

**ANALYSE STRUCTURALE  
ET THERMO-BAROMÉTRIQUE  
D'UN SYSTÈME  
DE CHEVAUchements VARISQUE :  
LES CÉVENNES CENTRALES  
(MASSIF CENTRAL FRANÇAIS).**

**MICROSTRUCTURES ET MÉCANISMES DE DÉFORMATION  
DANS LES ZONES DE CISAILLEMENT SCHISTEUSES**

**F. Arnaud**



**Documents du BRGM 286**

**Éditions BRGM**

**ANALYSE STRUCTURALE  
ET THERMO-BAROMÉTRIQUE  
D'UN SYSTÈME  
DE CHEVAUchements VARISQUE :  
LES CÉVENNES CENTRALES  
(MASSIF CENTRAL FRANÇAIS).  
MICROSTRUCTURES ET MÉCANISMES DE DÉFORMATION  
DANS LES ZONES DE CISAILLEMENT SCHISTEUSES**

**Florence Arnaud**

**Documents du BRGM 286**

**1999**

**Éditions BRGM**

3, avenue Claude Guillemin, B.P. 6009  
45060 Orléans cedex 2, FRANCE  
Tél. : 02.38.64.30.28

**Thèse présentée à l'Institut national  
polytechnique de Lorraine  
pour l'obtention du titre de docteur de l'INPL**

**Spécialité : Géosciences, Matières premières et environnement**

**Soutenue le 18 décembre 1997**

**devant la commission d'examen composée de :**

|                      |  |
|----------------------|--|
| <b>Président</b>     | <b>J. MACAUDIÈRE, Professeur, CRPG Vandœuvre</b>   |
| <b>Rapporteurs</b>   | <b>P. LEDRU, Docteur ingénieur, BRGM Orléans<br/>J. VAN DEN DRIESSCHE, Professeur, Université Rennes</b> |
| <b>Examineurs</b>    | <b>P. BARBEY, Professeur, CRPG Vandœuvre<br/>P. NEHLIG, Docteur ingénieur, BRGM Orléans</b>              |
| <b>Co-directeurs</b> | <b>A. M. BOULLIER, Directeur de recherche, LGIT Grenoble<br/>J. P. BURG, Professeur, ETH Zurich</b>      |

© BRGM 1999

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans la présente publication (ou le présent ouvrage), faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et, d'autre part, les analyses et courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'oeuvre dans laquelle elles sont incorporées. (Loi du 11 mars 1957 - art. 40 et 41 et Code Pénal art. 425).

## *Avant-propos*

Je remercie l'ensemble des membres du jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Nombreuses sont les personnes qui sont intervenues au cours de ce travail. Je remercie tout particulièrement:

- Jean-Pierre Burg a été l'initiateur de cette étude. J'ai surtout appris de lui l'exigence, la rigueur scientifique et l'autonomie intellectuelle. Je le remercie, ainsi que Marie Édith pour leur hospitalité lors de mes séjours à Zurich et de s'être déplacé dans les Cévennes pour m'aider à résoudre mes problèmes de terrain.
- Anne-Marie Boullier m'a accueilli au sein de son équipe au CRPG. J'ai apprécié ses qualités humaines, sa gentillesse et sa disponibilité pour discuter de mes multiples problèmes scientifiques.
- Patrick Ledru a été à l'origine de ce travail. Il m'a fait confiance dès la fin de la licence pour me confier la cartographie de la feuille de Saint-André-de-Valborgne et m'a toujours soutenu au cours de ces années.
- Jean Van Den Driessche, toujours présent dans les moments difficiles. Il s'est intéressé à ce travail dès son origine et m'a accueilli chez lui et dans son laboratoire de Rennes, pour le dernier mois de rédaction. Je ne sais comment lui exprimer toute ma reconnaissance.
- Michel Ballèvre et Chantal, pour leur amitié et leur accueil ainsi que pour les discussions que nous avons eu à Rennes à la fin de la rédaction de ce mémoire.
- Michel Dubois m'a enseigné la méthode des inclusions fluides et m'a initié à la thermodynamique. Avec Véronique Savary, ils m'ont toujours réservé un accueil chaleureux.
- Larryn Diamond et Ronald Bakker pour les calculs sur les IF qu'ils ont effectués sur leur programme ainsi que Jean Dubessy pour les discussions que nous avons eu ensemble. Claire Bény, dont j'ai beaucoup apprécié la compagnie, a effectué toutes mes analyses Raman.
- Michel Guiraud m'a accueilli plusieurs fois dans son laboratoire au Muséum de Paris. Il m'a appris à utiliser les divers programmes pour l'exploitation des données microsondes. Je remercie également Pavel Pitra pour son aide dans l'utilisation de ses programmes et ses réponses à mes divers problèmes.
- Bruno Goffé est venu une journée avec moi sur le terrain et a regardé les lames minces d'exsudat dans le but de trouver l'introuvable carpholite.
- Martin Casey m'a effectué les analyses au goniomètre de texture. Je le remercie de sa grande gentillesse et son aide dans l'interprétation des données.
- Je garde un très bon souvenir de mes entrevues et discussions avec Paul Brouder.

Je tiens à remercier particulièrement Yannick Branquet et Albert Galy, pour toutes les discussions scientifiques que nous avons eues ensemble au cours de ces quatre années, pour leur soutien et leur aide fréquente. Albert Galy m'a été d'une aide précieuse dans la discussion des données géochronologiques.

Je remercie le directeur et les gens du CRPG avec lesquels j'ai passé ces quatre années de thèse. J'ai beaucoup apprécié leur compagnie et appris de leurs qualités humaines. Je remercie particulièrement Chantal Lheman, Annie la bibliothécaire, Jean-Pierre Blanchard, Caroline et Bruno du service général, Jean-Jacques Royer, Gaston, Laurie et Larry Reisberg, Maryse et Daniel Ohnenstetter, Michel Arnold, Bernard Charoy, Michel Champenois et Jean-Marc Stussi pour les services qu'ils m'ont rendus, Gilbert Chrétien et Christiane de l'imprimerie et surtout Jacques Degeorge pour son efficacité lors du tirage de la thèse et ses cafés du matin. Je garderai un bon souvenir de mes collègues avec lesquels j'ai partagé ces années, entre autres Cathy, Yannick, Albert, Cécile et Christian, Benoît, Anne, les Pascals Hanon et Audigane, Franck et Jérôme, Fernando et Anna-Maria, Pavel,...

Les gens du BRGM m'ont été d'une précieuse aide, Albert Autran pour son soutien et son intérêt pour mon travail, Jean-Louis Feybesse et Pierre Nehlig, mes deux responsables successifs au cours de la thèse qui m'ont soutenu et ont favorisé mes démarches lors de mes séjours à Orléans ; les dessinateurs du BRGM ; le personnel du service de lame mince du BRGM ; Mr Gilles, le responsable du service microsonde du BRGM, Vera Johan qui a mis à ma disposition le matériel nécessaire pour les prises de photos avant les séances microsondes. Jean-François Becq-Giraudon et Elisabeth Legoff pour leur accueil chaleureux lors de mes passages au BRGM.

Au cours de la thèse j'ai souvent été de passage dans divers laboratoires dont je remercie les nombreuses personnes pour leur accueil. Je remercie particulièrement les personnes du laboratoire de Montpellier pour leur accueil chaleureux lors de mes passages dans le Sud ; Taos, Pavel, Fouad, Angelina et Kamen à Paris ; et l'équipe de sédimentologie de Rennes, surtout Olivier, les deux Christophes et Stéphane qui m'ont supporté dans leur bureau le dernier mois de rédaction.

Je ne saurais comment remercier Claire, Cécile et Christian, Laurent Tyssandier, Yannick, Pascal Audigane, Pavel, Jérôme, Judicaël et Valérie de Rennes pour l'aide précieuse et le soutien qu'ils m'ont apporté lors de la finition du manuscrit, Jean-Louis Pradier a contribué à sa mise en forme.

Je réserve une place particulière pour remercier tous les gens des Cévennes qui m'ont aidé moralement ou matériellement, lors de mes missions sur le terrain. Un grand merci aux habitants de Saint-Germain-de-Calberte qui m'ont accueilli et intégré dans leur village ainsi qu'à toutes les personnes que j'ai eu la chance de connaître dans les Cévennes. Je pense entre autres à Madame Cabanel, aux grand-parents de Thomas, à Yoyo et son mari, Jackie, Fernand, Claude et le grand Christophe, Jacques, Vincent de Saint-Martin, le grand Marc, Vincent. Je remercie tout particulièrement Philippe Cokkle et Lisa et ses trois enfants, Lotty, Basil et Youca, pour leur hospitalité, leur amitié, et en souvenir de tous les moments passés ensemble.

MERCI à ma mère et ma sœur pour leur soutien et leur encouragement permanents, mon père pour m'avoir donné le goût de la nature et de la science, Claire pour son amitié inestimable, Arben pour son aide et son amitié.

## ***Résumé***

Une approche pluri-disciplinaire sur la carte géologique à 1/50 000 de Saint-André-de-Valborgne permet de replacer les Cévennes centrales au sein de la chaîne varisque d'Europe occidentale. Ce secteur est constitué de séries présumées paléozoïques affectées par la déformation varisque. L'analyse structurale et microstructurale permet la caractérisation de zones de cisaillement dans les séries schisteuses. Le mécanisme de déformation dominant dans ces zones, où les exsudats de quartz sont très abondants, est la dissolution-cristallisation. Ces zones de cisaillement définissent une structuration des Cévennes en duplex à vergence S à SE. En tenant compte de cette géométrie, un nouveau log stratigraphique est proposé. L'étude thermo-barométrique sur les paragenèses minérales et des inclusions fluides indique que la déformation est contemporaine d'un métamorphisme sous des conditions de  $\pm 500^{\circ}\text{C}$  et  $4,3 \pm 0,4 \text{ Kb}$  daté dans la littérature entre 340 et 330 Ma. Ces chevauchements sont associés aux processus d'épaississement crustal de la chaîne varisque. Après les chevauchements, les inclusions fluides enregistrent une chute de pression et de température correspondant à l'exhumation des nappes. L'orientation des plans d'inclusions fluides suggère que cette exhumation s'effectue en contexte tectonique régional en extension. Par la suite, les Cévennes sont affectés par une extension contemporaine d'intrusions de granodiorites entre 330 et 290 Ma, d'une déformation fragile entre 300 et 280 Ma et de la formation du bassin sédimentaire d'Alès à cette même période. La direction de cette extension varie dans le temps de ENE-WSW à NNE-SSW. L'ensemble du scénario proposé s'intègre dans le modèle d'évolution de la branche Sud de la chaîne varisque d'Europe occidentale. D'après les modélisations analogiques d'une lithosphère en extension nous proposons que les Cévennes constituent un secteur affecté de manière fragile en horst et grabens au sein duquel les structures compressives sont conservées.

## ***Abstract***

A multidisciplinary approach to the 1:50,000-scale geological map of Saint-André-de-Valborgne has made it possible to situate the Central Cevennes within the Variscan belt of Western Europe. The area is underlain by Variscan-deformed rocks of presumed Paleozoic age where structural and microstructural analysis has characterized shear zones in the schistose series. Abundant quartz segregations in these zones indicate that the dominant mechanism of deformation was dissolution-crystallization. The shear zones define a S- to SE-verging duplex structure for the Cevennes, and a new stratigraphic log is proposed that takes this geometry into consideration. Thermo-barometric study of the mineral parageneses and fluid inclusions indicates that the deformation was contemporaneous with a metamorphism that took place under T-P conditions of  $\pm 500^{\circ}\text{C}$  and  $4.3 \pm 0.4$  kb, and which is dated in the literature at between 340 and 330 Ma. The thrusts were associated with crustal thickening of the Variscan belt. The fluid inclusions also register a post-thrusting fall in pressure and temperature corresponding to exhumation of the nappes; the orientation of the fluid-inclusion planes suggests that this exhumation occurred under a regional extensional tectonic regime. The Cevennes were then affected by further extension contemporaneous with a) the intrusion of granodiorites between 330 and 290 Ma, b) brittle deformation between 300 and 280 Ma, and c) the opening of the Alès sedimentary basin during the same period; the direction of this extension varied with time from ENE-WSW to NNE-SSW. The whole of the proposed scenario can be integrated into the evolution model of the southern branch of the Variscan belt of Western Europe. Based on the analogue modelling of a lithosphere under extension, we consider that the Cevennes area underwent brittle deformation with the formation of horsts and grabens that have preserved the compressive structures.

# Sommaire

|  |           |
|--|-----------|
| Avant propos .....   | I         |
| Résumé - Abstract .....  | III       |
| Sommaire .....   | V         |
| Liste des figures.....   | XI        |
| Liste des tableaux .....   | XV        |
| Liste des planches photos.....   | XV        |
| <br>   |           |
| <b>INTRODUCTION GÉNÉRALE .....</b>   | <b>1</b>  |
| <br>   |           |
| <b>CHAPITRE I: SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>                               | <b>3</b>  |
| Partie A: La chaîne varisque d'Europe occidentale, état des connaissances..... | 5         |
| 1. Contexte anté-varisque et formation de la chaîne.....                       | 5         |
| 2. La collision intra-continentale.....  | 7         |
| 3. L'effondrement de la chaîne varisque.....                                   | 13        |
| <br>   |           |
| Partie B: La position des Cévennes au sein de la chaîne varisque .....         | 15        |
| 1. par rapport aux chevauchements varisques.....                               | 15        |
| 2. Par rapport à l'extension syn- à post-orogénique.....                       | 18        |
| <br>   |           |
| Partie C: La géologie des Cévennes.....  | 29        |
| 1. La lithologie des séries schisteuses cévenoles.....                         | 29        |
| 1. 1. Description des séries et niveaux repères.....                           | 29        |
| 1. 1. 1. Les micaschistes quartzeux dit "inférieurs" .....                     | 31        |
| 1. 1. 2. Les micaschistes noirs .....  | 31        |
| 1. 1. 3. Les micaschistes quartzeux dits "supérieurs" .....                    | 33        |
| 1. 1. 4. Les quartzites .....  | 33        |
| 1. 1. 5. Le quartzite feldspathique .....                                      | 33        |
| 1. 1. 6. Les micaschistes quartzeux feldspathiques.....                        | 34        |
| 1. 2. L'orthogneiss de Peyrolles .....   | 34        |
| 1. 3. Corrélations et âge des séries .....                                     | 34        |
| 2. L'histoire tectono-métamorphique de la région étudiée.....                  | 37        |
| <br>   |           |
| Partie D: But de ce travail.....   | 44        |
| 1. Aspect régional.....  | 44        |
| 2. Aspect thématique .....   | 44        |
| <br>   |           |
| <b>CHAPITRE II: CARACTÉRISATION DE LA DÉFORMATION VARISQUE .....</b>           | <b>47</b> |
| Partie A: Description des structures à l'échelle de l'affleurement.....        | 49        |
| 1. Déformation régionale .....   | 49        |
| 1. 1. Schistosité S1 .....   | 49        |
| 1. 2. Linéation d'étirement L1.....  | 49        |
| 1. 3. Les plis P1.....   | 49        |

|   |     |
|---|-----|
| 2. Déformation localisée: les zones de cisaillement.....  | 50  |
| 2. 1. Description des structures dans les schistes.....   | 50  |
| 2. 1. 1. Étirement et boudinage .....   | 50  |
| 2. 1. 2. Plissements et schistosités superposées .....  | 50  |
| 2. 1. 3. Plans de cisaillement.....   | 57  |
| 2. 1. 4. L'abondance en exsudats de quartz .....  | 57  |
| 2. 2. Relations entre les différentes microstructures .....   | 60  |
| 2. 3. Interprétation et discussion .....  | 60  |
| 2. 4. La déformation localisée dans les orthogneiss .....   | 65  |
| <br>  |     |
| Partie B: Description des microstructures à l'échelle de la lame mince .....                        | 66  |
| Introduction.....   | 66  |
| 1. Microstructures dans les micaschistes.....   | 66  |
| 1. 1. Critères de cisaillement.....   | 66  |
| 1. 2. Schistosités superposées.....   | 67  |
| 2. Microstructures en relation avec la cristallisation des exsudats de quartz .....                 | 67  |
| 2. 1. Description des microstructures.....  | 67  |
| 2. 2. Composition minéralogique .....   | 69  |
| 3. Microstructures du quartz et orientation préférentielle des axes <c> du quartz .....             | 73  |
| 3. 1. Dans les exsudats de quartz .....   | 73  |
| 3. 1. 1. Exsudats de quartz à grains lobés peu déformés.....  | 75  |
| 3. 1. 2. Exsudats de quartz à grains lobés moyennement déformés.....                                | 77  |
| 3. 1. 3. Exsudats de quartz à grains lobés très déformés .....                                      | 81  |
| 3. 1. 4. Exsudats de quartz à grains aux joints rectilignes.....                                    | 83  |
| 3. 1. 5. Apport du goniomètre de texture .....  | 86  |
| 3. 1. 6. Discussion .....   | 86  |
| 3. 2. Dans les quartzites.....  | 88  |
| 3. 2. 1. Description des microstructures .....  | 88  |
| 3. 2. 2. Description des fabriques d'axes <c> du quartz .....                                       | 88  |
| 3. 2. 3. Interprétation des fabriques d'axes <c> du quartz.....                                     | 91  |
| 3. 2. 4. Apport du goniomètre de texture.....   | 91  |
| 3. 3. Dans les exsudats plissés isoclinalement .....  | 92  |
| 3. 3. 1. Description des microstructures .....  | 92  |
| 3. 3. 2. Description des fabriques de quartz.....   | 92  |
| 3. 3. 3. Interprétation et discussion.....  | 94  |
| 3. 4. Répartition géographique des fabriques d'axes <c> du quartz dans le<br>contexte régional..... | 94  |
| 3. 5. Comparaisons entre les fabriques obtenues dans les exsudats et dans les<br>quartzites.....    | 94  |
| <br>  |     |
| Partie C: Discussion-conclusion.....  | 97  |
| 1. Origine des exsudats de quartz.....  | 97  |
| 2. Processus de cristallisation des exsudats.....   | 98  |
| 3. Mécanisme de formation des exsudats .....  | 98  |
| 4. Le mécanisme de dissolution-cristallisation.....   | 101 |

|   |         |
|---|---------|
| <b>CHAPITRE III: ÉVÉNEMENTS POST-VARISQUES ET DÉFORMATIONS ASSOCIÉES</b> .....          | 103     |
| Partie A: Description des structures.....   | 105     |
| 1. Déformations liées à la mise en place des granodiorites.....                         | 105     |
| 2. Déformations tardi-varisques.....  | 107     |
| 2. 1. plis P3.....  | 107     |
| 2. 2. faille normale mylonitique.....   | 107     |
| 2. 2. 1. A l'échelle de l'affleurement.....   | 107     |
| 2. 2. 2. A l'échelle de la lame mince.....  | 107     |
| 2. 3. Déformation fragile.....  | 109     |
| 2. 3. 1. Les failles kilométriques.....   | 109     |
| 2. 3. 2. Les failles mineures.....  | 111     |
| 2. 3. 3. Réseaux de failles normales.....   | 111     |
| 2. 3. 4. Fentes tardives déformées.....   | 114     |
| <br>Partie B: Discussion.....   | <br>116 |
| 1. Déformation liée au plissement post-varisque.....                                    | 116     |
| 2. Âge de la déformation fragile post-varisque.....                                     | 116     |
| 3. Caractérisation de la déformation fragile.....                                       | 117     |
| <br><b>CHAPITRE IV: STRUCTURATION RÉGIONALE</b> .....                                   | <br>119 |
| Introduction.....   | 120     |
| Partie A: Cartographie et lithologie.....   | 121     |
| 1. Carte géologique à 1/50 000.....   | 121     |
| 2. Coupes détaillées.....   | 123     |
| 2. 1. Coupe A: La Hierle à Saint-Roman-de-Tousque.....                                  | 127     |
| 2. 2. Coupe B: Corniche des Cévennes au Col Saint-Pierre.....                           | 128     |
| 2. 3. Coupe C: Saint-Jean-du-Gard à Saint-Germain-de-Calberte.....                      | 129     |
| 2. 4. Coupe D: Malmeillas aux Abrits.....   | 131     |
| 2. 5. Coupe E: le Col d'Uglas au Pereyret.....  | 132     |
| 3. Coupes régionales.....   | 133     |
| <br>Partie B: Reconstitution de la colonne stratigraphique.....                         | <br>136 |
| 1. Description de la colonne stratigraphique.....                                       | 136     |
| 1. 1. Dans le domaine SW.....   | 136     |
| 1. 2. Dans le domaine NE.....   | 136     |
| 2. Comparaison des lithologies et structures avec les autres secteurs des Cévennes..... | 138     |
| 2. 1. Le domaine au SW de la faille N120.....   | 138     |
| 2. 2. Le domaine au NE de la faille N120.....   | 141     |
| <br>Partie C: Trajectoires et champs de déformation.....                                | <br>143 |
| Introduction.....   | 143     |
| 1. Description des cartes.....  | 143     |
| 1. 1. Carte de la schistosité majeure.....  | 143     |
| 1. 2. Carte de la linéation d'étirement.....  | 147     |
| 1. 3. Carte de la linéation de crénelation.....   | 147     |
| 1. 4. Carte des axes de plis P2.....  | 147     |
| 2. Interprétation et discussion.....  | 149     |

|  |     |
|--|-----|
| 2. 1. Conséquences du plissement tardif.....                           | 149 |
| 2. 2. Conséquences de la mise en place des granodiorites.....          | 149 |
| 2. 3. Conséquences du fonctionnement des failles.....                  | 149 |
| 2. 4. Champ de déformation attribué à la mise en place des nappes..... | 151 |
| Partie D: Discussion.....  | 153 |
| 1. Les structures responsables des répétitions lithologiques.....      | 153 |
| 2. La schistosité régionale.....                                       | 154 |
| 3. Le caractère polyphasé ou monophasé de la déformation varisque..... | 154 |
| 4. Le régime de déformation et sa cinématique.....                     | 155 |
| 5. La géométrie du système de chevauchements.....                      | 156 |
| 5. 1. Caractéristiques générales des duplex.....                       | 156 |
| 5. 2. Caractéristiques du duplex dans les Cévennes.....                | 159 |

## **CHAPITRE V: CARACTÉRISATION DU MÉTAMORPHISME RÉGIONAL ET DÉTERMINATION DU CHEMIN P-T..... 161**

|  |     |
|--|-----|
| Partie A: Caractérisation du métamorphisme et thermo-barométrie sur les paragenèses minérales..... | 163 |
| 1. Introduction.....   | 163 |
| 1. 1. But de l'étude du métamorphisme.....   | 163 |
| 1. 2. Méthodologie.....  | 163 |
| 1. 2. 1. Échantillonnage.....  | 163 |
| 1. 2. 2. Conditions analytiques.....   | 165 |
| 2. Description pétrographique et relations déformation-cristallisation.....                        | 165 |
| 2.1. Dans la matrice.....  | 165 |
| 2. 1. 1. Description des minéraux.....   | 165 |
| 2. 1. 2. Paragenèses minérales et relations cristallisation-déformation dans la matrice.....       | 171 |
| 2. 2. Au contact matrice-exsudat.....  | 171 |
| 2. 3. Dans les exsudats.....   | 171 |
| 2. 4. Conclusions.....   | 172 |
| 3. Composition chimique des roches totales.....  | 172 |
| 4. Composition chimique des minéraux.....  | 175 |
| 4. 1. Les feldspaths.....  | 175 |
| 4. 2. Les phyllites.....   | 175 |
| 4. 2. 1. Les micas blancs.....   | 175 |
| 4. 2. 2. Les biotites.....   | 177 |
| 4. 2. 3. Les chlorites.....  | 177 |
| 4. 3. Le grenat.....   | 186 |
| 4. 4. Les oxydes.....  | 190 |
| 5. Pétrologie des schistes des Cévennes.....   | 190 |
| 6. Détermination des conditions thermobarométriques.....   | 192 |
| 6. 1. Principes des méthodes utilisées et choix des programmes.....                                | 192 |
| 6. 2. Applications des méthodes aux données microsonde.....  | 196 |
| 6. 2. 1. Utilisation des thermomètres grenat-biotite, grenat-chlorite et grenat-ilménite.....      | 196 |
| 6. 2. 2. Utilisation du programme THERMOCALC.....  | 197 |
| 7. Discussion.....   | 197 |
| 7. 1. Sur la validité des différents géothermomètres.....  | 197 |

|   |     |
|---|-----|
| 7. 2. Sur l'existence d'une zonation du métamorphisme régional.....   | 198 |
| 7. 2. 1. Dans le secteur étudié.....  | 198 |
| 7. 2. 2. Dans l'ensemble des Cévennes .....   | 201 |
| <br>Partie B: Thermo-barométrie par l'étude des inclusions fluides.....   | 203 |
| 1. Introduction.....  | 203 |
| 2. Étude de l'exsudat de quartz EC15.....   | 203 |
| 2. 1. Description de l'exsudat.....   | 203 |
| 2. 2. Description des différentes familles d'IF.....  | 205 |
| 2. 2. 1. Les IF primaires dans l'albite .....   | 205 |
| 2. 2. 2. Les IF primaires dans l'apatite.....   | 205 |
| 2. 2. 3. Les plans d'IF aquo-carboniques, sub-perpendiculaires à la schistosité et à angles variables avec la linéation ..... | 211 |
| 2. 2. 4. Les plans d'IF aquo-carboniques, parallèles à la schistosité.....  | 213 |
| 2. 2. 5. Des plans d'IF aqueuses, perpendiculaires à la schistosité et à angles variables avec la linéation.....              | 213 |
| 2. 2. 6. Les plans d'IF aquo-carbonique perpendiculaires à la schistosité et à la linéation.....                              | 213 |
| 2. 3. Chronologie des différents types d'inclusion fluides .....  | 217 |
| 2. 4. Analyse tridimensionnelle des plans d'IF .....  | 217 |
| 2. 5. Détermination des propriétés V-X des différents types d'IF, calcul des isochores.....                                   | 218 |
| 2. 6. Évolution de la composition et de la densité dans les IF .....  | 221 |
| 2. 6. 1. Description.....   | 221 |
| 2. 6. 2. Interprétation .....   | 223 |
| 2. 7. Reconstruction du chemin P-T suivi par l'exsudat.....   | 224 |
| 3. Les exsudats EC4, EC20, EC27, EC21 et EC25 .....   | 225 |
| 3. 1. Description.....  | 225 |
| 3. 1. 1. Exsudat EC4.....   | 225 |
| 3. 1. 2. Exsudat EC20 .....   | 226 |
| 3. 1. 3. Exsudat EC27 .....   | 226 |
| 3. 1. 4. Exsudat EC21 .....   | 226 |
| 3. 1. 5. Exsudat EC25 .....   | 227 |
| 3. 2. Description des différents types d'IF .....   | 227 |
| 3. 2. 1. Exsudat EC4.....   | 227 |
| 3. 2. 2. Exsudat EC20 .....   | 232 |
| 3. 2. 3. Exsudat EC27 .....   | 234 |
| 3. 2. 4. Exsudat EC21 .....   | 235 |
| 3. 2. 5. Exsudat EC25 .....   | 236 |
| 3. 3. Chronologie des différents types d'IF .....   | 236 |
| 3. 4. Propriétés V-X et calcul des isochores .....  | 236 |
| 3. 5. Évolution de la composition et de la densité des fluides .....  | 237 |
| 3. 6. Reconstruction du chemin P-T .....  | 242 |
| 4. Discussion.....  | 242 |
| 4. 1 Marges d'erreur et validité de la méthode .....  | 242 |
| 4. 2 Le contexte tectonique du piégeage des IF.....   | 243 |
| 4. 2. 1. Conditions P-T de la mise en place des nappes.....   | 244 |
| 4. 2. 2. Chemin P-T lors de l'exhumation des nappes.....  | 244 |
| 4. 3. Remarques.....  | 247 |

|  |         |
|--|---------|
| <b>CONCLUSIONS</b> .....   | 249     |
| 1. Les zones de cisaillement schisteuses.....  | 251     |
| 1. 1. Les critères de reconnaissance.....  | 251     |
| 1. 2. Les mécanismes de déformation.....   | 251     |
| 1. 3. Les processus de transfert.....  | 252     |
| 1. 4. La formation des exsudats de quartz.....   | 252     |
| 2. Place des Cévennes dans la chaîne Varisque d'Europe Occidentale.....                    | 253     |
| 2. 1. La mise en place des nappes lors de l'épaississement crustal.....                    | 253     |
| 2. 2. L'exhumation des nappes.....   | 255     |
| 2. 3. L'extension syn à post orogénique.....   | 255     |
| <br><b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....   | <br>259 |
| <br><b>ANNEXES</b> .....   | <br>277 |
| Annexe 1.....  | 279     |
| Partie 1: Conditions analytiques et données microsondes.....                               | 279     |
| Partie 2: Résultats des programmes thermo-barométriques.....                               | 311     |
| <br>Annexe 2.....  | <br>317 |
| Partie 1: Méthodologie et procédure analytique pour l'étude des inclusions<br>fluides..... | 317     |
| Partie 2: Données microthermométriques.....  | 339     |

## *Liste des figures*

|  |    |
|--|----|
| I-1. Carte paléogéographique du monde au Westphalien (306 Ma) (Scotese C. R., 1994).....   | 4  |
| I-2. Cartes paléogéographiques de l'Europe occidentale au paléozoïque anté-varisque (Paris et Robardet, 1990).....                       | 4  |
| A. Ordovicien inférieur.....   | 4  |
| B. Silurien moyen.....   | 6  |
| C. Dévonien inférieur.....   | 6  |
| I-3. Schéma de la tectonique des plaques en Europe occidentale entre 500 et 270 Ma (Matte, 1991).....                                    | 8  |
| I-4. Carte structurale schématique de la chaîne varisque d'Europe occidentale (Matte, 1991).....   | 8  |
| I-5. Coupes à travers les massifs varisques français et ibériques (Matte, 1991) ...  | 9  |
| A. Section ibérique.....   | 9  |
| B. Section Armorica-Ardenne.....   | 9  |
| C. Section Massif central.....   | 9  |
| D. Section germanique.....   | 10 |
| E. Section bohémienne.....   | 10 |
| I-6. Carte schématique des principales nappes du Massif central français (Ledru et al., 1989).....                                       | 12 |
| I-7. Évolution des directions d'extension dans la chaîne varisque d'Europe Occidentale entre 330 et 260 Ma (Burg et al, 1994).....       | 14 |
| A. Viséen supérieur au Westphalien.....  | 14 |
| B. Stéphanien supérieur au Permien inférieur.....  | 14 |
| I-8. Schéma structural du Massif central (Burg et Leyreloup, 1988, non publié).....  | 16 |
| I-9. Carte géologique et coupe de la bordure orientale du Massif central d'après Ledru et al. (non publié).....                          | 17 |
| I-10. Coupes schématiques des séries du Vigan (Arthaud dans Alabouvette et al., 1988).....   | 19 |
| I-11. Coupes à travers les Monts de Lacaune et l'Albigeois (Guéringé-Lozes, 1987).....   | 20 |
| I-12. Coupe schématique générale de la Montagne Noire (Arthaud, 1970).....   | 22 |
| I-13. Carte schématique structurale liée à mise en place des granodiorites dans les Cévennes (Faure, 1995).....                          | 22 |
| I-14. Synthèse des données radiométriques des granodiorites de la région des Cévennes.....   | 24 |
| I-15. Évolution des directions d'extension au cours de la formation du bassin d'Alès (Djarar et al., 1996).....                          | 26 |
| I-16. Coupe schématique de la Montagne Noire (Van Den Driessche, 1994).....  | 27 |
| I-17. Coupe schématique du dôme du Velay (Dallain, 1997).....  | 27 |
| I-18. Carte géologique des Cévennes méridionales et médianes (Pellet, 1972).....   | 30 |
| I-19. Colonne stratigraphique du secteur étudié.....   | 32 |
| A. selon Munsch (1981).....  | 32 |
| B. selon Brouder (1964 et levés soumis).....   | 32 |
| C. selon Magontier (1988).....   | 32 |
| D. selon cette étude.....  | 32 |
| I-20. Colonnes stratigraphiques schématiques des séries paléozoïques du Sud du Massif central et principales corrélations proposées..... | 35 |
| I-21. Coupes schématiques passant par les Cévennes.....  | 39 |
| A. Selon Gèze (1949).....  | 39 |

|  |     |
|--|-----|
| B. Selon Brouder (1968).....   | 39  |
| C. Selon Pellet (1972).....  | 40  |
| D. Selon Munsch (1981).....  | 40  |
| E. Selon Mattauer et Etchecopar (1977).....  | 40  |
| I-22. Carte des isogrades régionales dans les Cévennes occidentales (Rakib, 1996).....   | 42  |
| I-23. Âges $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ obtenus sur les minéraux synchrones de la déformation varisque dans les Cévennes (Caron, 1994).....   | 43  |
|  |     |
| II-1. Comparaison entre L1 et L2 au Col du Pas (diagramme de Schmidt).....   | 51  |
| II-2. Dispersion de L2 au Martinets (diagramme de Schmidt).....  | 51  |
| II-3. Dessin de S0 et S1 boudinés.....   | 52  |
| II-4. Dessin d'un pli P2 et ses relations avec S2.....   | 52  |
| II-5. Dessin d'un pli P2 et ses relations avec S2.....   | 53  |
| II-6. Dessin d'un pli P2 en section perpendiculaire à S2 et L1 et L2.....  | 53  |
| II-7. Diagramme de densité des axes de P2, de Lc, L1 et L2 au Col du Pas.....  | 54  |
| II-8. Dessin de lame mince montrant la relation S0-S1 et S2.....   | 56  |
| II-9. Dessin de microlithons S1 entre la S2.....   | 56  |
| II-10. Dessin de la géométrie d'exsudat plissés isoclinalement.....  | 59  |
| II-11. Diagramme de Schmidt montrant la relation entre S1 et S2 sur un même affleurement.....  | 59  |
| II-12. Dessin d'un plan de cisaillement affectant la S2.....   | 59  |
| II-13. Géométrie des plans de cisaillement affectant la S1.....  | 61  |
| II-14. Dessin de pli P2 au flanc étirés et boudinés.....   | 61  |
| II-15. Géométrie des plis cylindriques et conjugués (Berthé et Brun, 1980).....  | 63  |
| II-16. Modèle géométrique du développement des plis non cylindriques et conjugués pendant la déformation en cisaillement (Berthé et Brun, 1980).....   | 63  |
| II-17. Rotation passive des axes de pli et diminution de leurs angles avec la direction de transport du chevauchement en fonction de l'augmentation de la déformation cisailante totale (Cowars et Potts, 1983)..... | 64  |
| II-18. Modèle de formation du boudinage de schistosité (Platt et Vissers, 1980).....   | 64  |
| II-19. Modèle de formation des bandes de cisaillement en extension (Platt et Vissers, 1980).....   | 64  |
| II-20. Carte de localisation des fabriques de quartz.....  | 95  |
| II-21. Modèle de formation des exsudats parallèles à la schistosité dans les zones de cisaillement.....  | 99  |
| A. Vides créés lors de la déformation progressive en cisaillement (Sauniac, 1980).....   | 99  |
| B. Formation perpendiculaire à S puis rotation lors de la déformation progressive en cisaillement.....   | 99  |
| C. Formation parallèle à S par surpression fluide.....   | 99  |
|  |     |
| III-1. Coupe simplifiée à travers le granite de Saint-Guiral (Arthaud dans Alabouvette et al., 1988).....  | 106 |
| III-2. Diagramme de densité des axes de plis P3.....   | 106 |
| III-3. Carte des diagrammes de Schmidt des axes de plis P3.....  | 108 |
| III-4. Diagramme de densité des pôles de plan de failles.....  | 112 |
| III-5. Répartition des pôles et plans de failles normales (diagramme de Schmidt).....  | 112 |
| III-6. Dessin de réseau de failles normales N150-30 à 50°E.....  | 113 |
| III-7. Dessin de réseau de failles normales N150-60°E.....   | 113 |
| III-8. Dessin de réseau de failles normales N150-60°E affectant les P3.....  | 115 |

|  |     |
|--|-----|
| III-9. Dessin de veine de quartz oblique à S1 plissée.....   | 115 |
| IV-1. Carte géologique à 1/50 000 de Saint-André-de-Valborgne.....   | 122 |
| IV-2. Localisation sur la carte géologique des coupes présentées .....   | 124 |
| IV-3. Coupes détaillées levées sur le terrain .....  | 125 |
| IV-4. Bloc diagramme expliquant la construction des coupes.....  | 134 |
| IV-5. Coupes interprétatives construites à partir de la carte géologique.....  | 135 |
| IV-6. Colonne lithologique du secteur étudié.....  | 137 |
| A. domaine SW.....   | 137 |
| B. Domaine NE .....  | 137 |
| IV-7. Carte géologique des Cévennes méridionales et centrales .....  | 139 |
| IV-8. Carte des trajectoires de la schistosité régionale S1.....   | 144 |
| IV-9. Carte des trajectoires de la L1 et L2.....   | 145 |
| IV-10. Carte des directions des linéations de crénulation.....   | 146 |
| IV-11. Carte des diagrammes de densité des axes de plis P2.....  | 148 |
| IV-12. Carte synthétique des microstructures et structures majeures .....  | 150 |
| IV-13. Classification des différents systèmes de chevauchement (Boyer et Elliot, 1982).....  | 157 |
| IV-14. Modèle de formation de duplex en séquence normale (Boyer et Elliot, 1982).....  | 157 |
| IV-15. Deux modèles de formation de duplex en séquence inverse (Boyer et Elliot, 1982).....  | 158 |
| IV-16. Géométrie contrastée des duplex (Boyer et Elliot, 1982).....  | 158 |
| V-1. Carte de localisation des lames minces analysées en microsonde .....  | 164 |
| V-2. Diagramme AFM des compositions en roche totale des micaschistes quartzeux et des micaschistes noirs (Rakib, 1996).....        | 173 |
| V-3. Composition de la roche dans le diagramme MgO-K <sub>2</sub> O-Na <sub>2</sub> O .....  | 174 |
| V-4. Composition des feldspaths dans le diagramme Na-Ca-K dans le domaine SW.....  | 174 |
| V-5. Composition des plagioclases dans diagramme Na-Ca-K.....  | 176 |
| A. Dans le domaine NE.....   | 176 |
| B. Dans le domaine SW.....   | 176 |
| V-6. Composition des phyllites dans le diagramme K/Al+Fet+Mg en fonction de Al/Al+Fet+Mg .....                                     | 178 |
| A. Dans le domaine SW .....  | 178 |
| B. Dans le domaine NE.....   | 178 |
| V-7. Composition des micas blancs dans le diagramme Na-Ca-K .....  | 179 |
| A. Dans le domaine SW.....   | 179 |
| B. Dans le domaine NE.....   | 179 |
| V-8. Composition des micas blancs dans le diagramme Fe+Mg en fonction de Si dans le domaine SW .....                               | 180 |
| V-9. Composition des micas blancs dans le diagramme Fe+Mg en fonction de Si dans le domaine NE .....                               | 181 |
| V-10. Évolution de la composition entre le coeur et la bordure d'un même mica blanc dans le diagramme Fe+Mg en fonction de Si..... | 181 |
| V-11. Composition des biotites dans le diagramme Mg/Fe+Mg en fonction de Si/Al <sub>IV</sub> dans le domaine SW.....               | 182 |
| V-12. Composition des biotites dans le diagramme de Schreurs (1985).....   | 183 |
| V-13. Composition des chlorites dans le diagramme de Hey (1954).....   | 184 |
| V-14. Évolution géographique du XFe dans les chlorites .....   | 185 |
| V-15. Évolution géographique du XFe dans les biotites.....   | 187 |
| V-16. Composition des grenats .....  | 188 |

|   |     |
|---|-----|
| A. Dans le diagramme Mn-Mg-Fe .....   | 188 |
| B. Dans le diagramme Mn-Ca-Fe+Mg.....   | 188 |
| V-17. Zonation d'un grenat du domaine NE.....   | 188 |
| V-18. Zonation des grenats dans les Cévennes centrales et septentrionales<br>(Rakib, 1996).....   | 189 |
| V-19. Évolution géographique du XFe dans les grenats.....   | 191 |
| V-20. Évolution géographique du XMn dans les biotites.....  | 193 |
| V-21. Évolution géographique du XMn dans les chlorites .....  | 193 |
| V-22. Évolution du XFe des biotites et des chlorites (Rakib, 1996) .....  | 199 |
| V-23. Répartition cartographique des Tmax dans les Cévennes occidentales<br>(Rakib, 1996).....  | 200 |
| V-24. Carte d'échantillonnage des exsudats de quartz étudiés en<br>microthermométrie .....  | 204 |
| V-25. Dessin des différentes familles d'inclusions fluides.....   | 206 |
| V-26. Diagramme de corrélations TfCO <sub>2</sub> en fonction de TfCl des données<br>microthermométriques des IF aquo-carboniques pour EC15 .....                                       | 208 |
| V-27. Diagramme de corrélations ThCO <sub>2</sub> en fonction de TfCO <sub>2</sub> des données<br>microthermométriques des IF aquo-carboniques pour EC15.....                           | 208 |
| V-28. Diagramme de corrélation TfG en fonction de ThTOT des données<br>microthermométriques des IF aqueuses pour EC15.....  | 214 |
| V-29. Tracés des isochores des différentes familles d'inclusions fluides dans<br>diagramme P-T pour EC15.....   | 219 |
| V-30. Composition des IF aquo-carboniques pour EC15.....  | 220 |
| A. dans le diagramme CO <sub>2</sub> total-N <sub>2</sub> -CH <sub>4</sub> (phase volatile) .....   | 220 |
| B. dans le diagramme H <sub>2</sub> O-CO <sub>2</sub> -N <sub>2</sub> ±CH <sub>4</sub> (composition totale) .....   | 220 |
| V-31. Diagramme de corrélations des données microthermométriques des IF<br>aquo-carboniques pour EC4, EC27, EC21, EC20.....   | 228 |
| A. ThCO <sub>2</sub> en fonction de TfCO <sub>2</sub> .....   | 228 |
| B. TfCO <sub>2</sub> en fonction de TfCl .....  | 228 |
| V-32. Diagramme de corrélations TfG en fonction de ThTOT des données<br>microthermométriques des IF aqueuses pour EC4, EC27, EC21, EC20 .....   | 229 |
| V-33. Tracés des isochores des IF aquo-carboniques dans diagramme P-T<br>pour EC4, EC27, EC21, EC20.....  | 239 |
| V-34. Tracés des isochores des IF aqueuses dans diagramme P-T pour EC4,<br>EC27, EC21, EC20 .....   | 240 |
| V-35. Composition des IF aquo-carboniques pour EC4, EC27, EC21, EC20...   | 241 |
| A. Dans le diagramme CO <sub>2</sub> total-N <sub>2</sub> -CH <sub>4</sub> (phase volatile).....  | 241 |
| B. Dans le diagramme H <sub>2</sub> O-CO <sub>2</sub> -N <sub>2</sub> ±CH <sub>4</sub> (composition totale).....  | 241 |
| V-36. Synthèse des isochores des différentes familles d'IF.....   | 245 |
| V-37. Diagramme de la pression fluide en fonction de la profondeur (Grégory<br>et Backus, 1980).....  | 245 |
| <br>  |     |
| 1- Coupe interprétative du Sud de Massif central français .....   | 257 |
| 2- Modélisation analogique en extension (modèle avec découplage basal<br>total) (Van den Driessche, 1994).....  | 257 |
| 3- Modélisation analogique en extension (modèle avec découplage basal et<br>hétérogénéité rhéologique à l'interface croûte fragile - croûte ductile) (Van den<br>Driessche, 1994) ..... | 257 |

## *Liste des tableaux*

|  |     |
|--|-----|
| I-1. Tableau synthétique de l'histoire tectono-métamorphique des Cévennes d'après différents auteurs .....   | 38  |
| II-1. Minéralogie des exsudats et de la matrice schisteuse .....   | 74  |
| V-1. Relations cristallisation-déformation dans la série schisteuse du secteur étudié .....  | 173 |
| V-2. Tableau récapitulatif des données microthermométriques et des données Raman des différents types d'IF étudiées pour la lame EC15 .....                      | 207 |
| V-3. Synthèse des densités et compositions totales des différentes familles d'IF pour la lame EC15 .....   | 222 |
| V-4. Tableau récapitulatif des données microthermométriques et des données Raman des différents types d'IF étudiées pour les lames EC4, EC27, EC21 et EC20 ..... | 230 |
| V-5. Synthèse des densités et compositions totales des différentes familles d'IF pour les lames EC4, EC27, EC21 et EC20 .....                                    | 238 |

## *Liste des planches photos*

|  |     |
|--|-----|
| Planche 1: Lithologie et déformation régionale .....   | 48  |
| Planche 2: Déformation localisée dans les zones de cisaillement schisteuses ..   | 58  |
| Planche 3: Microstructures dans les micaschistes .....   | 68  |
| Planche 4: Microstructures dans les exsudats .....   | 70  |
| Planche 5: Microstructures dans les exsudats .....   | 71  |
| Planche 6: Microstructures dans les exsudats .....   | 72  |
| Planche 7: Microstructures et fabriques de quartz des exsudats peu déformés ..   | 76  |
| Planche 8: Microstructures et fabriques de quartz des exsudats moyennement déformés .....  | 79  |
| Planche 9: Microstructures et fabriques de quartz des exsudats moyennement déformés .....  | 80  |
| Planche 10: Microstructures et fabriques de quartz des exsudats très déformés .....  | 82  |
| Planche 11: Microstructures et fabriques de quartz des exsudats aux joints de grains droits .....                                  | 84  |
| Planche 12: Microstructures et fabriques de quartz des exsudats aux joints de grains droits .....                                  | 85  |
| Planche 13: Pôle des figures des axes cristallographiques du quartz .....  | 87  |
| (A) pour un exsudat .....  | 87  |
| (B) pour un quartzite .....  | 87  |
| Planche 14: Microstructures et fabriques de quartz des quartzites .....  | 89  |
| Planche 15: Microstructures et fabriques de quartz des quartzites .....  | 89  |
| Planche 16: Comparaison des microstructures et fabriques de quartz dans les exsudats plissés isoclinalement .....                  | 93  |
| Planche 17: Déformation post-varisque .....  | 104 |
| Planche 18: Paragenèses minérales et relations cristallisation-déformation .....   | 167 |
| Planche 19: Paragenèses minérales et relations cristallisation-déformation .....   | 168 |
| Planche 20: Inclusions fluides primaires en amas dans l'albite et l'apatite .....  | 209 |
| Planche 21: Plans d'inclusions fluides aquo-carboniques .....  | 210 |
| Planche 22: Plans d'inclusions fluides aqueuses .....  | 212 |
| Planche 23: Plans d'inclusions fluides tardifs et intersection entre les plans d'IF aquo-carboniques et les plans d'aqueuses ..... | 216 |



# *Introduction générale*

La région des Cévennes constitue un segment de la chaîne varisque d'Europe occidentale. Elle est formée de séries schisteuses, d'âge présumé paléozoïque, et se situe en position d'autochtone relatif par rapport aux chevauchements majeurs de la chaîne varisque. Par rapport aux déformations associées à l'extension post-orogénique, cette région se localise entre deux dômes migmatitiques, le Velay et la Montagne Noire. Les travaux antérieurs sur ce secteur divergent quant à leur interprétation. Ce travail a pour but de comprendre l'histoire tectono-métamorphique de ce secteur afin de le replacer au sein de la chaîne. Un aspect plus thématique est consacré à l'étude des zones de cisaillement dans les séries schisteuses, déterminer les structures et microstructures caractéristiques de ces zones et les mécanismes de déformation activés lors de leur fonctionnement.

Les explications que cherche à atteindre ce travail, passent par les étapes suivantes:

- Une synthèse des travaux antérieurs sur la chaîne varisque et la région des Cévennes en particulier, est présentée dans le chapitre I. Elle permet de faire le point sur l'état des connaissances et de soulever les problèmes restant à résoudre.
- Une étude de la déformation varisque qui a nécessité la caractérisation des zones de cisaillement dans les séries schisteuses. Les zones de cisaillement ont été essentiellement étudiées dans les roches homogènes tels les granites. Peu de travaux se sont intéressés à caractériser les structures et à déterminer les mécanismes de déformation dans les zones de cisaillement affectant des séries schisteuses. Le chapitre II est consacré à l'étude de la déformation dans ces zones.
- Une étude de la déformation post-varisque est présentée dans le chapitre III
- Une détermination de la structuration régionale est présentée dans le chapitre IV. Elle résulte de l'acquisition de données de terrain, la cartographie à 1/50 000 de la feuille de Saint-André-de-Valborgne, des levés de coupes lithologiques, et des coupes interprétatives à partir de l'ensemble des données.
- Une étude thermo-barométrique afin de déterminer l'évolution des conditions pression-température (P-T), géographiquement et au cours de la déformation, est présentée dans le chapitre V. Après avoir précisé les relations déformation - cristallisation, une étude pétrologique et géothermobarométrique sur les paragenèses métamorphiques nous permet d'obtenir les conditions P-T du pic du métamorphisme. L'étude des inclusions fluides permet de préciser la pression au moment du fonctionnement des zones de cisaillement. Elle permet également de contraindre l'évolution des conditions P-T lors de l'exhumation.

L'objectif final est de replacer ce secteur dans une coupe traversant le Sud du Massif Central français.



## CHAPITRE I

### SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

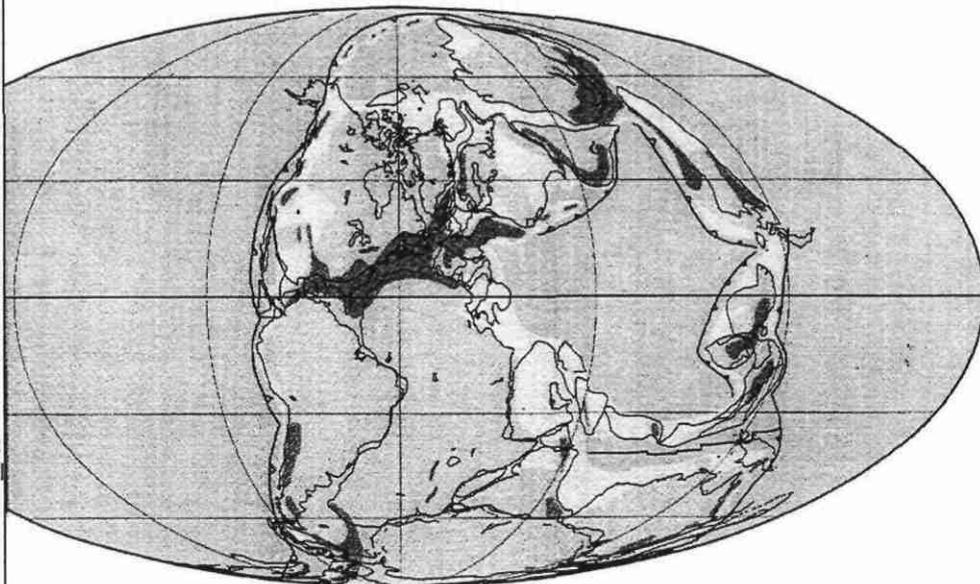
*A: La chaîne varisque d'Europe occidentale: état des connaissances*

*B: Position des Cévennes au sein de la chaîne varisque*

*C: Géologie des Cévennes: état des connaissances*

*D: But de ce travail*

Figure 1-1: Carte paléogéographique du monde à la fin du Carbonifère, au Westphalien (306 Ma), mettant en évidence les chaînes paléozoïques en gris foncé d'après Scotese, C. R., 1994, Late Carboniferous paleogeographic map in Klein, G. D., ed., Pangea: Paleoclimate, Tectonics, and Sedimentation During Accretion, Zenith, and Breakup of a Supercontinent: Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper 288.



A

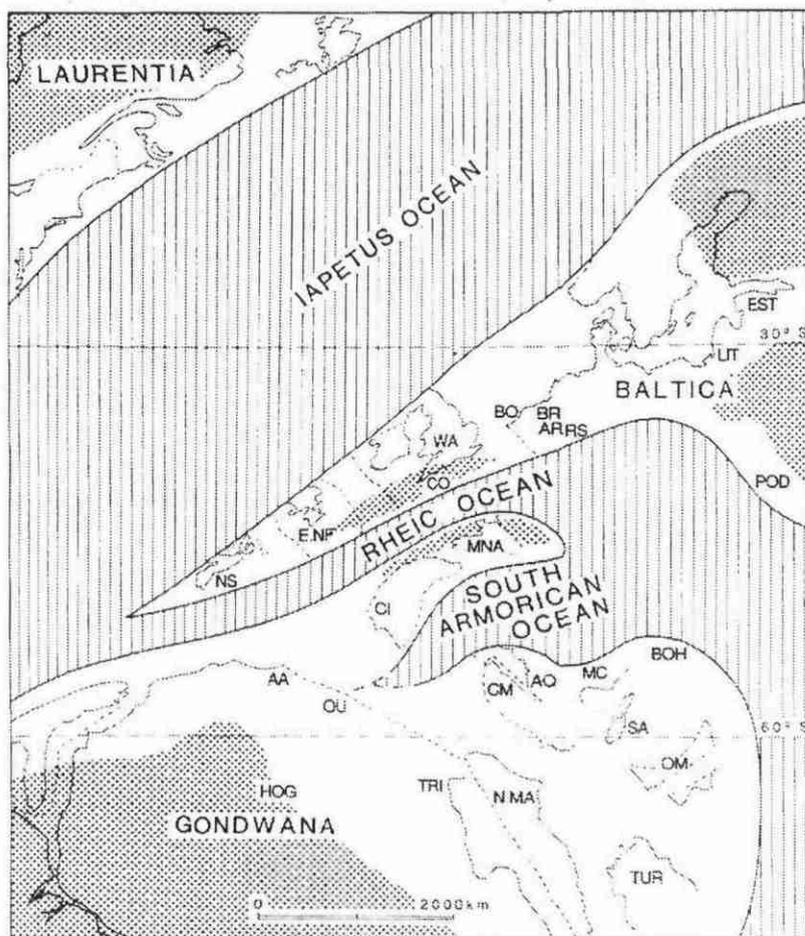


Figure 1-2: cartes paléogéographiques de l'Europe occidentale au paléozoïque anté-varisque d'après Paris et Robardet (1990)  
 A: Ordovicien Inférieur. B: Silurien Moyen. C: Dévonien Inférieur. Lignes verticales: régions océaniques, blanc: marges et talus continental, pointillés: terres émergées. Abréviations géographiques: AA: Anti-Atlas, AQ: Aquitaine, BOH: Bohême, CA: Alpes Carnic, CI: Domaine Central Iberique, CM: Montagne Cantabrie HOG: Hoggar, MC: Massif Central Français, MN: Montagne Noire, MNA: Domaine Mi-Nord-Armoricain, MO: plate-forme Moesienne, N.MA: Maghreb du Nord-Est, OM: Ossa Morena, OU: Chaîne Ougarta, PY: Pyrénées, SA: Sardaigne, TRI: Tripolitaine, TUR: Turquie, VE: Vendée, AR: Ardennes, BO: Boulonnais, BR: Massif Brabant, CO: Cornwall, E. NF: Est de Newfoundland, EST: Esthonie, LIT: Lithunie, NS: Nova Scotia, POD: Podolie, RS: Rheinisches Schiefergebirge, WA: Wales.

|                 |   |
|-----------------|---|
| <i>Partie A</i> |   |
|                 | <i>La chaîne varisque d'Europe occidentale<br/>état des connaissances</i> |

La chaîne varisque (fig. I-1) s'est formée au Paléozoïque supérieur. Elle a été par la suite segmentée par le mouvement des plaques mésozoïques. Cette synthèse ne concerne que la chaîne varisque d'Europe occidentale qui s'étire depuis la Péninsule Ibérique jusqu'au Massif de Bohême.

### *1. Contexte anté-varisque et formation de la chaîne*

Le contexte géodynamique anté-varisque est précisé à partir des données paléomagnétiques d'une part (voir synthèse de Van Der Voo, 1993) et par les informations paléogéographiques à partir des faunes, des flores et de la stratigraphie d'autre part (voir synthèse de Paris et Robardet, 1990; Robardet et al., 1994 et leurs références bibliographiques pour le Paléozoïque français; Robardet et al., 1993 pour l'Europe occidentale et la confrontation avec les données paléomagnétiques).

Le Cambrien correspond à un contexte d'ouverture caractérisé par un volcanisme important et une subsidence active dans presque toutes les régions paléozoïques. La distension provoque la rupture d'un bloc précambrien en plusieurs unités paléogéographiques distinctes séparées par des océans. L'océan Iapetus sépare deux grands ensembles cratoniques Baltica et Laurentia (fig. I-2A). A partir du Cambrien moyen ou au Trémadoc, l'océan Rhéique sépare l'Est-Avalonia, (comprenant le Nord de la France, la Belgique, l'Angleterre, le Pays de Galles et le SE de l'Irlande actuels) du continent Gondwana (fig. I-2A). L'Est-Avalonia dérive vers des latitudes plus basses; pendant l'Ordovicien moyen et le Caradoc il ne présente plus d'affinités avec les autres unités paléogéographiques. A partir de l'Ashgill, le micro-continent Est-Avalonia montre des affinités avec Baltica (fig. I-2B).

Les témoins de cette période d'océanisation sont des roches volcaniques bimodales (tholéitiques et calco-alcalines) datées entre 500 et 480 Ma et des complexes basiques à ultra-basiques représentant des suites ophiolitiques complètes ou démembrées datées entre 500 et 480 Ma (références géochronologiques dans Costa, 1990).

Au Silurien inférieur, l'expansion de l'océan Rhéique est maximale, il se ferme par la suite avec une dérive du continent Gondwana vers des latitudes plus basses, à partir du Wenlock (fig. I-2B et I-2C).

Vers la fin du Silurien, l'océan Iapetus qui séparait les plaques Laurentia et Baltica se ferme le long de la chaîne calédonienne (fig. I-2C). Laurentia et Baltica forment un seul continent, la Laurussia.

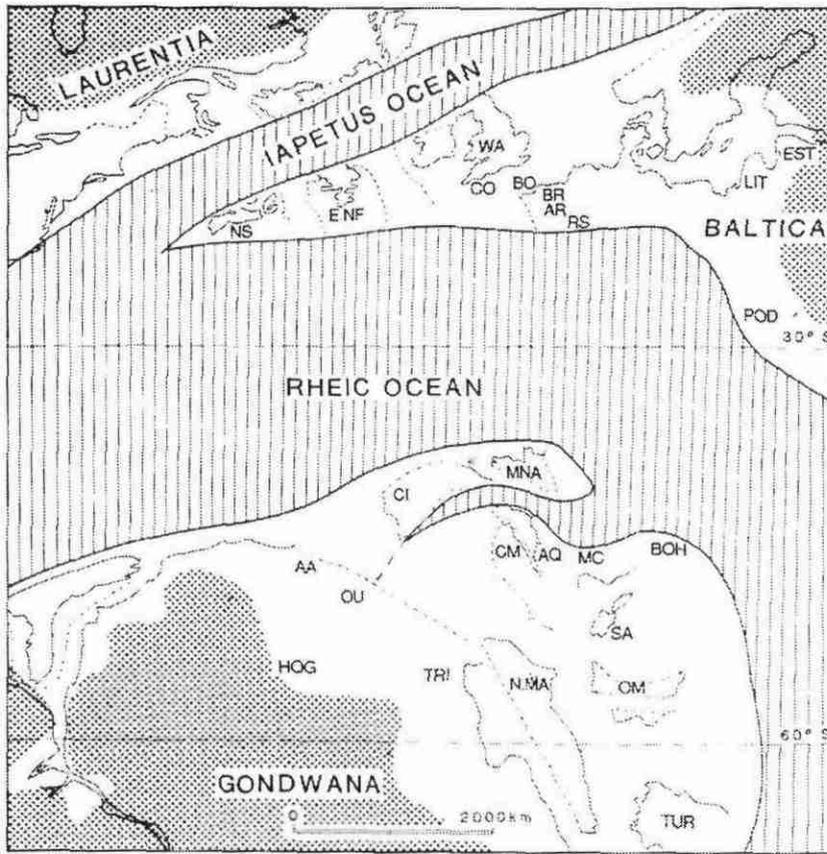
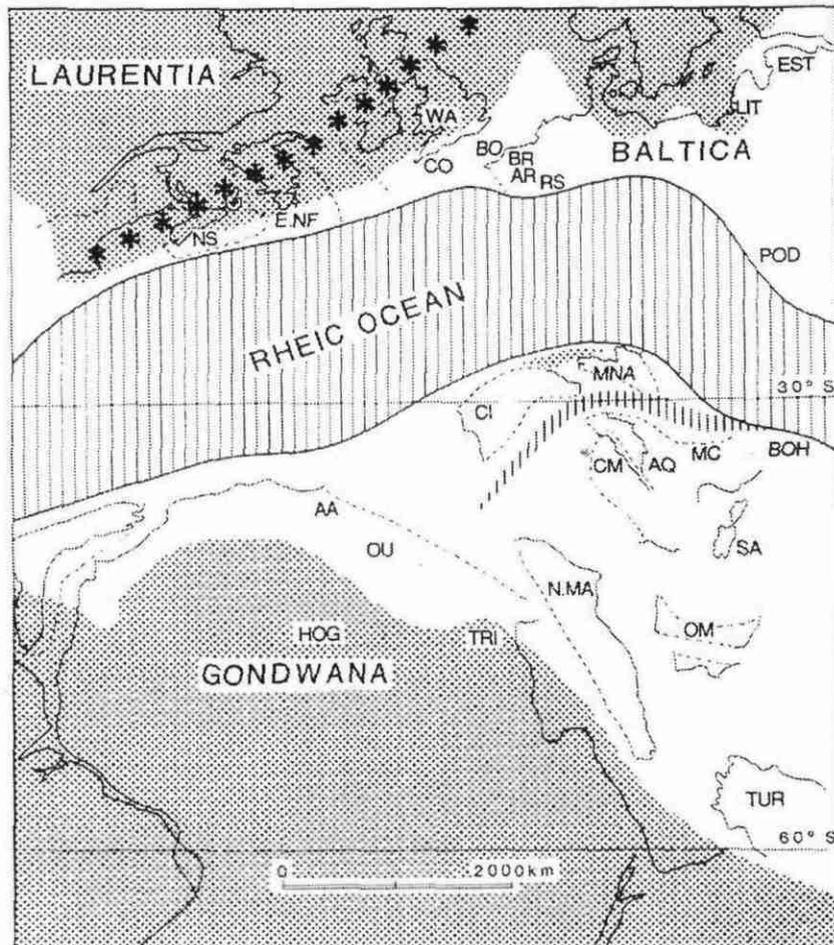
**B****C**

Figure 1-2 (suite)

Au Dévonien inférieur, il existe encore des différences entre les faunes benthiques du Gondwana et Est-Avalonia/Baltica qui se réduisent à partir du Praguien.

A l'Ordovicien moyen, la sédimentation indique un approfondissement bathymétrique vers le Sud pour le domaine Médio-Nord Armorica et vers le Nord pour la zone Centre-Ibérique et le Sud de la France. Ceci suggère l'existence d'un paléo-océan entre le domaine Médio-Nord Armorica et le Massif central séparant une microplaque, Armorica, et le continent Gondwana (fig. I-2A et I-2B). Cependant, de part et d'autre de cet océan, les espèces fauniques montrent une même affinité durant tout le Paléozoïque. Ainsi son étendue de faible ampleur et le caractère peu profond qui le caractérise le font considérer comme une branche de l'océan Rhéique (Paris et Robardet, 1990).

La chaîne d'Europe occidentale provient de la fermeture de l'océan Rhéique et de l'océan Sud-Armorica (fig. I-3; Matte, 1991). L'histoire anté-collision de cette chaîne est décrite dans les synthèses de Matte (1986, 1991). Les domaines océaniques ont été subductés sous les blocs continentaux avant leur fermeture (fig. I-3b à I-3c) comme l'atteste la présence de reliques de métamorphisme de haute-pression (parfois supérieure à 20 Kb) (faciès éclogitique, granulitique et schiste bleu) datées pour la plupart entre 450 et 400 Ma. La présence de croûte océanique affleurant à un haut niveau structural indique que les deux subductions étaient intra-océaniques et se sont poursuivies par une obduction de la croûte océanique accolée à Armorica (fig. I-3c). Par la suite, les trois blocs, Laurussia, Gondwana et Armorica entrent en collision (fig. I-3d à I-3e) formant la chaîne varisque qui présente une double vergence des nappes et de la migration de la déformation et du métamorphisme dans l'espace et dans le temps (Costa, 1990) de part et d'autre d'Armorica (Bard et al., 1981; Matte 1986; Matte, 1991).

## 2. *La collision intra-continentale*

La collision intra-continentale ainsi que les déformations tardi- et post-varisques donneront une géométrie finale de la chaîne varisque illustrée par la figure I-4 (Matte, 1991). La chronologie des événements varisques responsables de cette géométrie est issue de la synthèse effectuée par Costa (1990). La chaîne se caractérise dans sa partie occidentale par une virgation convexe à l'Ouest: l'arc Ibéro-Armorica. Deux branches se distinguent de part et d'autre d'un bloc central:

Le bloc central, à affinité gondwanienne, peu affecté par la déformation et le métamorphisme varisques, s'observe en Bohême (Tepla-Barandia) (fig. I-5E) et dans le massif Nord-Armorica (fig. I-5B). Cette zone a été cisailée par un décrochement dextre d'échelle lithosphérique dont les dernières déformations ductiles ont été datées à 320 Ma. Ainsi le bloc central ne se prolonge pas entre les deux massifs, où les zones internes à déformations de vergence opposée sont directement en contact, uniquement séparées par une zone de cisaillement (Forêt Noire, Vosges) (fig. I-5D). Ce bloc correspondrait à la microplaque Armorica, cependant

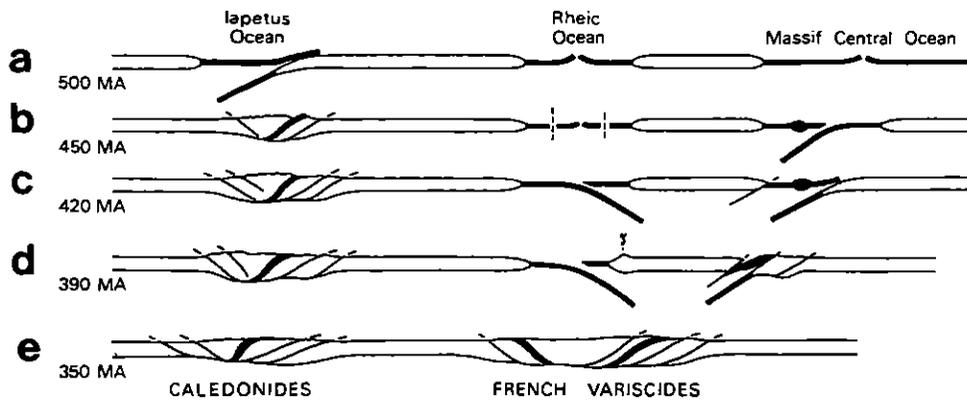


Figure 1 - 3: Schéma de la tectonique des plaques montrant l'évolution de la chaîne calédonienne et de la chaîne varisque d'Europe occidentale entre 500 et 270 Ma d'après Matte (1991).

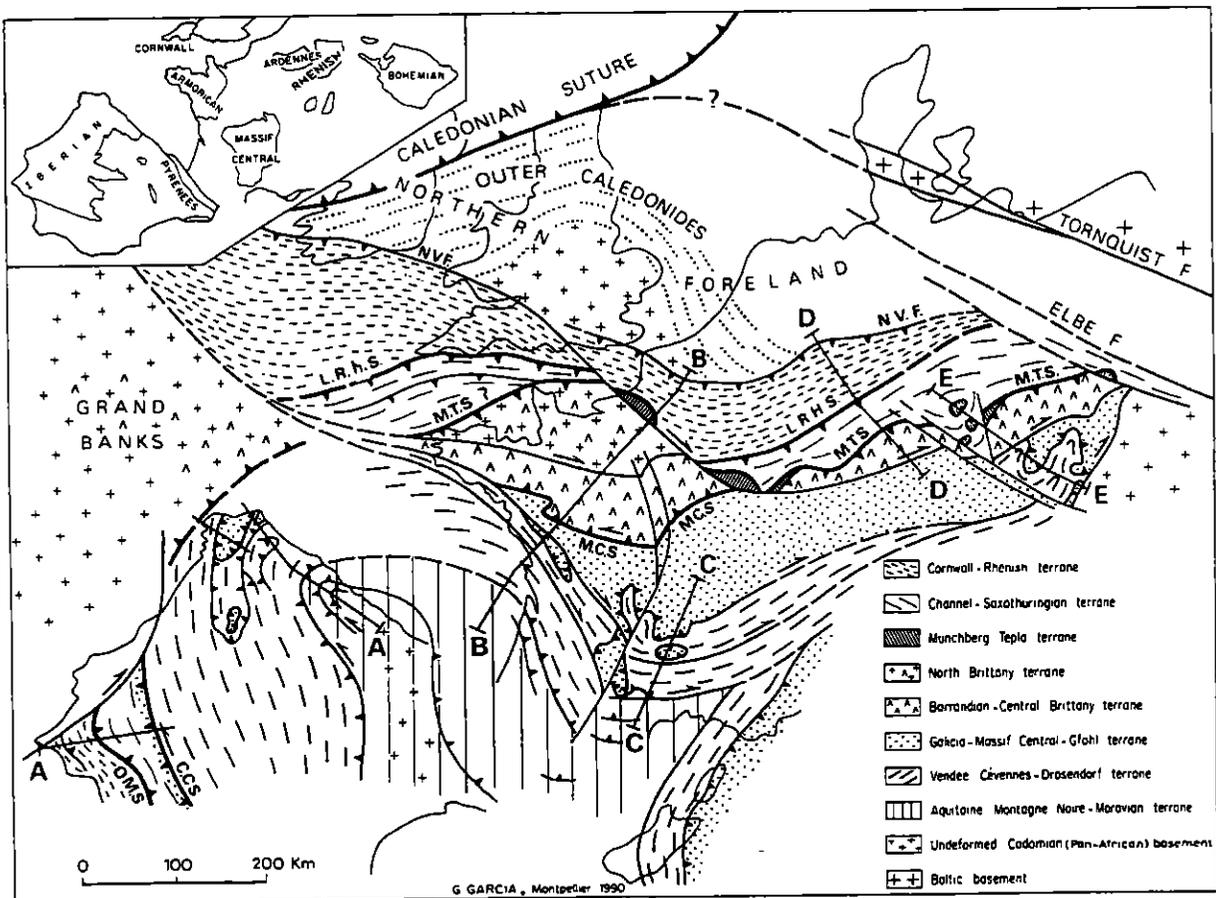


Figure 1 - 4: Carte structurale schématique de la chaîne varisque d'Europe occidentale avec la trace des coupes de la figure 1. 5 d'après Matte (1991). *N. V. F.* : northern Variscan front; *L. R. H. S.* : Lizard-Rhenish suture; *M. T. S.* : Münchberg-Tepla suture; *M. C. S.* : Massif Central suture; *C. C. S.* : Coimbra-Cordoba suture; *O. M. S.* : Ossa Morena. Les blocs ibériques et Corse-Sardaigne sont représentées dans leur position relative permienne possible par rapport à l'Europe.

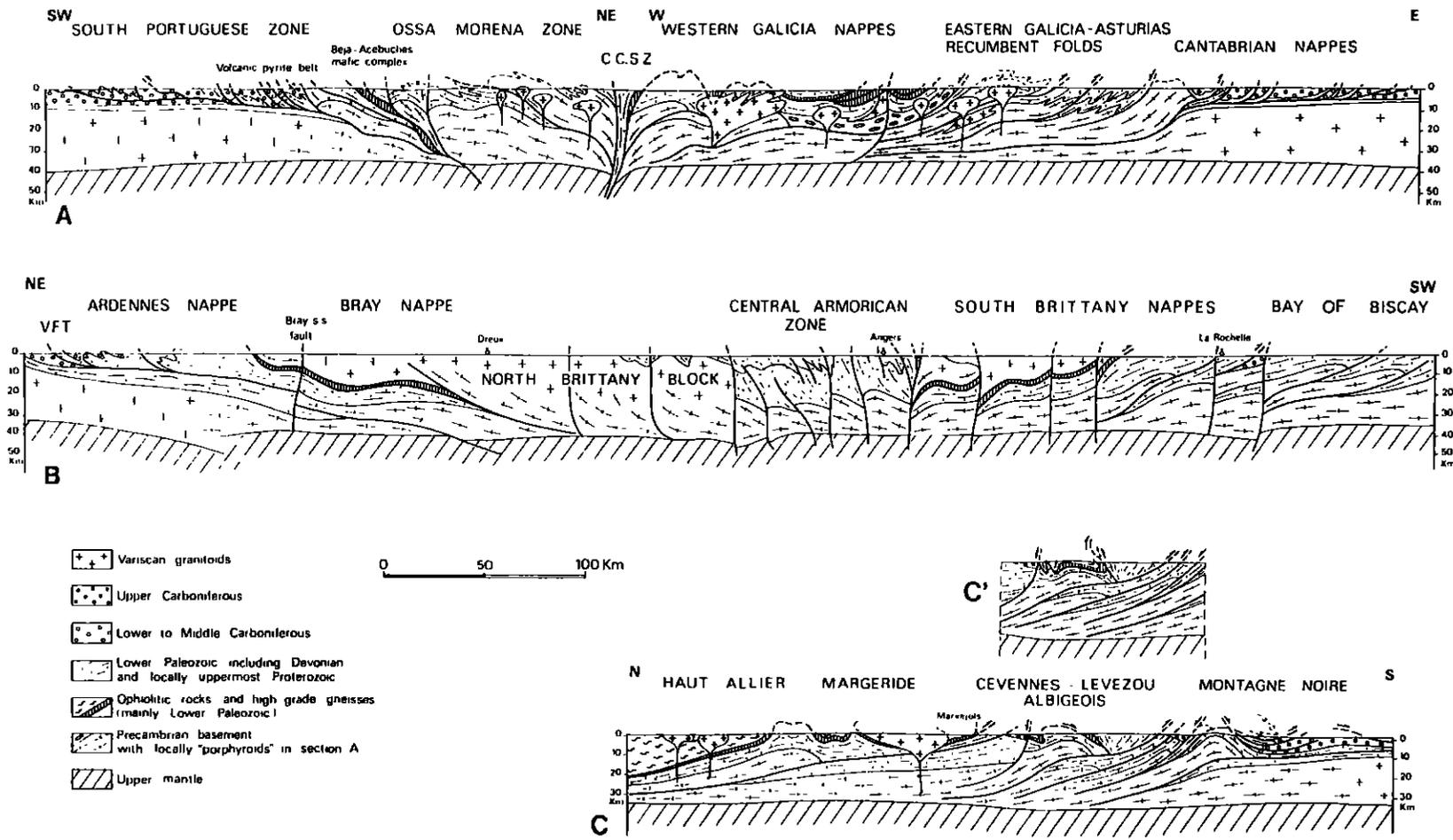


Figure I - 5: Coupes à travers les massifs varisques français et ibériques d'après Matte (1991). (A) section ibérique. (B) section Armorica-Ardenne. (C) section Massif central. (C') Autre alternative pour le dôme du Lézou.

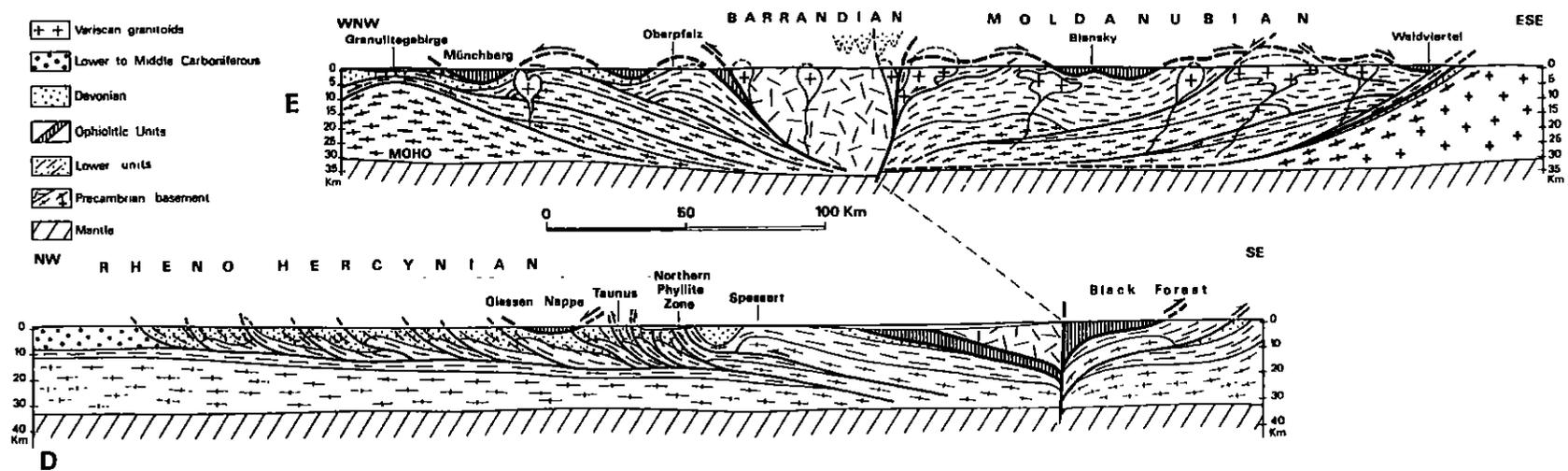


Figure I-5 (suite): Sections à travers la partie NE de la chaîne varisque d'Europe occidentale d'après Matte (1991). (D) section germanique. (E) section bohémienne.

une étude récente à la limite Barrandia-branche méridionale dans le massif de Bohême montre que la juxtaposition des deux zones est tardive par rapport à la mise en place des nappes majeures (Pitra, 1996). A l'Ouest, le massif Nord-Armoricain se prolonge par le Sud de la zone Centre Ibérique en Espagne (Crozon-Buçaco) (Ballèvre et al., 1992).

La branche septentrionale au N, NW à W comprend des zones internes (observées dans le massif de Bohême, les Sudètes et dans le massif Ibérique) très métamorphiques, affectées par des nappes profondes à vergence N, NW à W (fig. I-5A et I-5E). L'âge de la mise en place de ces nappes est avant 390 à 360 Ma. Lorsque l'on se dirige vers les zones externes au N, NW ou W (dans les Ardennes et le Massif schisteux Rhénan, le mont Harz et le Flechtingen et dans le Sud du Portugal) la déformation devient plus superficielle. Elle est caractérisée par un système de chevauchements vers le Nord (fig. I-5B et I-5D), ou vers le SW (au Portugal) (fig. I-5A) associé à une déformation et un métamorphisme décroissant au fur et à mesure que l'on va vers des zones plus externes. L'âge de la déformation (entre 330 et 290 Ma) et des sédiments impliqués dans cette tectonique est de plus en plus jeune vers les zones externes.

La branche méridionale, à vergence S, SE ou E, comprend des zones internes qui s'observent dans la Péninsule Ibérique, au Sud du Massif Armoricain, en Vendée, dans le Massif central, au Sud des Vosges, de la Forêt Noire et du massif de Bohême. Elles sont le lieu de mise en place de nappes profondes à vergence S/SE à E (fig. I-5). Les unités allochtones présentent une évolution rétrograde postérieure au stade de haute-pression et les unités autochtones enregistrent une évolution prograde de pression intermédiaire avec parfois développement d'un métamorphisme inverse sous le chevauchement (Burg et al., 1984). Un chevauchement majeur a été clairement identifié dans le Massif central (Burg et Matte, 1978; Matte, 1986, 1991) (fig. I-5C) (dans l'Artense, la Truyère, le Haut-Allier et dans les klippen de Najac/Carmaux, de Bessenois, du Vibal, du Lézou, de Marvejols, et dans le Tanargue et le Vivarais). Les données géochronologiques indiquent un âge de mise en place des nappes avant 380 à 350 Ma. La continuité de ce chevauchement majeur peut se retrouver dans le Massif Armoricain. Ledru et al. (1989) distinguent dans le Massif central deux chevauchements majeurs (fig. I-6). Le premier sépare l'unité supérieure des gneiss contenant des reliques de haute pression et l'unité inférieure des gneiss et correspond au chevauchement identifié par Burg et Matte (1978). Le second, plus méridional, sépare les unités autochtones relatives et l'unité inférieure des gneiss. Il est bien mis en évidence dans le Limousin sur des critères lithologiques, structuraux et d'évolution métamorphique. La localisation de ce chevauchement doit toutefois être précisée dans le Massif Central oriental. Des nappes crustales profondes vers le S ou SE existent également dans la Forêt Noire (fig. I-5D) et le massif de Bohême (fig. I-5E). De l'autre côté de l'Arc Ibéro-Armoricain, en Espagne (Galice), des nappes cristallines internes se sont mises en place vers 380 Ma d'Ouest en Est sur au moins 100 km (fig. I-5A). Les zones plus externes s'observent au NW de la Péninsule Ibérique (fig. I-5A), dans le Sud du Massif central (fig. I-5C), dans les Pyrénées varisques et en Moravie à l'Est du massif de Bohême. Elles sont caractérisées par des systèmes de chevauchements vers le Sud ou vers l'Est, selon où l'on se trouve dans la chaîne, contemporains d'une déformation et d'un métamorphisme de plus en plus superficiels et de plus en plus jeunes (de 340 à 300 Ma) lorsqu'ils affectent des zones de plus en plus externes.

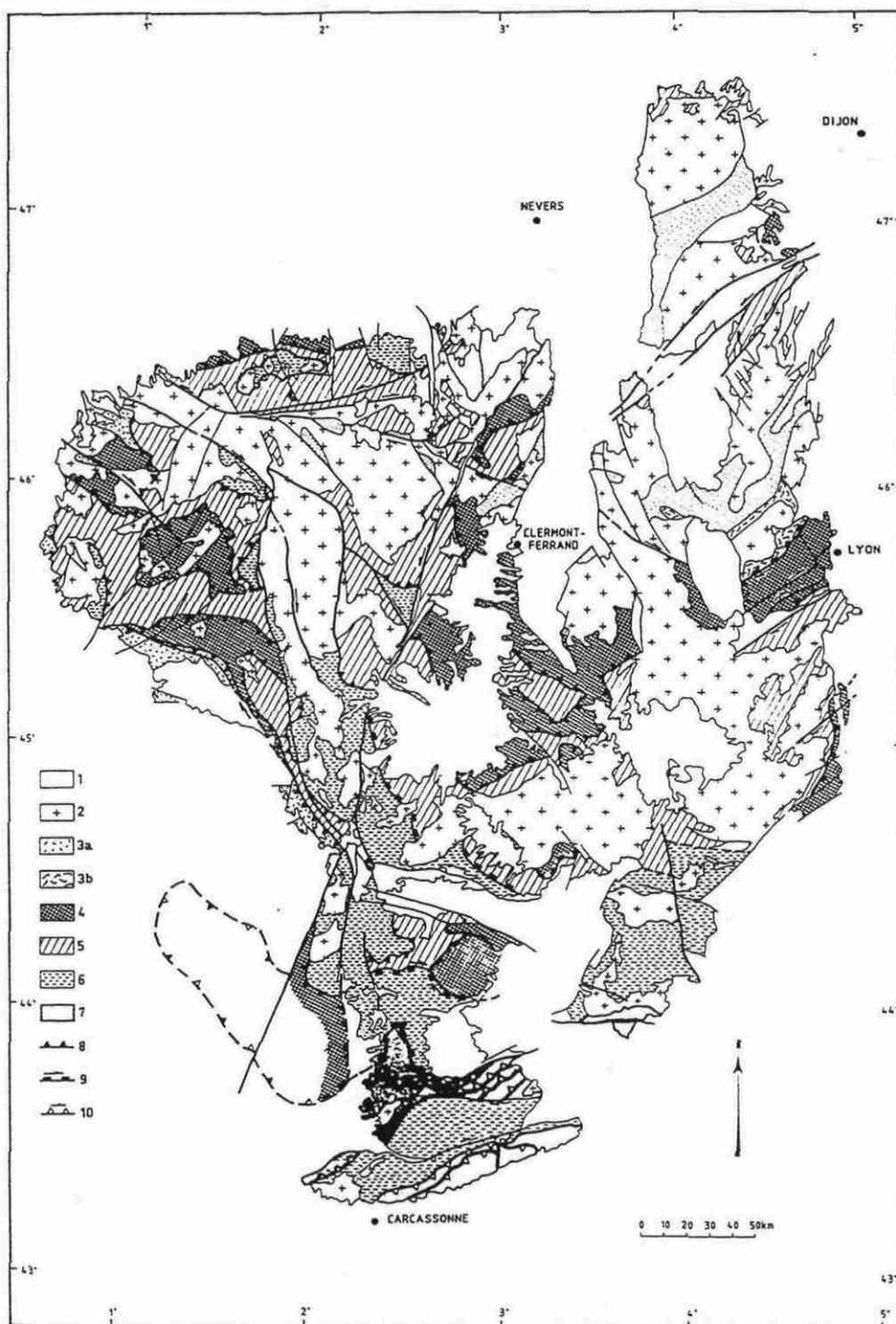


Figure I - 6: Carte schématique des principales nappes du Massif central français d'après Ledru et al. (1989). 1: dépôts viséens; 2: massifs granitiques indifférenciés; 3: unités supérieures épizonales; 3a: unité de Thiviers Payzac et de Génis; 3b: unité de la Brévenne; 4: unité supérieure des gneiss; 5: unité inférieure des gneiss; 6: complexes autochtones relatifs; 7: unités méridionales d'âge paléozoïque; 8: chevauchements (370-390 Ma); 9: chevauchements et décrochements (350-320 Ma); 10: chevauchements et décrochements ( $320 \pm 10$  Ma).

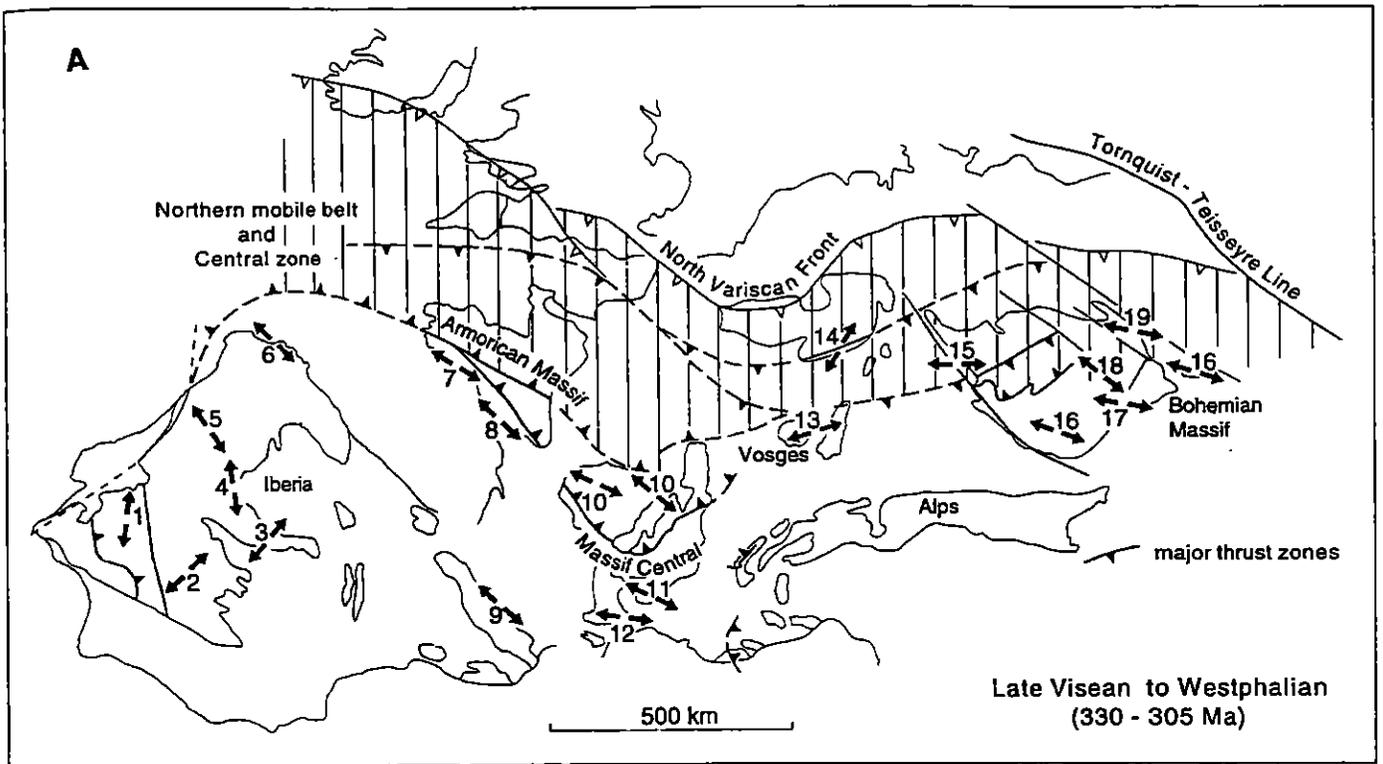
### 3. *L'effondrement de la chaîne varisque*

L'extension syn à post-orogénique, suggérée dans la chaîne varisque (Ménard et Molnard, 1988), a été décrite en divers endroits et les premières synthèses ne sont apparues que très récemment (Burg et al., 1994; Faure, 1995) (fig. I-7). Cette extension correspond à un effondrement gravitaire qui résulte de l'amolissement de la croûte suite à la relaxation thermique des domaines épaissis. Elle débute à la fin de la convergence continentale (extension syn-orogénique) dans les zones les plus internes, pendant que la mise en place de nappes se propage encore dans les zones externes. Les forces de compression imposent alors une extension parallèle à la chaîne. L'extension se poursuit après cette période de convergence (extension post-orogénique) et sa direction dépend des conditions aux limites de la chaîne.

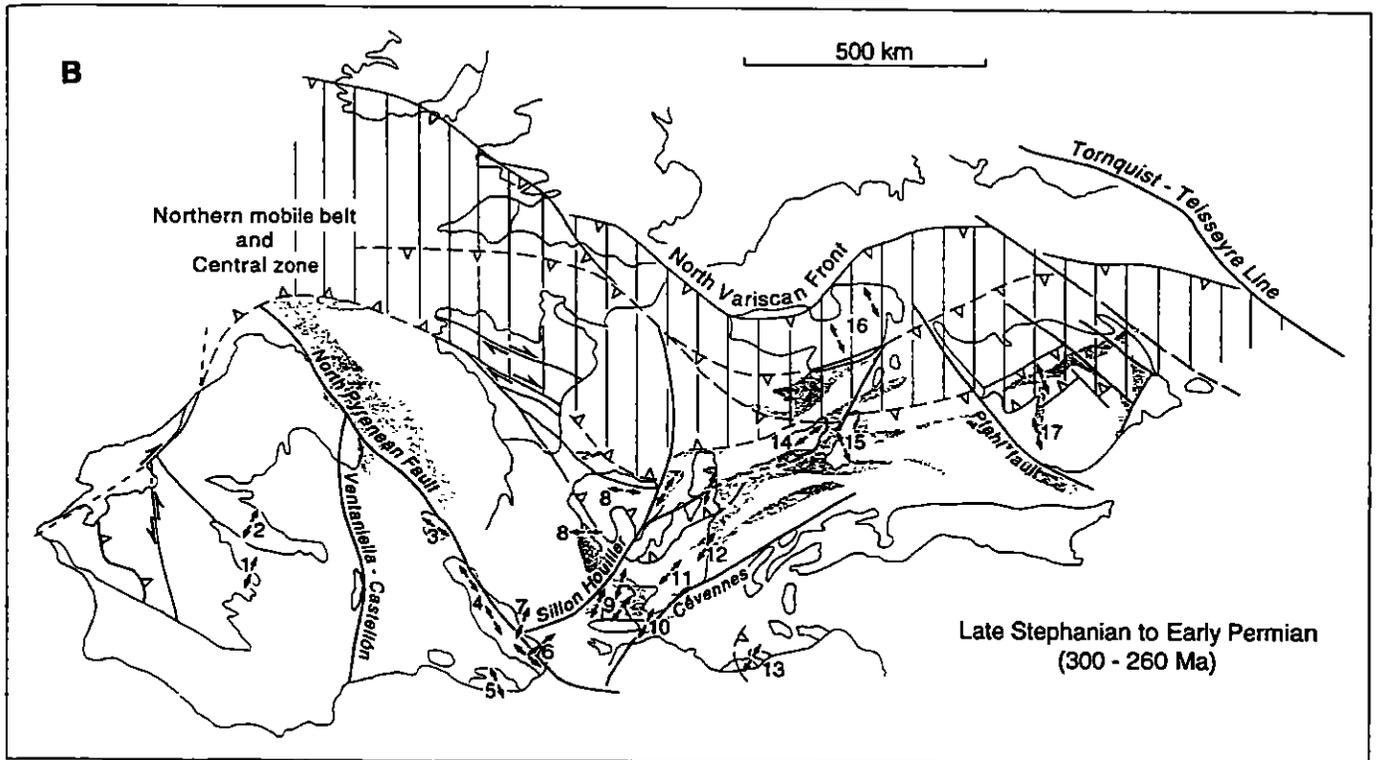
L'extension syn-orogénique (fig. I-7A) s'effectue du Viséen au Westphalien (entre 330 à 305 Ma). Elle se caractérise par la formation de bassins volcano-sédimentaire et de volcanisme sub-aérien. Cette extension s'accompagne de la mise en place de granites syn-tectoniques (Burg et al., 1994; Faure, 1995) et, dans certains secteurs, du fonctionnement de failles normales ductiles et d'un métamorphisme HT-BP. Cette extension n'engendre pas d'amincissement de la croûte mais permet d'atténuer l'épaississement crustal par une extrusion latérale (Burg et al., 1994).

Du Stéphanien supérieur à l'Autunien (300 à 260 Ma), l'extension peut devenir progressivement transverse à la chaîne résultant d'un effondrement radial ou d'un changement de conditions aux limites de la chaîne (fig. I-7B). Elle s'effectue après la période de convergence et affecte l'ensemble de la chaîne. Elle est contemporaine d'un volcanisme, d'un métamorphisme important de HT/BP, de détachements en faille normale, de la mise en place de dômes anatectiques et de la formation de bassins sédimentaires (Van Den Driessche et Brun, 1991; Faure, 1995; Ledru et al., non publié). Les quantités d'extension impliquées et la direction d'extension diffèrent localement dans la chaîne et sont accommodées par le jeu de failles de transfert d'échelle crustale tel le sillon houiller (entre 300 et 285 Ma) ou la faille Nord pyrénéenne. D'autre part, le litage de la croûte inférieure observé en sismique, interprété comme issu de l'alternance de sédiments et de roches basiques ignées étirés et métamorphisés dans le faciès granulite entre 315 et 290 Ma, est probablement lié à cette période d'extension post-orogénique (Rey, 1992). Cette extension permet l'amincissement de la croûte qui retrouve une épaisseur stable en équilibre isostasique (25 à 35 km actuellement par les données sismiques).

L'extension post-épaississement va modifier considérablement l'aspect final de la chaîne. Elle est responsable de son élargissement ainsi que de l'importance des flèches des chevauchements (qui ne sont en réalité que de 100 km). Le métamorphisme et la déformation qui lui sont associés se surimposent souvent, partiellement, parfois totalement à ceux liés à la mise en place des nappes lors de l'épaississement crustal.



A - Directions d'extension du Viséen supérieur au Westphalien dans la chaîne varisque d'Europe occidentale.



B - Directions d'extension du Stéphanien supérieur au Permien inférieur dans la chaîne varisque d'Europe occidentale. Les bassins principaux sont grisés.

Figure 1 - 7: Évolution des directions d'extension entre 330 et 260 Ma (d'après Burg et al., 1994)

|                 |   |
|-----------------|---|
| <i>Partie B</i> |   |
|                 | <i>La position des Cévennes au sein de la chaîne varisque</i> |

### *1. par rapport aux chevauchements varisques*

Le secteur étudié est localisé dans la région des Cévennes, au Sud-Est du Massif central français, dans la branche Sud de la chaîne varisque (fig. I-8). Dans la synthèse la plus récente, Quenardel et al. (1991) décrivent dans le Massif central un à plusieurs chevauchements majeurs constituant les bases de nappes profondes lors de la collision intracontinentale. La région étudiée constitue le para-autochtone sur lequel viennent reposer ces nappes internes à vergence Sud (Burg et Matte, 1978; Matte, 1986, 1991; Ledru et al., 1989). Dans la coupe interprétative la plus récente passant par les Cévennes (fig. I-9B; Ledru et al., non publié), les Cévennes occupent une position de para-autochtone relatif sur lequel s'est mise en place l'unité supérieure des gneiss (correspondant au chevauchement du Haut-Allier et du Lyonnais). Les Cévennes se retrouvent en dessous et au dessus de l'unité inférieure des gneiss. Cependant cette position n'est pas claire, le contact entre les Cévennes et l'unité inférieure des gneiss étant toujours faillé (fig. I-9A).

- La limite septentrionale des Cévennes est constituée par le chevauchement cartographié dans le Haut-Allier (Burg, 1977) et le Lyonnais. L'allochtone est constitué d'une séquence d'anatexites para et ortho-dérivées (roches basiques et acides) contenant des reliques de haute-pression (supérieure à 20 Kb dans le Lyonnais, Gardien et al., 1988). Ces reliques sont métamorphosées dans le faciès granulite, rétro-morphosées dans le faciès amphibolite. Le para-autochtone est constitué d'orthogneiss intrusifs dans une séquence de paragneiss qui représente la continuité Nord du secteur étudié. Il est affecté par un métamorphisme MP/MT. La zone de chevauchement est soulignée par des roches à caractère bimodal, contenant des reliques de haute pression mylonitisées. L'âge de refroidissement obtenu sur minéraux séparés marqueurs de ce chevauchement est entre 360 et 340 Ma (Costa, 1990; Costa et al., 1993). La déformation est donc antérieure à ces âges.
- La limite méridionale est constituée par un chevauchement qui juxtapose les séries du secteur étudié aux dessus des séries paléozoïques du Vigan (Alabouvette et al., 1988, fig. I-10). Ces séries datées paléontologiquement depuis la découverte d'archéocyathes cambriens dans les calcaires dolomitiques de la mine des Malines (Thoral et Debraban, 1935) présentent une structuration en chevauchements soupçonnée par Bergeron dès 1904 par l'étude des litho-faciès. La géométrie de cette région a été précisée par la cartographie détaillée de Demay (1948) et Gèze (1949) dont les vues diffèrent quant à la vergence des nappes, vers le Sud pour le premier, vers le Nord pour le second.

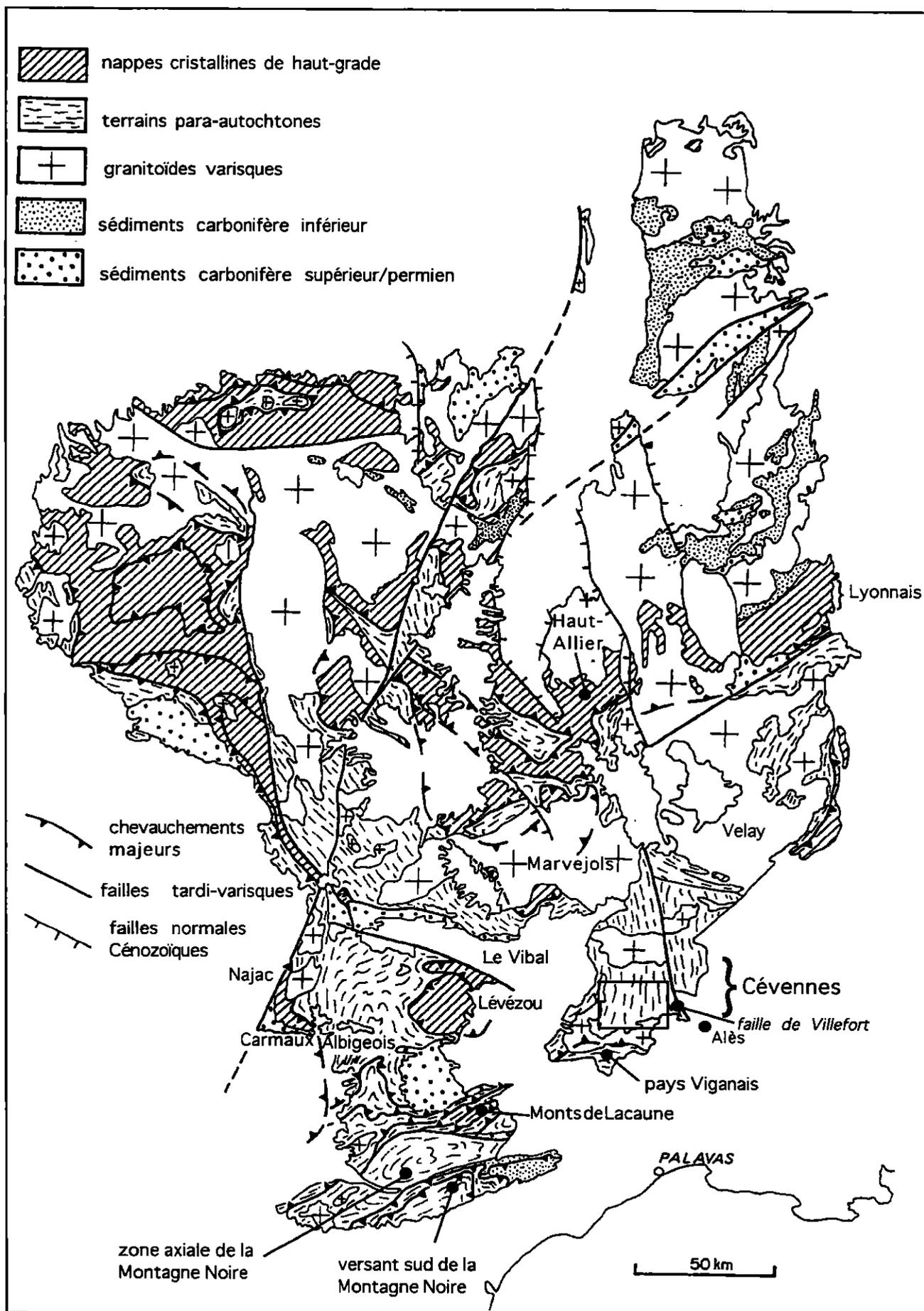


Figure 1 - 8: Schéma structural du Massif central (Burg et Leyreloup, 1988; non publié)

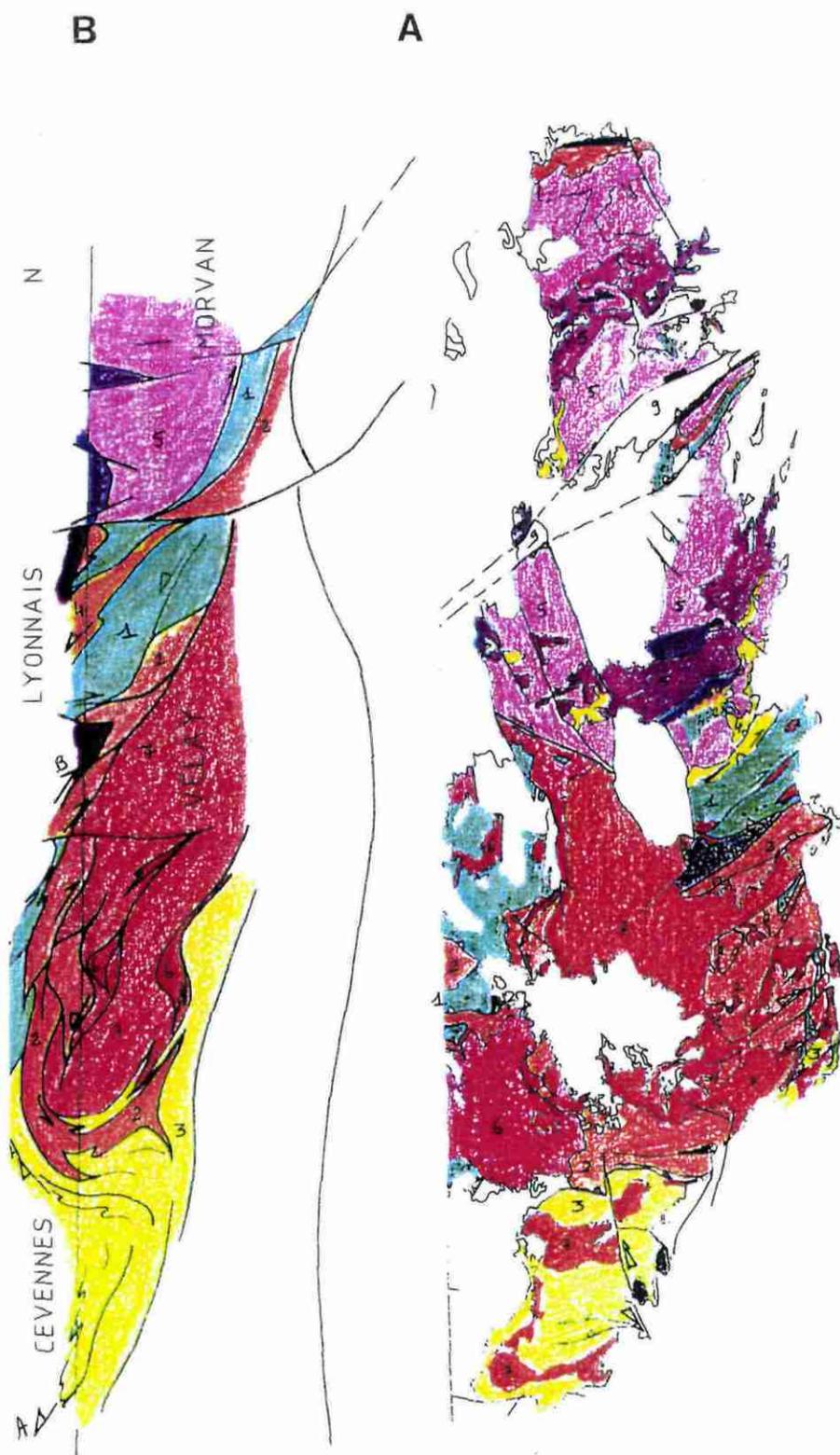


Figure 1 - 9: Carte géologique et coupe de la bordure orientale du Massif central d'après Ledru et al. (non publié).

**1 - 9A: Carte géologique.** 1: unité supérieure des gneiss (les points figurent les massifs à reliques de métamorphisme haute pression); 2: unité inférieure des gneiss; 3: unités micaschisteuses parautochtones; 4: Brévenne; 5: granites Carbonifère inférieur et Viséen du fossé de la Loire; 6: Granites porphyroïdes péri-vellaves; 7: granite du Velay et massifs Carbonifère supérieur; 8: bassins stéphaniens; 9: bassin permien.

**1 - 9B: Coupe géologique.** A: surface de chevauchement Carbonifère inférieur (D3); B: surface de détachement Carbonifère supérieur.

Actuellement tous les auteurs s'accordent pour une structuration en chevauchements à vergence Sud effectuée en climat métamorphique épizonal à anchizonal (Alabouvette et al., 1988) (fig. I-10).

- Le domaine étudié se corrèle à l'Ouest avec l'Albigeois. Les deux régions sont séparées par la présence de dépôts mésozoïques (calcaires jurassiques des grands Causses). L'Albigeois est composé d'une série schisto-gréseuse paléozoïque équivalente à celle du secteur étudié (Guérangé-Lozes, 1987) et affectée par une déformation et un métamorphisme comparables. Le système de chevauchements cartographié dans l'Albigeois (fig. I-11; Guérangé-Lozes, 1987) a fonctionné entre 340 Ma, au Nord, et 330 Ma, au Sud (Costa, 1990). Ce domaine se situe en position structurale similaire, représentant un para-autochtone surmonté par des nappes profondes que l'on retrouve sous forme de klippes à Najac-Carmaux, Bessenois, Lévézou, le Vibal et Marvejols (fig. I-5C). La limite méridionale du domaine de l'Albigeois est représentée par un chevauchement qui superpose les séries albigeoise sur les séries des monts de Lacaune (Guérangé-Lozes, 1987; fig. I-11). Ces dernières sont structurées en chevauchements mis en évidence pour la première fois par Bergeron (1905) et dont la vergence vers le Sud est proposée par Demay dès 1931 et retenue actuellement. Ce système en chevauchements se poursuit plus au Sud par les nappes du versant Sud de la Montagne Noire séparées des Monts de Lacaune par le dôme migmatitique de la zone axiale de la Montagne Noire (fig. I-12). La présence de nappes dans le versant Sud est suspectée par Bergeron (1904), et leur cartographie est précisée par Gèze (1949). Alors que ces auteurs évoquaient une vergence vers le Nord, l'analyse microtectonique démontra la vergence vers le Sud de ces nappes (Arthaud, 1970). L'âge de cette déformation se situe entre 330 Ma et 310 Ma (Engel et al., 1981).

En résumé, le secteur étudié et les Cévennes en général, ainsi que leur prolongation à l'Ouest dans l'Albigeois, représentent le para-autochtone sur lequel sont venues les nappes internes. Ce para-autochtone chevauche lui même des domaines plus externes structurés en système de chevauchements associés à une déformation et un métamorphisme de degré d'autant plus faible et d'âge plus récent (entre 360, âge minimum, et 310 Ma) que l'on se dirige vers les zones plus externes vers le Sud (Costa, 1990).

## *2. Par rapport à l'extension syn- à post-orogénique*

De nombreuses zones à proximité du secteur étudié sont affectées par la déformation post-orogénique:

Le secteur se situe entre plusieurs granodiorites, la granodiorite de Saint-Guiral et du Liron au Sud, de l'Aigoual à l'Ouest et du Mont-Lozère au Nord. A partir de leur forme asymétrique, de la fabrique de forme au sein des granodiorites, et des structures observées dans l'encaissant, Faure et al. (1992) et Faure (1995) interprètent la mise en place de ces granodiorites syntectoniques dans un contexte régional en extension EW, liée à l'extension syn-orogénique (fig. I-13). D'après cet auteur, les données gravimétriques (campagnes gravimétriques dans Najoui, 1996, carte gravimétrique du Sud

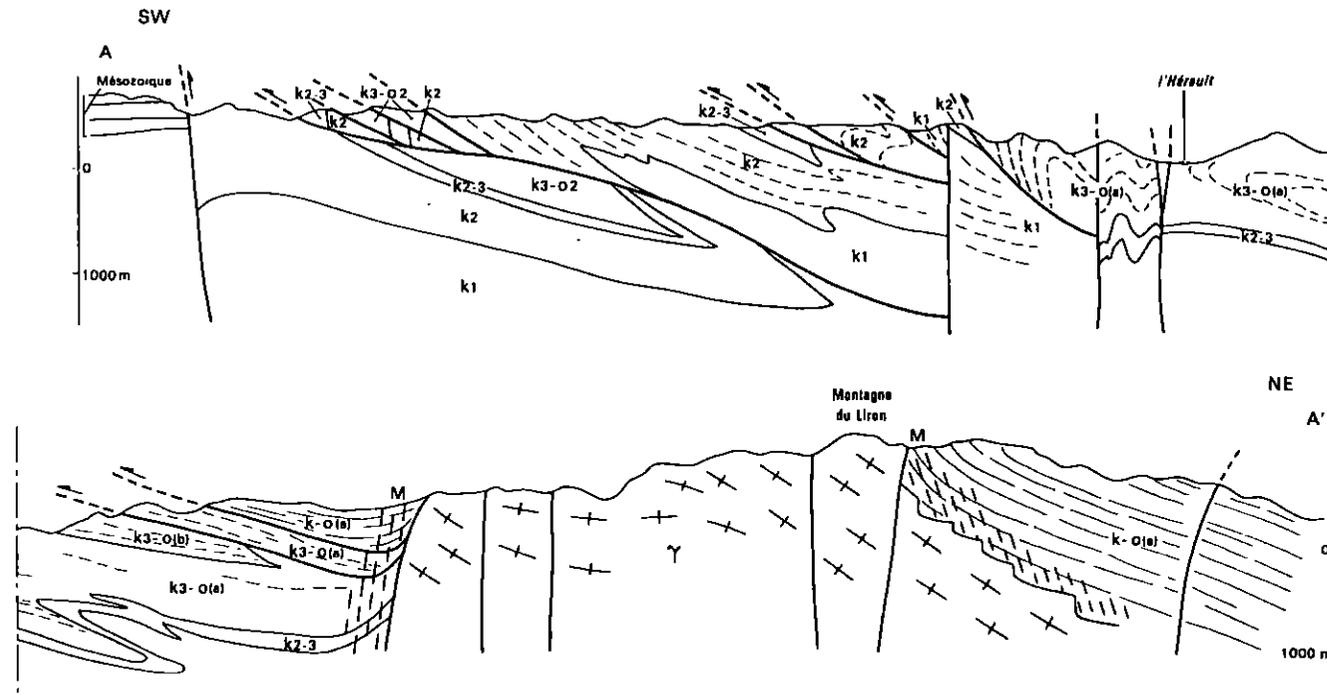


Figure 1 - 10: Coupes schématiques des séries du Vigan (travaux d'Arthaud discutés par Alabouvette, 1988). Séries cévenoles cambro-ordoviciennes: K3-0(a): série grésopélitique; K3-0(b): schistes à chlorite; K-0(a): série schisto-gréseuse; K-0(b): série grésopélitique à bancs de quartzites. Séries viganaises cambriennes: K1: série flyschoid grésopélitique; K2: dolomie; K2-3: série schisto-carbonatée; K3-02: série flyschoid grésopélitique cambro-ordovicienne.

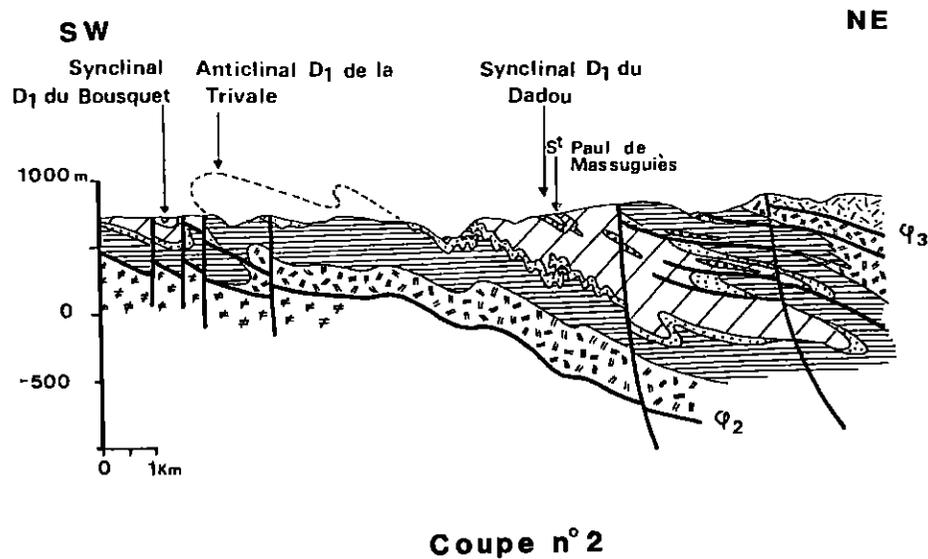
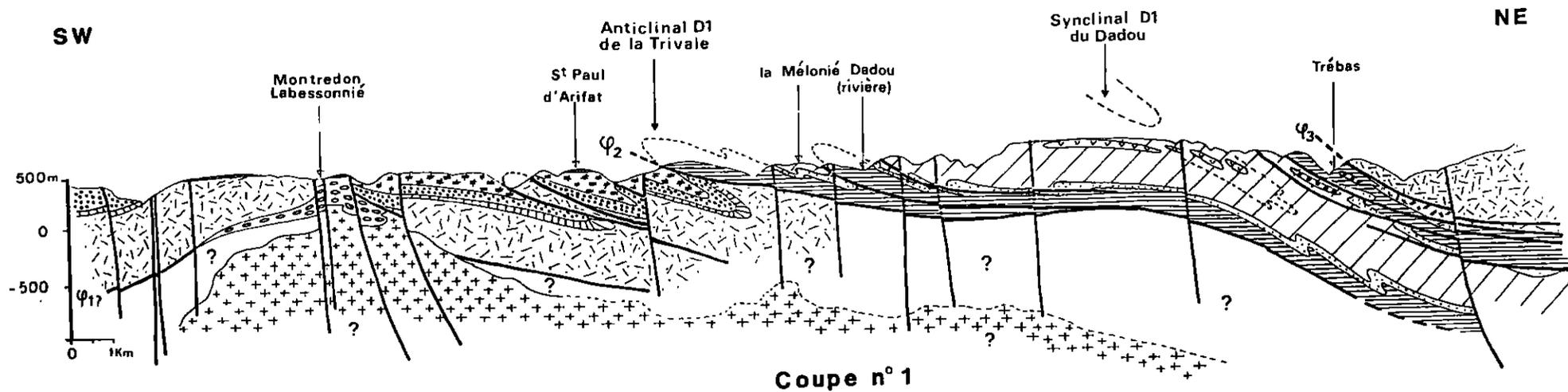


Figure I - 11: Coupes à travers les Monts de Lacaune et l'Albigeois d'après Guérangé-Lozes (1987). La légende des coupes est décrite page ci-contre.

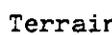
## LEGENDE

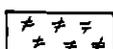
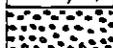
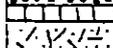
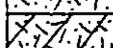
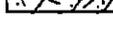
 Tertiaire

 Bassin stéphano-permien de Réalmont

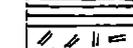
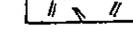
### Monts de Lacaune

 Terrains cambro-siluriens de la région de Lacaune

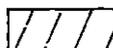
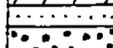
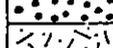
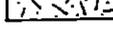
 Terrains cambro-siluriens de la région de Montredon-Labessonnié

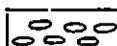
|  |   |   |
|--|---|---|
|   | 5 | 5 - Formation schisto-gréseuse grise                      |
|   | 4 | 4 - Formation noire à nodules phosphatés                  |
|   | 3 | 3 - Calcaires dolomitiques                                |
|   | 2 | 2 - Formation schisto-gréseuse du Cambrien inférieur (K1) |
|  | 1 | 1 - Formation micaschisteuse                              |

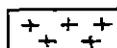
### Nappe de Saint-Salvi-de-Carcavès

|   |   |   |
|---|---|---|
|   | 5 | 5 - Série schisteuse noire ordovicienne                           |
|   |   | a) Volcanisme basique   |
|   |   | b) Formation carbonatée de Saint-Paul-de-Massuguiès               |
|  | 4 | 4 - Formation quartzitique du Moulin/Mont-Roc                     |
|  | 3 | 3 - Volcanisme acide  |
|  | 2 | 2 - Formation des schistes homogènes du Masnau-Massuguiès/Rayssac |
|  | 1 | 1 - Formation schisto-gréseuse de Mandegourc                      |

### Nappe de Saint-Sernin-sur-Rance

|   |   |   |
|---|---|---|
|  | 4 | 4 - Formation des séricitoschistes de la Vère                       |
|  | 3 | 3 - Formation des grès quartzitiques blancs du Puy Saint-Georges    |
|  | 2 | 2 - Formation des tufs rhyolitiques de Larroque                     |
|  | 1 | 1 - Formation schisto-gréseuse de Saint-Sernin-sur-Rance/Condamines |

 Orthogneiss de Montredon-Labessonnié (Précambrien)

 Granite "supposé" (tardi-hercynien : Stéphanien)

∅ Base de nappe

∅<sub>1</sub> : base de l'unité des écailles des Monts de Lacaune

∅<sub>2</sub> : base de la nappe de Saint-Salvi-de-Carcavès

∅<sub>3</sub> : base de la nappe de Saint-Sernin-sur-Rance

∅<sub>4</sub> : base au complexe gneissico-amphibolitique de Réalmont

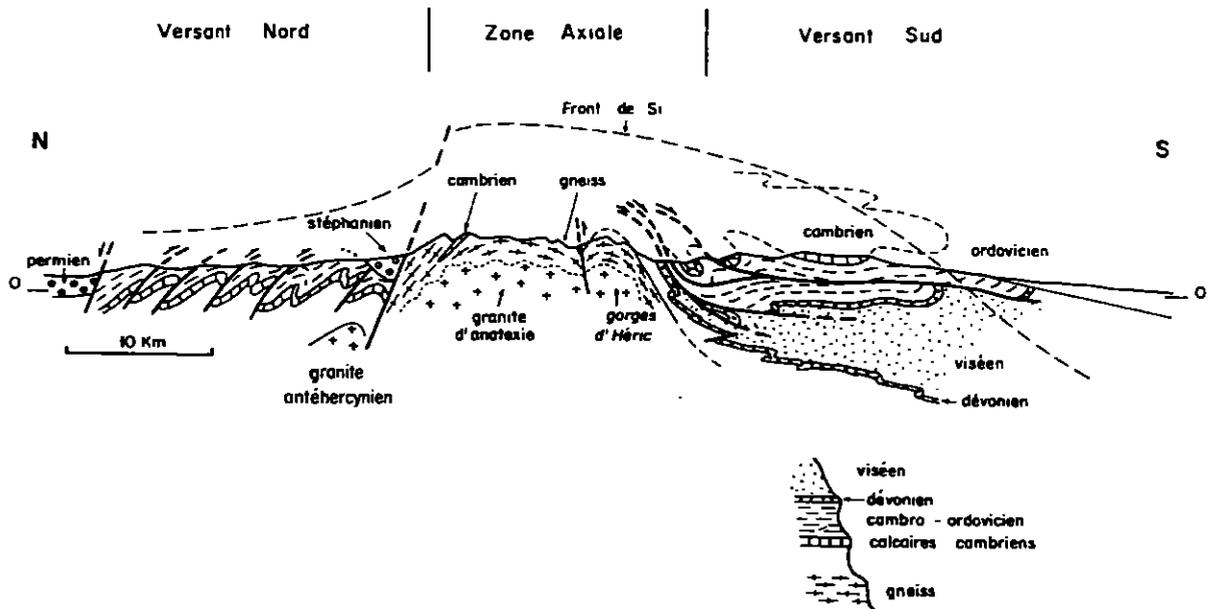


Figure I-12 : coupe schématique générale de la Montagne Noire d'après Arthaud (1970).

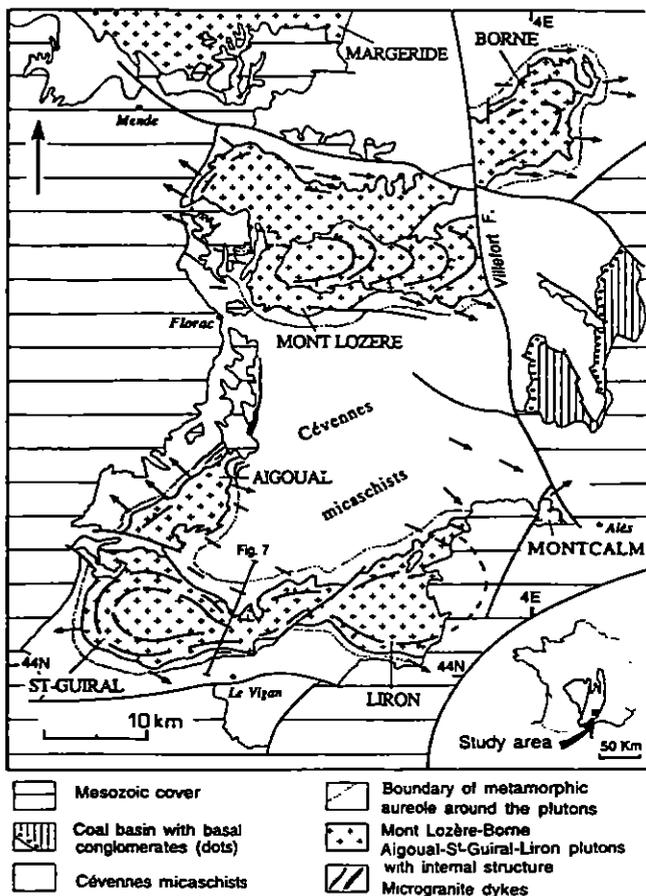


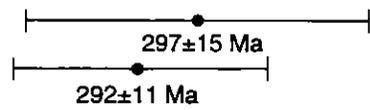
Figure I - 13: Carte structurale de la zone des Cévennes montrant les structures liées à l'emplacement des granites. Les barres indiquent la direction des linéations d'étirement liée à l'emplacement des plutons. Les flèches indiquent le sens de cisaillement dans le granite et l'encaissant. (d'après Faure, 1995).

de la France à 1/1 000 000 du BRGM) mettent en évidence la forme laccolithique des granodiorites, enracinées vers l'Ouest et extravasées vers l'Est. Le plissement associé à une crénulation qui s'intensifie en se rapprochant des contacts est interprété par cet auteur comme le résultat du gonflement du pluton. Les datations effectuées sur des biotites et amphiboles sur des cornéennes et enclaves basiques par la méthode  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ou sur roches totales par la méthode Rb/Sr sont interprétées comme un âge de mise en place du pluton (ou proche). Cependant, ces résultats sont divergents et indiquent une mise en place des granodiorites à différentes périodes (fig. I-14). Le Saint-Guiral s'est mis en place entre  $335\pm 7$  Ma et  $224\pm 2,4$  Ma (Maluski dans Najoui, 1996; Najoui, 1996); le massif de la Borne (extrémité Est du Mont Lozère) à  $315\pm 5$  Ma (Mialhe, 1980); le Liron à  $310,5\pm 3$  Ma (Najoui, 1996) et l'Aigoual et les massifs du Finiels et du Bougès (Ouest du Mont-Lozère) entre  $298\pm 9$  et  $292\pm 11$  Ma (Viallette et Sabourdy, 1977a et 1977b). Ainsi il n'est pas possible d'interpréter la mise en place de ces granodiorites en un seul épisode lié à un contexte tectonique en extension EW comme le proposent Faure et al. (1992) et Faure (1995). L'analyse des filons de lamprophyres associés à la mise en place des granodiorites permet de mieux contraindre le contexte de mise en place des granodiorites. Un réseau de direction NNE-SSW est observé dans l'ensemble des Cévennes. Ces filons recoupent les structures varisques et sont contemporains de la mise en place des granodiorites du Mont-Lozère, de l'Aigoual et du Liron. Cependant la présence d'enclaves de lamprophyres observées dans ces massifs indique un caractère précoce de ces filons par rapport aux intrusions granodioritiques (Gèze, 1949). Leur mise en place correspond donc à une extension de direction WNW-ESE qui semble antérieure à l'intrusion des granodiorites. Une datation sur un filon de cette direction permettrait de confirmer cette hypothèse. Un deuxième réseau de filons de lamprophyres de direction NW-SE à EW est clairement postérieur au réseau de direction NNE-SSW puisque les filons du deuxième réseau recoupent et décrochent les filons du premier réseau (Gèze, 1949). Par ailleurs un filon du deuxième réseau recoupe le filon de microgranite-rhyolite au Nord de la granodiorite de l'Aigoual (Gèze, 1949) et est donc postérieur à cette intrusion. Ce deuxième réseau correspond à une extension NE-SW à NS entre 315 et 301 Ma (datation par la méthode  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  par analyses ponctuelles sur biotite sur un filon de cette orientation, Najoui, 1996). Les données géochronologiques et les relations entre les réseaux de filons de lamprophyres entre eux ou avec les granodiorites suggèrent une mise en place des granodiorites en plusieurs épisodes au cours d'un contexte en extension dont la direction évolue de WNW-ESE à NS.

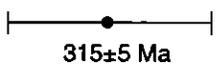
A l'Est de la faille de Villefort, se forment des bassins sédimentaires dont les dépôts les plus anciens sont âgés du Westphalien D (vers 300 Ma). La formation et l'évolution de ces bassins (entre 300 et 280 Ma) viennent d'être réinterprétées (Djarar et al., 1996). Ces auteurs attribuent la formation de ce bassin, et son évolution dans le temps, à la déformation extensive syn à post-orogénique (fig. I-15). Le bassin d'Alès se forme en trois stades correspondant à une évolution de la direction d'extension dans le temps (du Westphalien D soit 295 Ma au Stéphanien C soit 280 Ma):

- Un stade d'extension N70 responsable de failles syn-sédimentaires de direction N150-N160 à pendage E,

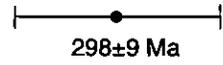
280 Ma 290 Ma 300 Ma 310 Ma 320 Ma 330 Ma 340 Ma



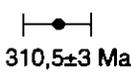
Rb/Sr sur roches totales  
**Mont Lozère**  
(Viallette et Sabourdy, 1977a)



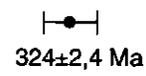
Rb/Sr sur roches totales  
**Borne**  
(Mialhe, 1980)



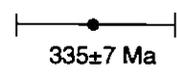
Rb/Sr sur roches totales  
**Aigoual**  
(Viallette et Sabourdy, 1977b)



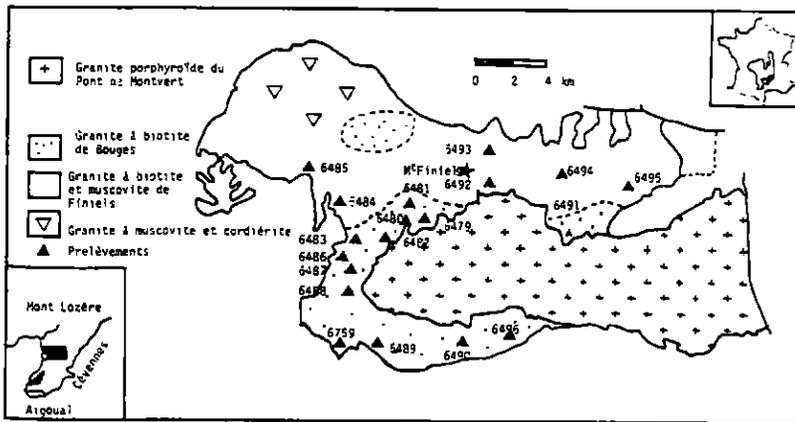
Ar/Ar sur amphibole  
enclave EC4 du **Liron**  
(Najoui, 1996)



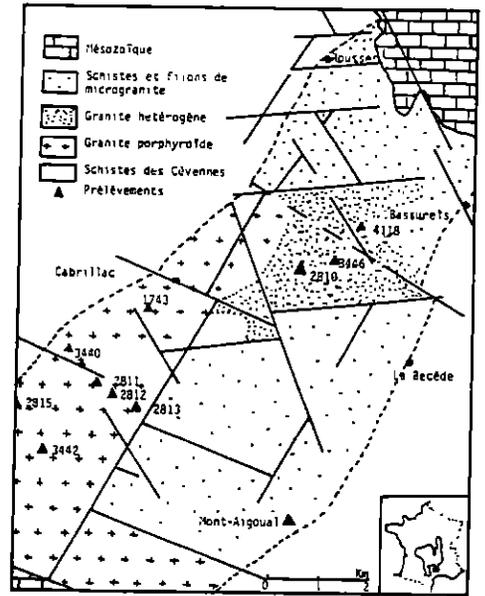
Ar/Ar sur biotite de  
cornéennes  
et magmatiques (EV14)  
du **Saint-Guiral**  
(Najoui, 1996)



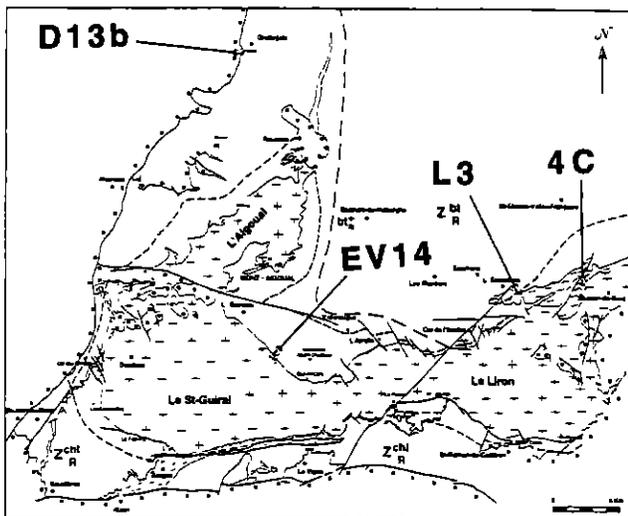
Ar/Ar sur biotite  
du **Saint-Guiral** (col de l'Asclier)  
(Maluski, dans Najoui, 1996)



Mont Lozère (Viallette et Sabourdy, 1977a)



Aigoual (Viallette et Sabourdy, 1977b)



Saint-Guiral et le Liron (Najoui, 1996)

Figure I-14: Synthèse des données radiométriques des granodiorites de la région des Cévennes. et localisation des échantillons analysés

- Un stade d'extension N30-N50 responsable de failles syn-sédimentaires N130-N140 à pendage NE. Le réseau de failles N150-N160 n'est plus activé et des décollements gravitaires vers le NW et SW ont lieu dans le bassin,
- Un stade d'extension N10 à N140 responsable de failles normales syn-sédimentaires N100 à N50-N60 à pendage N à NW. Le réseau de failles N150-N160 joue alors en décrochement sénestre.

D'après le pendage Est des couches constituant le bassin, la faille majeure contrôlant ce bassin doit se situer à l'Est du bassin, sous le Mésozoïque.

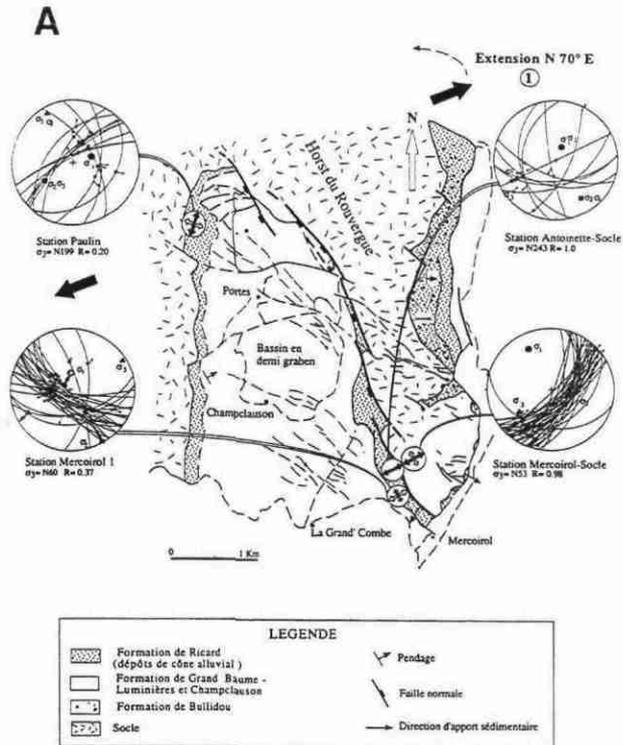
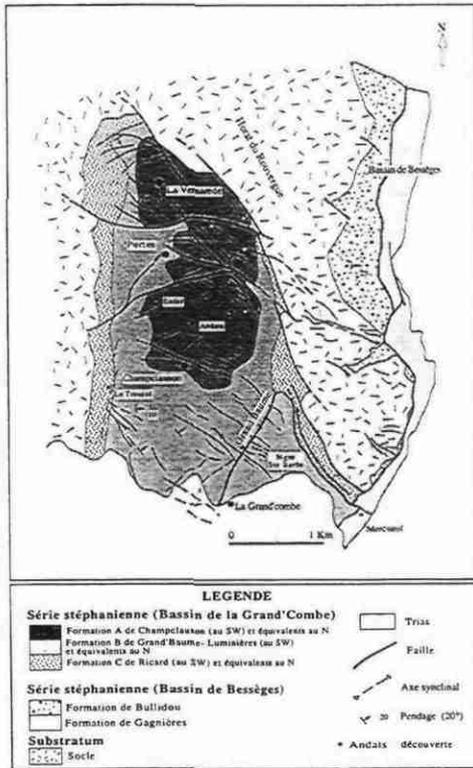
Les traces de cette extension se retrouvent dans les schistes constituant le substratum du bassin, à l'Est de la faille de Villefort. Cette région a été étudiée récemment par Allemand et al. (1997). Les structures pouvant être associées à l'extension liée à la formation des bassins sont les suivantes:

- une linéation d'étirement à muscovite et chlorite, de direction EW, superposée à la linéation d'étirement N45 à biotite, quartz et feldspath;
- la présence de bandes de cisaillements et de zones cataclasées de direction NS à N30 et N170 à N180, au jeu apparent normal vers l'Est.

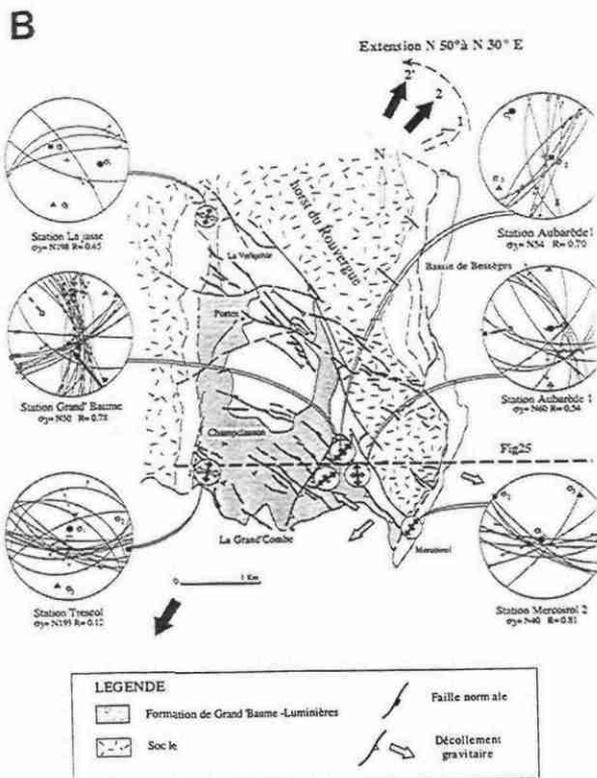
Ces auteurs attribuent une partie du métamorphisme, caractérisé par une paragenèse à grenat manganésifère, chlorite et muscovite, à l'extension car elle correspondrait à des gradients de 50°C/km. Nous ne pensons pas que ce soit le cas. En effet, cette paragenèse stable pour des températures entre 500 et 550°C et des pressions entre 3 et 5 Kb est également observée dans notre secteur. Elle est contemporaine du métamorphisme régional lié à la mise en place des nappes qui s'effectue sous des conditions de 500°C et  $4,4 \pm 0,3$  Kb correspondant à un gradient thermique moyen de 30°C/km. De plus les âges obtenus en  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  sur les muscovites et amphiboles autour de 340 Ma (Caron, 1994) sont incompatibles avec l'âge westphalien de formation du bassin d'Alès. D'ailleurs ces auteurs soulignent eux même que la quantité d'extension dans le socle est trop faible pour expliquer un gradient géothermique de 50°C/km et pensent que l'exhumation a été produite par de l'extension associée à de l'érosion.

Dans des secteurs plus éloignés:

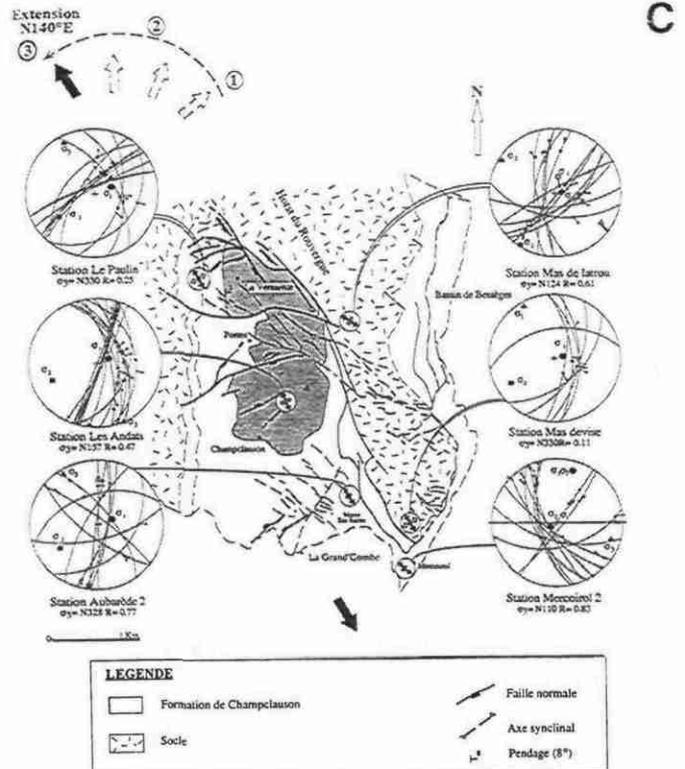
La région des Cévennes se situe entre deux dômes migmatitiques, la Montagne Noire au SE et le Velay au Nord. Ces dômes résultent de la remontée de la croûte profonde le long d'un détachement majeur lors de l'extension post-orogénique NNE-SSW vers 300 Ma (Van den Driessche et Brun, 1991, fig. I-16; Dallain, 1997; fig. I-17). Ces détachements font remonter de la croûte profonde tandis qu'en même temps des bassins stéphaniens se forment en surface. Dans ces secteurs, l'ensemble de la déformation ductile et fragile est lié à cet événement et correspond à une déformation progressive en cours de refroidissement. Les traces de la déformation liées à l'épaississement crustal ne s'observent plus dans ces secteurs. Cette déformation engendre des gradients thermiques anormalement élevés et s'accompagne d'un métamorphisme de basse pression - haute température (Montel et al., 1992).



A: Structures extensives N150-160°E et tenseurs de paléocontraintes associés caractérisant l'évolution tectono-sédimentaire du bassin des Cévennes (zone entourant le Rouvergue) durant la sédimentation de la Formation de Ricard (1<sup>er</sup> stade).



B: Structures extensives N130-140°E, décollements gravitaires et tenseurs de paléocontraintes associés caractérisant l'évolution tectono-sédimentaire du bassin des Cévennes durant la sédimentation de la Formation de Grand'Baume Lumières (2<sup>ème</sup> stade).



C: Structures extensives N100°E à N50-60°E et tenseurs de paléocontraintes associés caractérisant l'évolution tectono-sédimentaire du bassin des Cévennes durant la sédimentation de la Formation de Champclauson (3<sup>ème</sup> stade).

Figure I - 15: Évolution des directions d'extension au cours de la formation du bassin d'Alès (Djarar et al., 1996, schémas structuraux d'après le travail de Genna, HBCM).

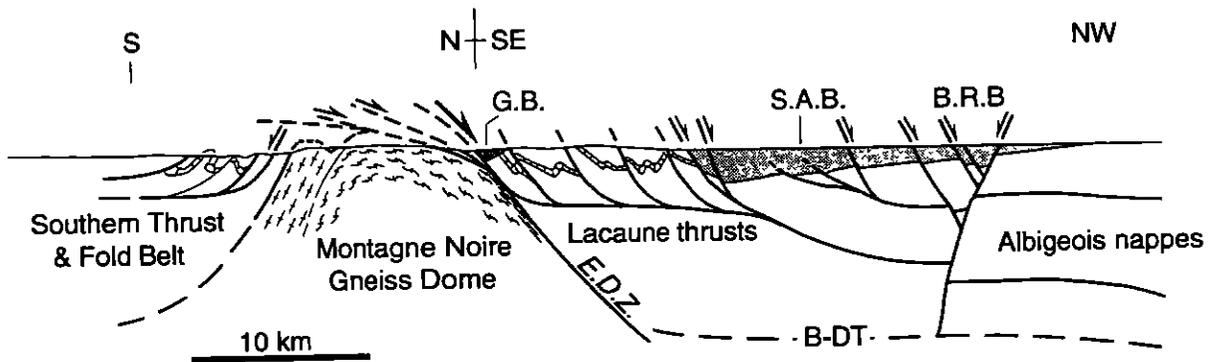


Figure I - 16: Coupe schématique de la Montagne Noire d'après Van den Driessche (1994). G.B.: bassin de Graissessac, S.A.B.: bassin de Saint-Affrique; B.R.B.: bassin de Broquiès; B-DT: détachement basal; E.D.Z.: zone de détachement de l'Espinouse.

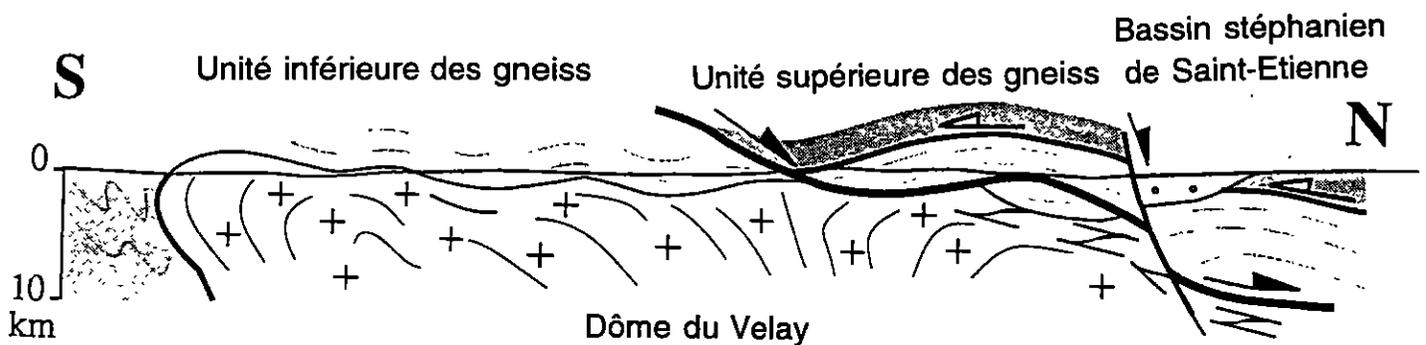


Figure I - 17: Coupe schématique du dôme du Velay d'après Dallain (1997).

En conclusion, les granodiorites se mettent en place en plusieurs épisodes au cours d'un contexte extensif dont la direction évolue de WNW-ESE pour les intrusions les plus précoces à NE-SW à NS pour les intrusions les plus tardives vers 300 Ma. Durant les derniers stades de mise en place des granodiorites se forment les bassins d'Alès entre 300 et 280 Ma. Ces bassins enregistrent une rotation anti-horaire de la direction d'extension entre N70 et N140 (Djarar et al., 1996). Ces évolutions de la direction d'extension sont compatibles avec l'évolution de la direction d'extension syn- à post-orogénique enregistrée dans l'ensemble du Massif central occidental entre 330 et 260 Ma (Burg et al., 1994).

|                 |  |
|-----------------|--|
| <i>Partie C</i> |  |
|                 | <i>La géologie des Cévennes<br/>état des connaissances</i> |

Le secteur des Cévennes étudié est situé entre les granodiorites du Mont-Lozère au Nord et de Saint-Guiral et du Liron au Sud, la faille de Villefort, les couvertures carbonifères du bassin d'Alès et le Mésozoïque et Cénozoïque du Gard à l'Est et les Grands Causses jurassiques à l'Ouest (fig. I-18). Ce secteur délimite la carte géologique à 1/50 000 de Saint-André-de-Valborgne (en cours de levé) et fait partie de la carte géologique à 1/80 000 d'Alès.

## *1. La lithologie des séries schisteuses cévenoles*

### **1. 1. Description des séries et niveaux repères**

Les séries schisteuses observées sur la feuille de Saint-André-de-Valborgne se retrouvent, en continuité, au Sud et à l'Ouest des massifs de l'Aigoual, du Saint-Guiral et du Liron, autour du Mont-Lozère, à l'Ouest de la feuille d'Alès et à l'Est de la faille de Villefort. Ainsi, la description de niveaux repères dans ces régions doit être prise en compte afin d'observer leur éventuelle continuité dans le secteur étudié et de permettre des corrélations.

Selon l'interprétation structurale de la région, plusieurs colonnes stratigraphiques (Brouder, 1964; Pellet, 1972; Munsch, 1981; Magontier, 1988) ont été proposées. Brouder (1964) (fig. I-19B) et Munsch (1981) (fig. I-19A) décrivent une épaisse série schisto-gréseuse dite inférieure, surmontée d'une série de schistes noirs elle-même surmontée d'une deuxième série schisto-gréseuse, dite supérieure. Les deux séries schisto-gréseuses sont similaires, formées d'alternances de niveaux quartzeux et pélitiques aux proportions variables, et ne se distinguent que par la couleur verte de certains niveaux dans les micachistes quartzeux dit "supérieurs". Ces trois séries sont séparées par des niveaux de quartzites d'extension régionale. Dans ses travaux récents pour la carte à 1/50 000 de Saint-André-de-Valborgne, Brouder décrit une quatrième série formée de micachistes quartzeux avec à sa base un niveau particulier de quartzites feldspathiques. Selon cet auteur, elle se situerait en position anormale au dessus des micachistes noirs. Pour Magontier (1988) cette quatrième série est associée à celle des micachistes quartzeux inférieurs répétée par un chevauchement. Il propose ainsi un log stratigraphique simplifié composé d'une série de micachistes quartzeux séparée d'une série de micachistes noirs par un niveau de quartzite blanc discontinu (fig. I-19C). Nos travaux confirment cette interprétation et révisent la stratigraphie présentée par Brouder (1964) et Munsch (1981) en tenant compte des répétitions de séries et niveaux repères liées à des chevauchements (fig. I-19D).

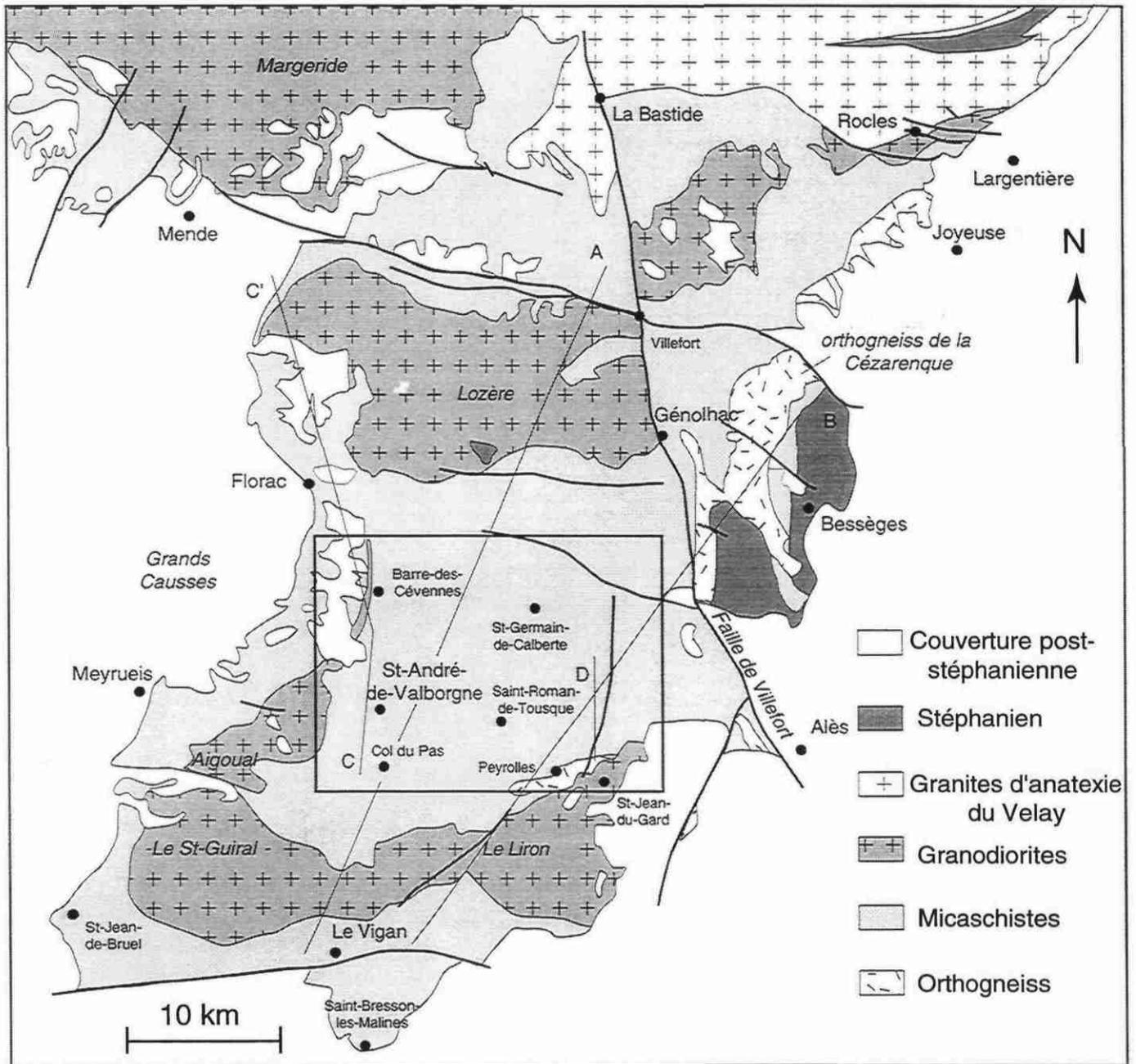


Figure I-18: Carte géologique des Cévennes méridionales et médianes d'après Pellet 1972  
 Le cadre correspond au secteur étudié et aux limites de la carte 1/50 000 de Saint-André-de-Valborgne.  
 Les tracés A,B,C,C' et D représentent les coupes présentées dans la figure I-21.

Les différents niveaux de quartzites, ainsi que la présence de niveaux particuliers interstratifiés dans les séries, constituent les seuls niveaux repères permettant la cartographie et les éventuelles corrélations avec les séries paléozoïques connues ailleurs dans le Sud du Massif central (Vigan, Montagne Noire, Albigeois). Nous allons donc les décrire et préciser leur position dans la colonne stratigraphique.

#### **1. 1. 1. Les micaschistes quartzeux dit "inférieurs"**

Ils contiennent des niveaux de quartzites francs jusqu'à des micaschistes noirs en passant par tous les intermédiaires (micaschistes quartzeux aux quartzites micaschisteux). Certains niveaux sont très feldspathiques. Des niveaux carbonatés sont connus surtout au SW de la région étudiée (Brouder, 1964) et se situent vers la base de la série. La carte à 1/80 000 décrit des schistes amphibolitisés et épidotisés localisés au SW du secteur vers le Col du Pas. A l'origine, cette série proviendrait d'une série sédimentaire marine argilo-gréseuse issue de la désagrégation d'un socle de nature granodioritique (Munsch, 1981). La base de cette série n'est pas connue car elle chevauche, au Sud, les séries paléozoïques de la région du Vigan (travaux d'Arthaud discutés par Alabouvette et al., 1988). Ainsi, nous ne pouvons avoir qu'une idée de son épaisseur minimale que nous avons estimée à 1500 m. Des orthogneiss en Cézarenque et à Peyrolles sont interstratifiés dans la série des micaschistes quartzeux. Les observations de terrain en Cézarenque montrent un cortège filonien déformé et métamorphisé indiquant un caractère intrusif de ces orthogneiss dans la série des micaschistes quartzeux. Pour les orthogneiss de Peyrolles, Najoui (1996) décrit la présence de métacornéennes déjà signalées par Munsch (1981). Elles se localisent à l'extrémité Ouest de l'orthogneiss et leur absence sur la bordure Nord du massif peut s'expliquer par la présence d'une faille normale ductile à la limite Nord orthogneiss-schistes.

#### **1. 1. 2. Les micaschistes noirs**

Ce sont des roches composées à plus de 90 % de phyllosilicates (muscovite et chlorite, parfois biotite). Elles sont feuilletées, très fessiles, en feuillets phylliteux lisses, de couleur argentée à noire. Outre les phyllites, le chloritoïde est présent dans les niveaux les plus alumineux et le grenat s'observe fréquemment à l'Est de la carte. Cette série contient vers son sommet des niveaux particuliers baptisés "triplé associé de Bassurels" par Brouder (1964):

- Le niveau inférieur, b1, épais de 5 m, a l'aspect d'un quartzito-schiste rubané, gris clair, à grandes lamelles de chlorite plus ou moins obliques sur la schistosité et contenant des plages de feldspaths altérés.
- Le niveau médian, b2, épais de 3 m, massif et de teinte bleu-vert est composé essentiellement d'albite, de quartz, de chlorite, d'un peu de biotite et localement de calcite. Ce niveau correspond au niveau de chloritoschiste à albite décrit et étudié par Munsch (1981) et Magontier (1988) qui lui attribuent une origine volcanique, de composition proche des basaltes.
- Le niveau supérieur, b3, épais de quelques mètres, est un banc quartzo-feldspathique plus ou moins schisteux contenant du quartz de 3 à 5 mm souvent bleuté et du feldspath de taille voisine. Ce niveau retrouvé plus à

d'après Brouder (1964) et à partir  
des levés de la feuille de  
Saint-André-de-Valborgne  
à 1/50 000

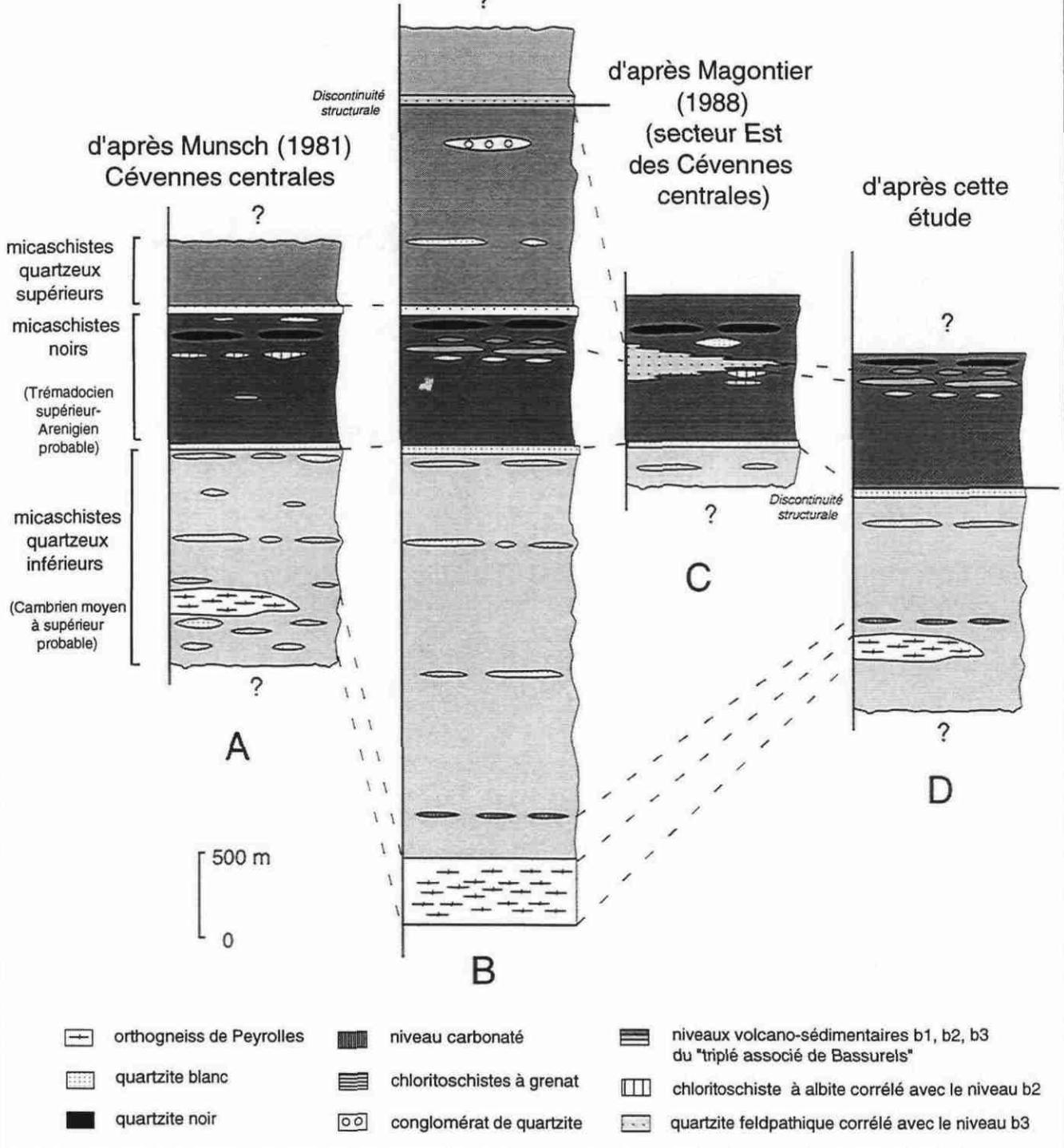


Figure I - 19: Colonnes stratigraphiques du secteur étudié d'après différents auteurs. Pour les niveaux repères, les corrélations proposées sont en pointillés.

l'Est à Cabrespic par Munsch (1981) pourrait être l'équivalent des quartzites feldspathiques massives décrites dans la même position structurale par Magontier (1988).

Plus haut dans la série, s'observe un niveau de microquartzites noirs riches en graphite d'extension régionale (Brouder et al., 1977). Ce niveau se retrouve dans tous les secteurs avoisinants en position lithologique identique. C'est un niveau massif métrique ou plusieurs petits niveaux décimétriques à grain fin qui ont la particularité de tacher les doigts. Ils sont composés à 95% de quartz avec un peu de muscovite et de graphite. Cet horizon peut être, à l'origine, une ancienne lydienne ou une pélite quartzeuse chargée de matière carbonneuse.

Dans cette série, on peut localement observer des bancs décimétriques à métriques de quartzites gris à grain très fin ainsi que des niveaux de quartzite blanc. De tels niveaux ont déjà été décrits dans la série des micaschistes noirs sur la feuille de Meyrueis (Brouder et al., 1977).

Dans la région de Meyrueis, des corps d'amphibolites lenticulaires interstratifiés se retrouvent dans la série des micaschistes quartzeux et des micaschistes noirs (Brouder et al., 1977). Ils peuvent représenter des injections basiques ou des épanchements volcaniques anté-métamorphiques. D'autres amphibolites sont décrites dans les micaschistes quartzeux dans la notice de la feuille de Bessèges (Elmi et al., 1989). Dans le secteur étudié, elles sont cartographiées dans la série des micaschistes quartzeux et des micaschistes noirs.

#### **1. 1. 3. Les micaschistes quartzeux dits "supérieurs"**

Cette série est identique à la série des micaschistes quartzeux dits "inférieurs". Brouder (1964) décrit la présence d'amphibolites à la base de cette série ainsi qu'un niveau conglomératique de 20 cm d'épaisseur riche en galets de quartzites, localisé uniquement au SE de Maseldan (commune de Barre-des-Cévennes).

#### **1. 1. 4. Les quartzites**

Ils forment des lentilles discontinues entre les différentes séquences schisteuses. Leur épaisseur varie et peut atteindre 20 m. Ce sont des roches massives généralement de couleur blanche à beige ou rosée. Leur minéralogie est composée à 90% de quartz avec de rares muscovites donnant un aspect feuilleté à la roche. Certains niveaux de quartzites contiennent du feldspath.

#### **1. 1. 5. Le quartzite feldspathique**

Le niveau de quartzite feldspathique a été décrit pour la première fois par Brouder (1963) près de Villefort, dans la Cézarenque. C'est un niveau épais d'une centaine de mètres composé de lits d'épaisseur millimétrique au maximum, clairs à quartz, albite, clinozoïsite, épidote et de lits sombres à muscovite, biotite, chlorite. Il contient parfois du grenat. On y trouve souvent des ocelles d'albite et parfois des ocelles de quartz bleuté (notice de la carte à 1/50 000 de Bessèges, Elmi et al., 1989). Magontier (1988) définit deux faciès principaux: un faciès clair très quartzeux et un faciès sombre qui peut

se présenter comme une roche massive homogène, ocellaire (contenant des albites millimétriques) ou rubanée (alternance de lits clairs quartzofeldspathiques et de lits sombres phylliteux). Ce niveau peut correspondre au banc volcano-sédimentaire b3 du triplé associé de Bassurels dans la partie SW de la carte. Vers Saint-Roman-de-Tousque, l'albite a conservé son habitus initial en lattes qui témoigne d'une origine volcanique. Son chimisme le rapporte à une émission andésitique ou dacitique (Rochette, 1984 dans notice de la carte à 1/50 000 de Bessèges; Elmi et al., 1989).

#### **1. 1. 6. Les micaschistes quartzeux feldpathiques**

La série des micaschistes quartzeux feldspathiques présente les mêmes caractéristiques que la série des micaschistes quartzeux et ne s'en diffère que par une composante feldspathique plus importante dans certains niveaux. Elle s'observe en position structurale anormale au dessus de la barre de quartzite feldspathique.

#### **1. 2. L'orthogneiss de Peyrolles**

L'orthogneiss de Peyrolles affleure au Sud de la région étudiée, au sein de la série des micaschistes quartzeux inférieurs. Long de 10 km sur 3 km de large environ, il est métamorphisé et déformé avec son encaissant. Il a longtemps été considéré comme le coeur d'origine sédimentaire d'un anticlinal EW déversé vers le Sud (Fabre, 1896; Demay, 1948; Brouder, 1968). Cependant, ses caractères pétro-structuraux indiquent qu'un pluton de granite porphyrique alcalin et alumineux d'origine anatectique crustale (Munsch, 1981) serait à l'origine de l'orthogneiss (Van der Sijp, 1950; De Waard, 1950). Les analyses de fractions de zircons et apatites en U/Pb (Caron et Lancelot, 1996) montrent une histoire thermique et hydrothermale complexe. Elles confirment néanmoins une origine crustale et un âge anté-varisque de ces orthogneiss.

#### **1. 3. Corrélations et âge des séries**

Aucune série lithologique n'a été précisément datée et l'âge de ces séries n'est estimé qu'à partir de corrélations avec les séries paléozoïques voisines (fig. I-20) et les âges géochronologiques obtenus sur les massifs magmatiques intrusifs (fig. I-14). Les colonnes stratigraphiques des différentes séries paléozoïques méridionales et leurs corrélations éventuelles sont résumées dans la fig. I-20. Les corrélations concernent essentiellement les niveaux calcaires à archéocyathes du Cambrien (Géorgien) et des barres de quartzites à la base de l'Ordovicien inférieur. En ce qui concerne le secteur étudié, deux corrélations ont été proposées: Brouder corrèle des bancs carbonatés de la partie inférieure des micaschistes quartzeux inférieurs avec les calcaires du Cambrien moyen de la série du Vigan à Saint-Bresson-Les-Malines (Thoral et Debraban, 1935). De tels niveaux calcaires sont également décrits au Géorgien supérieur dans les monts de Lacaune et dans le versant Sud de la Montagne Noire. Gèze (1952) propose que le niveau de quartzite blanc d'extension régionale entre les micaschistes quartzeux dit "inférieurs" et les micaschistes noirs correspond au banc dit "de la dentelle" dans le Tremadocien inférieur du versant Sud de la Montagne Noire. D'autre part, le log stratigraphique du secteur étudié est comparable à

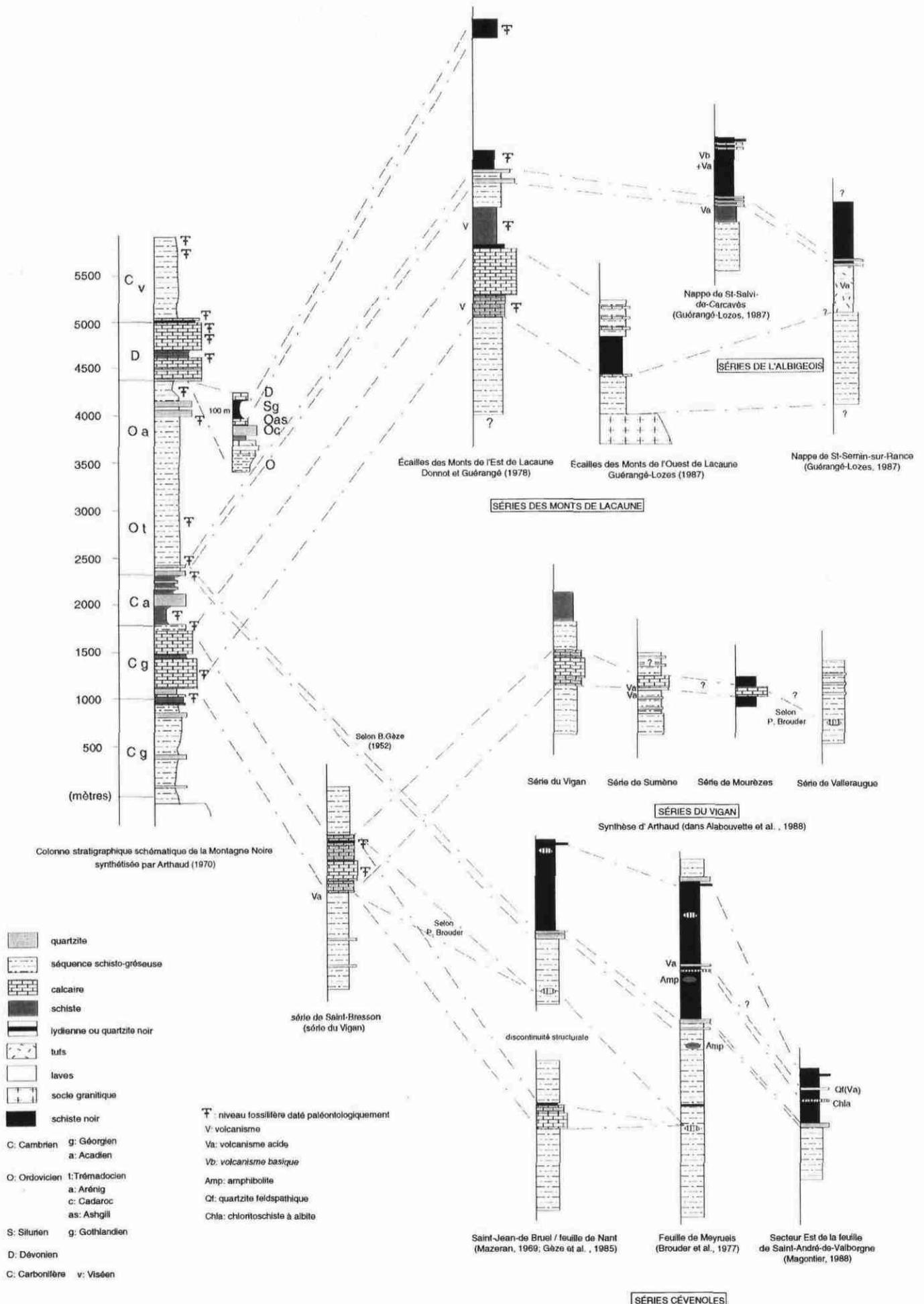


Figure 1 - 20: Colonnes stratigraphiques schématiques des séries paléozoïques du Sud du Massif central et principales corrélations proposées par différents auteurs. Les colonnes sont présentées des séries les mieux définies paléontologiquement au Sud (Montagne Noire) vers les séries les moins bien définies au Nord (Cévennes, Albigeois) en passant par les séries intermédiaires (Monts de Lacaune, Vigan).



ceux des séries de l'Albigeois, elles mêmes corrélées aux monts de Lacaune (Guérangé-Lozes, 1987). Toutes les corrélations semblent converger pour attribuer un âge Cambrien moyen à supérieur pour les micaschistes quartzeux dit "inférieurs", Trémadocien inférieur pour les quartzites blancs et Ordovicien inférieur (Trémadocien supérieur - Arénigien) pour les micaschistes noirs.

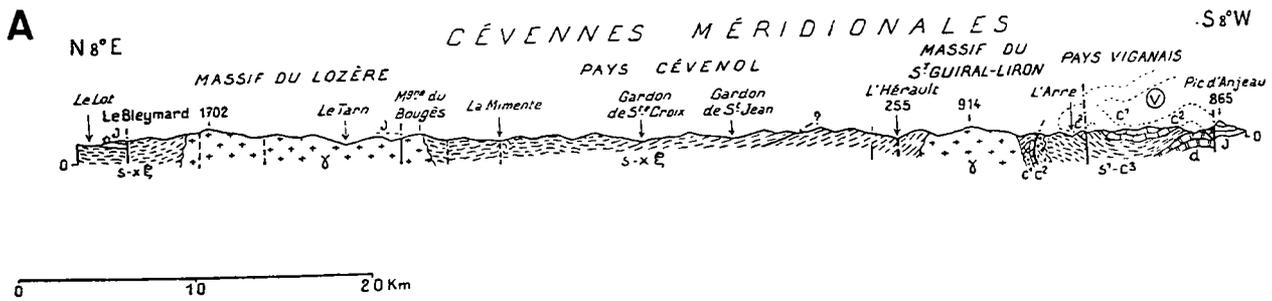
## *2. L'histoire tectono-métamorphique de la région étudiée*

La série sédimentaire et les orthogneiss de Peyrolles et de la Cézarenque ont été affectés par l'histoire tectono-métamorphique de l'orogène varisque. Les différentes interprétations structurales de la région sont reportées sur le tableau I-1 et les coupes régionales d'après les différents auteurs sur la figure I-21. Cet inventaire met directement en évidence l'avancée des travaux et les nombreuses divergences quant à leur interprétation. Les résultats et les hypothèses émis par les auteurs précédents faisant encore l'objet de polémique ont été vérifiés sur le terrain et seront discutés après la présentation de nos résultats. Les premières synthèses régionales des Cévennes datent de Demay (1931), Demay (1948) et Gèze (1949). Par la cartographie, l'établissement de coupes et de nombreuses études de terrain, ils proposent un âge paléozoïque des séries schisteuses, affectées par une déformation et un métamorphisme de faible degré, d'âge anté-stéphanien. Ils décrivent un premier aperçu de la structure régionale et émettent l'hypothèse de plis aigus ou d'écaillés imbriquées à vergence Sud pour expliquer les répétitions lithologiques (fig. I-21A). Cette approche est poursuivie par Brouder (1963, 1964) et Pellet (1972) qui définissent des niveaux repères et tentent de comprendre la structure générale, à l'aide de ces niveaux, en partant de l'hypothèse d'un grand pli couché déversé à l'Ouest, à cœur gneissique à l'Est de la faille de Villefort (gneiss de la Cézarenque) (fig. I-21-C). Brouder (1968, 1971) décrit plusieurs phases de déformation dont la première, majeure, est responsable de la structuration régionale en plissements isoclinaux d'axes EW déversés vers le Sud (fig. I-21B).

D'autre part, de Waard (1950, 1952) effectue les premières analyses microstructurales, met en évidence le caractère pré-tectonique et orthodérivé du massif de Peyrolles et présente les premières cartes de schistosité et de linéations du secteur étudié. La structure générale représente une large synforme entre les plutons granodioritiques du Mont Lozère au Nord et du Saint-Guiral et du Liron au Sud. La trajectoire de la linéation d'étirement est proche de NS. Cet auteur, ainsi que tous ceux qui suivirent décrivent la schistosité majeure comme une S2 parallèle aux plans axiaux de plis P2 replissant une S1 née sub-horizontale parallèle à la stratification. Les données microtectoniques de de Waard (1950) ainsi que celles acquises par Arthaud et al. (1969) évoquent, pour expliquer la structuration régionale, la présence de plis penniques de direction NS déversés vers l'Ouest, suivis par un plissement EW déversé vers le Sud. Ces caractéristiques sont retrouvées par des études lithologiques et pétro-structurales au Sud (Munsch, 1981) (fig. I-21D) et à l'Est du secteur étudié (Magontier, 1988). Ce dernier auteur interprète les deux phases de déformation majeure comme un continuum de déformation en régime cisailant. Cette dernière interprétation est compatible avec l'hypothèse d'un à plusieurs cisaillements plats à vergence Sud responsables de la structuration des Cévennes et évoquée en 1978 par Burg

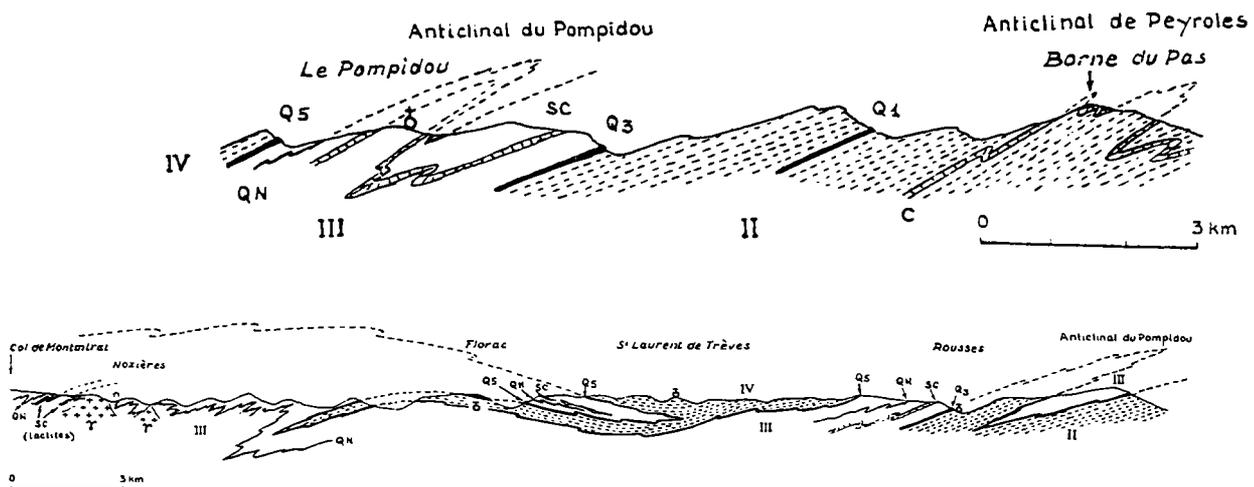
|                                | D1   | D2  | D3  | D4  | D5  | D6  | Méthodologie employée et localisation des études  |
|--------------------------------|--|---|---|---|---|---|---|
| <i>Demay<br/>1948</i>          | S1 globalement EW pentée vers le N<br>plis isoclinaux déversés vers le Sud<br>structuration isoclinale à poussée vers le Sud   |   |   |   |   |   | analyse cartographique et microtectonique<br>(schistosité, plissements) dans le secteur des Cévennes<br>synthèse avec toutes les observations des séries<br>paléozoïques méridionales |
| <i>Gèze<br/>1949</i>           | plis à vergence SSE<br>suivi d'extension   |   |   |   |   |   | observation structurale dans le secteur étudié  |
| <i>De Waard<br/>1952</i>       | phase synmétamorphe<br>formation d'une S1 globalement WNW-ESE<br>Linéation minérale NS<br>plis d'axes NNE-SSW  | phase synmétamorphe<br>formation d'une S1 globalement WNW-ESE<br>plis d'axe WNW-ESE<br>déversés vers le Sud   |   |   |   |   | étude microtectonique détaillée dans tout le secteur<br>schisteux compris entre les granodiorites de<br>St-Guiral-Liron et du Mont Lozère   |
| <i>Arthaud et al.<br/>1969</i> | phase synmétamorphe<br>formation d'une S1 de direction NS<br>linéation d'étretement NS à NE/SW<br>plis d'axes NS déversés vers l'W<br>mégastructures en plis couchés | phase synmétamorphe<br>formation d'une S2 de direction NS à NE/SW<br>plis d'axes NE-SW à EW<br>déversés vers le Sud   | schistosité de fracture S3<br>plis ouverts<br>d'axes ESE-WNW  |   |   |   | étude microtectonique localisée dans 3 secteurs<br>au SW du Saint-Guiral, au Nord de Peyrolles,<br>au SE du Mont-Lozère   |
| <i>Mazeran<br/>1969</i>        | phase synmétamorphe<br>formation d'une S1<br>plis d'axes NS déversés vers l'E  | phase synmétamorphe<br>formation d'une S2<br>plis d'axes NS à NE-SW déversés vers l'W   | schistosité de fracture S3<br>plis ESE-WNW  |   |   |   | étude pétro-structurale dans le secteur W de la<br>granodiorite de Saint-Guiral   |
| <i>Brouder<br/>1971</i>        | phase synmétamorphe<br>formation d'une S1<br>plis d'axes EW déversés vers le S<br>mégastructures en plis couchés   | phase synmétamorphe<br>formation d'une S2<br>plis d'axes NS déversés vers l'W   | schistosité de fracture pendant vers le NE<br>crénulation N120<br>plis N120 déversés vers le SW   | formation d'une schistosité de fracture<br>formation d'une linéation de crénulation<br>plis dissymétriques N140 déversés vers le SW | plis d'axes N60<br>linéation de crénulation<br>accompagnée de recristallisation | structures d'axes EW<br>déversés vers le S<br>(plis, crénulation) | étude lithologique et cartographie des niveaux<br>repères du secteur étudié   |
| <i>Pellet<br/>1972</i>         | hypothèse de mégastructures en plis couchés<br>d'axes EW déversés vers le S à SE<br>La Cézairene correspond à une nappe-pli<br>d'axe NS déversé à l'W                |   |   |   |   |   | étude lithologique et cartographie des niveaux<br>repères   |
| <i>Munsch<br/>1981</i>         | phase synmétamorphe<br>formation d'une S1<br>plis d'axes NS déversés vers l'W<br>mégastructures en plis couchés  | phase synmétamorphe<br>formation d'une S2: EW à NW-SE<br>linéation d'étretement et de crénulation<br>plis d'axes NE-SW à EW   | schistosité de fracture S3<br>linéation de crénulation NNE-SSW et EW<br>microplis ouverts   | schistosité de fracture de plan axial<br>linéation de crénulation // à axes des plis<br>plis d'axes EW déversés vers le Sud         | kink-bands et plis en chevron   |   | étude lithologique et structurale au SE du secteur étudié   |
| <i>Magontier<br/>1988</i>      | phase synmétamorphe<br>formation d'une S1<br>plis d'axes NS  | phase synmétamorphe<br>formation d'une S2<br>linéation d'étretement et de crénulation<br>réorientation des plis devenant<br>d'axes EW déversés vers le S<br>mégastructures en plis couchés EW<br>déversés vers le Sud | schistosité de fracture S3<br>linéation de crénulation et d'intersection<br>de direction NW-SE<br>plis ouverts, kinks ou plis en chevrons | kink-bands ou plis en chevron<br>d'axes globalement NS déversés vers l'W  |   |   | étude lithologique et pétro-structurale à l'Est<br>du secteur étudié et vers la Cézairene   |

Tableau I - 1: Tableau synthétique de l'histoire tectono-métamorphique des Cévennes d'après différents auteurs.



Coupe des Cévennes occidentales d'après Gèze (1949): le secteur étudié est interprété comme une série tranquille affectée par quelques plissements à vergence sud et déformée par la mise en place des granodiorites. Le pays Viganais est interprété comme une nappe à vergence Nord.

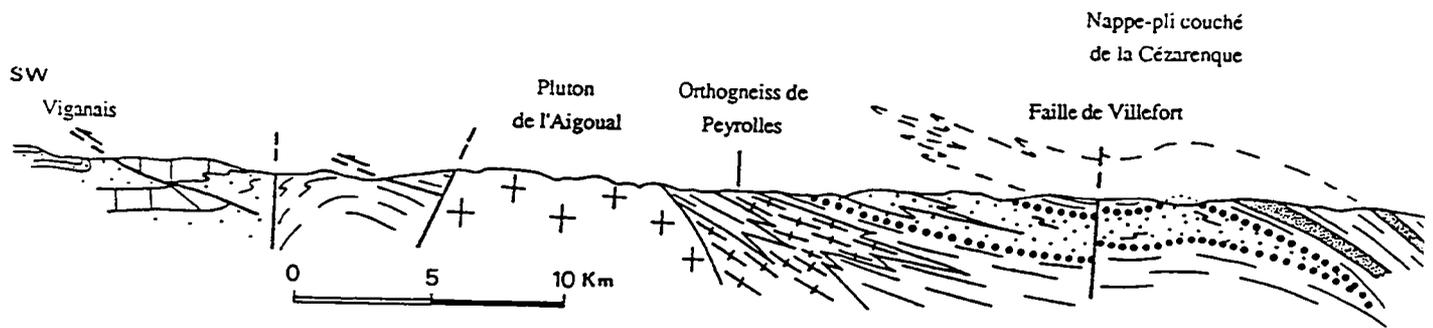
**B**



Coupes localisées dans le secteur étudié d'après Brouder (1968): Elles mettent en évidence la structuration de la région en plis isoclinaux d'axe EW déversés vers le Sud.

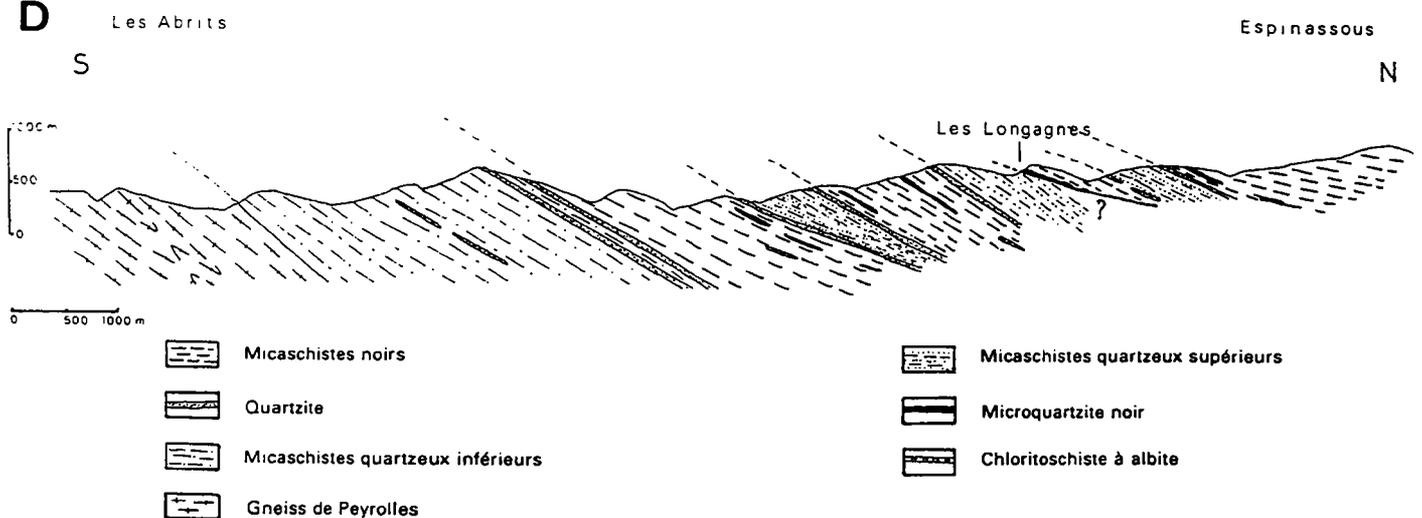
Figure I-21: Coupes expliquant la structuration régionale des Cévennes proposées par différents auteurs. Le tracé des coupes est indiqué sur la carte géologique des Cévennes de la figure I-18.

C



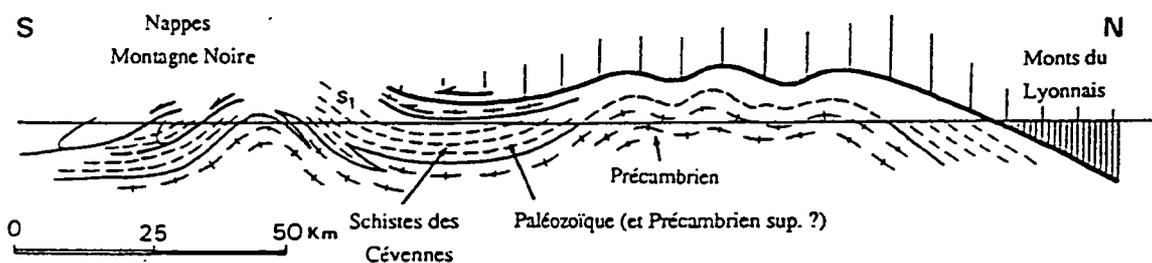
Coupe des Cévennes d'après Burg et Matte (1978) (en partie d'après Pellet, 1972): la structuration du secteur étudié est interprétée comme une nappe - pli couché d'axe NS déversée à l'Ouest.

D



Coupe localisée dans le secteur étudié d'après Munsch (1981): Elle met en évidence des répétitions de séquences interprétées par l'auteur comme un plissement isoclinal d'axe NS déversé vers l'W d'après l'orientation des microplis qui sont associés à cette déformation. On peut noter après les Longagnes d'autres répétitions suggérant l'hypothèse d'une nappe aux Longagnes.

E



Coupe hypothétique à travers le massif central suggérant une structuration des séries cévenoles due à un ou plusieurs cisaillements à vergence sud d'après Mattauer et Etchecopar (1977).

Figure I-21 (suite)

et Matte dans leur coupe à travers le Massif Central français. Cette hypothèse est proposée par Mattauer et Etchecopar (1977), afin d'expliquer le caractère sub-horizontale de la schistosité sur d'assez grandes surfaces. Elle repose sur les découvertes effectuées dans la chaîne varisque, témoignant de l'existence d'un chevauchement majeur, et de l'analogie qu'ils établissent avec la chaîne himalayenne. Outre le chevauchement majeur juxtaposant les séries du Mont Lyonnais sur les séries cévenoles, ils proposent un autre chevauchement à la base des orthogneiss de la Cézarenque sans preuves concrètes (fig. I-21E).

Ainsi, alors que tous les auteurs reconnaissent le caractère polyphasé de la déformation et l'existence de grands plis isoclinaux (Brouder, 1968; Arthaud et al., 1969; Pellet, 1972; Munsch, 1981; Magontier, 1988) ou de zones de cisaillement (Mattauer et Etchecopar, 1977) dans le secteur étudié, de nombreux désaccords existent sur le nombre de phases de déformation, leur chronologie, leur cinématique et la localisation précise des zones de chevauchements ou de plis de grande échelle.

Par ailleurs, la déformation majeure est contemporaine d'un métamorphisme régional dont les caractéristiques et l'origine diffèrent selon les auteurs. Demay (1948) et Munsch (1981) décrivent un métamorphisme épizonal qui augmenterait du Sud vers le Nord et qu'ils associent à la mise en place des nappes. Ce métamorphisme serait apparemment inverse d'après le pendage Nord de la schistosité (Munsch, 1981). Une nouvelle interprétation a été proposée récemment et décrit un métamorphisme de basse pression-haute température lié à la mise en place du dôme du Velay (Rakib, 1996). Son argumentation repose sur le tracé des isogrades et les données thermobarométriques qui indiquent une augmentation de température au fur et à mesure que l'on se rapproche du dôme (fig. I-22). Montrant le caractère syntectonique du métamorphisme, il associe implicitement la déformation des séries à ce même événement. Cependant les données géochronologiques existantes sur la mise en place du Velay et celles sur le métamorphisme régional ne sont pas compatibles. En effet, l'âge de mise en place du dôme du Velay obtenu par la méthode U-Pb sur monazite est de  $301 \pm 5$  Ma (Mougeot et al., 1997). Or le métamorphisme et la déformation associée sont datés entre 340 et 330 Ma par la méthode  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  sur des minéraux soulignant la linéation d'étirement majeur (muscovite, biotite et amphibole) (Caron, 1994) (fig. I-23). Les spectres  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , non satisfaisants dans le secteur étudié, sont toutefois bien définis à l'Est de la faille de Villefort, dans la région de la Cézarenque.

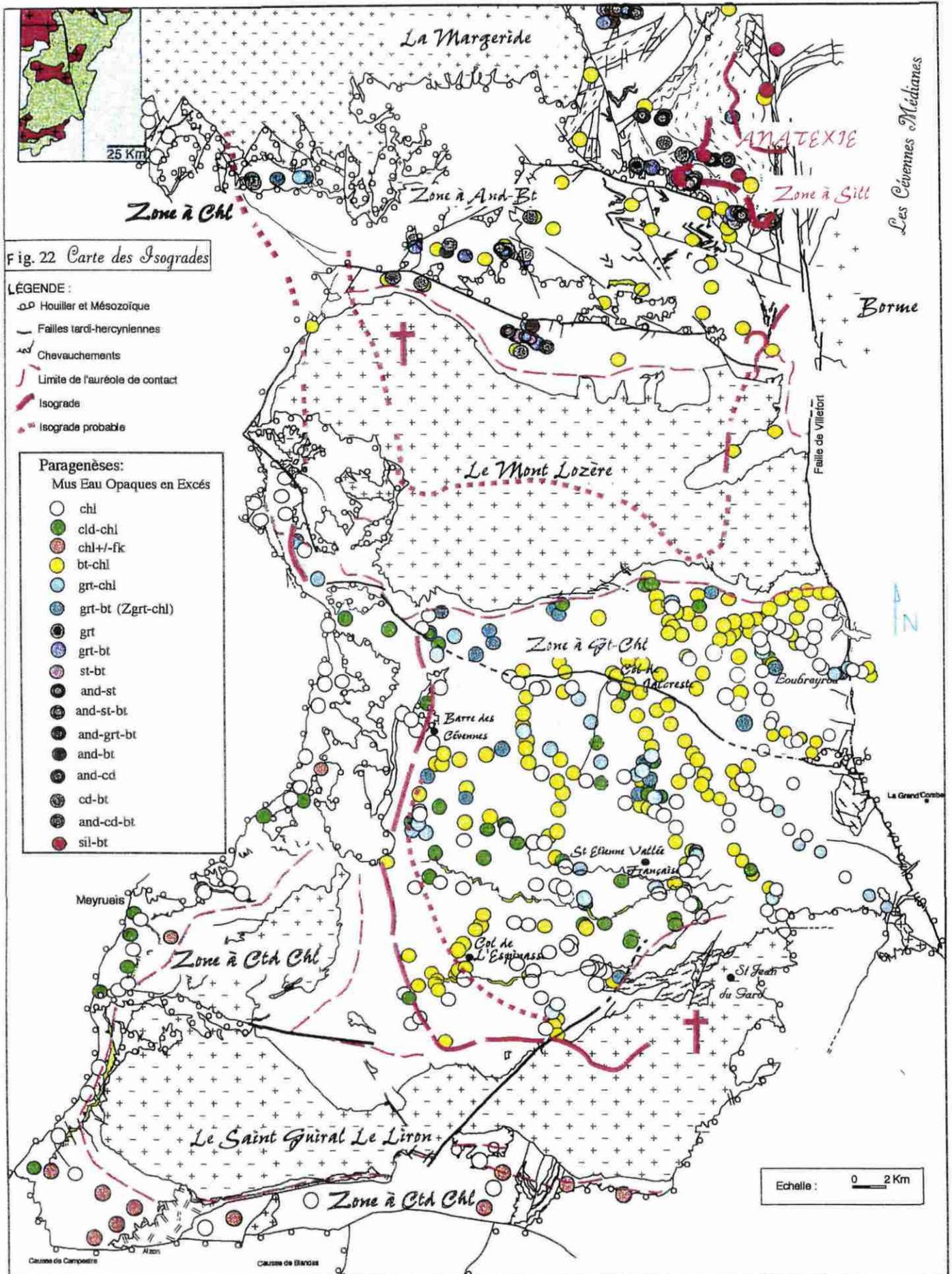
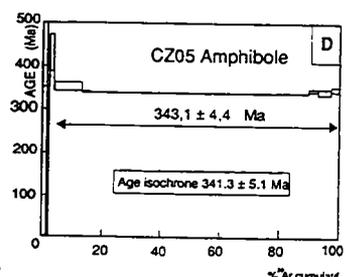
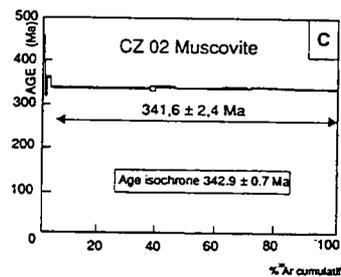
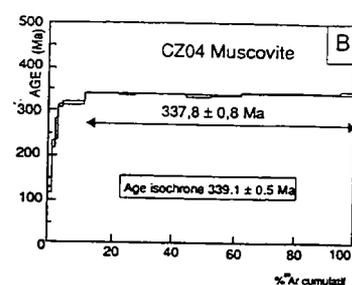
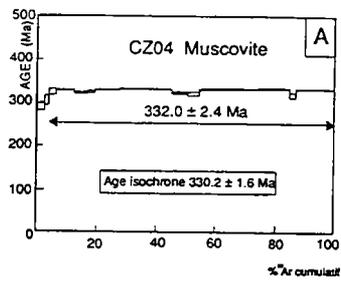
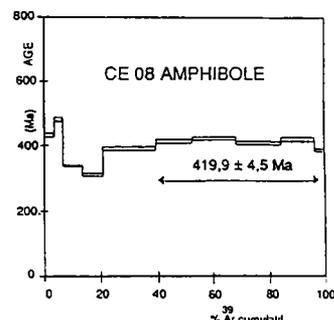
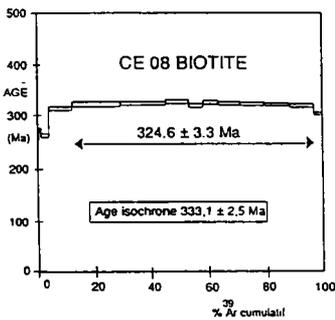
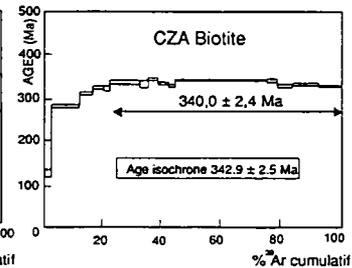
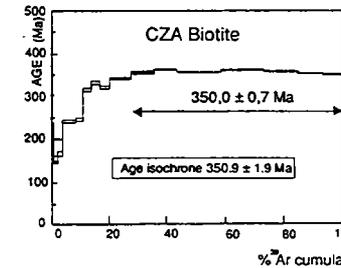
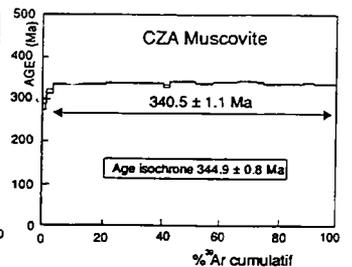
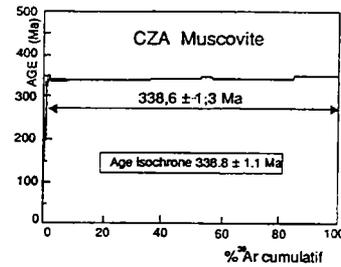
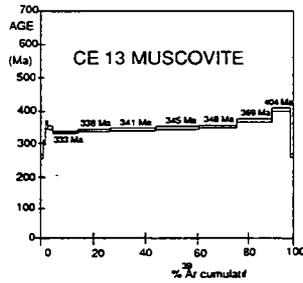
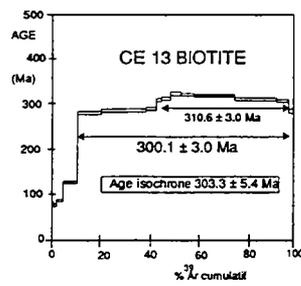
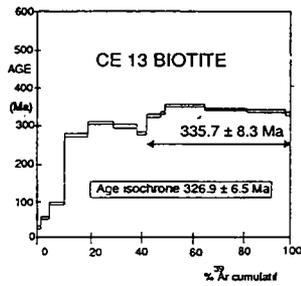
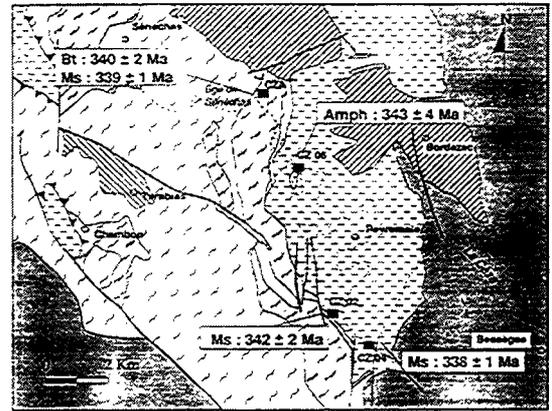
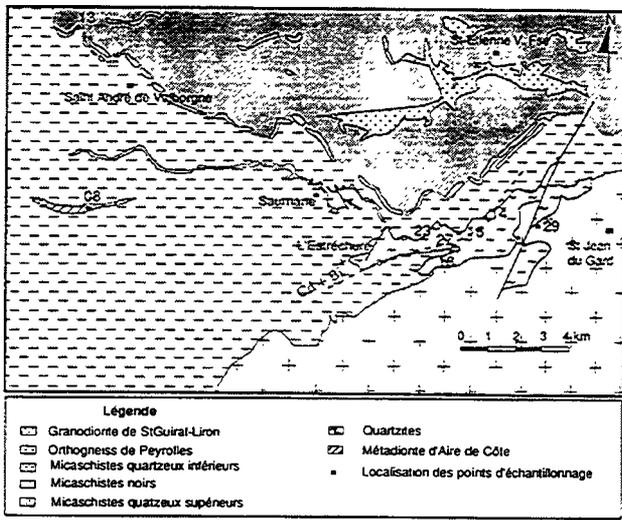


Figure I - 22: Carte des isogrades régionales dans les Cévennes occidentales d'après Rakib (1996).



Secteur Saint-Jean-du-Gard (Sud du domaine étudié)

Secteur Cézaire (Est de la faille de Villefort)

Figure 1 - 23: Âges obtenus par la méthode  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  sur les minéraux synchrones de la déformation varisque dans les Cévennes d'après Caron (1994).

## 1. Aspect régional

Cette synthèse bibliographique met en évidence les deux épisodes principaux qui ont affecté la région et sont susceptibles d'être responsables du caractère tectono-métamorphique des Cévennes: des chevauchements liés à l'épaississement crustal varisque et l'extension syn- à post-orogénique liée à l'effondrement de la chaîne. Excepté Rakib (1996) qui interprète le métamorphisme et la déformation associée comme une conséquence de l'anatexie vellave, entre  $319 \pm 11$  et  $301 \pm 5$  Ma (Mougeot et al., 1997), tous les autres auteurs s'accordent pour l'associer à la mise en place de nappes lors de l'épaississement crustal entre 330 et 340 Ma (âges d'après Costa, 1990; Caron, 1994). Cependant, bien que de nombreuses hypothèses aient été avancées quant à l'existence de nappes, il n'existe aucun schéma structural précis de la région. L'analyse cartographique et microtectonique classique amène à des reconstitutions de l'histoire tectono-métamorphique de la région fort différentes selon les auteurs. Le but régional de cette étude est de comprendre la géologie de ce secteur de la chaîne varisque. Des travaux préliminaires argumentent en faveur d'une mise en place de nappes lors de l'épaississement crustal (Arnaud et Burg, 1993). Dans le cas où cette interprétation se vérifie il convient d'une part de préciser la structure régionale en chevauchements et d'autre part de voir s'il n'existe pas une déformation tardive liée à l'extension post-orogénique. Cette étude s'intègre dans le débat plus général concernant la distribution des déformations extensives dans les chaînes de montagne (Van den Driessche, 1994; Malavieille, 1993; Brun et al., 1994).

## 2. Aspect thématique

Afin de comprendre la géologie des Cévennes, une partie de ce travail s'est intéressé à l'étude thématique des zones de cisaillement dans les séries schisteuses. Ces zones ont été peu étudiées et se caractérisent par une concentration d'exsudats de quartz associée à un gradient de déformation qui devient plus importante dans la zone de cisaillement (Sauniac, 1980; Brunel, 1983). Les exsudats de quartz sont interprétés comme résultant d'une cristallisation à l'intérieur de vides créés lors de la déformation progressive en cisaillement (Sauniac, 1980). Ces exsudats sont ensuite déformés en cisaillement et leur asymétrie est utilisée comme critère de cisaillement (Sauniac, 1980). Les zones de cisaillement des séries schisteuses présentent les caractères particuliers suivants:

- la présence de fluides indiquée par l'abondance des exsudats de quartz,
- des variations de composition lithologique de rhéologie variable,
- la présence d'une forte anisotropie (schistosité),

- la cristallisation des exsudats au cours de la déformation qui se comportent alors comme des objets rigides au sein d'une matrice plus déformable.

L'ensemble de ces caractéristiques donne un caractère particulier à ces zones de cisaillement (voir par exemple les structures en extension décrites par Platt et Vissers, 1980). Au cours de ce travail, les aspects suivants ont été abordés:

- la caractérisation du gradient de déformation: description des structures et microstructures spécifiques à ces zones.
- la détermination des mécanismes de déformation actifs (déformation intracristalline plastique, recristallisation dynamique, dissolution-recristallisation).
- la signification de la concentration des exsudats de quartz, l'origine du quartz et les mécanismes de la formation des exsudats.
- la détermination des conditions P-T de déformation dans ces zones de cisaillement.

D'autre part, de nombreuses études montrent l'importance des fluides, et notamment de surpressions fluides, dans les processus de déformation dans la croûte jusqu'à 12 km et 350/400°C (entre autres, Hubbert et Rubey, 1959; Secor, 1965; Sibson et al., 1975; Sibson et Poulsen, 1988; Cosgrove, 1993; Kennedy et Logan, 1997). Pour la plupart des auteurs, les zones de cisaillement constituent des lieux favorables à la circulation des fluides (Beach, 1976; Etheridge et al., 1983; O'Hara, 1988) jusqu'à des niveaux très profonds (550°C pour 10 Kb; Selverstone et al., 1991). D'autres travaux, tel ceux de Marquer et Burkhard (1992) montrent dans des séries métasédimentaires l'existence d'un système fermé (absence de circulations de fluide) et d'un système ouvert (présence de circulations de fluide), ce dernier étant localisé essentiellement au niveau d'un chevauchement majeur. Excepté les travaux de Selverstone et al. (1991), peu de travaux se sont intéressés à des domaines où les conditions P-T sont supérieures à 400°C et 4,5 Kb. Les zones de cisaillement dans les séries schisteuses des Cévennes constituent un cas dans le cadre de cette problématique pour des conditions de déformation de 500°C et 4,5 Kb environ.

Les résultats obtenus sur cet aspect thématique seront présentés dans le chapitre suivant. Ils permettent, entre autre, de définir les critères qui seront utilisés pour comprendre la structuration régionale des Cévennes.



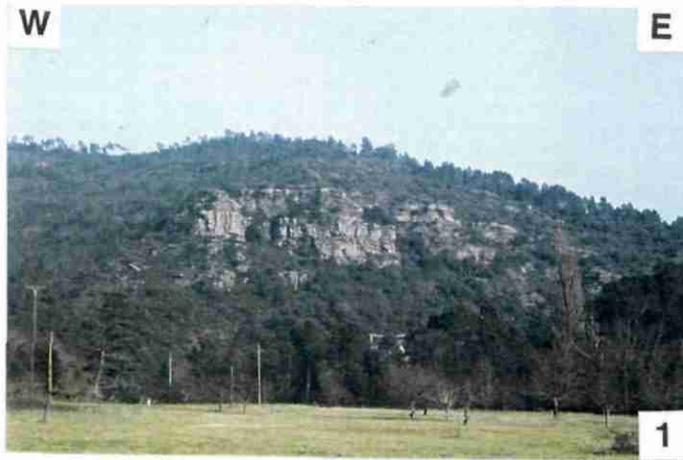
## CHAPITRE II

### CARACTÉRISATION DE LA DÉFORMATION VARISQUE

*A: Description des structures à l'échelle de l'affleurement*

*B: Description des microstructures à l'échelle de la lame mince*

*C: Discussion - conclusion*



**Planche 1: Lithologie et déformation régionale.** 1: Barre de quartzite blanc qui constitue un niveau repère d'extension régionale (Vallée Française, D983). 2: Stratification  $S_0$  dans les schistes, marquée par des séquences centimétriques quartzieuses à la base (niveaux clairs) et de plus en plus pélitiques vers le sommet (niveaux sombres), indiquant une polarité normale des couches. Une schistosité  $S_1$  est parallèle à la  $S_0$  (Moissac-Vallée-Française, D983). 3:  $S_1$  dans les orthogneiss, dans un plan parallèle à la  $L_1$ , les feldspaths fortement étirés, ont des queues de cristallisation asymétriques indiquant un cisaillement vers le Nord (bord du Gardon Saint-Jean, Ecolette, Vallée Borgne). 4: Linéation  $L_1$  marquée par l'étiement des grains de quartz sur les plans  $S_1$  (Route les Plantiers - Col du Pas, D193, Borgne du Pas). 5: Pli isoclinal  $P_1$  affectant la stratification des schistes (Route Col du Pas - Col de l'Espinass).

|                 |   |
|-----------------|---|
| <i>Partie A</i> |   |
|                 | <i>Description des structures à l'échelle de l'affleurement</i> |

## ***1. Déformation régionale***

### ***1.1. Schistosité S1***

La série schisteuse et le massif de Peyrolles sont affectés par une schistosité (S1) pénétrative. Dans les schistes, elle apparaît comme un débit fin de la roche, d'échelle millimétrique, marqué par l'aplatissement des phyllosilicates. A l'échelle régionale, cette schistosité est proche de la stratification (S0) marquée par les barres de quartzite qui s'individualisent dans le paysage (photo 1). A l'échelle de l'affleurement, S1 est parallèle à la stratification, soulignée par l'alternance de niveaux plus ou moins pélitiques. L'observation de grano-classement sur certains affleurements indique une polarité régionale normale (photo 2). Dans le massif de Peyrolles, S1 se présente comme une foliation pénétrative (photo 3), apparemment parallèle à la schistosité S1 dans les schistes.

### ***1. 2. Linéation d'étirement L1***

Dans les schistes, une linéation d'étirement est marquée par l'étirement de phyllosilicates (micas, chlorite) ou par l'étirement des grains de quartz matriciels sur les plans S1 (photo 4). Cette linéation d'étirement s'observe régionalement. Dans l'orthogneiss de Peyrolles, les grains de feldspath et de quartz sont allongés dans les plans de foliation S1 et la linéation minérale est soulignée par l'alignement des biotites.

### ***1. 3. Les plis P1***

Les plis P1, affectant la stratification, s'observent rarement (photo 5). Ils sont d'échelle centimétrique à décimétrique, isoclinaux, à flancs étirés et charnières légèrement épaissies. La direction de leurs axes varie de NNW-SSE à NE-SW. Dans les Cévennes méridionales, au Sud du Saint-Guiral et du Liron, où les séries sont moins affectées par la déformation, et où la stratification est mieux préservée, les plis P1 sont plus fréquents. Ils sont à charnières épaissies et flancs étirés et ont des axes orientés à N170, parallèles à la linéation d'étirement (Rakib, 1996). Au SW, dans la région d'Alzon, leurs axes ont une direction parallèle à la linéation d'étirement et leur déversement apparent est vers l'W (Najoui, 1996). Au Nord de Saint-Jean-de-Bruel leurs axes sont orientés de N10 à N20 parallèlement à la linéation d'étirement. Le déversement réel des plis, mis en évidence par le

granoclassement de la stratification, est vers le ESE (Meyer, 1990). Des linéations d'intersection observées essentiellement au Sud des Cévennes sont toujours parallèles à la linéation d'étirement (Meyer, 1990).

## ***2. Déformation localisée: les zones de cisaillement***

Au sein de la série schisteuse, il existe localement des zones d'une centaine de mètres d'épaisseur qui se caractérisent par le développement d'une deuxième schistosité, la présence d'une linéation d'étirement marquée, de nombreux plis, des plans de cisaillement et d'une richesse en exsudats de quartz. Ces zones se suivent à travers toute la région et se localisent systématiquement à proximité des niveaux repères où le contraste rhéologique entre ces niveaux et l'encaissant est important.

### **2. 1. Description des structures dans les schistes**

#### **2. 1. 1. Étirement et boudinage**

Une linéation d'étirement L2, très bien marquée dans ces zones, se présente sous plusieurs aspects:

- Un étirement des exsudats de quartz et des lits micacés de la roche (photo 6).
- Une structure fibreuse des grains de quartz sur les exsudats.

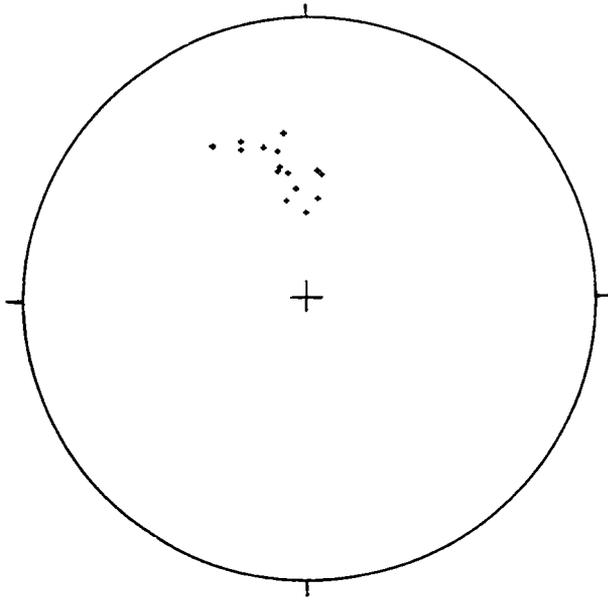
Sur un même affleurement, L2 et L1 ont la même direction (fig. II-1). L'orientation de L2 est toutefois moins régulière (diagramme plus diffus) que celle des linéations régionales L1. Elle varie de quelques degrés suivant les plans de schistosité et peut même apparaître courbe sur un même plan. Une étude statistique est donc nécessaire pour avoir une idée générale de l'orientation de L2 sur l'affleurement (fig. II-2).

L'étirement se caractérise également par un boudinage des exsudats de quartz et de la S1. Les exsudats boudinés apparaissent sous forme de zones de lentilles épaisses qui s'affinent localement. Des structures affectant la S1 se caractérisent par des boudins de schistosité. Sur l'exemple de la figure II-3, la S1, peu affectée à l'intérieur du boudin, prend une orientation qui converge vers la zone étirée au centre de laquelle on observe fréquemment un exsudat de quartz de forme ovoïde. Au sein du boudin, des microfentes à quartz ont des directions perpendiculaires à la S1. En dessous, on observe un niveau lithologique très pélitique, discontinu, dont les morceaux sont séparés par des exsudats de quartz.

#### **2. 1. 2. Plissements et schistosités superposées**

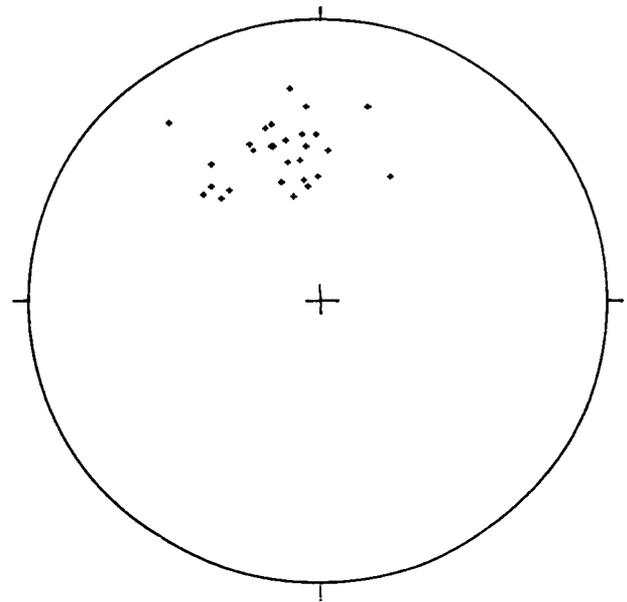
Au sein de ces zones, la S1 est généralement plissée, formant des plis P2 avec une deuxième schistosité S2 parallèle au plan axial de ces plis (fig. II-4 et II-5). Ces plis s'observent bien lorsqu'ils affectent d'épaisses lentilles d'exsudats de quartz parallèles à la S1. Ce sont des plis d'échelle centimétrique à décimétrique, isoclinaux, à charnière épaissie et flancs étirés.

A



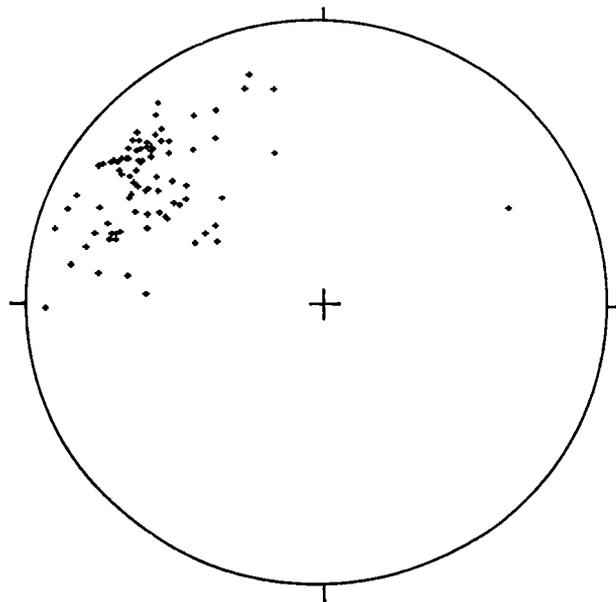
16 mesures

B



29 mesures

Figure II-1: Comparaison entre les linéations L1 (A) et les linéations L2 (B) sur l'affleurement du Col du Pas (diagramme de Schmidt, hémisphère inférieur).



85 mesures

Figure II-2: Dispersion des directions et plongements de la L2 au niveau d'un affleurement (les Martinets) (diagramme de Schmidt, hémisphère inférieur).

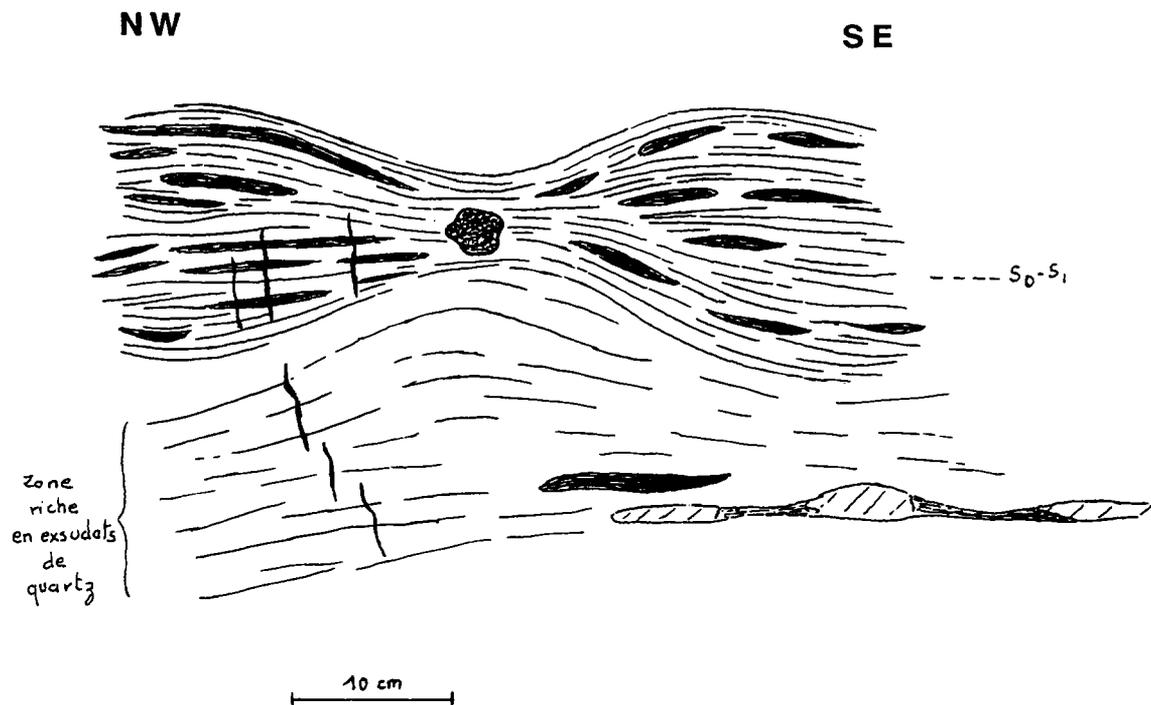


Figure II - 3 : S1 et niveaux lithologiques boudinés. (plan perpendiculaire à S1 et parallèle à L1 et L2) (Les Martinets). Les niveaux sombres représentent les exsudats de quartz.

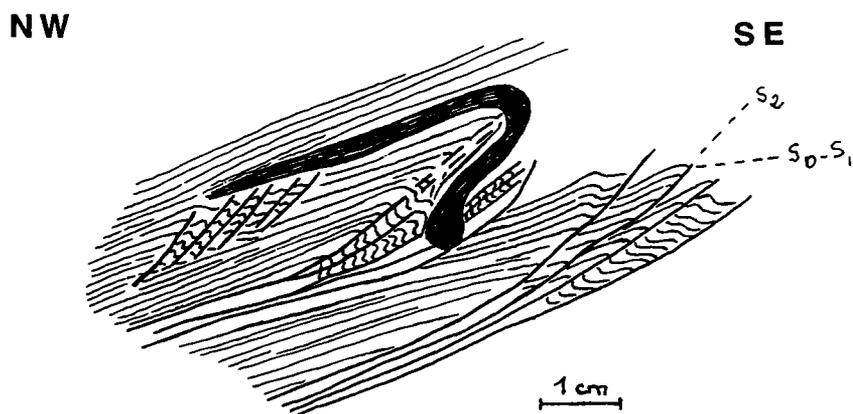


Figure II - 4 : Pli P2 affectant un exsudat parallèle à S1 et formation d'une S2 de plan axial (plan perpendiculaire à S1 et parallèle à L1 et L2) (Les Martinets). Les niveaux sombres représentent les exsudats de quartz.

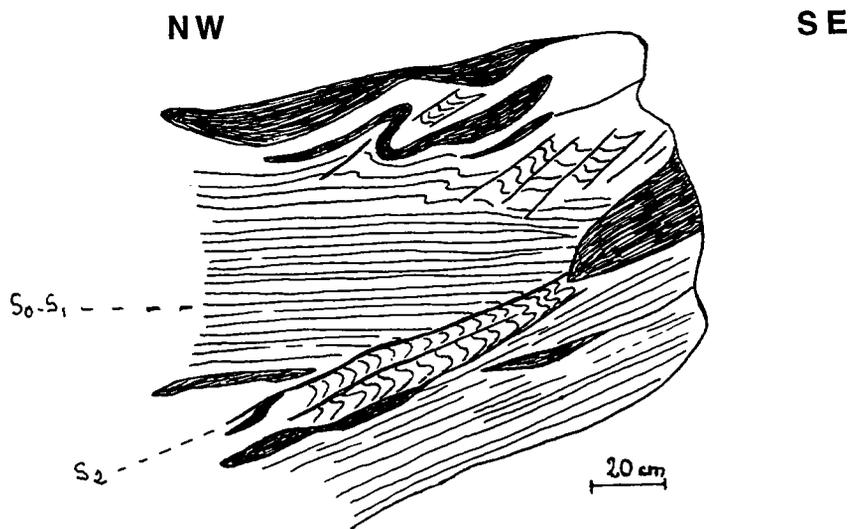


Figure II - 5 : Pli P2 affectant la S1 et les exsudats parallèles à S1, et formation de la S2 de plan axial (plan perpendiculaire à S1 et parallèle à L1 et L2) (Les Martinets). Les niveaux sombres représentent les exsudats de quartz.

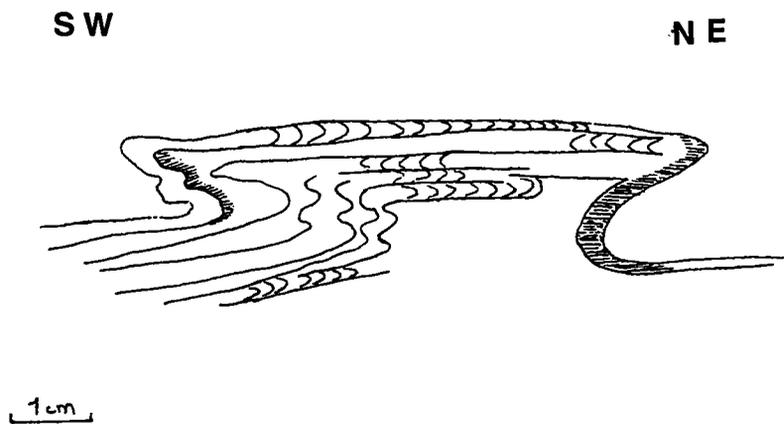
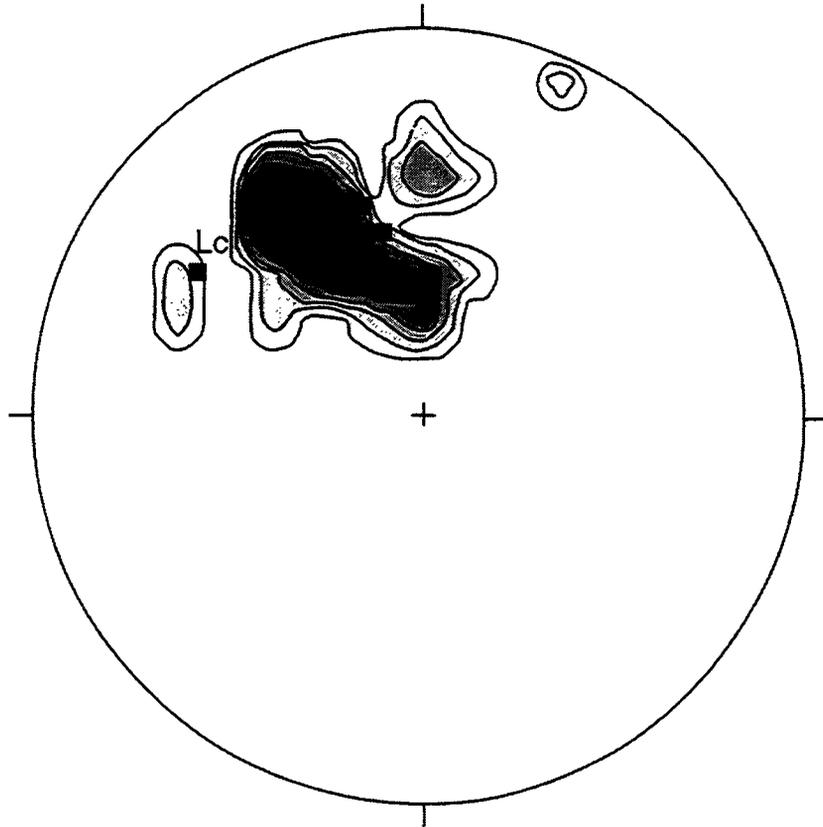


Figure II - 6 : Pli P2 affectant la S1. Plan perpendiculaire à S2 et L1 et L2 (Les Martinets).



Contours de densité des axes de plis P2 (2%, 6%, 10%, 14%, 18%) (20 mesures)  
 Le: pôle moyen des linéations d'étirement fibreuses du quartz (29 mesures)  
 Lm: pôle moyen des linéations d'étirement minérales sur S1 (16 mesures)  
 Lc: pôle moyen des linéations de crénulation sur S1 (10 mesures)

Figure II-7: Diagramme de Schmidt (hémisphère inférieur) représentant les différentes microstructures sur le même affleurement (Col du Pas, secteur SW de la carte).

Les axes sont fréquemment courbes (photo 7). Sur un même affleurement (fig. II-7), les axes de plis P2 sont bien concentrés avec des écarts de variation de direction de 30° seulement pour la plupart des plis. Cette orientation est distribuée de part et d'autre de la linéation d'étirement de manière asymétrique. La famille de plis à axe faisant un angle de 5 à 20° avec la linéation d'étirement dans le sens anti-horaire est plus représentée. Dans le plan perpendiculaire à S1 et parallèle à L1 et L2, la plupart des plis sont isoclinaux déversés vers le S ou SE selon la direction de la linéation d'étirement. Dans le plan perpendiculaire à la linéation d'étirement, les plis sont déversés généralement vers l'W ou le SW selon la direction de la linéation d'étirement. Cependant, certains plans perpendiculaires à la linéation montrent des plis avec un déversement dans les deux sens (fig. II-6).

Lorsque le plissement est local, la S2 se localise dans la charnière du pli (fig. II-4 et II-5). Dans la zone de charnière, la S1 se retrouve sous forme de microlithons. Au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la charnière, la S2 est oblique à la S1. La direction de S2 est proche de celle de S1 et son pendage est plus fort de 25 à 30° vers le Nord. La S1 apparaît en sigmoïdes entre les plans S2. Ces structures peuvent alors être confondues avec des plans de cisaillement reprenant une schistosité (fig. II-8). En dehors de la zone plissée la schistosité observée est une S1.

Le cas le plus fréquemment rencontré, est un plissement qui affecte l'ensemble de la roche. La S2 est omniprésente à l'échelle de l'affleurement et la S1 s'observe localement sous forme de microlithons dans les zones de charnière (photo 8). Dans les flancs, la schistosité est composite, c'est une S1-S2. Perpendiculairement à la S2, la S1 s'observe dans les plans parallèles et perpendiculaires à la linéation d'étirement (fig. II-9). Certains affleurements montrent la S2 dans les plans perpendiculaires à la linéation d'étirement où l'on distingue nettement deux schistosités tandis que dans les plans parallèles à la linéation d'étirement une seule schistosité s'observe. Dans ce cas précis, l'axe des microplis formant la S2 est parallèle à la linéation d'étirement. Dans certains secteurs, la géométrie en 3D montre des exsudats de longueur et largeur plurimétriques et d'épaisseur centimétrique parallèles à la S1, replissés isoclinalement entre les plans S2 (fig. II-10).

Parfois, une schistosité que nous nommerons également S2, oblique à la S1, s'observe à l'échelle de l'affleurement. L'obliquité entre les deux schistosités, toujours inférieure à 45°, est constante dans tout l'affleurement et ne semble pas liée à un plissement.

Le pendage de la S2 est, dans tous les cas, systématiquement plus fort vers le Nord que la S1 (fig. II-11).

Sur les plans de schistosité, une linéation de crénulation se développe fréquemment. Elle correspond à un microplissement des plans marquant la S1. Parfois, deux linéations de crénulation se recoupant mutuellement se distinguent sur un même plan de schistosité (photo 9). Dans ce cas, la linéation d'étirement a une direction correspondant à la bissectrice de l'angle aigu formé par les deux familles. Lorsqu'une seule famille de crénulation est représentée, sa direction est proche ou confondue avec celle des plis P2.

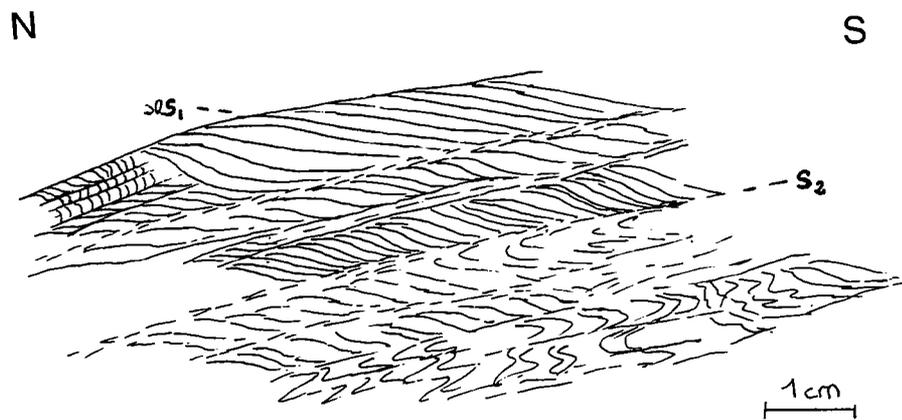


Figure II-8: Dessin à partir d'une grande lame mince de micaschiste montrant une S1 plissée avec développement d'une S2, parallèle au plan axial des plis .

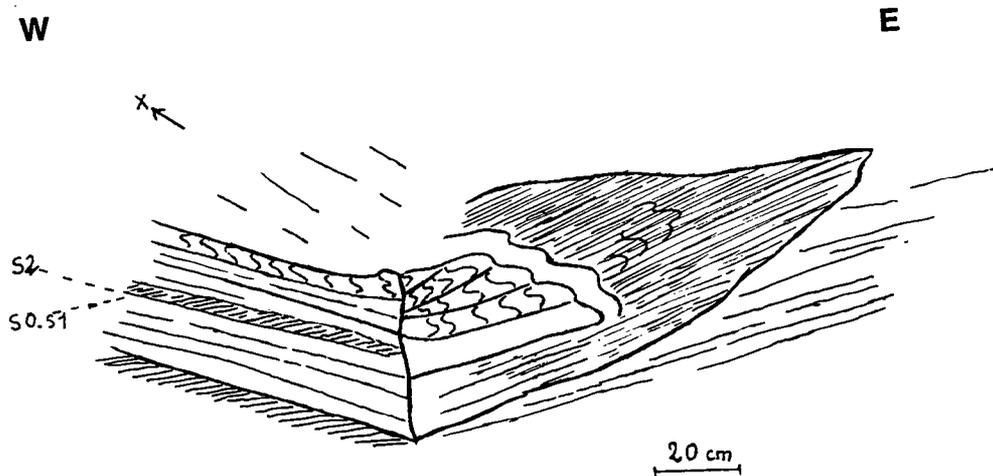


Figure II - 9 : S1 en microlithons entre les plans S2 observés dans les deux plans perpendiculaires et parallèles à L1 et L2, et perpendiculaire à S2 (Les Martinets).

### 2. 1. 3. Plans de cisaillement

Les plans de cisaillement et les critères de cisaillement s'observent très fréquemment dans ces zones de déformation localisée. Les affleurements perpendiculaires à la schistosité et parallèles à la linéation d'étirement sont caractéristiques (photo 10). La schistosité à pendage Nord est déformée et se parallélise de part et d'autre des nombreux plans de cisaillement. Cette schistosité est dans la plupart des cas une S2 (fig. II-12). L'espacement entre les plans est décimétrique et entre ces derniers la schistosité acquiert une forme en sigmoïde. Ces plans sont marqués par la réorientation et recristallisation de phyllites et sont généralement courbes. La figure II-13 montre deux exemples de géométries de plans de cisaillement en section parallèles à la linéation d'étirement et leur relation avec la schistosité. Leur direction variable selon les plans est différente de celle de la schistosité et leur pendage varie localement de 0 à 60°. Lorsqu'un exsudat de quartz parallèle à S1 est affecté par deux plans de cisaillement localisés à ses deux extrémités, il acquiert une forme asymétrique. La photo 11 montre en détail l'attitude de la schistosité et des exsudats de quartz parallèles à cette dernière à l'approche d'un plan de cisaillement.

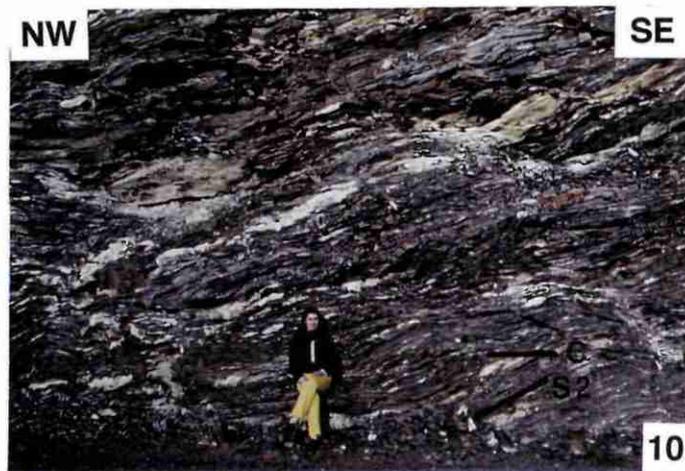
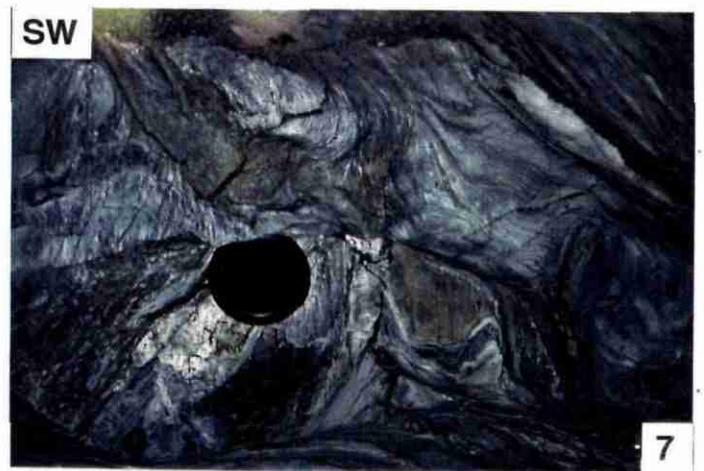
Les relations plan de schistosité-plan de cisaillement et l'asymétrie des exsudats de quartz indiquent toujours un sens de cisaillement vers le S à SE selon la direction de la linéation d'étirement.

### 2. 1. 4. L'abondance en exsudats de quartz

C'est le critère le plus visible sur le terrain pour repérer les zones à déformation localisée (photo 10). En dehors de ces zones les exsudats de quartz sont rares alors qu'ils peuvent atteindre 50% du volume de la roche dans ces zones de cisaillement.

Dans un même affleurement ils présentent des relations géométriques diverses avec la S1, la S2 ou les plans de cisaillement:

- La majorité des exsudats sont parallèles à la S1. Ce sont soit de fins filonnets quartzeux d'épaisseur millimétrique à centimétrique, soit des veines d'épaisseur centimétrique à décimétrique disposées parallèlement à la schistosité. Leur longueur et largeur sont très variables, centimétriques à pluri-métriques. Ils sont généralement déformés avec la S1 et sont soit plissés (fig. II-4 et II-5), soit étirés (fig. II-3) et parfois boudinés (fig. II-14), soit cisailés (fig. II-12).
- Certains exsudats sont obliques à la S1 mais parallèles à S2 (fig. II-5) ou aux plans de cisaillement (fig. II-12). Ils ont généralement une forme en lentille entre les plans de schistosité, ou parallèle au plan de cisaillement.
- D'autres exsudats se localisent entre les boudins de schistosité S0-S1 (fig. II-3).
- De rares exsudats sont obliques à toutes les structures décrites auparavant. Ce sont des filons de longueur décimétrique à métrique et d'épaisseur décimétrique.



**Planche 2: Déformation localisée dans les zones de cisaillement schisteuses.** 6: L2 marquée par l'étirement des exsudats de quartz et des niveaux micacés (Route Saint-Jean-du-Gard à Saint-Etienne-Vallée-Française, D984, les Martinets). 7: Axes de plis P2 courbes affectant des exsudats de quartz (Route Saint-Jean-du-Gard à Saint-Etienne-Vallée-Française, D984, les Martinets). 8: Microlithons de S1 entre des plans S2 (Route Saint-Roman-de-Tousque - le Fès Roland, D141). 9: Linéations de crénulation conjuguées se recoupant mutuellement (Vallée Borgne, Pradelles, D907). 10: Affleurement, parallèle à la linéation d'étirement, d'une zone de cisaillement schisteuse. A noter l'allure sigmoïde de la schistosité entre les plans de cisaillement indiquant un cisaillement vers le SE et l'abondance en exsudats de quartz (Vallée Borgne, Pradelles, D907). 11: Détail d'un plan de cisaillement affectant la S2. La S2 se parallélise au plan de cisaillement lorsqu'elle s'en rapproche. Ceci donne une allure sigmoïde à la schistosité entre les plans de cisaillement et une forme sigmoïde aux exsudats de quartz syn-S1 utilisables comme critère de cisaillement vers le SE sur cette photo (Route Saumane - les Plantiers, D20, Sengle).

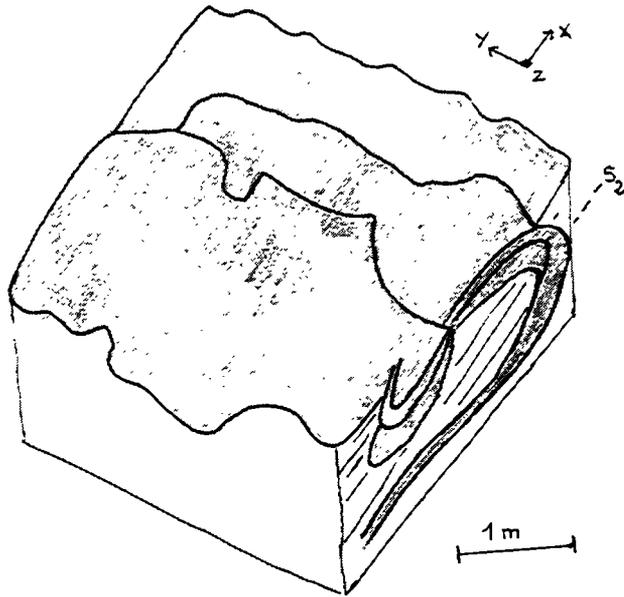


Figure II - 10 : Exsudats de longueur et largeur plurimétrique (en grisé) replissés. La S2 est parallèle au plan axial des plis (Les Martinets).

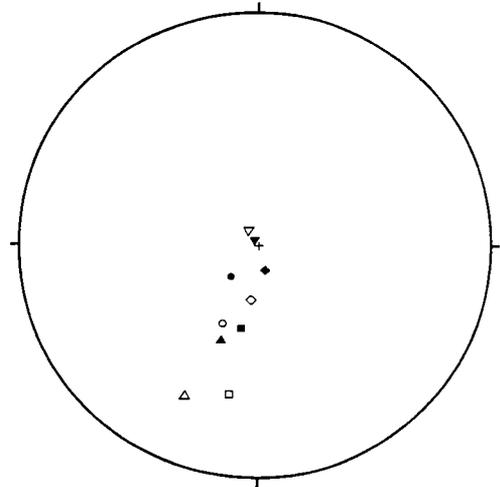


Figure II-11 : Diagramme de Schmidt (hemisphère inférieure) dans lequel sont reportés les pôles des plans de schistosité S1 et S2. Chaque symbole caractérise un affleurement, le blanc est la mesure de la S1 et le noir de la S2 (10 mesures).

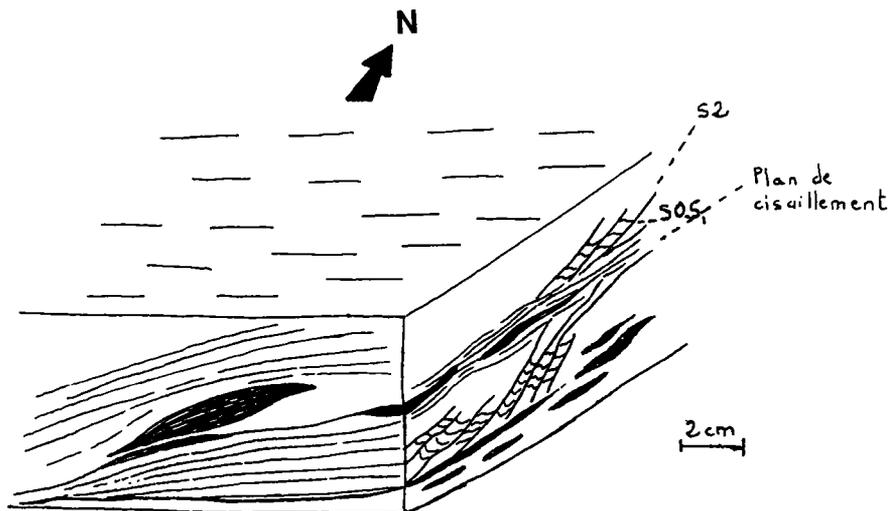


Figure II - 12 : Plan de cisaillement affectant la S2. Les niveaux sombres représentent les exsudats. A noter la forme en sigmoïde de l'exsudat cisailé. Les autres exsudats sont parallèles au plan de cisaillement.

## **2. 2. Relations entre les différentes microstructures**

Les microstructures décrites dans le paragraphe précédent s'observent au sein d'un même affleurement et certaines observations permettent de déterminer les relations entre elles. Elles indiquent que les microstructures de plissement, d'étirement et de cisaillement se sont faites de manière synchrone au cours d'une même déformation. En effet, selon les observations, le plissement, l'étirement ou le cisaillement s'effectue dans un ordre chronologique différent:

- La présence de la L2 marquée par les quartz fibreux sur les exsudats, plissée par les plis P2 indique qu'un étirement a précédé le plissement.
- Des exsudats, parallèles à une S1 fortement plissée (P2), sont étirés, boudinés ou cisailés indiquant un étirement ou un cisaillement postérieur au plissement.
- Les deux schistosités S1-S2 sont reprises par des plans de cisaillement. La figure II-12 montre en effet les deux schistosités entre deux plans de cisaillement espacés de 5 cm environ. Entre les deux plans de cisaillement les deux schistosités se distinguent. Lorsque l'on se rapproche des plans de cisaillement, elles se parallélisent à ces derniers. Au niveau des plans de cisaillement, une seule schistosité composite S1-S2 se distingue parallèle au plan de cisaillement. Ces plans contiennent une quantité d'exsudats de quartz très importante parallèles au plan de cisaillement.
- Parfois les plis décimétriques observés ont des flancs étirés caractérisés par des exsudats étirés et des boudinages de foliation. Au niveau de la charnière deux schistosités se distinguent (fig. II- 14).

Les exsudats de quartz se sont mis en place à divers moments au cours de la déformation progressive en cisaillement. La majorité des exsudats sont parallèles à la S1, sont déformés avec elle et sont donc relativement précoces.

## **2. 3. Interprétation et discussion**

Les observations dans les plans perpendiculaires à la S1 et S2 et perpendiculaires ou parallèles à L1 et L2 (fig. II-5; fig. II-6) montrent que les plis P2 correspondent à des plis non-cylindriques dont certains sont conjugués. De tels plis sont fréquemment rencontrés dans les zones de cisaillement et sont généralement interprétés comme une formation de plis à axes perpendiculaires à la linéation d'étirement qui ont subi une rotation amenant les axes dans une direction parallèle à la linéation d'étirement (Turner et Weiss, 1963; Sanderson, 1973; Bell, 1978; Escher et Watterson, 1974; Carreras et al., 1977; Berthé et Brun, 1980). Nous prenons la géométrie des plis décrits par Berthé et Brun (1980) (fig. II-15) pour comparaison avec les plis observés dans les Cévennes. Berthé et Brun (1980) interprètent la formation de ces plis au cours du fonctionnement dextre du cisaillement Sud-Armoricain à 320 Ma qui affecte des séries pélitiques et greywackeuses.

Orientation des plans de cisaillements

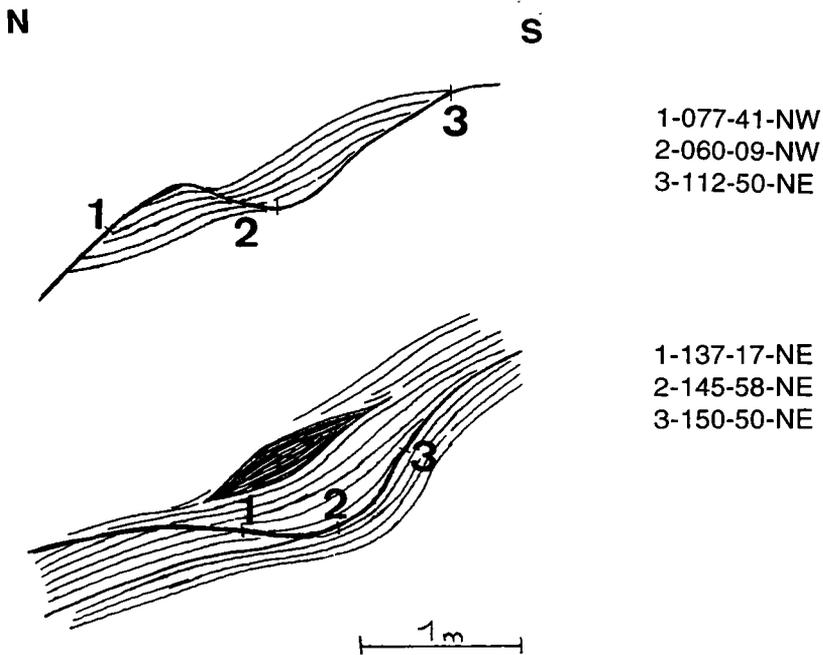


Figure II - 13 : Géométrie des plans de cisaillement affectant la S1. Le niveau sombre représente un exsudat de quartz. La linéation d'étirement est N150. (sud du secteur sur la D20 au niveau de Sengle).

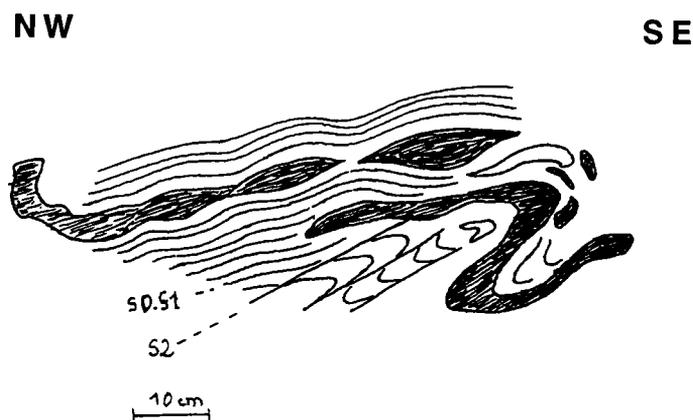


Figure II - 14 : Pli P2 aux flans étirés et boudinés et une S2 de plan axial au niveau de la charnière (plan perpendiculaire à S1 et parallèle à L1 et L2) (Les Martinets). Les niveaux sombres représentent les exsudats de quartz.

La géométrie des plis non cylindriques (fig. II-15a) est similaire à celle des plis P2 de cette étude et se caractérise par:

- Des axes courbes qui s'amortissent le long de l'axe (photo 7) dont la direction est oblique à la linéation d'étirement (fig. II-7). Cependant l'obliquité entre la linéation d'étirement et les axes de plis ne dépasse généralement pas les 30° dans les Cévennes contrairement aux plis décrits par Berthé et Brun (1980).
- Une forme asymétrique des plis dans les plans parallèles et perpendiculaires à la linéation d'étirement et perpendiculaires à la schistosité compatibles avec le sens de cisaillement (fig. II-5).

Les plis conjugués (fig. II-15b) présentent également des similitudes avec les plis P2 et se caractérisent par:

- Deux familles d'axes, l'une proche, l'autre fortement oblique (50 à 60°) à la linéation d'étirement. Dans les Cévennes, on n'observe pas la famille fortement oblique à la linéation d'étirement, l'obliquité est peu importante pour les deux familles (elle ne dépasse jamais 30°).
- Plis asymétriques dans les sections perpendiculaires à la schistosité et parallèles à la linéation d'étirement compatibles avec le sens de cisaillement.
- Plis à double déversement dans les sections perpendiculaires à la schistosité et perpendiculaires à la linéation d'étirement (fig. II-6).

Le modèle de développement de plis durant une déformation progressive en cisaillement proposé, entre autres, par Berthé et Brun (1980) (fig. II-16) peut être appliqué pour expliquer les plis conjugués et non cylindriques observés dans les Cévennes. Selon Berthé et Brun (1980), les conditions initiales sont la présence de roches anisotropes (litage, schistosité) et d'une hétérogénéité qui permettra l'initiation du pli par effet mécanique. Par la suite le pli peut s'amplifier passivement. La formation de plis non-cylindriques ou de plis conjugués dépendra de l'orientation initiale du plan à plisser par rapport au plan de cisaillement. Cependant, dans les Cévennes, les axes de plis sont bien concentrés et sont légèrement obliques à la linéation d'étirement. Cette caractéristique se retrouve régionalement (voir chapitre IV, fig. IV-11), notamment dans la partie SE du secteur étudié. La linéation d'étirement fait toujours un angle de 10 à 30° dans un sens horaire avec les axes de plis. Une possibilité pour expliquer cette caractéristique est de considérer la présence d'une composante en décrochement. La combinaison d'une composante en décrochement et d'une composante en chevauchement permet la formation de plis obliques à la linéation d'étirement (Cowards et Potts, 1983; Ridley, 1986). Plus la composante en décrochement est importante et plus l'obliquité entre l'axe des plis formés et la linéation d'étirement sera faible (fig. II-17). L'axe de ces plis sera ensuite réorienté au cours de la déformation en cisaillement dans la direction de la linéation d'étirement.

La schistosité S2, parallèle au plan axial de ces plis est synchrone du plissement.

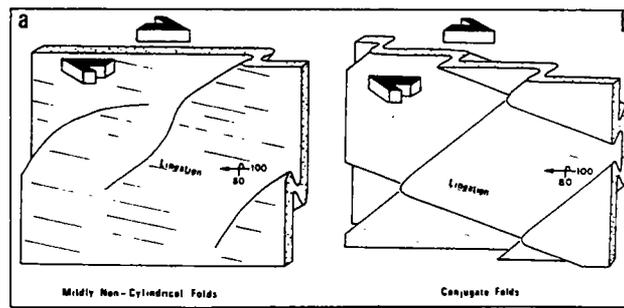


Figure II-15 : Géométrie des plis non cylindriques et conjugués d'après Berthé et Brun (1980).

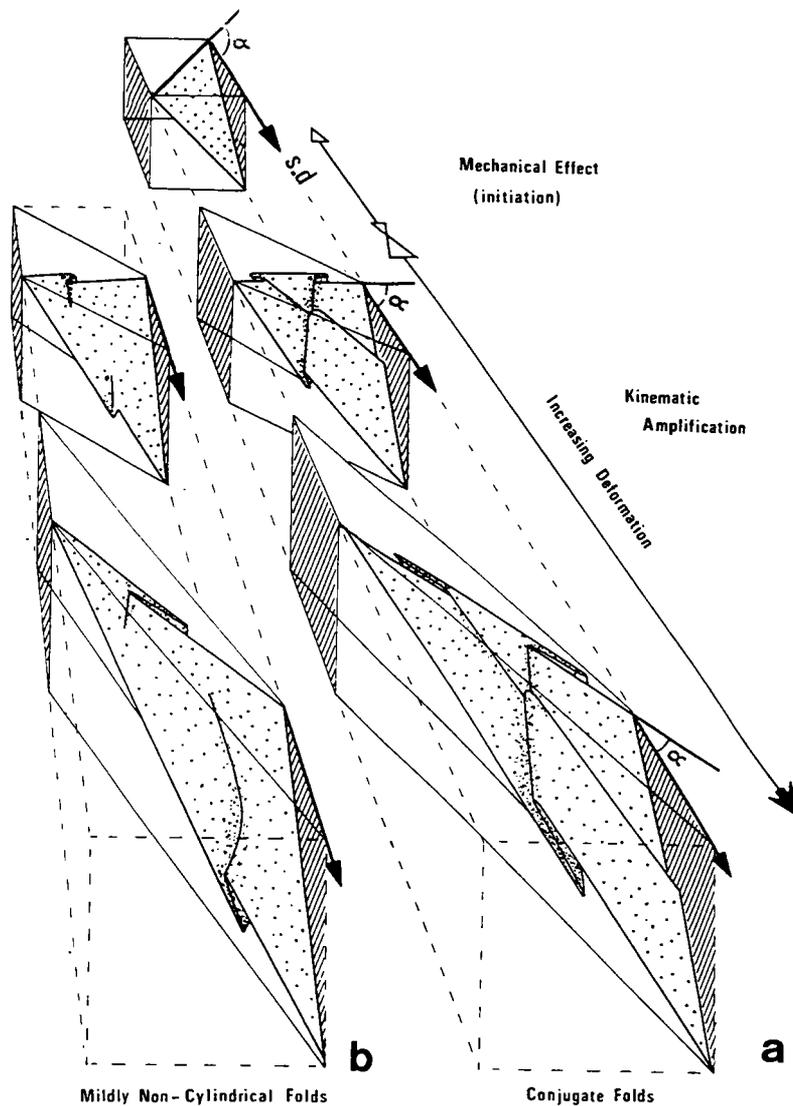


Figure II - 16 : Modèle purement géométrique du développement des plis non cylindriques et conjugués pendant la déformation progressive en cisaillement simple (le plan avec les lignes diagonales est le plan de cisaillement). Si la surface à plisser fait un angle initial ( $\alpha$ ) de plus de  $90^\circ$  avec la direction de cisaillement (s. d.), des plis conjugués se développent (b). Si l'angle initial ( $\alpha$ ) est inférieur à  $90^\circ$ , un seul jeu de plis se développe (a). d'après Berthé et Brun (1980)

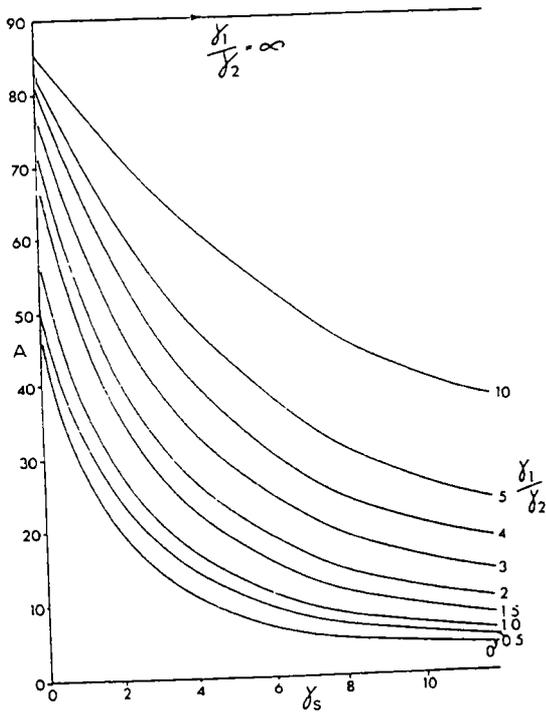


Figure II-17: Rotation passive des axes de pli et diminution de leurs angles A avec la direction du transport du chevauchement en fonction de l'augmentation de la déformation cisailante totale  $\gamma_s$ . Le  $\gamma_s$  résulte de la combinaison des déformations cisailantes  $\gamma_1$  et  $\gamma_2$ , correspondant respectivement au cisaillement en chevauchement et au cisaillement en décrochement (d'après Coward et Potts, 1983).

Figure II-18: Modèle de formation du boudinage de schistosité d'après Platt et Vissers (1980).

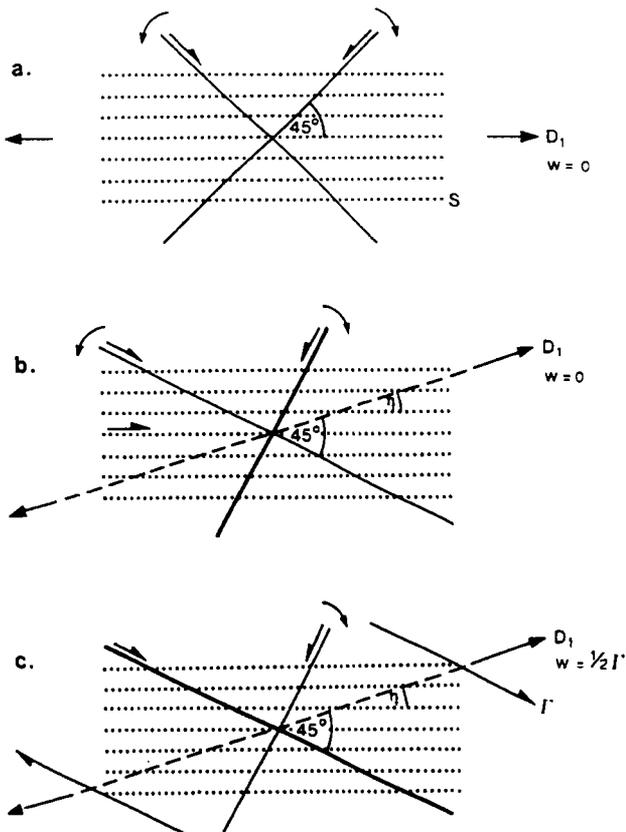
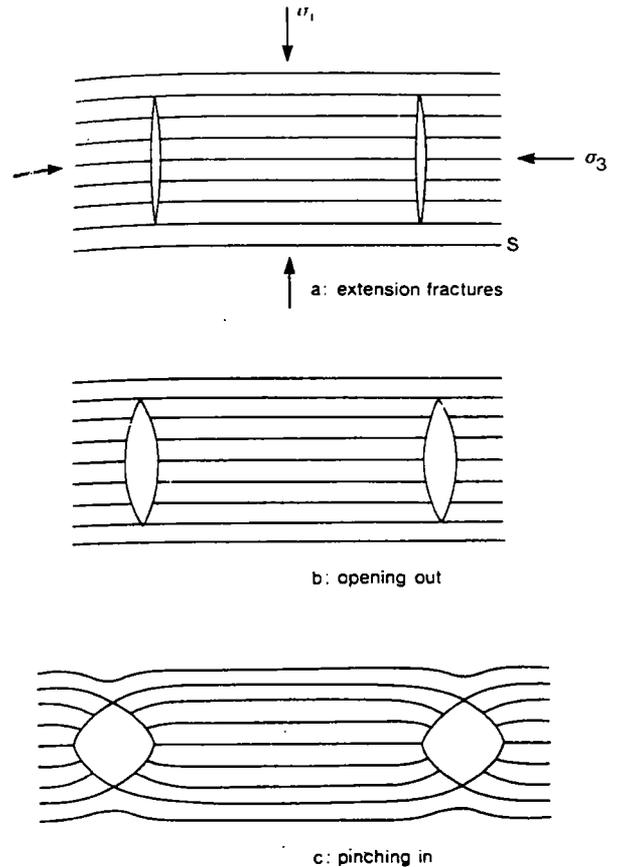


Figure II-19: Formation des bandes de cisaillement en extension d'après Platt et Vissers (1980). (a) Cas d'une déformation coaxiale avec  $D_1$  parallèle à S. Le sens de rotation des bandes de cisaillement est donné par les flèches courbes. (b) Déformation coaxiale avec  $D_1$  à h degré de la schistosité. Le sens possible associé au glissement sur la schistosité est montré. (c) Cisaillement simple avec un taux j à  $(45 - h)$  de la schistosité. Dans (b) et (c) la bande de cisaillement en trait épais sera dominante.

Le boudinage de schistosité peut se former lors d'une extension parallèle à une anisotropie préexistante d'après le modèle proposé par Platt et Vissers (1980) (fig. II-18). Entre les boudins, des exsudats de quartz ovoïdes observés sont liés à la rupture de la schistosité lorsque l'étirement dépasse le seuil de résistance de la roche à la rupture.

Les plans de cisaillement observés dans les zones de cisaillement faisant un angle d'environ  $30^\circ$  avec la schistosité correspondent à l'équivalent des plans C' selon la nomenclature de Berthé et al. (1979). Ce sont des microstructures caractéristiques des zones de cisaillement affectant un matériel déjà structuré et qui peuvent se former selon le modèle proposé par Platt et Vissers (1980) (fig. II-19).

En résumé, l'ensemble des microstructures observées dans ces zones sont caractéristiques d'une déformation non-coaxiale affectant un matériel anisotrope. Ce sont donc des zones de cisaillement affectant une roche déjà schistosée régionalement lors du premier stade de déformation. Elles se caractérisent par la coexistence de structures compressives et extensives fréquemment observée dans les zones de cisaillement (Ramsay, 1980a; Coward et Potts, 1983).

#### ***2.4. La déformation localisée dans les orthogneiss***

Le massif de Peyrolles est également affecté localement par une deuxième déformation. Un deuxième débit s'observe dans des zones de couloirs qui peuvent correspondre soit à des charnières de pli, soit à des zones de cisaillement. Dans ce dernier cas, ces zones ne se poursuivent pas régionalement comme cela s'observe dans la série schisteuse. Les deux schistosités font un angle qui peut atteindre jusqu'à  $30^\circ$ , la S2 étant toujours plus pentée vers le Nord. Une deuxième schistosité s'observe également à proximité du contact entre les orthogneiss et les schistes. Elle correspond à un débit de l'ordre du centimètre marqué par les micas. Entre deux plans, la foliation S1 apparaît sous forme de microlithons. C'est une schistosité de crénulation. Localement des plis serrés, centimétriques à métriques, replissent la foliation S1. Une linéation de crénulation, correspondant à l'axe de petits plis serrés parallèles entre eux, affecte fréquemment les plans S1. Sa direction EW est constante sur l'ensemble du massif.

## *Introduction*

Une centaine de lames minces de schistes, quartzites et exsudats de quartz ont été effectuées dans des échantillons prélevés dans les zones de cisaillement. Nous allons dans un premier temps décrire les microstructures caractéristiques observées au microscope optique. L'étude des microstructures s'est concentrée sur les relations entre la S1 et la S2 afin de déterminer la nature de ces plans. Nous avons également observé les microstructures pouvant être liées à la croissance des exsudats afin de pouvoir discuter des mécanismes possibles de leur formation. Afin de mieux caractériser les mécanismes de déformation actifs dans ces zones, nous avons effectué une étude des microstructures et orientations préférentielles du quartz dans les exsudats et dans les quartzites. Une cinquantaine de lames minces dans les exsudats de quartz présentant diverses relations avec la déformation, a été observée au microscope optique. Les différentes microstructures rencontrées sont décrites et présentées avec les fabriques de quartz obtenues à la platine universelle selon la méthode de Bouchez (1977). Les diagrammes de répartition des axes  $\langle c \rangle$  du quartz et de densité ont été effectués par le programme fabric 7 (Mainprice, 1992, non publié). Pour les diagrammes de densité, les contours sont à 1%, 2%, 3%, 4% et 8%. Pour la totalité des diagrammes présentés, la ligne EW représente la schistosité majeure et la linéation d'étirement est horizontale dans ce plan. Plusieurs quartzites présentant des orientations préférentielles des axes  $\langle c \rangle$  du quartz ont également été étudiés. Cinq échantillons présentant les fabriques les plus caractéristiques ont été passés au goniomètre de texture par Martin Casey à l'ETH de Zurich. Les conditions analytiques et les méthodes de calculs des figures de pôles utilisées sont celles décrites dans Schmid et al. (1981). Les exsudats de quartz renseigneront sur la déformation localisée dans les zones de cisaillement. Pour les quartzites, les données pourront éventuellement nous renseigner sur la déformation régionale. Une étude détaillée des microstructures et fabriques de quartz d'un exsudat plissé isoclinalement est également présentée afin de renseigner sur le mécanisme de plissement et les relations cisaillement-plissement.

## *1. Microstructures dans les micaschistes*

### **1. 1. Critères de cisaillement**

Les critères de cisaillement sont fréquemment observés dans les lames minces perpendiculaires à la schistosité et parallèles à la linéation. Les critères les plus fréquents sont les suivants:

- cristallisations dans les "zones abritées",
- structures en poisson des micas,
- et des indices de rotation des porphyroblastes (inclusions sigmoïdes).

Tous les critères observés indiquent un sens de cisaillement vers le S à SE selon la direction de la linéation d'étirement.

### **1. 2. Schistosités superposées**

Dans les zones de cisaillement, de nombreuses lames présentent clairement les deux schistosités, la S1 et la S2, observées sur les affleurements. De fins filonnets d'exsudats de quartz parallèle à la S1, plissés et se retrouvant en microlithons entre les plans S2 sont souvent observés. La forme des microlithons est inversée de part et d'autre de la S2 (photo 12). Les microlithons sont très décalés de part et d'autre de la S2 ou s'arrêtent brutalement le long des plans S2 (photo 12). Le contact entre l'exsudat en microlithon et le plan S2 est franc (photo 13 et 14). Les phyllites composant la S2 sont accolées aux grains de quartz constituant le microlithon. Aucune variation d'orientation de forme des grains de quartz, d'orientation d'axes <c> du quartz ou de taille de grain n'est observée dans le microlithon de quartz lorsque l'on se rapproche du plan S2 (photo 15). Lorsque la S1 plissée en microlithons est marquée par l'aplatissement des phyllites, les phyllites ne sont pas progressivement déformées à l'approche du plan S2. La photo 13 montre bien des muscovites syn-S1, en forme de baguettes rectilignes, juxtaposées avec une forte obliquité aux muscovites marquant la S2. La S2 est essentiellement marquée par des phyllites (muscovite, chlorite, biotite) et se caractérise fréquemment par une concentration de minéraux d'oxydes de fer et de minéraux accessoires aplatis dans le plan S2 (photo 13).

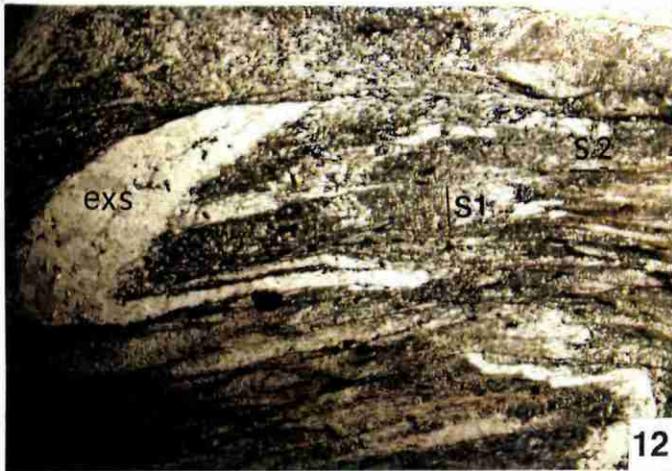
Ces observations indiquent que la S2 est une schistosité de crénulation et correspond à un plan de dissolution. Aucune composante en cisaillement n'est mise en évidence le long de ces plans. Entre les plans S2, les microlithons correspondent aux charnières des microplissements. Les flancs des plis sont soit transposés dans la S2, soit dissous dans le cas des filonnets de quartz ou aucune trace des flancs du filonnet de quartz n'est observée.

## **2. Microstructures en relation avec la cristallisation des exsudats de quartz**

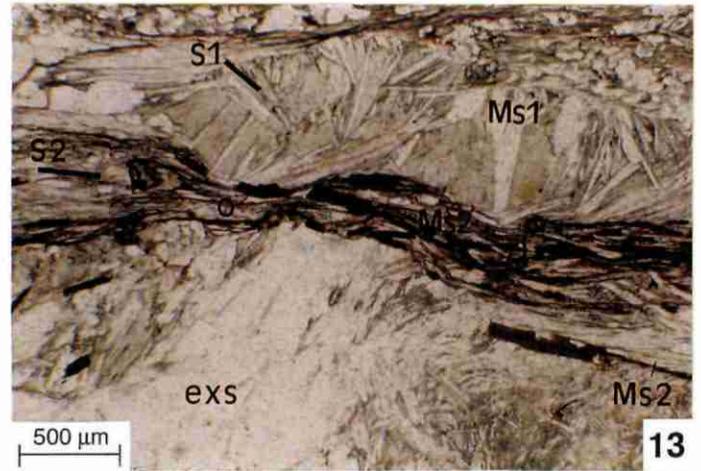
### **2. 1. Description des microstructures**

Dans la suite du texte, le terme matrice se réfère à la roche encaissante des exsudats de quartz. Les exsudats ont été déformés après leur croissance et la majorité des microstructures liées à leur croissance a été détruite. Cependant certaines caractéristiques communes peuvent être liées à leur cristallisation:

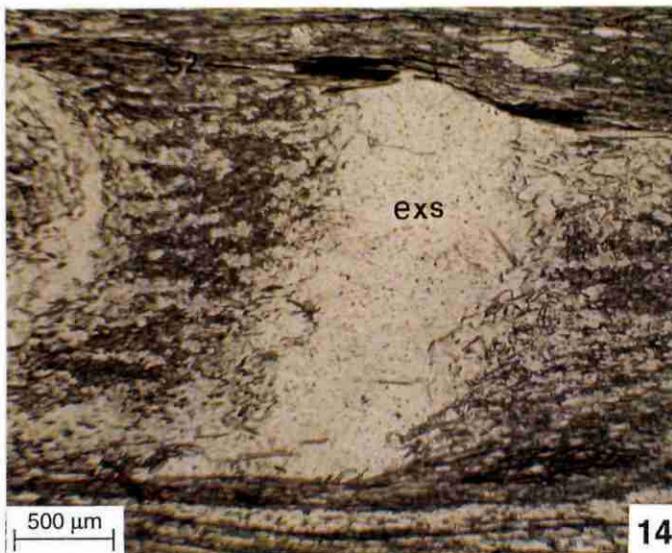
- De nombreux exsudats se caractérisent par la présence de fins filonnets soulignés par de la chlorite, de la muscovite et de l'albite (photo 16 à 19). Ces filonnets sont généralement parallèles à la schistosité dans la matrice



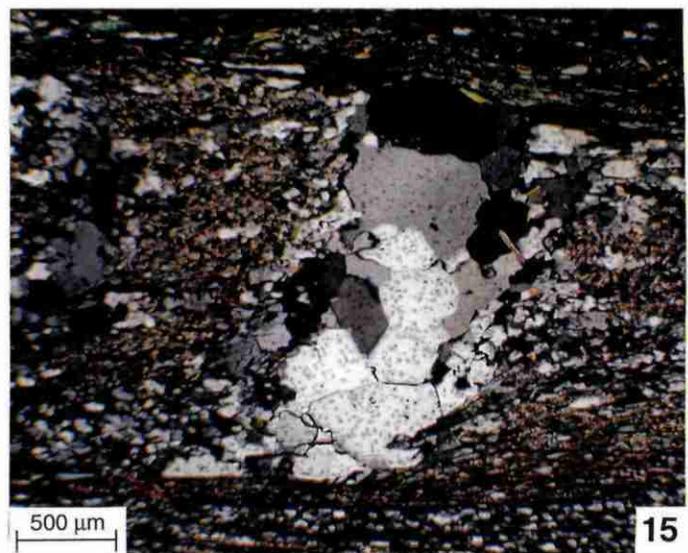
Lame FC 69



Lame FC 75



Lame FC 91



**Planche 3: Microstructures dans les micaschistes.** **12:** Exsudat de quartz (exs) parallèle à S1 en microlithons entre les plans S2. Le contact entre l'exsudat et la S2 est net. Parfois l'exsudat s'arrête au niveau de la S2. **13:** Détail d'un microlithon d'exsudat de quartz parallèle à S1 et de matrice S1 entre les plans S2. Le contact entre l'exsudat et la S2 est franc. Les muscovites syn-S1 (Ms1) sont arrêtées au niveau de la S2 avec un contact franc. L'angle entre les muscovites syn-S1 et les muscovites syn-S2 (Ms2) est important (entre 45 et 90°). A noter l'abondance en minéraux insolubles (oxydes (O), zircons (Zi), tourmaline (To)) dans les plans S2. **14:** Détail d'un microlithon d'exsudat de quartz syn-S1 entre les plans S2. **15:** Photo précédente en lumière polarisée. Les grains de quartz ont une extinction nette à légèrement ondulée. Leur taille ne varie pas à l'approche de la S2.

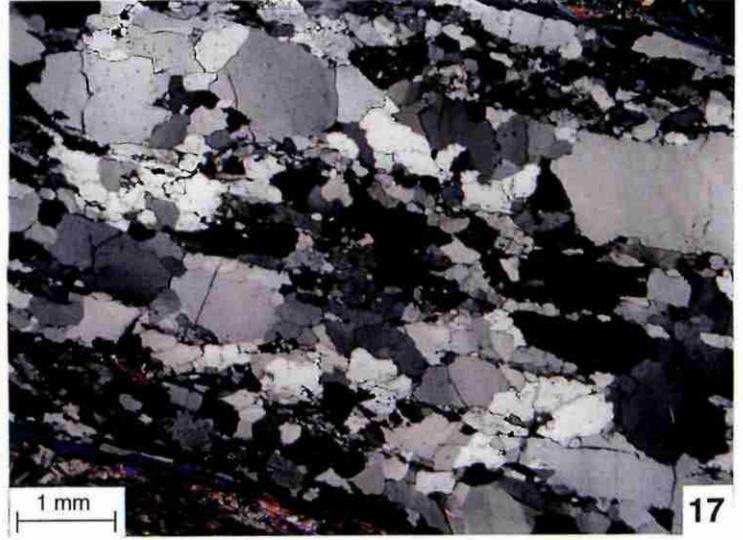
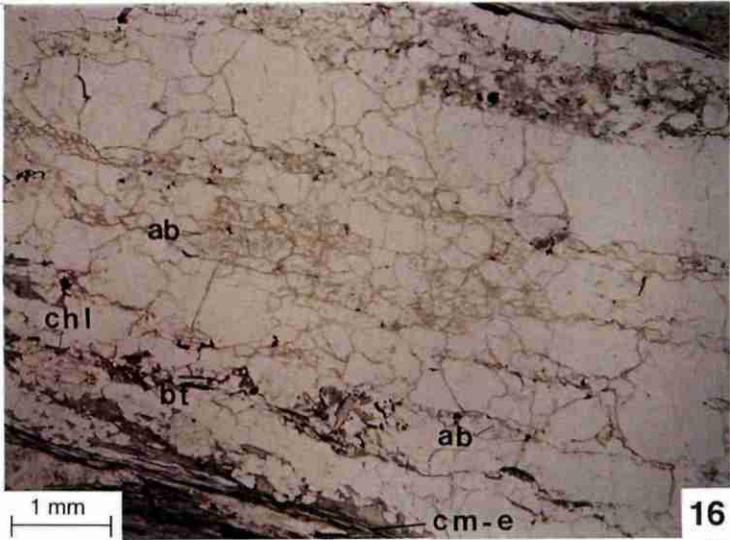
et au contact matrice-exsudat. Le long de ces filons, les grains sont systématiquement plus petits que dans le restant de l'exsudat. Ceci est probablement dû à la présence des phyllites qui ont pour effet de limiter la taille des grains de quartz ou de feldspath lors de la croissance des cristaux. Les albites sont fréquemment alignées selon leur plus grand axe parallèle au contact matrice-exsudat.

- De nombreux exsudats contiennent des lambeaux de matrice schisteuse. Ces lambeaux de matrice sont généralement en fins filonnets, parallèles à la schistosité de la matrice et du contact matrice-exsudat. Ces lambeaux sont essentiellement constitués de phyllites qui marquent une schistosité et se caractérisent par une abondance en minéraux accessoires et d'oxydes de fer. Pour les exsudats parallèles à S1, la schistosité de la matrice incluse dans l'exsudat est parallèle à S1. Les exsudats parallèles à S2 contiennent des morceaux de matrice où l'on distingue deux schistosités et la S2 est parallèle au contact matrice-exsudat (photo 20).
- Les bordures d'exsudats sont toujours tapissées de cristaux de muscovite, chlorite et parfois biotite allongés parallèlement ou avec une faible obliquité au contact matrice-exsudat (photo 21). Optiquement ces cristaux bien cristallisés et limpides se distinguent clairement des phyllites constituant la schistosité S1 ou S2 dans la matrice. Les albites localisées en bordure d'exsudat sont altérées au niveau de leur bordure avec les phyllites qui ont cristallisées au contact matrice-exsudat (photo 22).
- Des cristaux de calcite et chlorite, en bordure d'exsudat, en forme de rosette, ont été observés dans certaines lames (photo 23).
- Les chlorites qui ont cristallisé dans l'exsudat présentent parfois des formes particulières en "chenilles" (photo 24).
- Dans un exsudat oblique à la S1 et à la S2, la matrice à proximité du contact avec l'exsudat est marquée par la présence exclusive de minéraux phylliteux aplatis parallèlement au contact exsudat-matrice et marquant ainsi une schistosité parallèle à l'exsudat et oblique à S1 et S2. Une concentration en oxydes de fer et minéraux accessoires s'observe fréquemment dans cette matrice de bordure d'exsudat.
- Les plagioclases contenus dans les exsudats se caractérisent par une multitude d'inclusions fluides, de petite taille, dont la plupart ont décrépité (photo 18 et 22, voir également chapitre V).

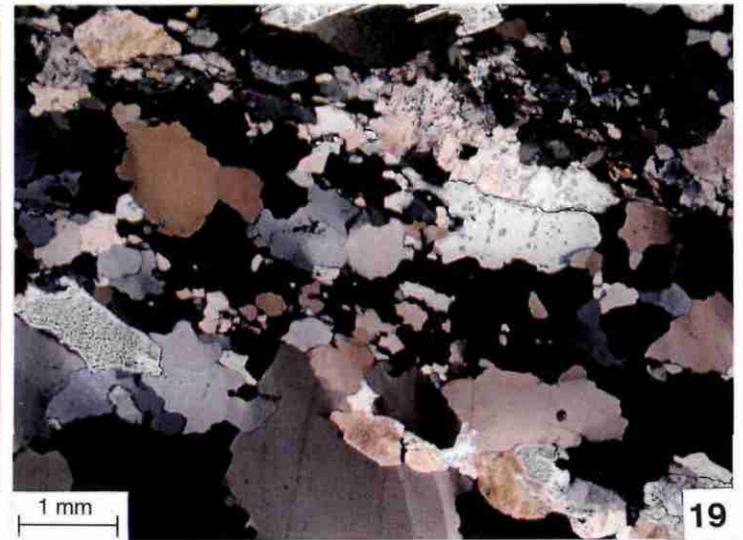
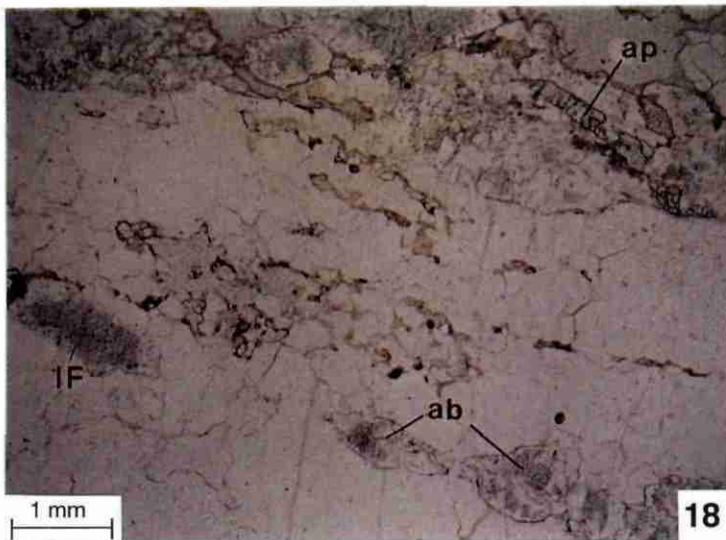
## **2. 2. Composition minéralogique**

Dans le tableau II-1 sont reportées la minéralogie de l'exsudat et la minéralogie de la matrice encaissante observée dans la même lame mince pour différents types d'exsudats. Il permet de faire les constatations suivantes:

- Les exsudats inclus dans les quartzites (CFC42a, FC39, FC2, CFC42b) présentent les mêmes compositions minéralogiques à quartz, muscovite  $\pm$  chlorite que les quartzites dans lesquels ils se sont formés. Seuls les minéraux insolubles ne se retrouvent pas dans l'exsudat.



Lame FC 88

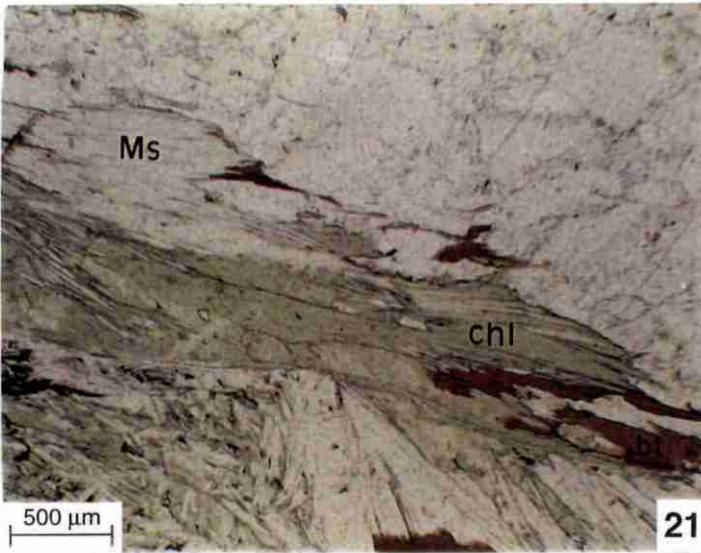


Lame FC 55

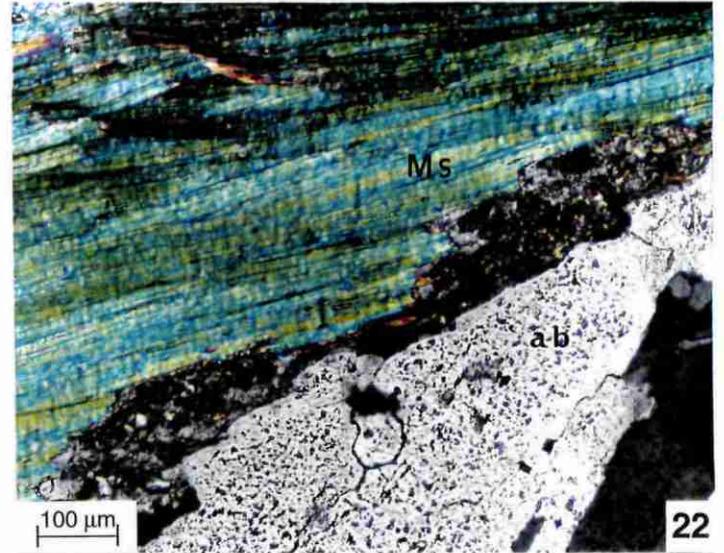
**Planche 4: Microstructures dans les exsudats:** **16:** Niveaux composés d'albite (ab) et/ou chlorite (chl) et biotite (bt), parallèles au contact matrice-exsudat (Cm-e) (le long de ces niveaux, les grains de quartz ont des tailles plus réduites). **17:** Photographie précédente en lumière polarisée. **18:** Détail des albites allongées et alignées parallèlement au contact matrice-exsudat. A noter l'abondance des inclusions fluides (IF) primaires localisées au coeur des albites alors que leurs bordures sont limpides, exemptes de telles inclusions. L'apatite (ap) est fréquente dans les exsudats et souvent associée à l'albite. **19:** Photographie précédente en lumière polarisée.



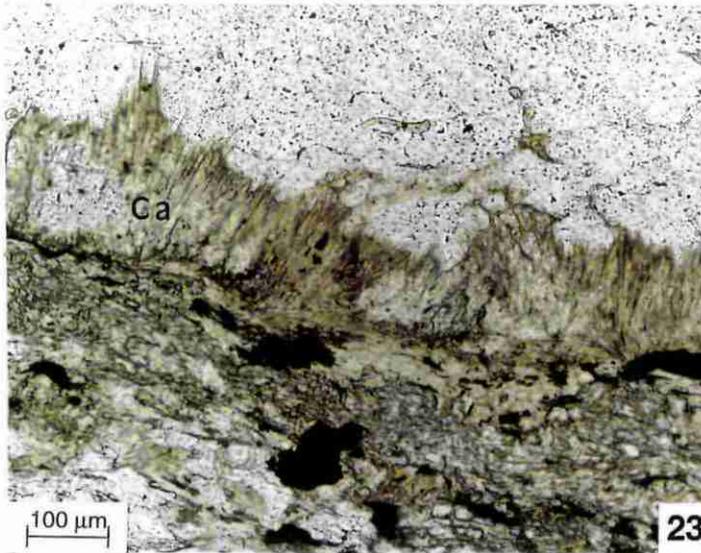
**Planche 5: Microstructures dans les exsudats: 20:** Exsudat parallèle à la S2 contenant des morceaux de matrice parallèles au contact matrice-exsudat. Dans ces morceaux se distinguent deux schistosités, une S1, en microlithons, et une S2, parallèle au contact matrice-exsudat. Au sein de l'exsudat, on peut observer des niveaux de chlorites parallèles à ce même contact.



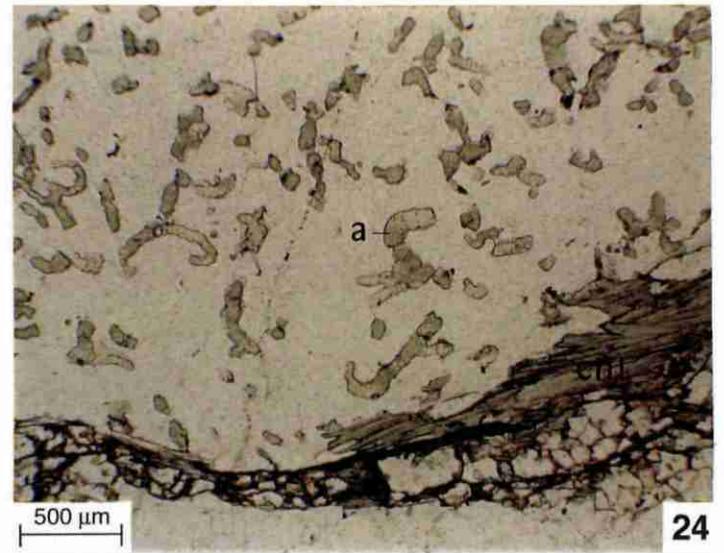
Lame EC 25



Lame EC 3



Lame EC 21



Lame EC 7

**Planche 6: Microstructures dans les exsudats:** **21:** Tapissage de muscovite, biotite et chlorite sur les bordures de l'exsudat. **22:** Détail d'une bordure d'exsudat constituée de muscovite néoformée, accolée à l'albite de l'exsudat. L'albite est altérée le long de sa bordure avec la muscovite. **23:** Bordure d'exsudat marquée par de la calcite (Ca) qui a cristallisé en forme de rosette. **24:** Cristallisation de chlorite dans l'exsudat. Dans les niveaux à chlorite, les grains de quartz ont des tailles réduites. A noter l'habitus en chenille (a) de certaines chlorites.

- Les exsudats inclus dans les micaschistes quartzeux présentent les mêmes compositions minéralogiques que dans la matrice à quartz, plagioclase, muscovite, chlorite et parfois biotite selon la minéralogie de la roche encaissante. Seule la biotite est parfois absente de l'exsudat alors qu'elle est présente dans la matrice.
- Un exsudat (EC21) inclus dans un niveau de composition particulière à quartz, plagioclase, muscovite, chlorite, amphibole, calcite, apatite et oxydes présente la même minéralogie que le niveau dans lequel il est inclus (excepté la biotite). Ce niveau d'épaisseur centimétrique n'a pas été observé ailleurs dans la série et aucune composition d'exsudat de ce type n'a été observée dans d'autre lame mince.
- Lorsque de la calcite est observée dans la matrice, l'exsudat contient toujours de la calcite. Par contre certains exsudats contiennent de la calcite qui n'est pas observée dans la matrice.
- L'apatite est un minéral accessoire fréquent dans les exsudats et s'observe généralement aussi dans la matrice.
- Les oxydes, la tourmaline et le zircon ne s'observent pas toujours dans l'exsudat alors qu'ils sont toujours présents dans la matrice.
- La composition de l'exsudat est indépendante du type d'exsudat observé (syn S1 plissé, cisailé ou en lentille, syn S2) excepté pour les exsudats obliques aux structures antérieures (S1, S2) qui ont tous des compositions à quartz avec de fines baguettes de muscovite  $\pm$  chlorite.

Ces observations indiquent que la composition des exsudats formés au cours du fonctionnement de la zone de cisaillement est directement contrôlée par la composition de la matrice dans laquelle il a cristallisé. Ceci implique une circulation des fluides réduite. La composition minérale de la matrice est contrôlée par le métamorphisme régional et dépend de la composition de la roche originale. Il est donc possible d'affirmer, dès maintenant, que les exsudats ont cristallisé sous des conditions métamorphiques similaires à celles liées au métamorphisme régional. Ceci sera confirmé lors de l'étude du métamorphisme (chapitre V).

### *3. Microstructures du quartz et orientation préférentielle des axes $\langle c \rangle$ du quartz*

#### **3. 1. Dans les exsudats de quartz**

Les différentes microstructures du quartz sont présentées pour les exsudats syn-tectoniques. Deux principales catégories de microstructures du quartz se distinguent: les microstructures à grains lobés et les microstructures aux joints de grains droits. La première catégorie a été subdivisée selon l'intensité de la déformation, estimée qualitativement par l'importance de l'allongement des grains et l'abondance des structures intracristallines. La taille des grains a été

| Type d'exsudat  |  |   |                     |
|---|--|---|---------------------|
| pli isoclinal   | cisaillé   | lentille  | post S2             |
| EC23: Qtz-Pl-Ms-Chl-Ap  | FC39: Qtz-Ms-Zi  | EC24: Qtz-Pl-Ms-Chl-Ap-To-Zi  | EC18: Qtz-Ms        |
| EC25: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Cc-O<br>M: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-To-O       | M: Qtz-Ms-Zi   | M: Qtz-Pl-Ms-Chl-Ap-To-Zi   | M: Qtz-Pl-Ms-Chl-To |
| EC26: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Cc-Ap<br>M: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Cc-Ap-To  | CF13: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Ap-<br>M: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Ap-To-Zi | EC27: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Cc-Ap-FK<br>M: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Cc-Ap-To-FK    | EC9: Qtz-Ms         |
| EC20: Qtz-Pl-Ms-Chl-Cc  | EC19: Qtz-Pl-Ms-Chl-Ap-Zi-<br>M: Qtz-Pl-Ms-Chl-Ap          | EC21: Qtz-Pl-Ms-Chl-Amp-Cc-Ap-O<br>M: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Amp-Cc-To-Zi-O | EC28: Qtz-Ms        |
| FC48: Qtz-Pl-Ms-Chl-Ap<br>M: Qtz-Pl-Ms-Chl-Ap-Zi-O            | FC2: Qtz-Ms-Chl<br>M: Qtz-Ms-Chl                           | EC3: Qtz-Pl-Ms-Chl-Bt-Cc-Ap-To-Zi                                     |                     |
| CFC42a: Qtz-Ms-Chl<br>M: Qtz-Ms-Chl-Ap-Zi-To-O                | EC22: Qtz-Ms-Chl<br>M: Qtz-Ms-Chl                          | EC7: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Ap-O  |                     |
| EC4: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Cc-Ap-O<br>M: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl          | CFC42b: Qtz-Ms-Chl<br>M: Qtz-Ms-Chl-To-Zi-O                | EC11: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Ap-O<br>M: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Ap-O               |                     |
| EC5: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Ap<br>M: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Ap-To-Zi      | EC14: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Ap<br>M: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Ap        | EC12: Qtz-Ms-Bt-Chl-Ap-O<br>M: Qtz-Ms-Bt-Chl-Ap-Zi-O                  |                     |
| EC6: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Ap<br>M: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Ap-To-Zi      | EC15: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Ap<br>M: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Ap        | FC55: Qtz-Pl-Ms-Chl-O<br>M: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Ap-To-Zi-O               |                     |
| EC16: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl<br>M: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-To-O            | FC71: Qtz-Pl-Ms-Chl-Grt-Ap<br>M: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Ap-O     | FC67: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Ap-Cc-O<br>M: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-To-O            |                     |
| EC17: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Ap<br>M: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Ap-To-Zi     | FC80: Qtz-Pl-Ms-Chl<br>M: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Ap-To-Zi-O      |   |                     |
| EC29: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Ap-To<br>M: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-To-Zi-O   | FC88a: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl<br>M: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-O           |   |                     |
| FC58: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl<br>M: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Ap-To-O         | FC91a: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl<br>M: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-O           |   |                     |
| FC62: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Ap-O<br>M: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Ap-To-Zi-O | FC91b: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-O<br>M: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-O         |   |                     |
| FC73: Qtz-Pl-Ms-Chl-O<br>M: Qtz-Pl-Ms-Chl-To-Zi-O             | FC96: Qtz-Ms-Bt-Chl<br>M: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Ap-To-Zi-O      |   |                     |
| FC75: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Ap<br>M: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Ap-To-Zi-O   |  |   |                     |
| FC76: Qtz-Pl-Ms-Bt-Ap<br>M: Qtz-Pl-Ms-Bt-Ap                   |  |   |                     |
| FC83: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Ap<br>M: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-To-O         |  |   |                     |
| FC84: Qtz-Pl-Ms-Chl<br>M: Qtz-Pl-Ms-Chl-Grt-O                 |  |   |                     |
| FC85: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-Ap-O<br>M: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-O          |  |   |                     |
| FC91c: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-O<br>M: Qtz-Pl-Ms-Bt-Chl-To-O         |  |   |                     |

Légende

- Qtz: quartz
  - Pl: plagioclase
  - FK: feldspath potassique
  - Ms: muscovite
  - Bt: biotite
  - Chl: chlorite
  - Amp: amphibole
  - grt: grenat
  - Cc: calcite
  - Ap: apatite
  - Zi: zircon
  - To: tourmaline
  - O: opaques
- ECX: exsudat dans lame ECX  
M: matrice dans la même lame ECX

Tableau II-1: Minéralogie des exsudats et de la matrice schisteuse

déterminée avec un oculaire à micromètre. Une corrélation est observée entre les exsudats à grains présentant peu de signes de déformation intracristalline (taille plus grande: 0,3, 0,53 et 0,69 mm) et les exsudats à grains montrant des signes de déformation intracristalline plus importants (taille plus petite: 0,24 à 0,47 mm). Par contre, les exsudats à grains fortement allongés et présentant de nombreux signes de déformation intracristalline ont une taille de grains très variable (0,27 à 0,51 mm).

Aucune relation n'est observée entre le type de microstructures et la relation de l'exsudat avec la déformation d'une part, et la localisation géographique de l'exsudat d'autre part.

En ce qui concerne l'interprétation des fabriques, nous nous heurtons à un problème majeur. En effet, l'exsudat peut acquérir une orientation préférentielle de forme et de réseau liée aux processus de croissance. Sa déformation ultérieure s'effectue donc sur des grains pouvant être originellement déjà orientés. Cette superposition des deux types de textures rend difficile l'interprétation des microstructures et fabriques de quartz pouvant être liées à la déformation intracristalline. L'orientation originelle des grains de quartz au moment de leur croissance peut expliquer le caractère anormal obtenu sur certaines de nos fabriques notamment dans les exsudats les moins déformés.

### **3. 1. 1. Exsudats de quartz à grains lobés peu déformés (Planche 7)**

#### *3. 1. 1. 1. Description des microstructures*

Les exsudats qui appartiennent à cette catégorie sont généralement des lentilles de quartz syn-S2 ou des veines replissées isoclinalement relativement épaisses. Les grains de quartz de moyenne à petite taille (0,3 à 0,69 mm) apparaissent équants, peu allongés, et présentent de légères extinctions onduleuses, et parfois un début de formation de sous-grains, notamment dans les grains de grande taille. Les joints de grains sont légèrement lobés et l'on y distingue parfois la présence de petits grains. Ces exsudats se caractérisent par la présence fréquente de chlorite soit en amas, soit en forme de "chenilles". Dans les zones où la chlorite est présente, la taille des grains de quartz est dépendante de l'espace intergranulaire entre les cristaux de chlorite. Les grains de quartz ont alors des tailles plus petites jusqu'à 0,2 mm.

#### *3. 1. 1. 2. Description des fabriques de quartz*

- Les fabriques EC15 et EC19 comportent deux maxima principaux, bien définis (respectivement 7,5% et 9% des mesures) situés à la périphérie du diagramme à 20° et 30° respectivement de l'axe d'extension maximale de la déformation finie (X), avec une obliquité plongeant vers le Sud.
- Dans la fabrique FC96, les axes <c> du quartz tendent à former deux petits cercles centrés à 25° de l'axe de compression maximale de la déformation finie (Z) et raccordés par un début de guirlande mal définie. Ils

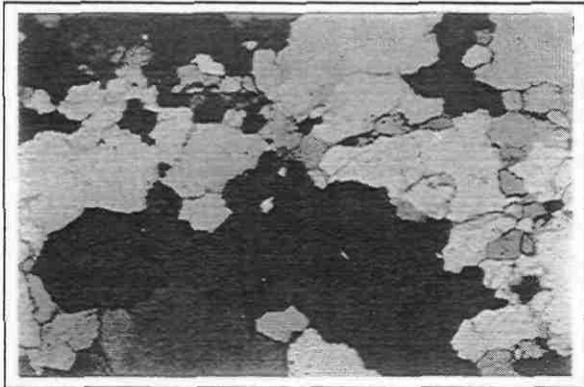
S à SE

N à NW

240 mesures

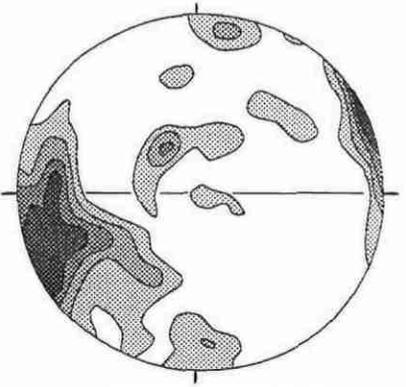
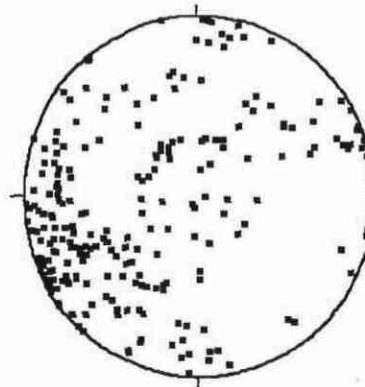
S à SE

N à NW



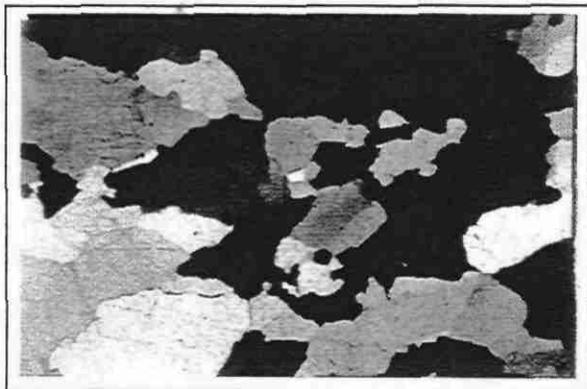
0.53mm

EC15



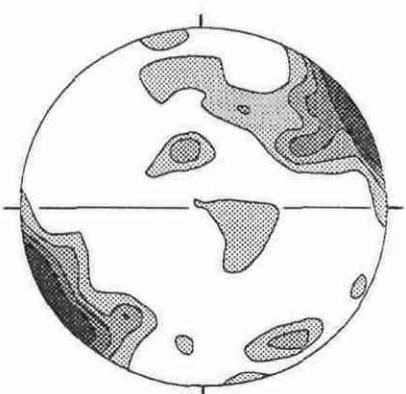
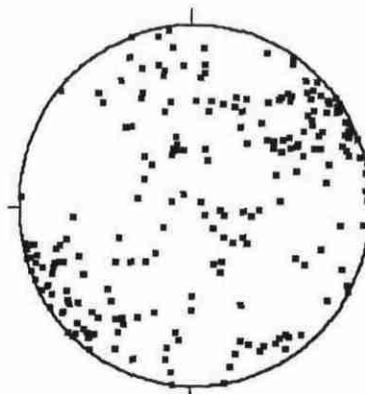
Densité max 7.5%

230 mesures



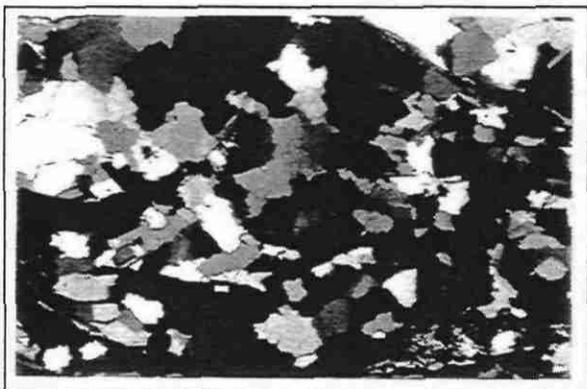
0.69mm

EC19



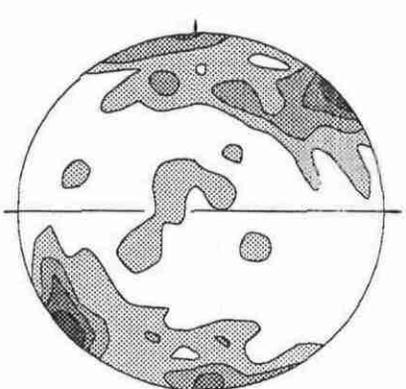
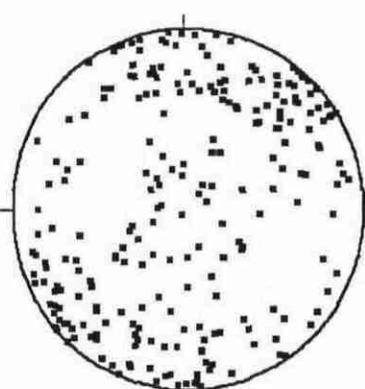
Densité max 9%

240 mesures



0.3mm

FC96



Densité max 5.1%

Planche 7: Microstructure et orientations préférentielles des axes  $\langle c \rangle$  du quartz des exsudats peu déformés présentant des joints de grains lobés. En bas, à gauche de chaque microphotographie: taille moyenne des grains en millimètre (également dans les planches 8, 9, 10, 11, 12, et 16).

comprennent deux maxima en bordure du diagramme, l'un situé au niveau de l'axe Z, l'autre, plus important (5,1% des mesures) se localise à 40° de l'axe X avec une obliquité plongeant vers le S.

### *3. 1. 1. 3. Interprétation*

- Les deux premières fabriques EC15 et EC19 présentent des maxima proches de X qui ne pourraient s'interpréter, en termes de déformation intracristalline, qu'en envisageant un glissement sur les plans prismatiques selon la direction de l'axe  $\langle c \rangle$ . L'activation de ce système ne peut s'effectuer que dans des conditions de très haute température (700-800°C) (Lister et Dornsiepen, 1982; Blumenfeld et al., 1986; Gapais et Barbarin, 1986) ou pour de très fortes circulations de fluides chauds (Garbutt et Teyssier, 1991). Or les conditions de déformation de nos exsudats étant de 500°C (voir chapitre V) nous ne pouvons donc pas expliquer nos fabriques par un glissement prismatique  $\langle c \rangle$ . Nous retenons donc plutôt l'hypothèse que ces fabriques traduisent une orientation préférentielle du quartz lors de sa cristallisation et sa croissance dans l'exsudat qu'une faible déformation intracristalline n'a pas effacée.
- La fabrique FC96 montre une géométrie asymétrique par rapport aux axes de la déformation finie. De telles fabriques ont été obtenues en simulation numérique (modèle B de Lister et Hobbs, 1980) et en expérimentation (Dell'Angelo et Tullis, 1989). Toutes font intervenir une composante en cisaillement simple dans la déformation. L'asymétrie indique dans notre cas un cisaillement vers le N à NW. La présence des maxima localisés à la bordure du diagramme indique que le glissement sur le plan basal de direction  $\langle a \rangle$  est le système principalement activé (Schmid et Casey, 1986).

### **3. 1. 2. Exsudats de quartz à grains lobés moyennement déformés (Planches 8 et 9)**

#### *3. 1. 2. 1. Description des microstructures*

Les grains de quartz, de tailles variables selon les lames (0,24 à 0,47 mm), sont peu allongés mais dans de nombreux grains, on observe la présence de sous-joints délimitant des sous-grains. Les joints de grains sont généralement lobés mais certains grains possèdent des joints de grains droits qui tendent à former des points triples à 120°. Tous les exsudats de cette catégorie présentent des orientations préférentielles du quartz plus ou moins prononcées.

#### *3. 1. 2. 2. Description des fabriques de quartz*

- Dans les fabriques EC25, EC21 et FC39exs, les axes  $\langle c \rangle$  du quartz tendent à former une guirlande incomplète perpendiculaire (EC25) ou oblique (75°, EC21 et FC39exs) à la schistosité avec un plongement vers le S. Elle comporte un maximum localisé en bordure du diagramme (EC25 et FC39exs pour 5,4% et 5,2% des mesures respectivement) ou légèrement à l'intérieur du diagramme (EC21 pour 5,8% des mesures).

Quelques axes <c> du quartz se concentrent à proximité de l'axe intermédiaire de la déformation finie (Y).

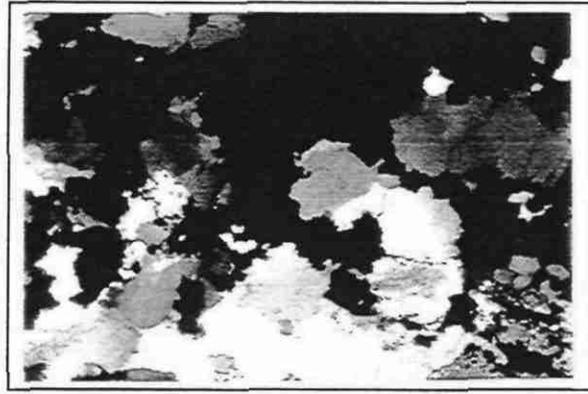
- La fabrique EC16 met en évidence une concentration d'axes <c> au niveau de deux maxima à la périphérie du diagramme dont le principal (6,5 % des mesures) est situé à 25° de Z et le deuxième à 45° de Z.
- Les fabriques FC62'pa et FC75 montrent une concentration d'axes <c> selon des petits cercles centrés à proximité de Z avec un angle d'ouverture respectif de 40° et 70°. Dans ces petits cercles, les axes <c> sont essentiellement concentrés sur la bordure du diagramme.
- Les fabriques EC5 et CF13 présentent des orientations préférentielles d'axes <c> très importantes (11,6% et 10,4% des mesures respectivement) localisées proches de l'axe Z pour la première ou de X pour la seconde.

### 3. 1. 2. 3. *Interprétation*

- Les fabriques EC21 et FC39exs présentent des guirlandes asymétriques plus ou moins bien définies, que l'on peut interpréter comme le résultat d'une déformation avec une composante non coaxiale (Etchecopar, 1977; Etchecopar et Vasseur, 1987; Law et al., 1990). L'asymétrie des fabriques EC21 et FC39exs est compatible avec un cisaillement vers le N à NW. La présence de maxima en bordure du diagramme et, dans une moindre mesure, en Y suggère une activation des systèmes de glissement basal <a> et prismatique <a> indiquant des conditions de déformation de moyenne température (400-500°C).
- Les fabriques FC62'pa et FC75 sont caractérisées par des petits cercles centrés sur Z indiquant une déformation de type aplatissement (Tullis et al., 1973; Marjoribanks, 1976; modèle B de Lister et Hobbs, 1980; Law, 1986; Schmid et Casey, 1986).
- Les lames EC5 et CF13 présentent des fabriques particulières. L'observation en lame mince de la lame CF13 en lumière polarisée avec une lame quart d'onde met en évidence des domaines constitués de grains de même orientation. Ces fabriques particulières peuvent donc représenter l'orientation originelle d'anciens grains et ne sont pas, dans ce cas, l'expression d'une déformation intracristalline. Dans le cas de la lame EC5, la fabrique a été effectuée au niveau affiné d'un exsudat boudiné. Ce niveau correspond donc à une localisation de la déformation où l'exsudat a été fortement étiré. La taille des grains relativement réduite (0,26 mm) et l'orientation de leur axe <c> très proche d'un grain à l'autre, peut s'expliquer par une origine des grains due à une recristallisation dynamique par rotation de sous-grains d'un unique grain de quartz ayant un axe <c> proche de l'axe Z.
- La fabrique EC16 présente deux maxima en bordure du diagramme indiquant une activation du système de glissement basal <a> essentiellement. Le maxima le plus développé est compatible avec un sens de cisaillement vers le N à NW.

S à SE

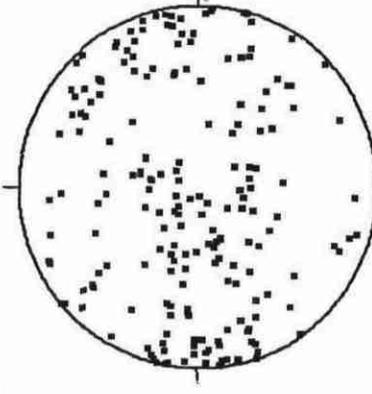
N à NW



0.34mm

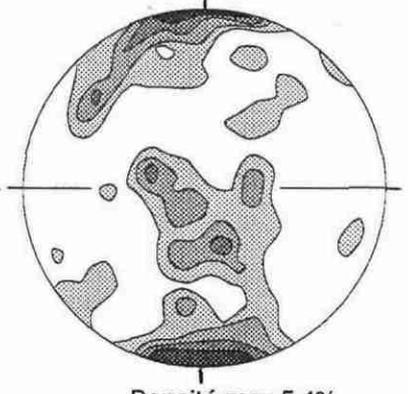
EC25

200 mesures



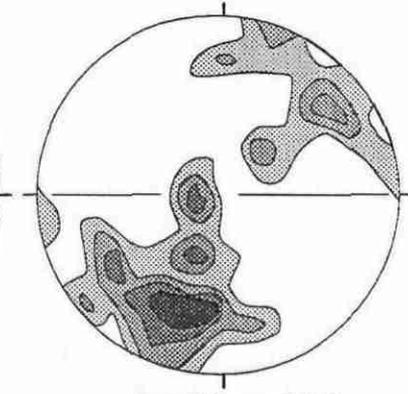
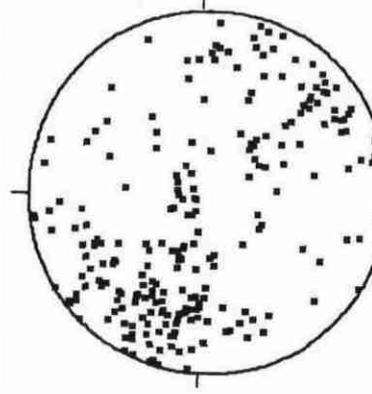
S à SE

N à NW



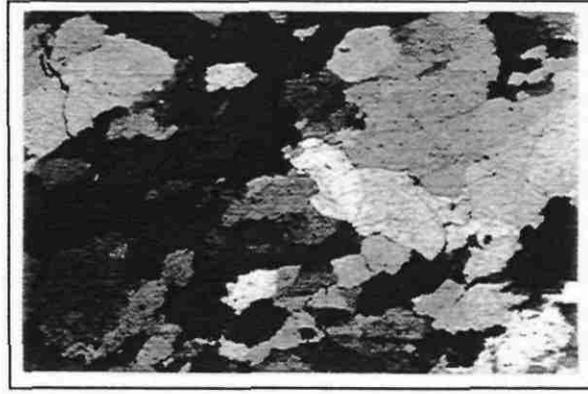
Densité max 5.4%

240 mesures



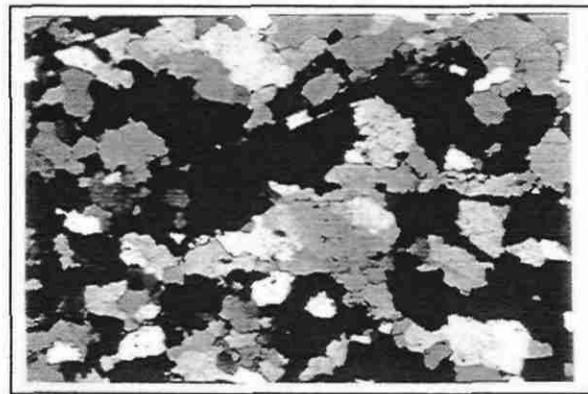
Densité max 5.8%

240 mesures



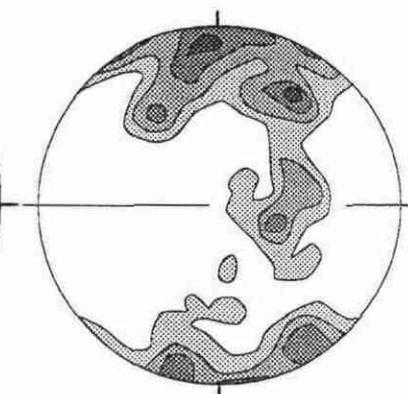
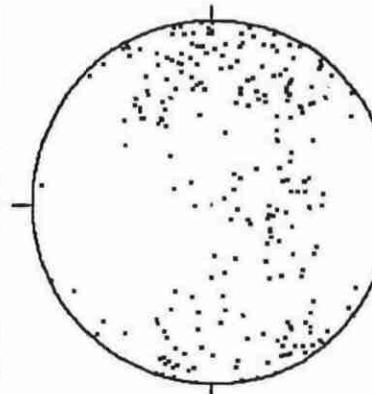
0.47mm

EC21



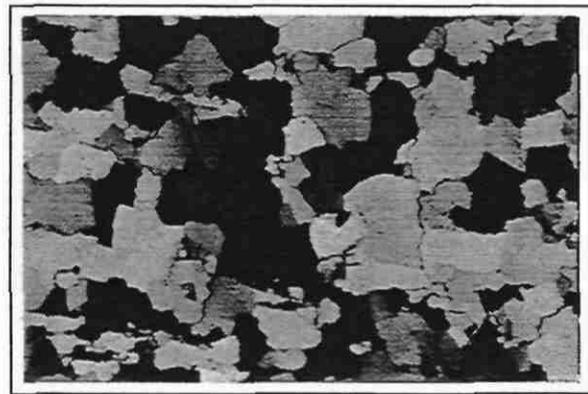
0.24mm

FC39exs



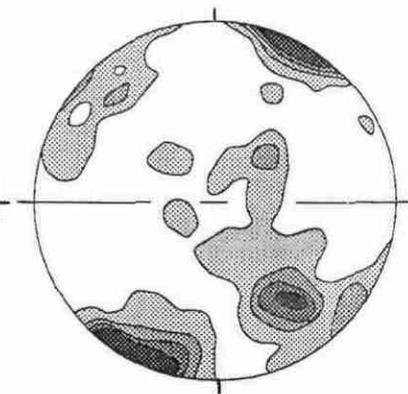
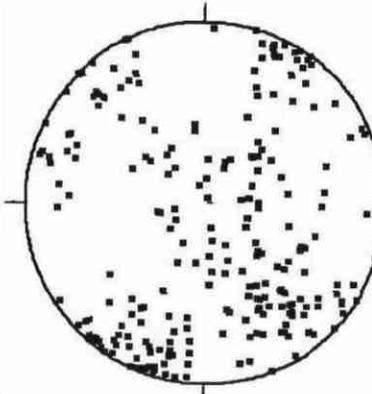
Densité max 5.2%

240 mesures



1 mm 0.3mm

EC16



Densité max 6.5%

Planche 8: Microstructures et orientations préférentielles des axes  $\langle c \rangle$  du quartz des exsudats moyennement déformés présentant des joints de grain lobés.

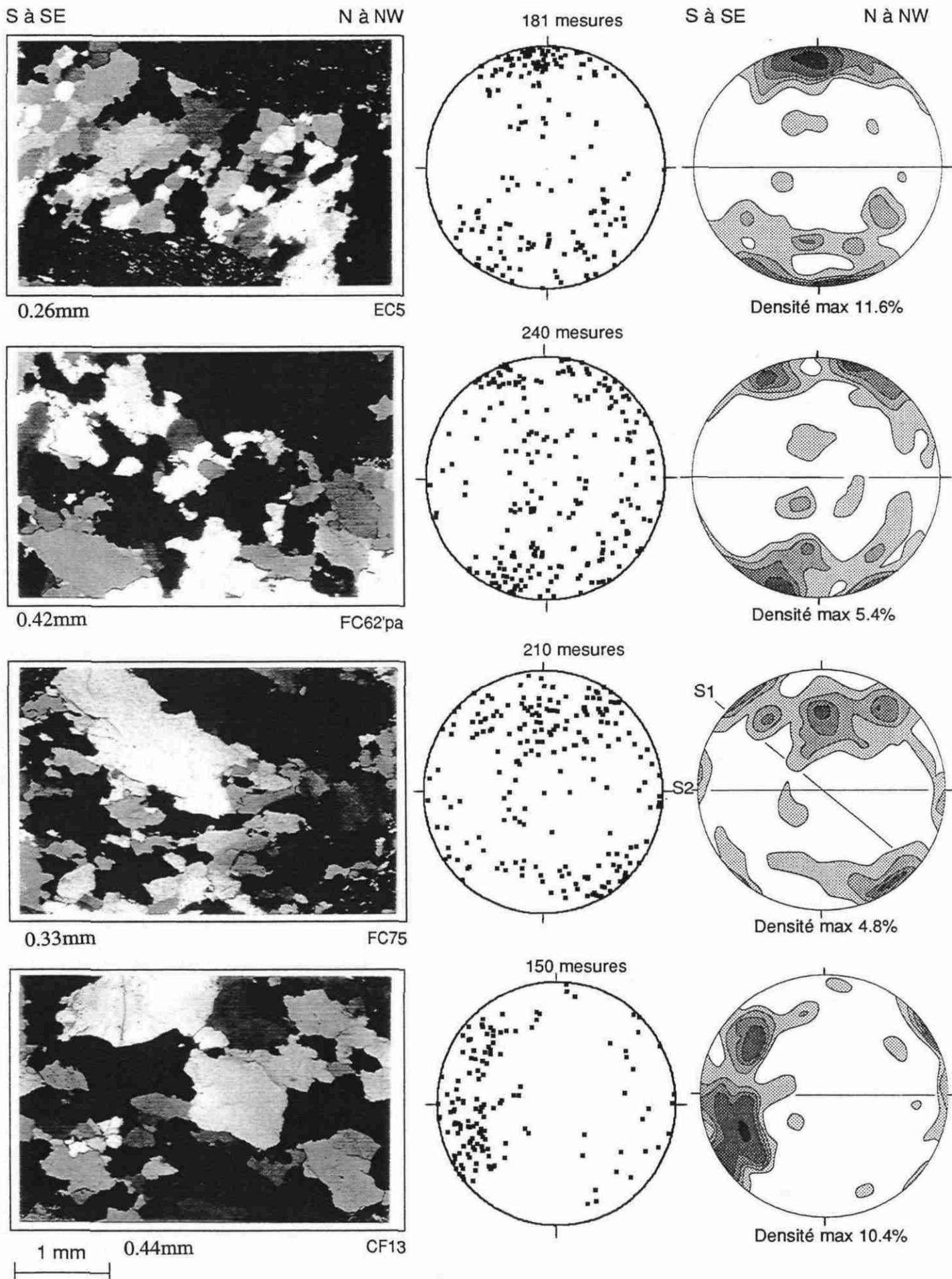


Planche 9: Microstructures et orientations préférentielles des axes  $\langle c \rangle$  du quartz des exsudats moyennement déformés présentant des joints de grain lobés.

### 3. 1. 3. Exsudats de quartz à grains lobés très déformés (Planche 10)

#### 3. 1. 3. 1. Description des microstructures

Les grains de quartz, de petite taille (0,4 à 1,2 mm) sont plus ou moins allongés selon les lames et présentent de fortes extinctions onduleuses et une orientation préférentielle des axes <c> du quartz. Les joints de grains sont lobés, enchevêtrés les uns dans les autres, et souvent jalonnés de bourgeons séparés du cristal hôte par un sous-joint. Dans tous les exsudats le test à la lame quart-d'onde met en évidence une orientation préférentielle des axes <c> dans l'ensemble de la lame.

La majorité des exsudats moyennement ou très déformés sont plissés isoclinalement.

#### 3. 1. 3. 2. Description des fabriques de quartz

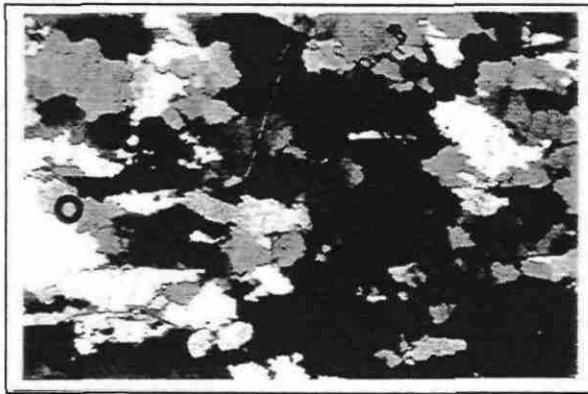
Les fabriques de cette catégorie paraissent mieux définies que les précédentes. Pour les quatre lames (EC22, FC73, FC2, EC29), les axes <c> du quartz tendent à former une guirlande plus ou moins complète, oblique à la schistosité (de 60° à 70°) et plongeant soit vers le N (EC22, FC2, EC29) soit vers le S (FC73). Les maxima sont différemment localisés le long de la guirlande selon les fabriques. Pour EC22 et FC73, on observe deux maxima situés légèrement à l'intérieur du diagramme pour l'un, et proche de Y pour l'autre. Le long de la guirlande, la fabrique FC2 présente un maxima principal à la périphérie du diagramme (7,1% des mesures). Quelques axes <c> sont concentrés près de Y. Les axes <c> de la fabrique EC29 sont plus uniformément concentrés le long de la guirlande avec deux faibles maxima dont le plus important (4,5% des mesures) est proche de Y et le deuxième à la périphérie du diagramme. Ces deux dernières fabriques montrent également deux branches qui viennent se raccorder à la guirlande principale avec un maximum des axes <c> du quartz à la périphérie du diagramme, à environ 30° de Z.

#### 3. 1. 3. 3. Interprétation des fabriques de quartz

Toutes les fabriques de cette catégorie présentent des guirlandes asymétriques plus ou moins bien définies. Ceci indique que les exsudats ont été affectés par une déformation présentant une composante en cisaillement (Etchecopar, 1977; Etchecopar et Vasseur, 1987; Law et al., 1990). L'asymétrie des guirlandes par rapport aux axes de la déformation finie suggère un cisaillement vers le S à SE pour les fabriques EC22, FC2 et EC29 et plutôt vers le N à NW pour la fabrique FC73. Les maxima localisés en bordure du diagramme indiquent que le système de glissement basal <a> a été surtout activé. Cependant, la présence d'axes <c> concentrés en Y suggère une activation du système de glissement prismatique <a> non négligeable. Ces systèmes s'activent pour des conditions de déformation de moyenne température (400-500°C).

S à SE

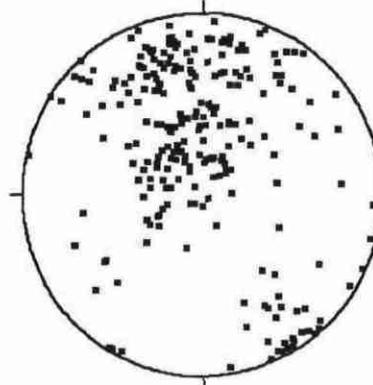
N à NW



0.38mm

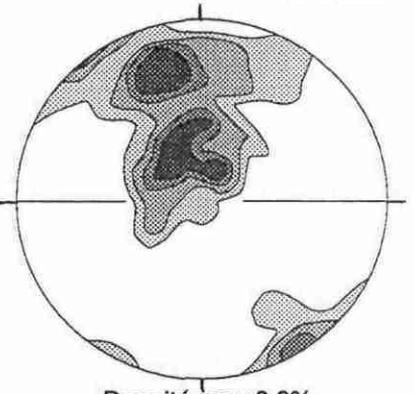
EC22

239 mesures

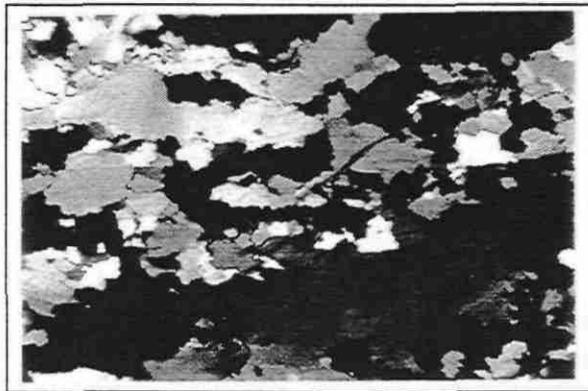


S à SE

N à NW



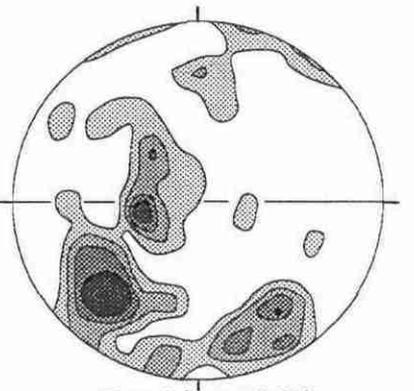
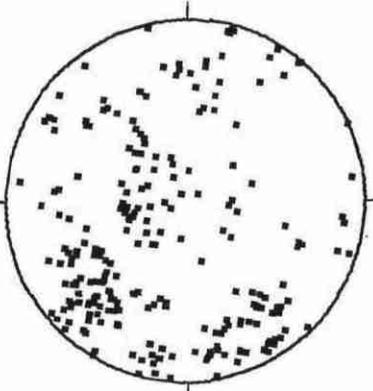
Densité max 6.2%



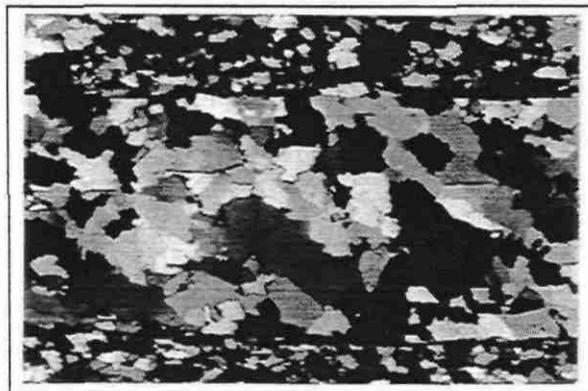
0.49mm

FC73

240 mesures



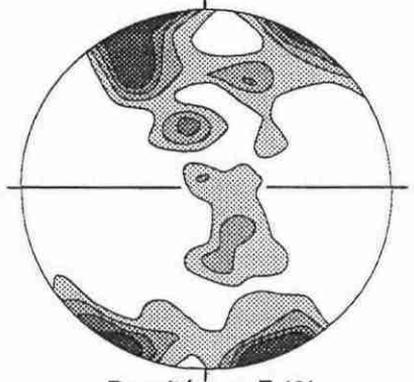
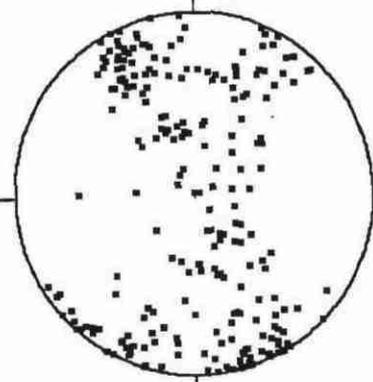
Densité max 6.9%



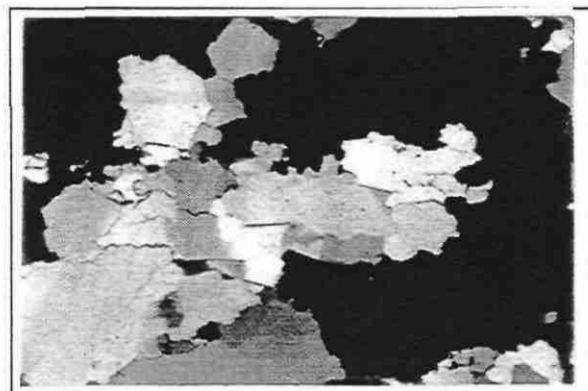
0.27mm

FC 2

240 mesures



Densité max 7,1%

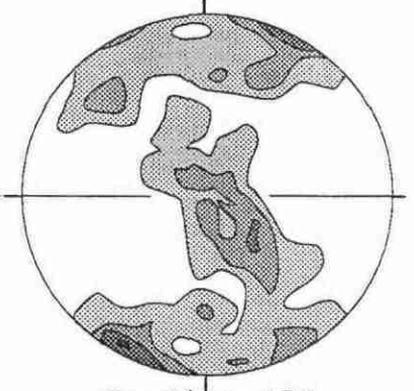
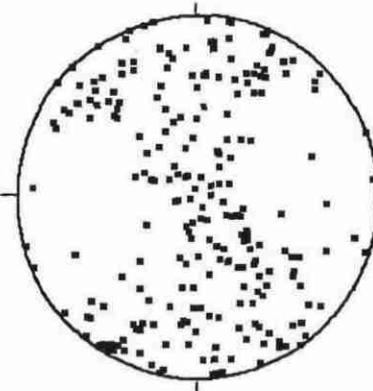


1 mm

0.51mm

EC29

240 mesures



Densité max 4.5%

Planche 10: Microstructures et orientations préférentielles des axes  $\langle c \rangle$  du quartz des exsudats très déformés présentant des joints de grain lobés.

### 3. 1. 4. Exsudats de quartz à grains aux joints rectilignes

Ce type d'exsudat est présenté dans les planches 11, 12 et 16 (pour les fabriques FC91bchar, FC91bflanc, CFC42ainf et CFC42asup, p93).

#### 3. 1. 4. 1. Description des microstructures

Les grains de quartz sont de petite taille (0,13 à 0,39 mm), équants, et présentent fréquemment des extinctions nettes. Les joints de grains sont rectilignes et tendent à former des points triples proches de 120°, bien visibles dans la lame CFC42b. Certains exsudats présentent de fortes orientations des axes <c> du quartz alors que d'autres en sont totalement dépourvus.

#### 3. 1. 4. 2. Description des fabriques de quartz

Cette catégorie de microstructure présente des fabriques très variées:

- Dans les fabriques FC91a, FC88a, FC91bchar et CFC42ainf, les axes <c> du quartz se concentrent le long de petits cercles centrés à proximité de Z avec un angle d'ouverture de 70° environ. Les maxima sont différemment concentrés le long des cercles, selon les fabriques. Pour FC91a et FC91bchar on distingue un maximum légèrement à l'intérieur du diagramme (5,7% des mesures et 6,1% des mesures respectivement) et FC88a présente deux maxima, le principal à la bordure du diagramme (5,9% des mesures) et le deuxième dans le plan (YZ) à 25° de Z. CFC42ainf possède deux maxima très faibles le long des petits cercles en bordure du diagramme (4,4% des mesures) et un maximum principal dans le plan (YZ) à 30° de Y.
- Les fabriques FC69, FC42b, et CFC42asup ont leurs axes <c> concentrés selon une guirlande incomplète. Les guirlandes de CFC42b et CFC42asup présentent un fort maximum (6,9% et 7,4% des mesures respectivement) proche de Y et plongent vers le S. La guirlande FC69 possède un maximum à la bordure du diagramme (6,1% des mesures) à 20° de Z plongeant vers le N.
- Les axes <c> de la fabrique FC83 se concentrent selon un maximum (8,2% des mesures) à la périphérie du diagramme, à 40° de X plongeant vers le N.
- La fabrique FC69sig est très diffuse et présente un faible maximum (3,9% des mesures) en bordure du diagramme à 30° de Z plongeant vers le N.

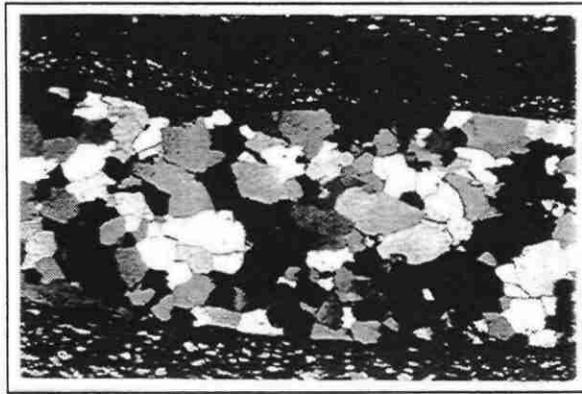
#### 3. 1. 4. 3. Interprétation des fabriques de quartz

On distingue deux sortes de fabriques principales:

- Les fabriques présentant des petits cercles centrés sur Z (FC91a, FC88a) suggérant une déformation dans le champ de l'aplatissement (Tullis et al., 1973; Marjoribanks, 1976; modèle B de Lister et Hobbs, 1980; Law, 1986; Schmid et Casey, 1986).

S à SE

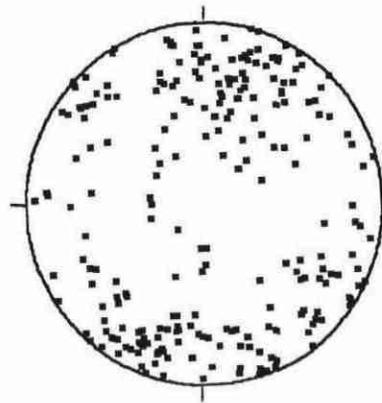
N à NW



0.21mm

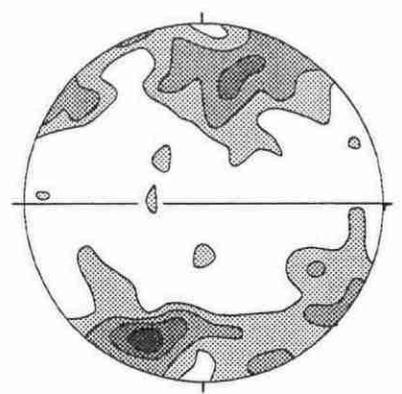
FC91a

240 mesures



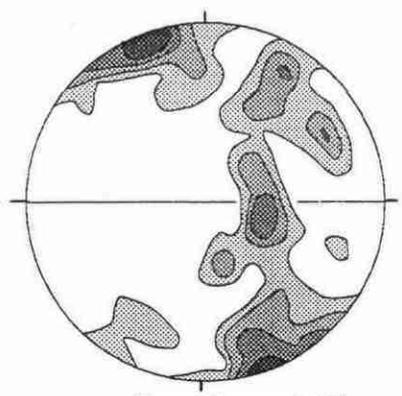
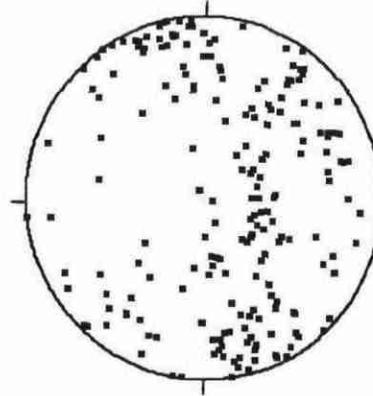
S à SE

N à NW



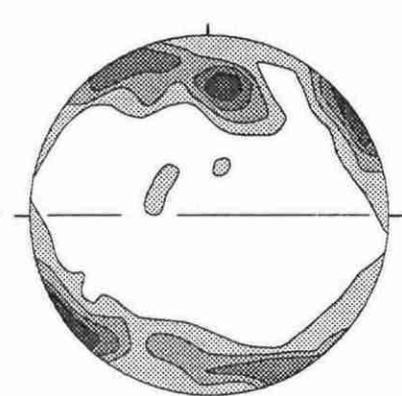
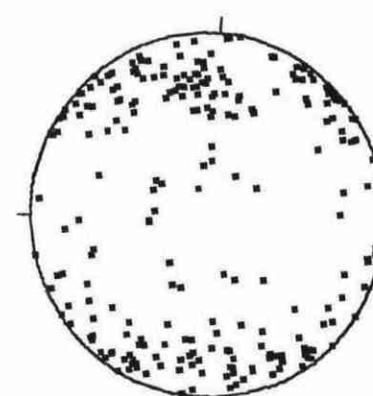
Densité 5.7%

200 mesures

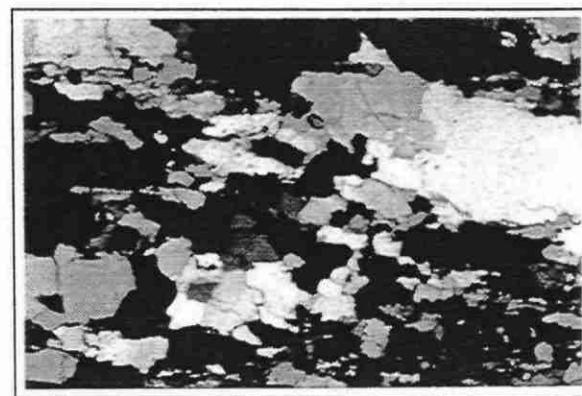


Densité max: 6.1%

240 mesures



Densité max 5.9%



0.39mm

FC88a

1 mm

Planche 11: Microstructures et orientations préférentielles des axes  $\langle c \rangle$  du quartz des exsudats présentant des joints de grain droits.

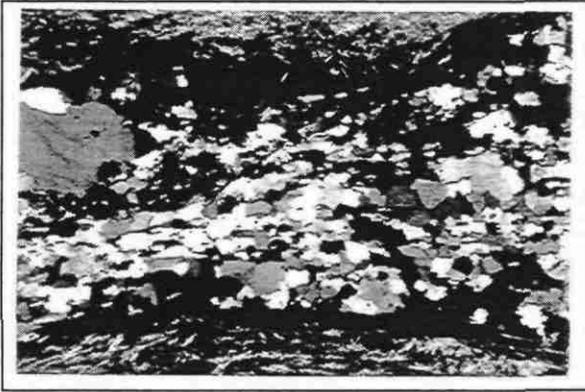
S à SE

N à NW

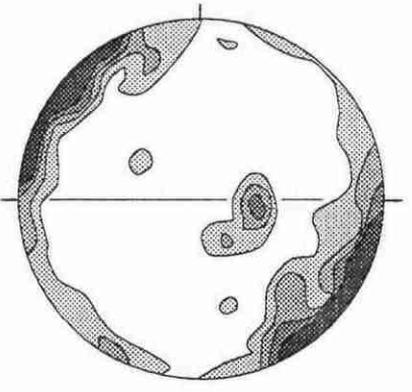
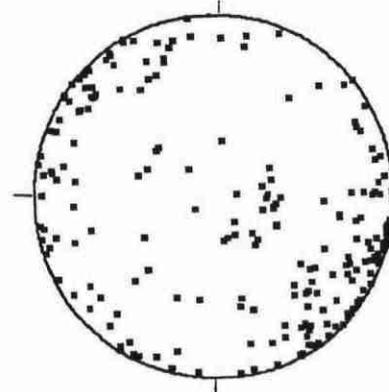
214 mesures

S à SE

N à NW

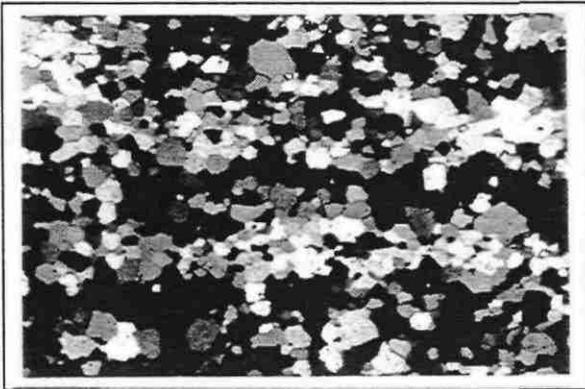


FC83



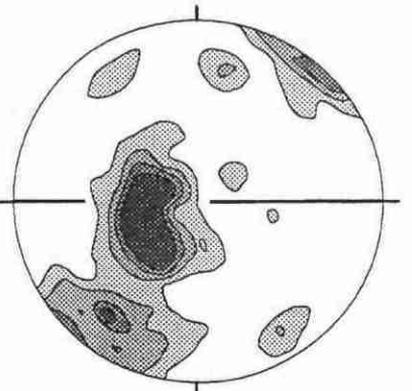
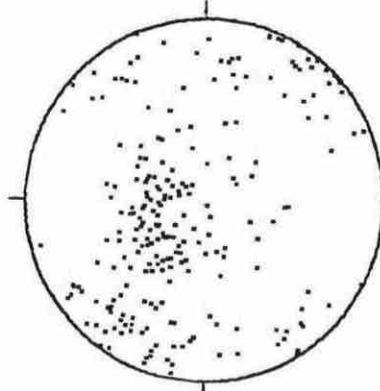
Densité max 8.2%

240 mesures



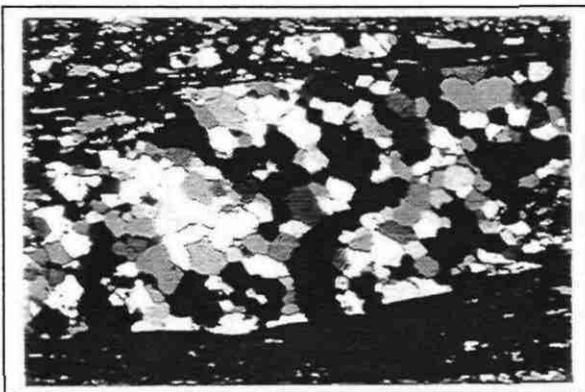
0.13mm

CFC 42b



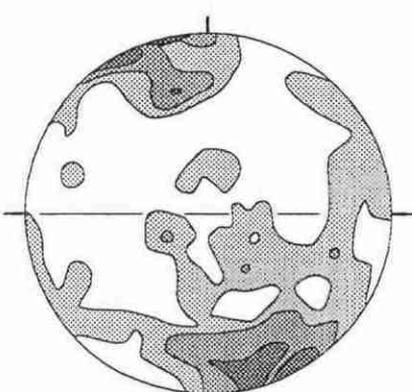
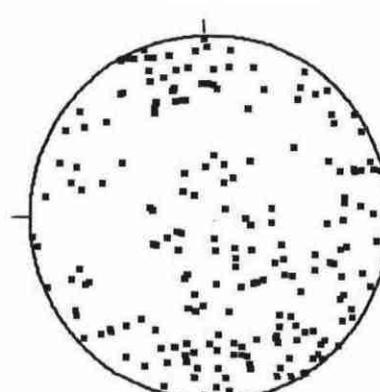
Densité max 6,9%

200 mesures



0.16mm

FC69 sig



Densité max 3.9%

1 mm



Planche 12: Microstructures et orientations préférentielles des axes  $\langle c \rangle$  du quartz des exsudats présentant des joints de grain droits.

- Les fabriques formant des guirlandes plus ou moins bien définies, asymétriques, suggérant une déformation avec une composante en cisaillement (Etchecopar, 1977; Etchecopar et Vasseur, 1987; Law et al., 1990) vers le N à NW (CFC42b) ou vers le S à SE (FC69, FC69sig).
- La fabrique particulière FC83 provient de mesures d'axes <c> effectuées au niveau d'un boudin et peut donc refléter l'orientation d'un unique grain qui aurait recristallisé en petits grains par rotation de sous-grains.

### 3. 1. 5. Apport du goniomètre de texture

Une analyse complète des axes cristallographiques du quartz pour l'exsudat EC29 est présentée en planche 13-A.

#### 3. 1. 5. 1. Description

La répartition des axes <c> se fait selon trois maxima principaux (jusqu'à 9,2% des axes <c> calculés), un en bordure du diagramme à 30° de Z, un à 20° de la bordure du diagramme à 10° de Z et un à 30° de la bordure du diagramme à 30° de Z. La répartition des axes <a> est essentiellement localisée selon deux maxima (jusqu'à 4,7% des axes calculés) en bordure du diagramme. Un est proche de la direction X, le deuxième est à 30° de Z. Les axes <m> sont répartis selon plusieurs maxima dont le principal (jusqu'à 4,6% des axes calculés) est en bordure de diagramme à 30° de X. Les axes r+z sont répartis selon une bande parallèle à X et un maximum en bordure de diagramme proche de Z.

#### 3. 1. 5. 2. Interprétation

La plupart des axes cristallographiques du quartz s'effectue selon deux ou trois maxima. La position des maxima ne peut pas s'interpréter comme le résultat d'une déformation intracristalline. Ils correspondent probablement à une microstructure héritée, formée au moment de la croissance de l'exsudat. Ces orientations d'axes cristallographiques sont interprétées comme l'orientation des axes de deux ou trois anciens grains qui constituaient originellement l'exsudat de quartz.

### 3. 1. 6. Discussion

Les données obtenues par le goniomètre de texture indiquent que les exsudats étaient probablement formés originellement de quelques grains de grande taille. L'observation au microscope optique avec la lame quart d'onde de domaines constitués de grains à axes <c> d'orientation voisine et l'allure de certaines fabriques d'axes <c> permettait déjà de soupçonner une telle conclusion. Les microstructures observées actuellement proviennent donc d'une recristallisation de l'exsudat au moment de la déformation en cisaillement. D'autres observations sont en faveur d'une telle conclusion telle l'absence d'inclusions fluides primaires dans le quartz (contrairement aux plagioclases et apatites, voir chapitre V) et la forte concentration aux joints de grains d'inclusions fluides à  $\text{CO}_2 \pm \text{CH}_4 \pm \text{N}_2$  dont beaucoup sont décrépitées.

## Exsudat EC29

### A

Axes <c> régénérés



Densité maximale: 9,2 %

Axes <a> régénérés



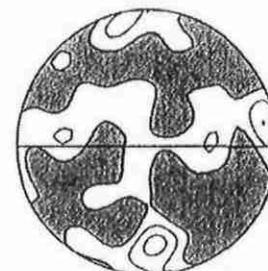
Densité maximale: 4,7 %

Axes <m> régénérés



Densité maximale: 4,6 %

Axes r+z régénérés

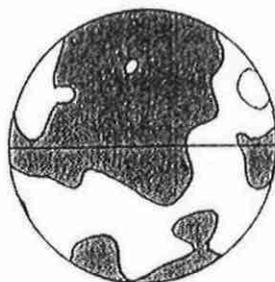


Densité maximale: 3,5 %

### B

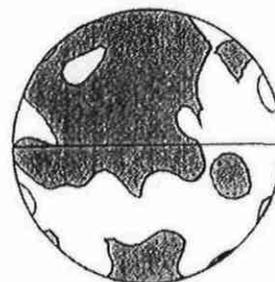
## Quartzite FC2

Axes <a> régénérés



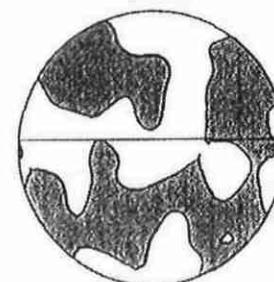
Densité maximale: 2,4 %

Axes <m> régénérés



Densité maximale: 2,6 %

Axes r+z régénérés



Densité maximale: 1,6 %

Planche 13: Pôle des figures des axes cristallographiques du quartz pour un exsudat (A) et un quartzite (B). La ligne EW représente la schistosité majeure et la linéation d'étirement est horizontale dans ce plan. Les contours sont à 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 %.

En raison des conditions moyennement élevées de la déformation (500°C), cette recristallisation correspond probablement à une recristallisation dynamique par rotation de sous grains (Poirier et Nicolas, 1975) qui entraîne une diminution de la taille des grains. L'orientation préférentielle de l'axe <c> des nouveaux grains peut être toutefois interprétée en termes de déformation intracristalline malgré l'héritage de la fabrique de croissance. On peut constater que les fabriques s'interprétant en termes d'orientation préférentielle des axes <c> du quartz liées à la croissance de l'exsudat, correspondent aux exsudats aux grains de quartz les plus gros (EC15, EC19, CF13), à l'exception de celles provenant de domaines boudinés (EC5, FC83). Ces exsudats sont donc probablement les moins déformés.

Les exsudats présentant des fabriques pouvant s'interpréter en termes de déformation intracristalline indiquent:

- une déformation avec une composante en cisaillement soit vers le Nord soit vers le Sud,
- une déformation dans le champ de l'aplatissement,
- et une activation des systèmes de glissement basal <a> et prismatique <a> indiquant des conditions de déformation de moyenne température (400-500°C).

### **3. 2. Dans les quartzites**

Les quartzites choisis ne contiennent qu'une seule schistosité S1. Ainsi, les orientations préférentielles du quartz matriciel dans les quartzites pourront éventuellement donner des indications sur les conditions de la déformation régionale. Cette déformation étant relativement précoce dans l'histoire varisque, cela ne sera possible que dans le cas où les fabriques acquises précocement ne sont pas modifiées par les stades de déformation ultérieurs.

#### **3. 2. 1. Description des microstructures**

Les quartzites sont constitués de grains de quartz de petite taille, de l'ordre de 0,1 mm, aux contours globalement rectilignes, légèrement allongés parallèlement à la schistosité et à la linéation d'étirement. Les grains ont une extinction onduleuse ce qui témoigne de la présence de sous-joints. Ces caractéristiques sont des indices d'un mécanisme de déformation intracristalline (White, 1976). Les contacts micas-quartz sont rectilignes, parallèles aux clivages (001) des micas.

#### **3. 2. 2. Description des fabriques d'axes <c> du quartz (Planche 14 et 15)**

Dans toutes les fabriques de quartzites une concentration des axes <c> bien marquée proche de Y est observée.

- Les fabriques FC2m, FC31, FC10 et FC11a présentent des petits cercles centrés sur ou à proximité de Z. Sur les cercles, les maxima (qui représentent respectivement 4,6%; 3,6%; 5,1% et 7,6% des mesures) sont

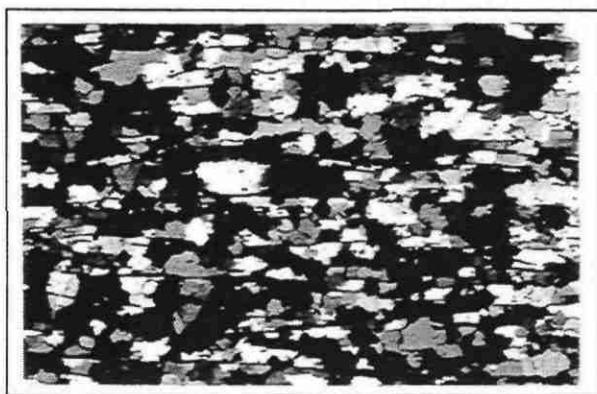
S à SE

N à NW

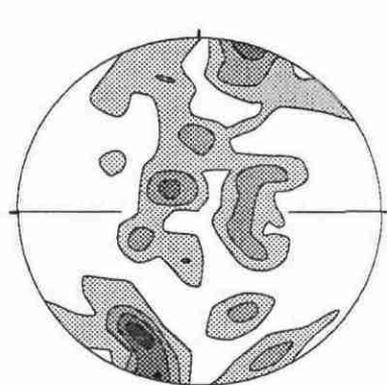
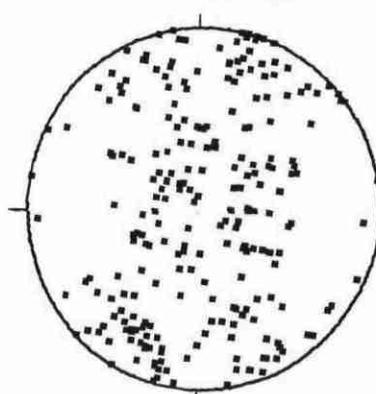
239 mesures

S à SE

N à NW

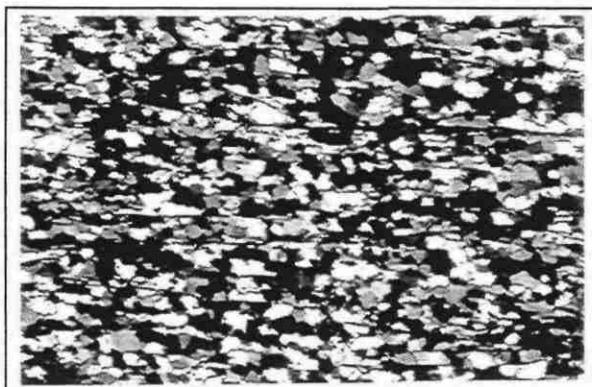


FC 13

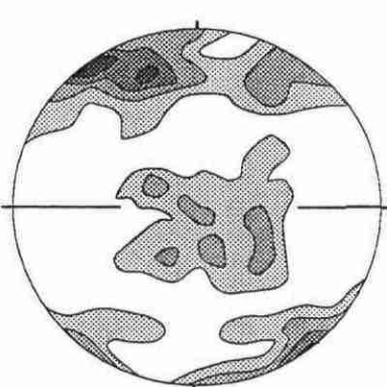
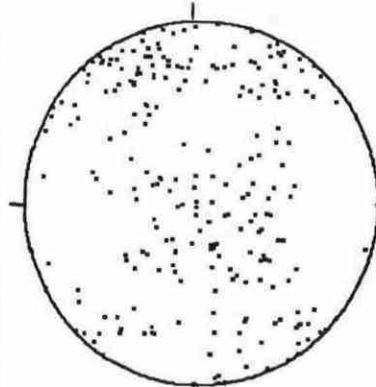


Densité max: 5,5%

240 mesures

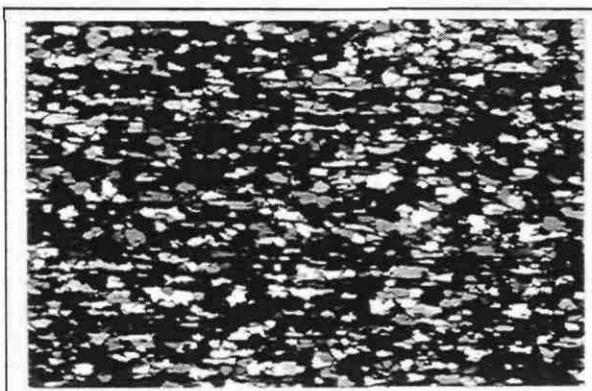


FC 2m

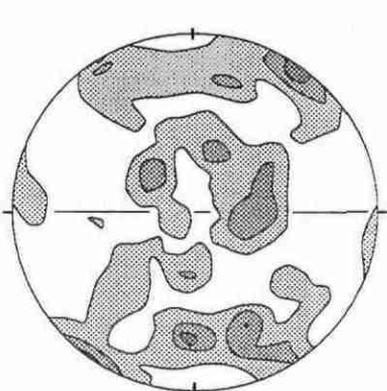
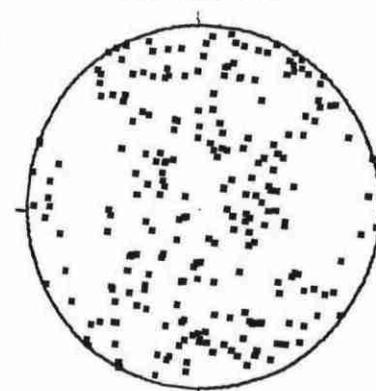


Densité max 4,6%

240 mesures



FC 31



Densité max 3,6%

1 mm

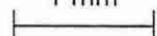


Planche 14: Microstructures et orientations préférentielles des axes  $\langle c \rangle$  du quartz matriciel dans les quartzites.

S à SE

N à NW

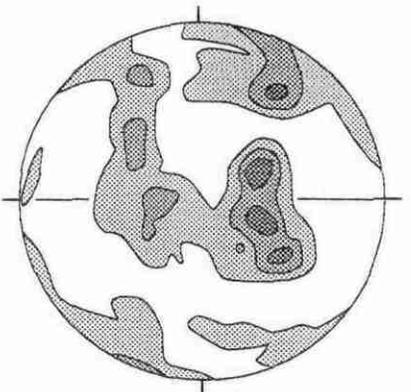
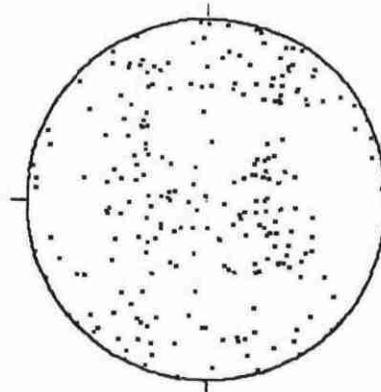
240 Mesures

S à SE

N à NW

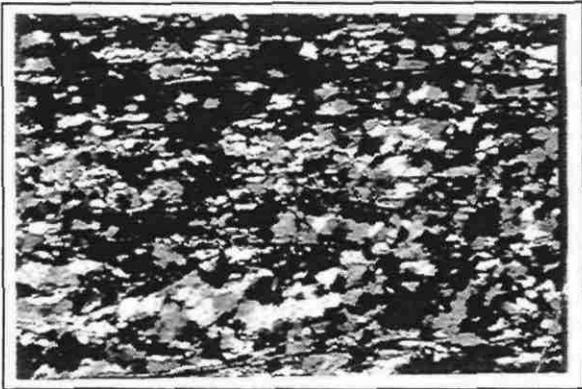


FC 39m

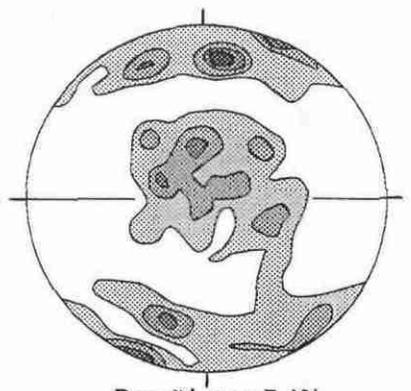
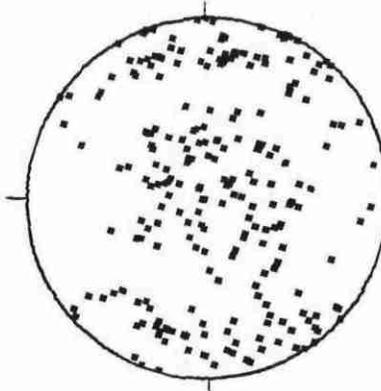


Densité 4,3%

240 Mesures

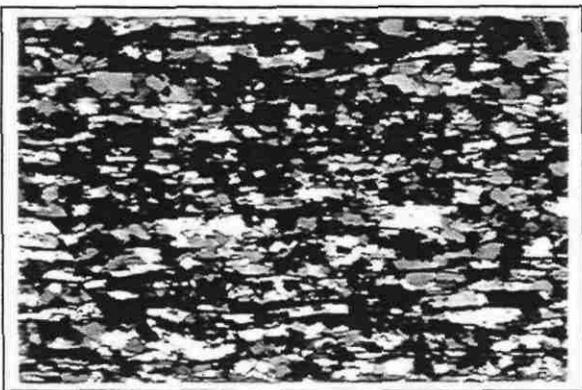


FC10

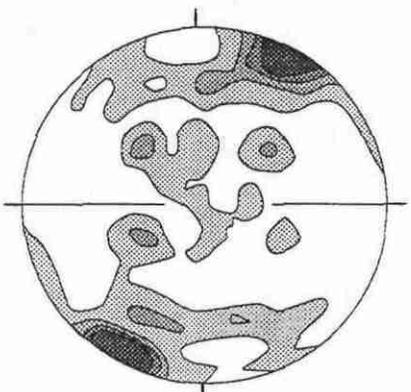
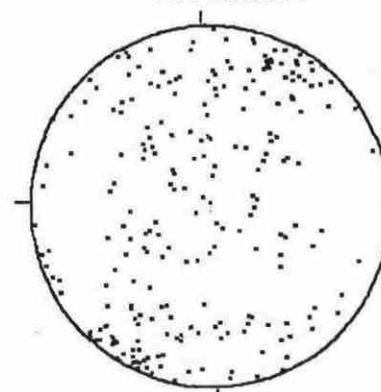


Densité max 5,1%

240 mesures



FC 11a



Densité max 7,6%

1 mm

Planche 15: Microstructures et orientations préférentielles des axes  $\langle c \rangle$  du quartz matriciel dans les quartzites.

en bordure du diagramme à environ 30° de Z soit au Nord (FC31, FC10, FC11a) soit au Sud (FC2m).

- Les axes <c> des fabriques FC13, FC31, FC39m, FC10 et FC11a tendent à se concentrer selon des guirlandes croisées plus ou moins bien définies, présentant des maxima soit uniformément répartis sur les guirlandes (FC31, FC39m) soit plus importants en bordure de diagramme, à environ 30° de Z, au Nord, FC10, FC11a).

### 3. 2. 3. Interprétation des fabriques d'axes <c> du quartz

- On observe, dans toutes les fabriques obtenues, des maxima en bordure de diagramme et localisés près de la direction (Y). Ceci est un indice d'activation du système basal <a> et prismatique <a>. L'activation de ces systèmes suggère des conditions de déformation à moyenne température (400 à 500°C).
- Les petits cercles centrés à proximité de (Z), observés dans les fabriques FC2m, FC10, FC 31 et FC11a peuvent s'interpréter par une déformation dans le champ de l'aplatissement (Tullis et al, 1973; Marjoribanks, 1976; modèle B de Lister et Hobbs, 1980; Law, 1986; Schmid et Casey, 1986).
- Les fabriques FC10, FC13, FC11a, FC31 font apparaître des guirlandes croisées plus ou moins bien définies qui suggèrent une déformation plutôt coaxiale. Cependant une des deux guirlandes, est souvent plus peuplée que l'autre indiquant l'existence d'une composante non rotationnelle. De même les cercles centrés sur ou proches de Z présentent des maxima mieux développés d'un coté que de l'autre. Le sens de cisaillement compatible avec cette asymétrie diffère d'une fabrique à l'autre; il est parfois vers le N à NW (FC13, FC10, FC11a) parfois vers le S à SE (FC2m).

### 3. 2. 4. Apport du goniomètre de texture

#### 3. 2. 4. 1. Description

Une lame de quartzite contenant un fin filonnet d'exsudat de quartz est présentée dans la planche 13-B. Les axes <c> sont répartis selon une guirlande asymétrique à 30° de Z avec un maximum (jusqu'à 4% des axes calculés) à 20° de la bordure du diagramme. Les répartitions des axes <a> et <m> sont similaires et se font selon un maximum (de 2,4 % et 2,6% des axes calculés <a> et <m> respectivement) à 30° de X. Ces maxima sont situés à 90° de la guirlande asymétrique définie par l'orientation des axes <c>. Les plans r+z ne montrent pas d'orientations particulières.

#### 3. 2. 4. 2. Interprétation

La guirlande asymétrique indique une orientation préférentielle des axes <c> du quartz due à une déformation non-coaxiale. L'asymétrie indique un sens de cisaillement vers le SE (Etchecopar, 1977; Etchecopar et Vasseur, 1987; Law et al., 1990). L'orientation préférentielle des axes <a> est parallèle à la direction de cisaillement, indiquant un glissement dominant selon la direction

<a> pendant la déformation (Schmid et Casey, 1986). Les axes <m> tendent également à s'aligner dans cette direction. Ces orientations préférentielles d'axes cristallographiques du quartz sont causées par la déformation intracristalline. Elles sont caractéristiques de mylonites provenant de quartzites affectés par une déformation non-coaxiale sous des conditions métamorphiques du faciès schiste-vert (300-400°C) (Schmid et Casey, 1986).

### **3. 3. Dans les exsudats plissés isoclinalement**

Deux exsudats plissés isoclinalement ont été étudiés. Les microstructures et les fabriques d'axes <c> du quartz sont présentées sur la planche 16.

#### **3. 3. 1. Description des microstructures**

L'exsudat CFC42a possède une microstructure à grains de quartz aux joints rectilignes identique dans les deux flancs du pli. Les grains de quartz sont de petite taille (0,12 à 0,15 mm) équants et à extinction nette. Les joints de grains tendent à former des points triples à 120°. Localement, des grains de plus grande taille s'observent et contiennent des sous-joints délimitant des sous grains de taille identique aux grains de quartz observés par ailleurs dans l'exsudat. L'exsudat FC91b présente une différence de microstructure entre la charnière et le flanc du pli. La charnière est constituée de grains de quartz de moyenne taille (0,31 mm) qui présentent peu d'extinction onduleuse et aux joints rectilignes. Le flanc possède des grains de quartz de taille identique à ceux dans la charnière (0,36 mm), présentant une forte extinction onduleuse et des joints aux contours plus lobés.

#### **3. 3. 2. Description des fabriques de quartz**

- Dans la lame FC91b, nous avons reporté sur des diagrammes différents les mesures effectuées au niveau de la charnière du pli et celles effectuées au niveau du flanc. On obtient des fabriques identiques caractérisées par une concentration des axes <c> du quartz selon des petits cercles centrés proches de Z avec un angle d'ouverture de 70° pour FC91bflanc et de 80° pour FC91bchar. Pour la fabrique FC91bchar, on observe deux maxima légèrement à l'intérieur du diagramme (dont le plus important contient 6,1% des mesures). Pour la fabrique FC91bflanc, les axes <c> sont concentrés à la périphérie du diagramme.
- Dans la lame CFC42a, nous avons reporté les mesures effectuées dans le flanc supérieur et celles du flanc inférieur dans deux diagrammes distincts. Deux fabriques différentes ont été obtenues. Les axes <c> de la fabrique CFC42asup tendent à définir une guirlande incomplète, asymétrique avec un maximum proche de la direction Y de la déformation finie (7,4% des mesures). L'asymétrie indique un sens de cisaillement vers le N à NW. La fabrique CFC42ainf présente également une guirlande asymétrique avec un maximum localisé dans le plan YZ, entre Z et Y, légèrement plus proche de Y (4,4% des mesures). L'asymétrie, dans ce cas, indique un cisaillement vers le S à SE. A cette guirlande se rattachent deux petites branches avec un maximum localisé à la périphérie du diagramme, à 30° de Z.

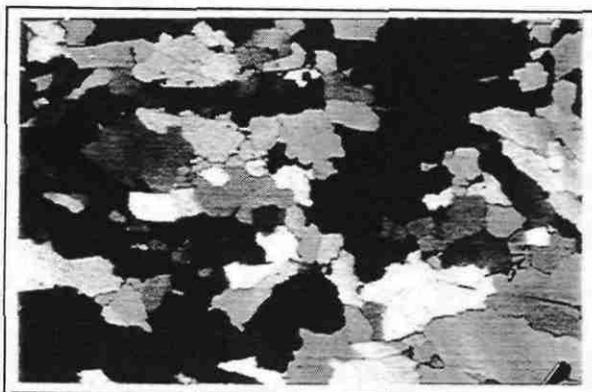
S à SE

N à NW

240 mesures

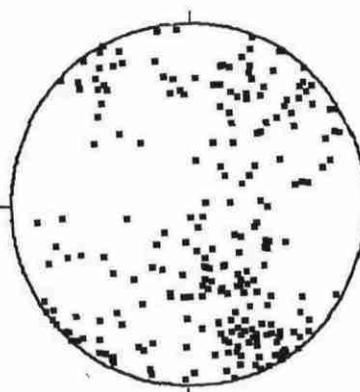
S à SE

N à NW

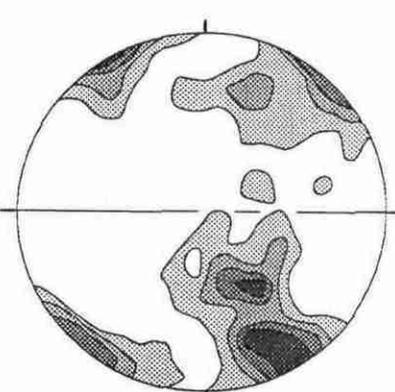


0.36mm

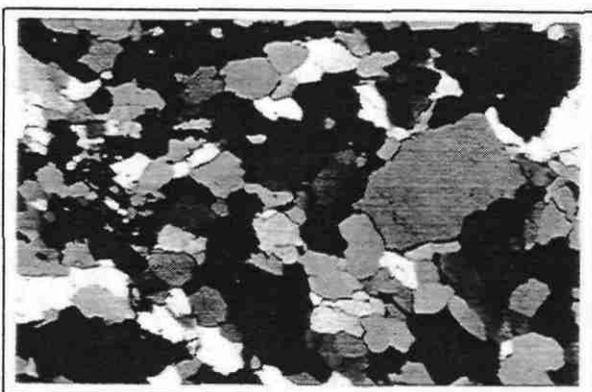
FC91bflanc



240 mesures

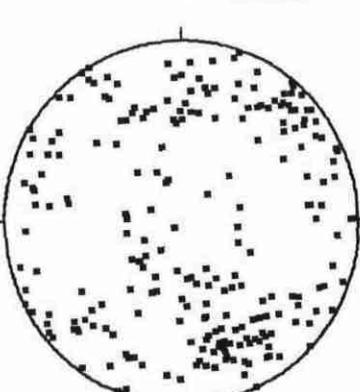


Densité max 5.5%

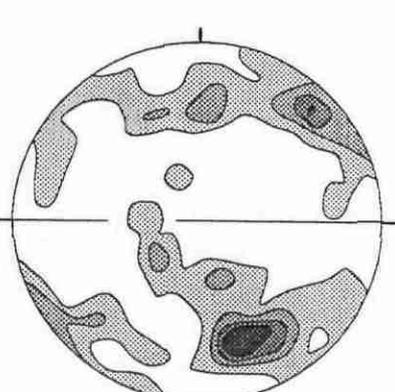


0.31mm

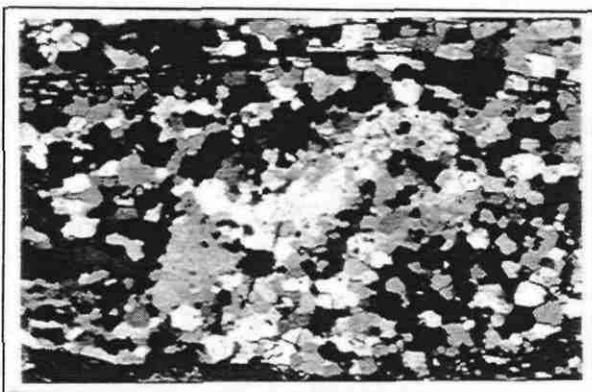
FC91bchar



240 mesures

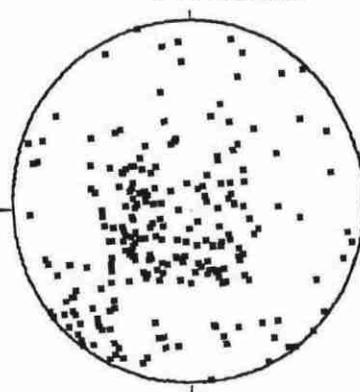


Densité max 6.1%

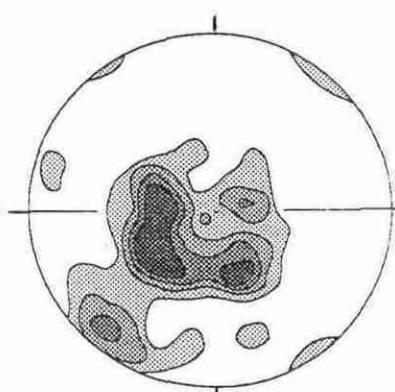


0.12mm

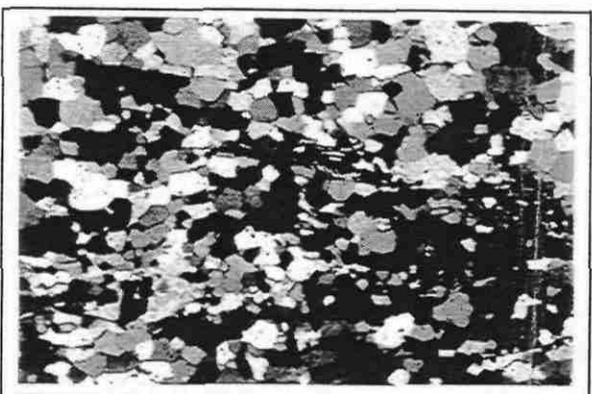
CFC 42a sup



240 mesures



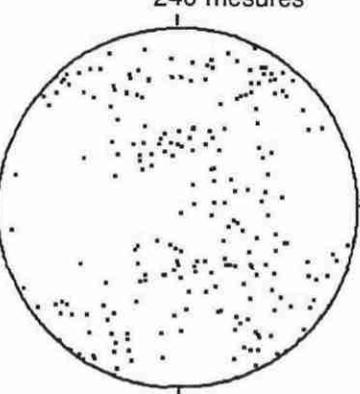
Densité max 7.4%



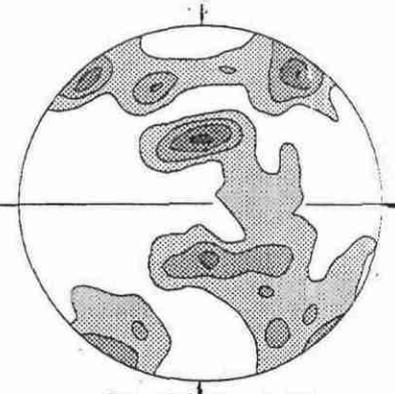
1 mm

0.15mm

CFC42a inf



240 mesures



Densité max 4.4%

Planche 16: Comparaison des microstructures et orientations préférentielles des axes  $\langle c \rangle$  du quartz dans les exsudats plissés isoclinalement entre les flancs et la charnière d'une part (FC91bflanc et FC91bchar) et les flancs inférieur et supérieur d'autre part (CFC 42a sup et CFC42a inf).

### **3. 3. 3. Interprétation et discussion**

Dans la première partie de ce chapitre nous avons décrit les plis P2 que nous interprétons comme un plissement associé au stade de déformation localisée, en cisaillement. Les fabriques effectuées dans la charnière et le flanc de l'exsudat FC91b présentent une allure typique indiquant une déformation en aplatissement (Tullis et al., 1973; Marjoribanks, 1976; modèle B de Lister et Hobbs, 1980; Law, 1986; Schmid et Casey, 1986). Le fait que la fabrique dans la charnière soit identique à celle mesurée dans le flanc est plutôt en faveur d'une origine précoce à synchrone de la fabrique par rapport au plissement. Dans le cas d'une origine précoce, le plissement a affecté l'exsudat sans modifier les orientations préférentielles du quartz initiales. Pour les fabriques CFC42a, on observe une inversion du sens de cisaillement entre le flanc inférieur et le flanc supérieur. Cette observation suggère d'une part que l'acquisition de l'orientation préférentielle des grains de quartz est antérieure au plissement et, d'autre part, que le plissement s'est initié avec un axe de pli proche de la linéation d'étirement. Cette interprétation est en accord avec une formation de plis à axe oblique à la linéation d'étirement, liée à l'existence d'une composante en décrochement proposée dans la discussion de la partie A de ce chapitre.

Pour cette raison il n'est pas possible de déduire un sens de cisaillement réel à partir de l'analyse des orientations préférentielles des axes  $\langle c \rangle$  du quartz. En effet, même si l'on n'observe pas de pli, les exsudats peuvent être des flancs inférieurs ou supérieurs d'anciens plis qui ont pu être cisailés ou étirés par la suite. Si le cisaillement n'est pas assez important pour détruire l'ancienne fabrique, cette dernière peut indiquer un sens de cisaillement différent selon la position en flanc inverse ou normal de l'exsudat. Ce phénomène peut expliquer les différents sens de cisaillement déduits de nos fabriques.

### **3. 4. Répartition géographique des fabriques d'axes $\langle c \rangle$ du quartz dans le contexte régional**

Lorsque l'on reporte les fabriques sur une carte (fig. II-20), on n'observe aucune relation entre le type de fabrique et leur disposition régionale. Le régime et le type de déformation semblent être plus liés à l'histoire propre de chaque exsudat qu'à la situation des exsudats par rapport aux zones de cisaillement ou qu'à leur position géographique. On peut toutefois constater que la majorité des fabriques présentant une forte concentration d'axes  $\langle c \rangle$  en Y sont localisées au Sud de la région étudiée. Cette observation peut indiquer une activation plus importante du système de glissement prismatique  $\langle a \rangle$ . Ceci pourrait s'expliquer par une température de déformation plus élevée dans le Sud que dans le Nord, cependant les données métamorphiques (voir chapitre V) montrent que l'ensemble du secteur s'est déformé sous des conditions de métamorphisme identiques.

### **3. 5. Comparaisons entre les fabriques obtenues dans les exsudats et dans les quartzites**

Les fabriques obtenues dans les quartzites présentent quelques différences avec celles effectuées dans les exsudats de quartz. Dans les quartzites, les

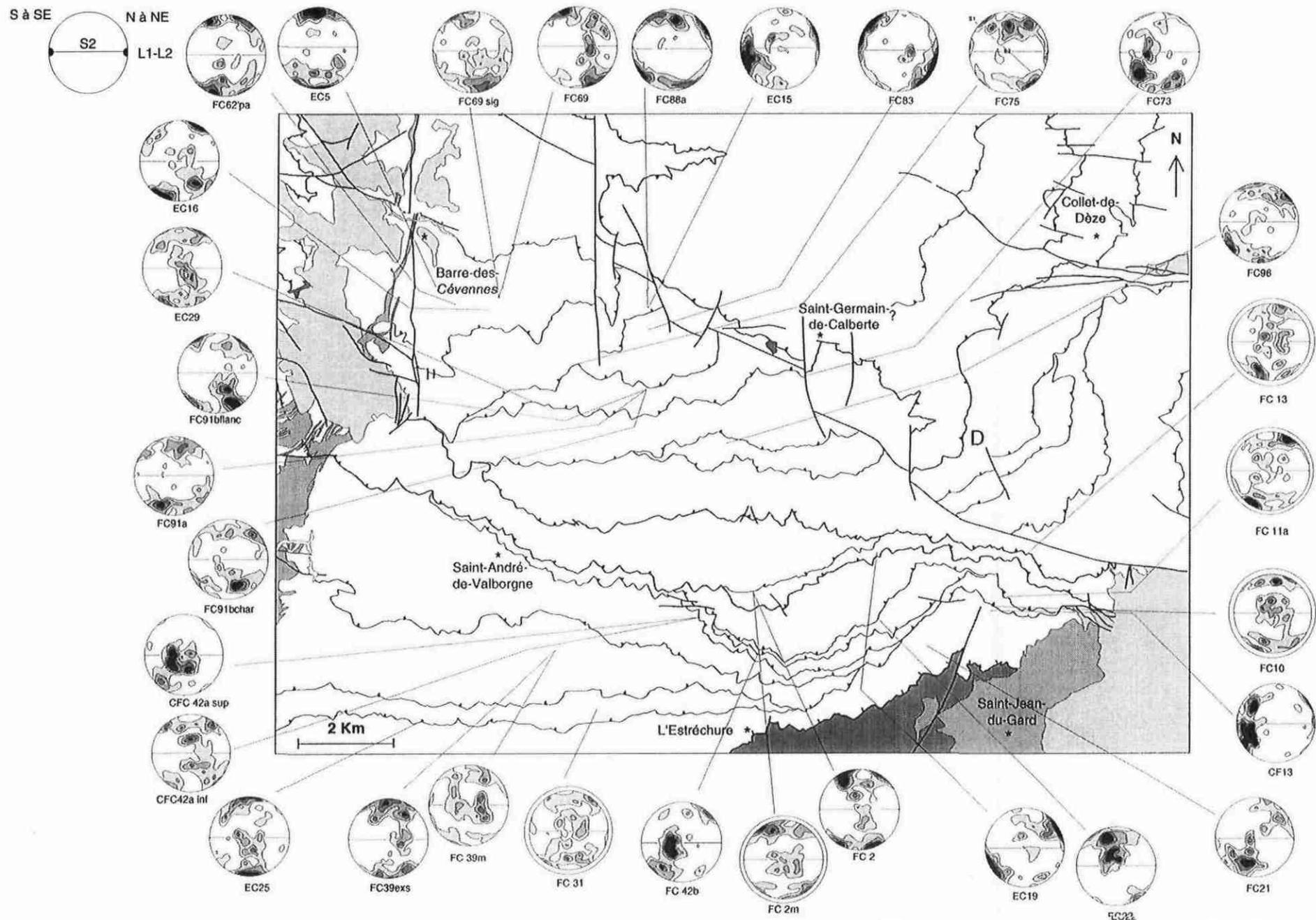


Figure II - 20: Carte de localisation des fabriques de quartz provenant des exsudats de quartz (diagrammes normaux) et des quartzites (diagrammes cerclés).  
 Les contours des diagrammes de densité sont à 1, 2, 3, 4%

fabriques sont plus symétriques ce qui suggérerait plutôt un régime de déformation essentiellement coaxial. Cependant une des deux guirlandes ou maxima sont souvent plus peuplés que l'autre, laissant supposer qu'une composante non rotationnelle n'est pas négligeable. Par ailleurs, cette déformation en cisaillement est bien montrée par l'orientation préférentielle des axes cristallographiques du quartz, déterminée sur l'échantillon FC2 par le goniométrie de texture. Certaines fabriques présentent des petits cercles centrés sur ou proches de Z indiquant une déformation en aplatissement aussi bien dans les exsudats que dans les quartzites. Il est difficile de comparer les fabriques dans les exsudats et dans les quartzites dans la mesure où les orientations des grains de quartz étaient différentes avant la déformation dans ces deux objets. Cependant, dans les deux types d'objets les répartitions d'axes  $\langle c \rangle$  sont voisines et caractérisent une même déformation en régime essentiellement non coaxial, souvent dans le champ de l'aplatissement et sous des conditions de basse à moyenne température (400-500°C). Nous ne pouvons cependant pas tirer de conclusions sur la déformation régionale précoce. En effet, les fabriques obtenues dans les quartzites sont probablement liées à la déformation localisée en cisaillement. Comme les travaux de Brunel (1980) le montrent, les quartz enregistrent généralement les derniers stades de la déformation.

D'après l'ensemble des données microstructurales à l'échelle de l'affleurement ou de la lame mince obtenues dans les zones de cisaillement affectant la série schisteuse, plusieurs conclusions ou hypothèses peuvent être apportées sur l'origine des exsudats de quartz, leur mécanisme de formation et les mécanismes de déformation actifs dans ces zones.

### *1. Origine des exsudats de quartz*

Dans la littérature, deux hypothèses sont évoquées pour expliquer la présence d'exsudats de quartz et autres minéraux dans les zones métamorphiques:

- Les réactions métamorphiques: les changements de conditions PT peuvent provoquer des modifications de l'activité de certains éléments dans la solution aqueuse, entraînant la précipitation de certains éléments et la dissolution d'autres, ceci afin de conserver l'équilibre thermodynamique entre les phases. Ce phénomène a été observé expérimentalement et appliqué pour expliquer la composition de certaines veines naturelles (par exemple Goffé et Murphy, 1987).
- La déformation par dissolution-cristallisation (Durney, 1972): dans ce cas, les éléments proviennent de la dissolution des éléments dans un lieu donné, leur transport par diffusion ou infiltration et leur recristallisation dans un nouveau lieu. Ce mécanisme a été notamment étudié expérimentalement par Gratier (1984) et nécessite obligatoirement la présence d'une phase fluide. Les structures les plus typiques expliquées par ce phénomène sont les systèmes fentes-stylolites.

Les réactions métamorphiques ne peuvent expliquer la présence de nos exsudats de quartz. En effet, si la concentration des exsudats dans des zones localisées était due à des réactions métamorphiques, la localisation des concentrations seraient liée à la composition des roches. Or, ces zones affectent indifféremment différentes lithologies (quartzites, micaschistes quartzeux, micaschistes noirs, niveaux carbonatés) tandis que des lithologies identiques ne contiennent pas ou très peu d'exsudats. La présence des exsudats, essentiellement concentrés au sein de zones plus déformées et se mettant en place tout au long du fonctionnement de la zone de cisaillement, est en faveur d'un rôle de la déformation lors de leur formation. La présence des exsudats de quartz s'explique donc plutôt par une déformation par dissolution-cristallisation importante dans ces zones.

## *2. Processus de cristallisation des exsudats*

Les exsudats ont cristallisé en fracture ouverte comme l'indiquent les observations suivantes:

- La présence de minéraux en rosettes en bordure d'exsudat.
- L'habitus des chlorites en "chenilles". Cet habitus a été observé expérimentalement lors d'expériences de cristallisation de minéraux correspondant à des fractures ouvertes (Goffé, communication personnelle).
- L'habitus automorphe de certaines albites.

Dans le cas de cristallisation en fracture ouverte, la vitesse d'ouverture de l'exsudat est supérieure à la vitesse de cristallisation des minéraux dans l'exsudat (Cox, 1991; Foxford et al., 1991). La cristallisation des minéraux s'effectuera lorsque la solution sera sursaturée en éléments qui compose les minéraux. Un tel processus explique l'absence de quartz fibreux dans nos exsudats comme ceux décrits dans les veines formées par "crack seal" (Ramsay, 1980b).

La présence de fluides lors de la cristallisation de l'exsudat est clairement démontrée par l'abondance d'inclusions fluides primaires dans les albites et les apatites constituant l'exsudat. La néoformation de biotite, chlorite et muscovite en bordure d'exsudat indiquent que la matrice est affectée par la présence de ces fluides. L'altération des albites constituant l'exsudat, notamment au contact matrice-exsudat, indique, soit que les fluides sont restés présents après la cristallisation de l'exsudat, soit que de nouvelles arrivées de fluides ont affecté l'exsudat postérieurement à sa cristallisation.

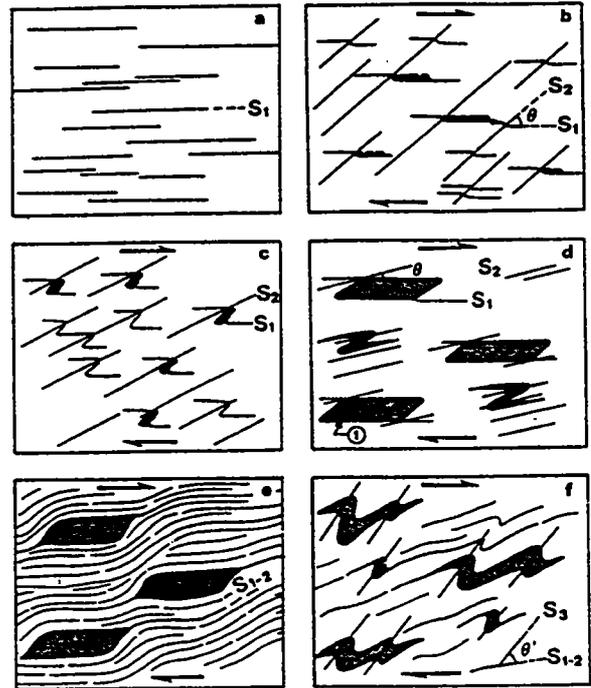
## *3. Mécanisme de formation des exsudats*

La présence d'exsudats parallèles à la schistosité dans un tel contexte de déformation peut s'expliquer selon plusieurs mécanismes:

- 1- cristallisation dans des vides en "dominos" créés lors de la déformation progressive en cisaillement (Sauniac, 1980) (fig. II-21A). Les fluides vont se localiser dans les vides créés et ne seront pas en surpression par rapport à la pression lithostatique. Pour un tel mécanisme, la croissance de l'exsudat se fait selon une direction à 45° de S1 et du contact matrice-exsudat (fig. II-21A-b-c et d).

- 2- cristallisation par fracturation hydraulique. La fracturation hydraulique s'effectue dans le cas où  $P_f - \sigma_3 > T_0$ ,  $P_f$  étant la pression fluide,  $\sigma_3$  la contrainte principale minimale et  $T_0$  la résistance de la roche à la traction. Dans notre contexte tectonique et pour des conditions de pression de formation des exsudats de  $4,3 \pm 0,4$  Kb (conditions obtenues sur les inclusions fluides primaires, voir chapitre V), la pression fluide correspond à la pression lithostatique. La fracturation hydraulique peut donc s'effectuer

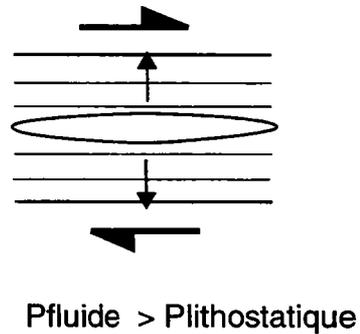
A



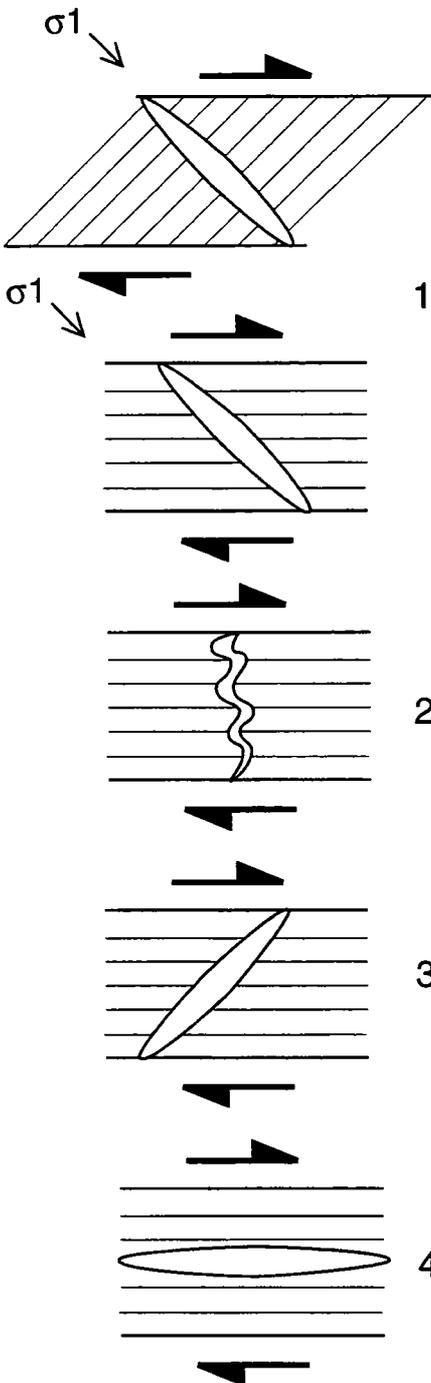
Mécanisme de formation des exsudats de quartz parallèles à la schistosité d'après Sauniac (1980).

Les filons sont en grisé sur les schémas. Quand le plissement de S1 est peu important, on a une formation de filons de quartz longs et fins (b). Le début du plissement de S1 (b) peut aussi être envisagé sans formation de S2. Celle-ci n'apparaîtrait qu'en figure c.  $\theta$  = angle entre S1 et S2, et cet angle diminue quand la déformation augmente. 1: fibres de croissance matérialisées sur l'affleurement par un liseré noir correspondant à une concentration d'impuretés.

C



B



Formation de l'exsudat dans les premiers stades de la déformation cisailante.

Formation de l'exsudat lorsque S est parallèle au plan de cisaillement.

Figure II - 21: Modèle de formation des exsudats parallèles à la schistosité dans les zones de cisaillement sous des conditions de pression fluide lithostatique (discussion dans le texte).

dans le cas où  $P_f > P_{\text{lithostatique}} + T_0$ . La croissance de nos exsudats en fracture ouverte implique un seul épisode de cristallisation dans une fracture (Cox, 1991) et la pression des fluides doit rester suffisamment élevée pour permettre à la fracture de rester ouverte. La croissance de l'exsudat se fait parallèlement au contact matrice-exsudat, généralement de la bordure vers le centre (Cox, 1991).

Dans le cas de la fracturation hydraulique, deux mécanismes sont possibles pour expliquer la géométrie des exsudats parallèles à la schistosité pour une déformation en cisaillement:

- a - L'exsudat cristallise faisant un angle de  $45^\circ$  à  $90^\circ$  avec la S1 selon le moment de sa formation par rapport à l'orientation des axes de la déformation finie. Si l'exsudat se forme précocément dans la déformation il fera un angle de  $90^\circ$  avec la S1. Si sa formation s'effectue lorsque la S1 est parallèle au plan de cisaillement, l'angle entre l'exsudat et la S1 sera de  $45^\circ$ . Entre ces deux cas extrêmes, l'angle entre l'exsudat et la S1 est intermédiaire entre  $90^\circ$  et  $45^\circ$ . Après sa formation il tournera, suite à la déformation progressive en cisaillement, jusqu'à devenir sub-parallèle à S1 (fig. II-21B).

- b - L'autre possibilité est d'envisager une formation originelle de l'exsudat parallèle à la S1 (fig. II-21C).

Une différence entre les modèles 1 et 2 réside dans la différence de pression fluide nécessaire pour former les exsudats. Elle doit être supérieure à la pression lithostatique dans le modèle 2 alors qu'une surpression fluide n'est pas nécessaire dans le modèle 1. Dans notre contexte tectonique, il n'est pas possible de mettre en évidence directement l'existence de surpressions fluides éventuelles liées à la formation de nos exsudats. En effet, cette surpression ne dépasse généralement pas 150 bars (au delà la roche se fracture). Or une telle variation est trop faible par rapport aux marges d'erreur liées à la méthode des inclusions fluides et ne peut être décelée.

Ainsi les seuls arguments pouvant distinguer les différents modèles sont la forme et les dimensions de l'exsudat, ses relations géométriques avec la déformation et les microstructures internes liées à sa croissance.

L'observation en 3D de nombreux exsudats (bien visibles en bordure de rivière, par exemple au lieu dit "les Martinets") (fig. II- 9) montre que nombre d'entre eux sont parallèles à la S1 sur des dimensions plurimétriques en longueur et largeur et pluricentimétriques en épaisseur. La S1 et les exsudats sont intensément plissés isoclinalement avec un développement d'une S2 de plan axial des plis qui affecte l'ensemble de la roche . Il est difficile d'expliquer une telle géométrie d'exsudat par le modèle 1. Ces exsudats paraissent s'être formés parallèlement à la S1 sur de larges étendues, ce qui semble incompatible avec la dimension des vides créés par un processus de décollement de la S1 lors de son plissement et l'ouverture de vides au niveau des charnières des plis. D'autre part nous n'avons jamais observé les fibres de croissance matérialisées par un liseré noir correspondant à une concentration d'impuretés, obliques à la schistosité et au contact matrice-exsudat décrites par Sauniac (1980) (fig. II-21Ad).

Nos observations sur les microstructures suggèrent plutôt une formation des exsudats selon le mécanisme 2b (fig. II-21C). La présence de niveaux de

composition variable au sein de l'exsudat, orientés parallèlement à l'exsudat, indique une croissance de l'exsudat parallèle au contact exsudat-matrice. Les lambeaux de matrice schistosée inclus dans l'exsudat mais ne montrant pas de rotation par rapport aux schistes encaissants, plaident en faveur d'une ouverture du plan de schistosité et de la formation de l'exsudat dans cette ouverture par croissance parallèlement à la schistosité. La préservation de la schistosité à l'intérieur de l'exsudat parallèle à la schistosité observée dans la matrice est un argument supplémentaire. En effet si l'exsudat s'était formé initialement perpendiculairement à la schistosité (mécanisme 2a, fig. II-21B), la matrice incluse dans l'exsudat aurait une schistosité perpendiculaire au contact matrice-exsudat et perpendiculaire à la schistosité externe après rotation de l'exsudat.

La majorité des exsudats ne peuvent donc pas s'expliquer par les mécanismes 1 et 2a et l'ensemble des observations s'intègre mieux pour un modèle de formation des exsudats parallèlement à S1 pour la plupart, ou S2, en réponse à une surpression fluide. Cependant certains exsudats sont clairement associés aux microstructures tels ceux se mettant en place entre les boudins de schistosité ou entre les niveaux lithologiques boudinés parallèlement à la S1 (fig. II-3). Dans un contexte de déformation en cisaillement,  $\sigma_1$  est théoriquement à  $45^\circ$  du plan de cisaillement. La formation d'une fente par fracturation hydraulique se fait théoriquement dans le plan  $\sigma_1$ - $\sigma_2$  et devrait donc être à  $45^\circ$  de la schistosité. Une fracturation parallèle à la schistosité peut toutefois s'expliquer mécaniquement puisqu'il est généralement plus facile de fracturer parallèlement à un plan d'anisotropie, la résistance de la roche à la traction étant moins élevée dans ce plan (Gratier, 1987).

#### *4. Le mécanisme de dissolution-cristallisation*

A partir de l'ensemble des données disponibles nous proposons que le mécanisme principal de déformation dans nos zones de cisaillement soit la dissolution-cristallisation. Les témoins de dissolution s'observent au niveau des relations S1 avec la S2, de celles des exsudats synS1 avec la S2 et des concentrations en minéraux insolubles (oxydes, minéraux accessoires) dans la S2. Le contrôle de la composition des exsudats par la composition de la matrice juste à proximité est en faveur d'un faible transport des éléments entre le lieu de dissolution et celui de cristallisation. Dans ce cas, cela signifierait une faible circulation de fluides ou un transport par diffusion de ce fluide. Un échantillonnage très serré d'exsudats de quartz au sein d'une roche contenant de nombreux niveaux lithologiques de compositions différentes permettrait de vérifier avec certitude cette hypothèse.

Une étude plus détaillée sur les lieux de dissolution (notamment par l'observation au microscope électronique à balayage) et sur les processus de transfert de fluides jusqu'aux lieux de cristallisation dans les exsudats de quartz permettrait de mieux caractériser les processus actifs lors de la déformation dans les schistes affectés par un cisaillement dans des conditions P-T vers  $500^\circ\text{C}$  et 4,5 Kb (voir chapitre V).

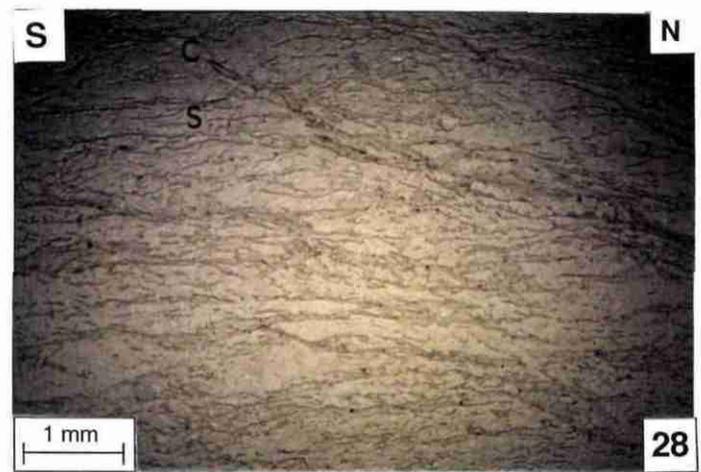


## CHAPITRE III

### ÉVÉNEMENTS POST-VARISQUES ET DÉFORMATIONS ASSOCIÉES

*A: Description des structures et microstructures*

*B: Discussion - conclusion*



**Planche 17: Déformation post-varisque.** 25: Contact orthogneiss-granite intrusif. La granodiorite à grands cristaux de feldspaths, non déformée, recoupe à l'emporte pièce les orthogneiss foliés (Vallée Borgne, bord du Gardon, au niveau de l'intersection D260-D907). 26: Plis en chevron P3 avec schistosité de fracture de plan axial (Route Ste Croix-Vallée Française-Les Martinets, avant les Martinets). 27: Plis en chevron associés à une faille N100-70N dans les schistes (Vallée Borgne). 28: Lame mince dans les schistes au contact de l'orthogneiss de Peyrolles. L'obliquité entre les plans de cisaillement et la schistosité indique un sens de cisaillement vers le Nord (lame CFC43, Peyrolles). 29: Faille normale affectant les séries schisto-gréseuses (N106, Collet de Dèze).

|                 |  |
|-----------------|--|
| <i>Partie A</i> |  |
|                 | <i>Description des structures et microstructures</i> |

## *1. Déformations liées à la mise en place des granodiorites*

Les déformations liées à la mise en place des granodiorites ont été décrites dans les travaux effectués dans les granodiorites et leurs auréoles de contact (Alabouvette et al., 1988; Faure, 1995; Najoui, 1996).

Meyer (1990) décrit la formation d'une S3 dans le secteur de Saint-Jean-de-Bruel, qui se caractérise par une intensification de cette schistosité en fonction de la distance avec le contact du granite de l'Aigoual. Dans le même secteur, des plis en genou ou kink-bands métriques sont observés. Deux générations de plis sont distinguées, des axes de direction N110 à N130 plongeant de 20° vers l'W ou NW et des kink-bands d'orientation proche de NS. Ces plis s'observent essentiellement dans l'auréole de contact. Une linéation de crénulation, d'orientation parallèle à l'axe de ces plis, s'observe sur les plans S1.

Faure (1995) (fig. I-13) décrit les caractéristiques structurales suivantes liées à la mise en place du Mont-Lozère, du Saint-Guiral et du Liron:

- Une trajectoire des foliations magmatiques de forme ellipsoïdale, le grand axe de l'ellipsoïde étant EW, parallèle à la forme des deux massifs.
- Une forme asymétrique des bordures des plutons, moyennement pentés vers le Nord au Nord et sub-verticaux au Sud.
- Des plis centimétriques à métriques, à axes de direction N90 à N130, déversés vers le Sud au contact Nord, sans déversement au contact Sud.
- Une linéation minérale EW marquée par l'allongement des xénolites et des biotites. L'analyse de la forme des xénolites indique une déformation dans le champ de la constriction.
- Une linéation minérale de certaines biotites et andalousites de contact orientée N80 à N150.
- Des critères de cisaillement observés sur les bordures Nord et Sud des deux massifs indiquent un sens de cisaillement vers l'Est.

Dans le secteur étudié, l'extrémité NE du massif du Liron affleure dans la région de Saint-Jean-du-Gard. Il est intrusif soit dans les orthogneiss de Peyrolles (photo 25) soit dans la série schisteuse.

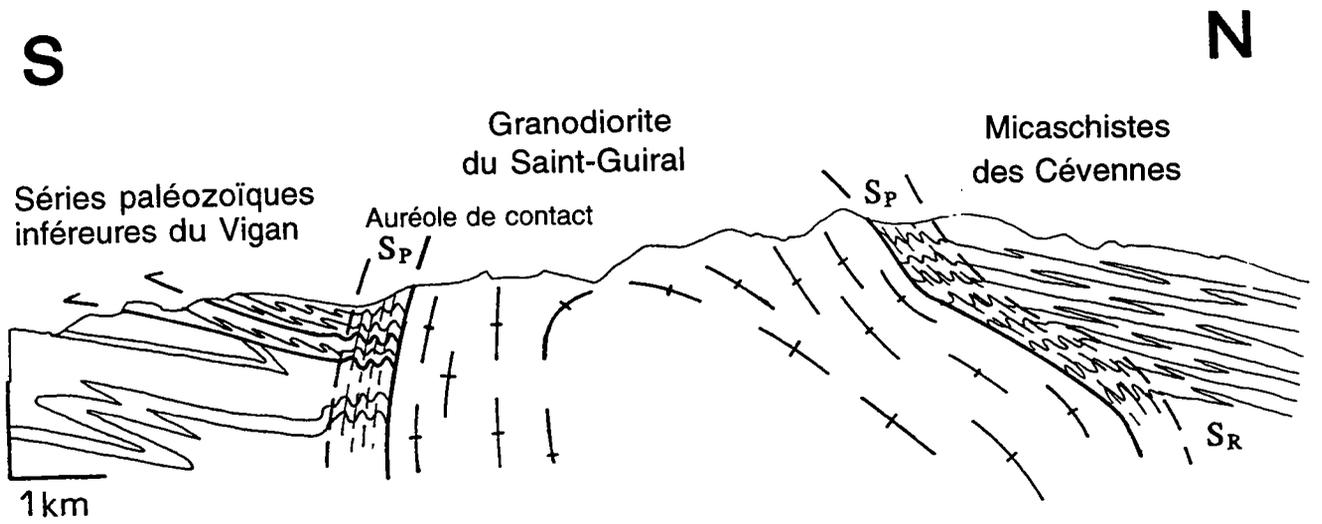


Figure III-1: coupe simplifiée à travers le granite de Saint-Guiral (d'après le travail d'Arthaud et discuté par Alabouvette et al, 1988).  $S_r$  est la schistosité régionale dans les micaschistes des Cévennes;  $S_p$  est la schistosité reliée au pluton dans l'auréole de contact.

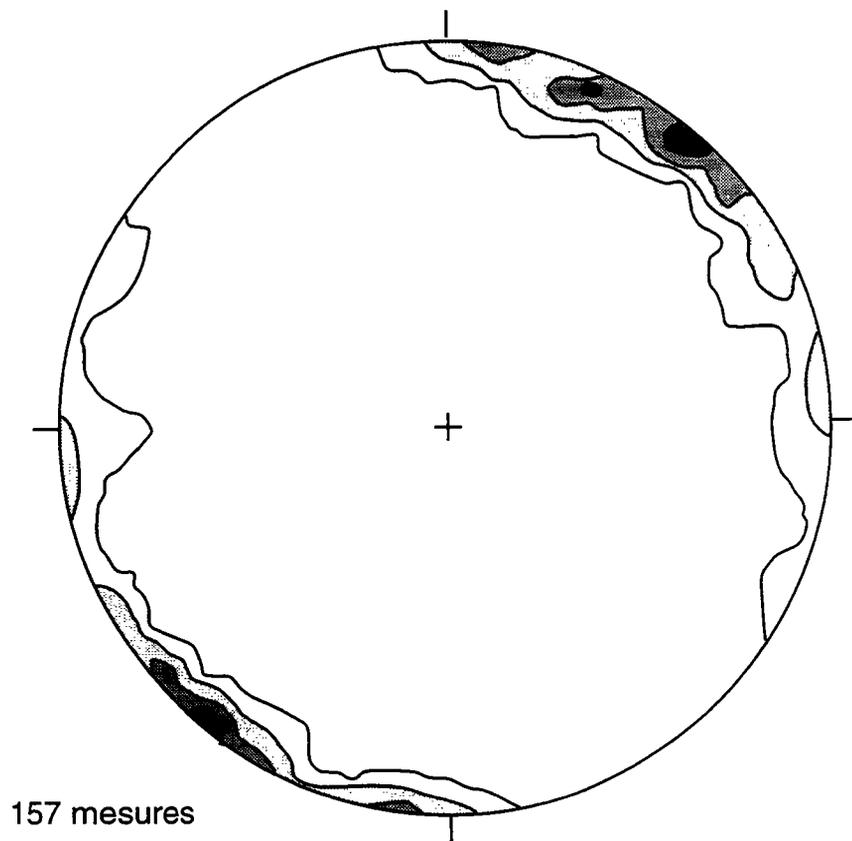


Figure III-2: Répartition des axes de plis P3 sur un diagramme de densité (contours à 2%, 4%, 6% et 8%) (diagramme de Schmidt, hémisphère inférieur).

La déformation liée à la mise en place des granodiorites est localisée à proximité des contacts et affecte les schistes essentiellement situés dans l'auréole de contact (fig. III-1). Leur mise en place est responsable du redressement de la S0-S1 dont le pendage augmente progressivement de 30 à 50° vers le Nord lorsque l'on se rapproche du contact Nord des granodiorites de Saint-Guiral et du Liron. Au Sud du Mont-Lozère, cette S0-S1 devient à pendage Sud.

## ***2. Déformations tardi-orisques***

### ***2. 1. plis P3***

Ce sont des plis en chevrons et kink-bands qui replissent les microstructures antérieures (photo 26). Ces plis, de taille centimétrique à décimétrique, présentent une schistosité frustrée de plan axial. L'ensemble des axes de ces plis a été reporté sur un diagramme de Schmidt (fig. III-2), ainsi que répartis dans 6 secteurs de la carte (NW, N, NE, SW, S, SE) (fig. III-3). Le diagramme de la figure III-2 met en évidence trois directions principales de plis, la plus marquée étant de direction NE-SW, puis NS et EW. Ces trois directions se retrouvent dans tous les secteurs étudiés lorsque les mesures sont assez nombreuses (fig. III-3). Certains de ces plis s'observent à proximité de zones faillées (photo 27). Parallèlement à l'axe de ces plis, une linéation de crénulation, sous forme de microplissement, affecte la schistosité S0-S1 ou la S2. Dans les schistes noirs, au NE du secteur étudié, une linéation de crénulation N45 est bien exprimée. Elle s'observe fréquemment sur les plans de schistosité et est marquée par une réorientation des micas allongés parallèlement à sa direction.

### ***2. 2. faille normale mylonitique***

L'orthogneiss de Peyrolles est affecté sur sa bordure Nord par un gradient de déformation croissante lorsque l'on se rapproche du contact orthogneiss-schistes. Ce gradient s'observe aussi bien à l'échelle de l'affleurement que de la lame mince.

#### ***2. 2. 1. A l'échelle de l'affleurement***

Les orthogneiss présentent une anisotropie planaire soulignée par une foliation marquée par la biotite et la muscovite qui moulent des porphyroclastes de feldspath potassique ou de quartz. En se rapprochant du contact, la taille des porphyroclastes diminue progressivement et ils deviennent plus aplatis et étirés jusqu'à un faciès caractérisé par une forte anisotropie planaire (foliation pénétrative millimétrique) où l'on distingue difficilement les porphyroclastes.

#### ***2. 2. 2. A l'échelle de la lame mince***

L'observation des lames minces montre une augmentation de la déformation lorsque l'on se rapproche du contact et qui se caractérise par:

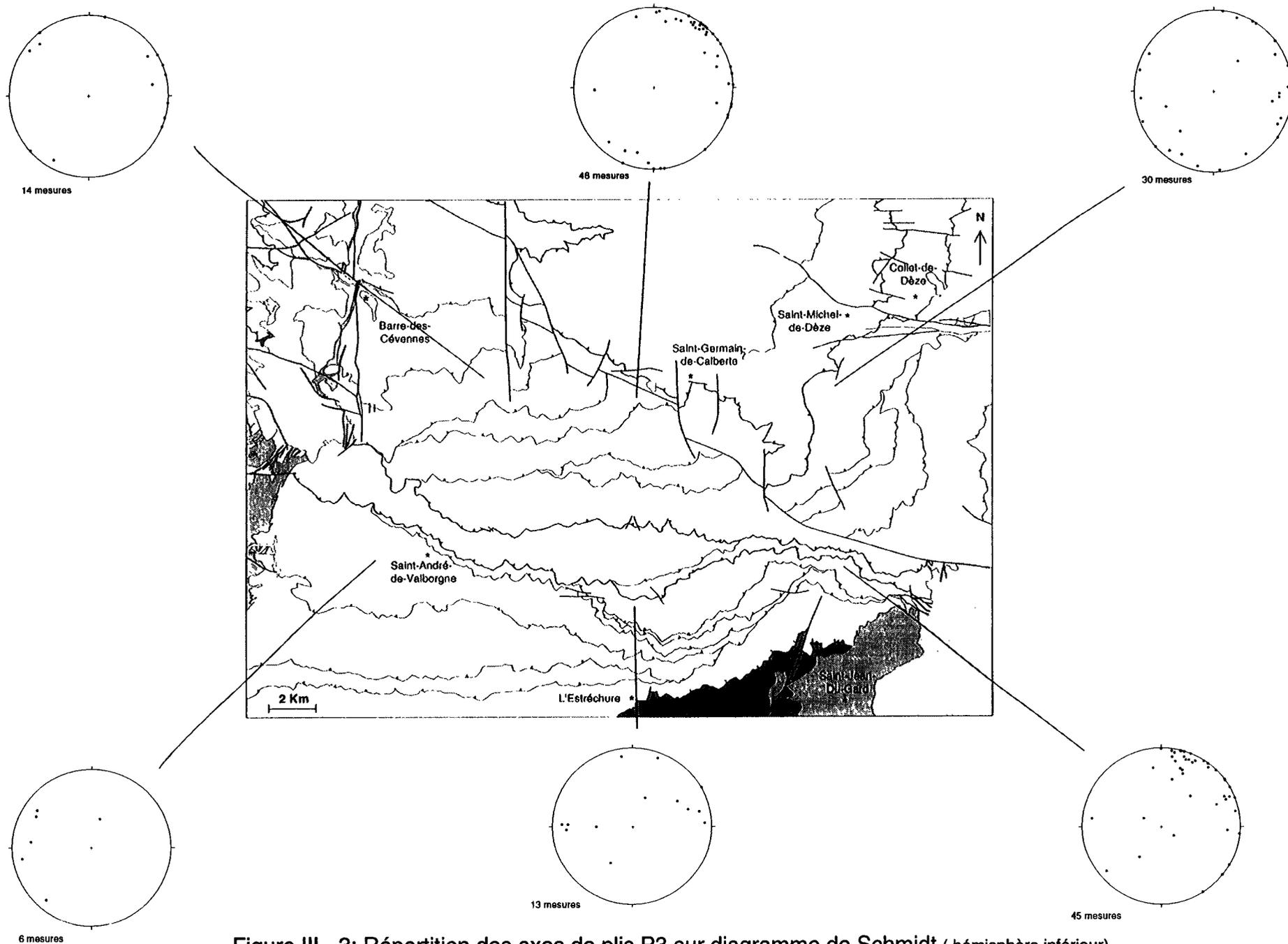


Figure III - 3: Répartition des axes de plis P3 sur diagramme de Schmidt (hémisphère inférieur).

- Une recristallisation dynamique du quartz qui s'accompagne d'une diminution de la taille des grains. Des sous-joints apparaissent, délimitant des sous-grains marqués par une extinction onduleuse. Des néoblastes de taille identique aux sous-grains apparaissent. Lorsque l'on se rapproche du contact, les grains de quartz sont de taille plus petite. Au contact, la taille des grains est encore plus réduite. On distingue des cristaux de petite taille qui correspondent aux anciens porphyroclastes et des cristaux minuscules provenant de la recristallisation dynamique de la matrice quartzeuse originelle.
- Une "microclinisation" des feldspaths alcalins.

La direction d'étirement soulignée par l'alignement des biotites est NS. Les schistes au contact contiennent une S1 affectée par des plans de cisaillement marqués par la muscovite. L'obliquité entre les plans de cisaillement et la schistosité indique un sens de cisaillement en faille normale vers le Nord (photo 28).

### **2. 3. Déformation fragile**

Les failles sont très fréquentes dans le secteur étudié. Elles s'observent à toutes les échelles, du réseau de microfailles d'échelle centimétrique à des failles pluri-kilométriques.

#### **2. 3. 1. Les failles kilométriques**

Dans les Cévennes centrales, trois failles d'échelle kilométrique se distinguent. Une faille N120 cartographiée au cours de cette étude, la faille de Saint-Michel-de-Dèze légèrement plus au Nord et la faille de Villefort à l'Est du secteur étudié.

- La faille de direction moyenne N120 apparaît souvent sur le terrain jalonnée par de la gouge de faille, et juxtapose anormalement des séries lithologiques différentes, tels les micaschistes noirs et les micaschistes quartzeux au SE, et deux séries de micaschistes quartzeux différentes, une essentiellement quartzo-pélique dans la partie SW et une plus feldspathique dans la partie NE. Sur le terrain cette faille correspond généralement à un secteur broyé sur quelques mètres. La série schisteuse est entièrement replissée en chevrons et affectée de nombreuses failles de directions variables, fortement pentées (60 à 90°) soulignées par de la gouge de faille. Il est généralement très difficile de distinguer un plan de faille majeur au sein de ce réseau faillé. Les stries s'observent rarement sur les plans de faille. De telles zones faillées s'observent:
  - Sur la route D983 après le lieu dit "le pont de Négase" entre Saint-Etienne-Vallée-Française et Saint-Germain-de-Calberte.
  - Sur le chemin partant de la route D983 (reliant Saint-Jean-du-Gard à Saint-Etienne-Vallée-Française) passant par Malmeillas, Dalle, Cuyeirolle, la Bruguière jusqu'au Falguières. Une zone faillée s'observe avant la Bruguière après avoir traversé le ruisseau de la Droubie. Au sein

de la zone faillée, une faille d'orientation 125-70N portant des stries de direction N10 se distingue. Les critères de sens de mouvement permettant de déterminer le jeu précis de cette faille n'ont pas été observés.

Parfois un seul plan de faille principal séparant des lithologies différentes s'observe:

- Sur le chemin partant de Saint-Etienne-Vallée-Française vers les Longagnes au niveau du pont de la Planquette. Une faille d'orientation 135-80N juxtapose des alternances centimétriques de micaschistes quartzeux et pélitiques au Sud et des quartzites feldspathiques au Nord de la faille.
- A l'intersection de la D28 et de la D13, une faille de direction N135-50N juxtapose des micaschistes quartzites feldspathiques au Nord avec des alternances centimétriques de micaschistes quartzites et pélitiques au Sud de la faille.
- Sur la D13, de Saint-Germain-de-Calberte vers Barre-des-Cévennes avant le plan de Fontmort, une faille N120 verticale juxtapose une alternance centimétrique de micaschistes quartzites et pélitiques au SW avec des schistes quartzites très feldspathiques de couleur beige au NE.

La géométrie de la faille, montrant un pendage fréquent de 60 à 80° vers le NE avec des stries proches de la direction de plus grande pente, suggère qu'il s'agit d'une faille normale. Cependant l'observation locale de la faille présentant un pendage vertical et des stries sub-horizontales montre qu'elle a pu jouer en décrochement. La virgation observée dans les séries au SE de la région, à proximité de cette faille, et l'orientation des filons de quartz tardifs de direction NW-SE observés au Sud de la faille, au Nord de Saint-Jean-du-Gard et pouvant s'interpréter comme des fentes de tension liées au fonctionnement de la faille, suggèrent un jeu dextre. Sur les cartes géologiques adjacentes, elle se prolonge vers le Nord, sur la feuille de Génolhac, où sont également distinguées deux séries lithologiques différentes: Une série schisto-gréseuse plus ou moins feldspathique, au NE et une série schisto-gréseuse séparée par un banc de quartzite d'une série de micaschistes noirs au SW. Sur cette feuille, la faille décale le Trias. Au SE elle se prolonge sur la feuille d'Alès où elle affecte le Trias, une partie du Lias puis s'ennoie sous le reste de la couverture mésozoïque. Sur notre secteur cette faille est recoupée et décalée par des décrochements dextres secondaires de direction N150 à NS.

- La faille de Villefort: Cette faille de direction N150 se localise à l'Est de notre secteur. Elle correspond à un décrochement sénestre et décale de 15 km le massif de la Borne du Mont Lozère (Roger, 1969; Pellet, 1972). Cartographiquement, la schistosité est incurvée sur 5 km de part et d'autre de la faille de manière conforme à un jeu sénestre (Magontier, 1988).
- La faille de Saint-Michel-de-Dèze de direction N120 a un jeu essentiellement vertical (Magontier, 1988). La cartographie montre qu'elle juxtapose les séries à l'envers au NE avec des séries à l'endroit au SW.

### 2. 3. 2. Les failles mineures

De nombreuses failles ont été observées sur le terrain. Leurs pôles ont été reportés sur un diagramme de Schmidt (fig. III-4). La majorité des failles ont des plans de direction comprise entre N90 et N180. Les maxima se situent autour des directions N150-160, N120-N130 et N50. Le jeu de nombreuses failles n'a pu être identifié en raison de l'absence de stries et de critères de sens de déplacement sur les plans de faille. Lorsque le jeu a pu être déterminé, il indique que la plupart des failles sont des décrochements ou des failles normales (photo 29). Quelques failles de faible pendage correspondent à des chevauchements. Les plans de failles interprétés comme des failles normales, soit par des critères de sens de déplacement, soit par leur géométrie et le décalage des niveaux lithologiques initialement continus qu'elles affectent, ont été reportés sur la fig. III-5. La plupart ont une direction entre N130 et N150, d'autres, plus pentés (pendage de 70 à 80°), ont des directions comprises entre N80 et N110.

En raison du faible nombre de failles entièrement déterminées (plan de faille, strie et jeu de la faille) et de l'incertitude des relations entre elles, une étude quantitative (détermination du tenseur des contraintes) de la fracturation tardi-hercynienne dans notre secteur n'est pas fiable.

Ces failles s'observent dans tout le secteur étudié. Cependant, le réseau de failles devient très dense dans le secteur Est d'où la plupart des mesures de failles proviennent (fig. III-4 et failles normales dans les coupes détaillées de la fig. IV-3). Cette intensification du réseau à l'approche de la faille de Villefort a déjà été soulignée par Magontier (1988).

Des failles normales ont également été décrites au niveau des contacts entre la granodiorite de Saint-Guiral et du Liron et de son encaissant (exemple de faille, N 90-45 S, pitch 70°W au Nord d'Alzon, Najoui, 1996). Ces failles sont postérieures au métamorphisme de contact puisqu'elles soustraient les auréoles internes du métamorphisme de contact.

### 2. 3. 3. Réseaux de failles normales

Des réseaux de failles à jeu normal ont été bien observés à plusieurs endroits:

- Sur la D983, une alternance de micaschistes quartzeux et micaschistes noirs est décalée par des failles d'orientation variant de 119-38NE à 162-33E, portant des stries plongeant dans la direction de plus grande pente. Le décalage des niveaux lithologiques indique un jeu en faille normale (fig. III-6). On peut souligner le faible pendage des failles pour des failles normales indiquant qu'elles ont dû être basculées postérieurement à leur formation.
- Sur la route de Saint-Jean-du-Gard, à Saint-Germain-de-Calberte (D984) au niveau du lieu dit "Les Martinets", des réseaux de microfailles normales d'échelle centimétrique s'observent clairement (fig. III-7). Elles se présentent sous forme de petites fentes à quartz, d'épaisseur millimétrique, et de longueur centimétrique à décimétrique. Ces petites fentes ont des orientations d'environ N150 à pendage de 60° vers l'E, et sont parfois localisées dans certains niveaux. Elles décalent les

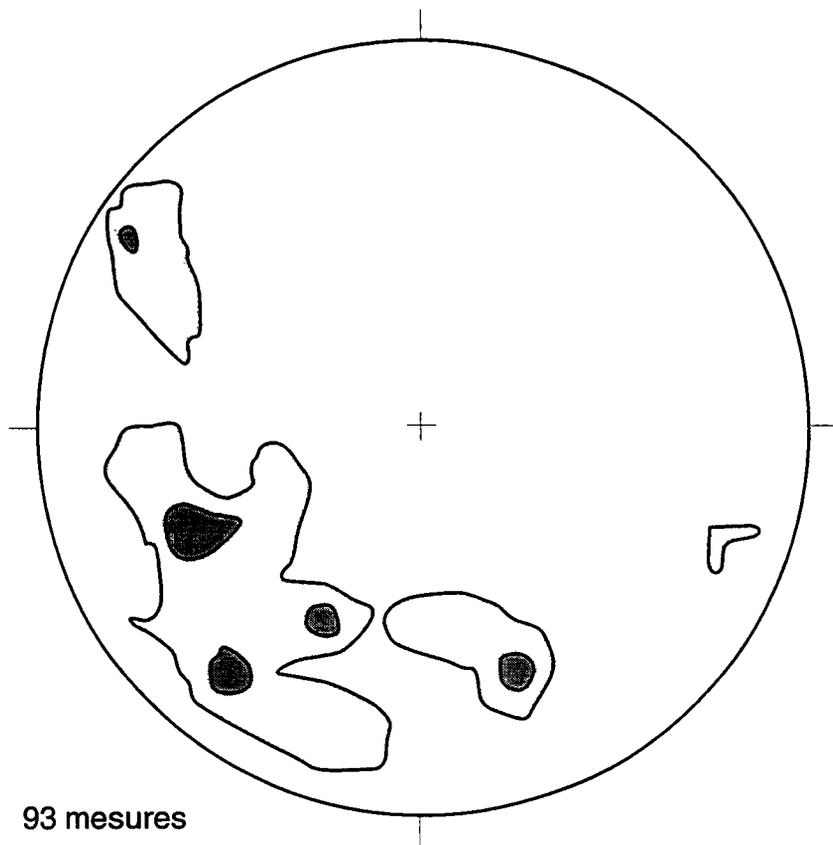
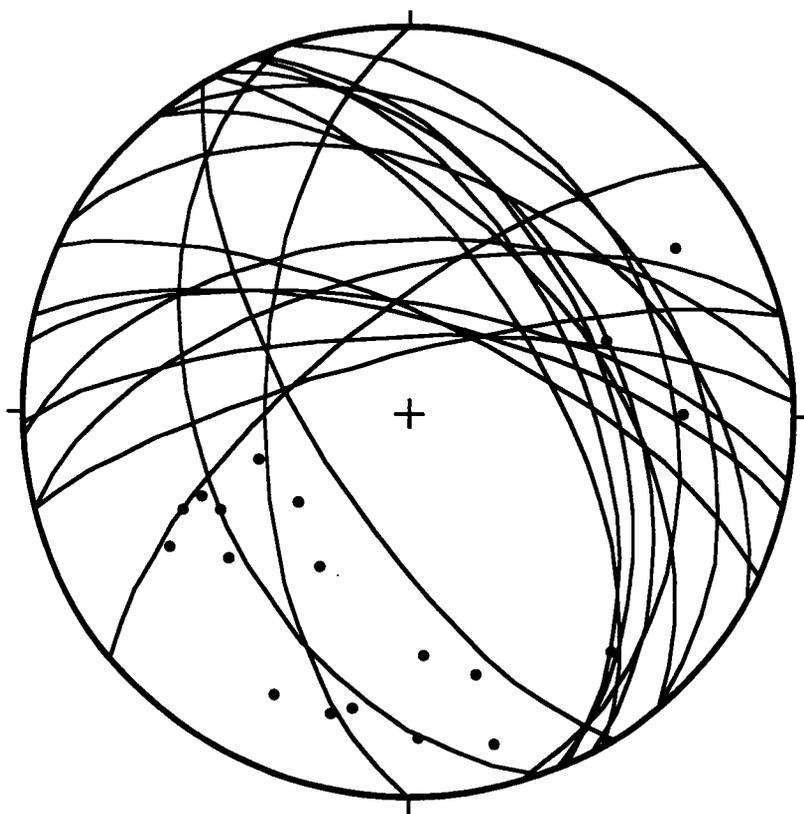


Figure III - 4: Diagramme de densité des pôles de plan de failles (contours à 2%, 4%) (diagramme de Schmidt , hémisphère inférieur).



19 mesures

Figure III - 5: Répartition des plans de failles normales et de leurs pôles sur diagramme de Schmidt (hémisphère inférieur).

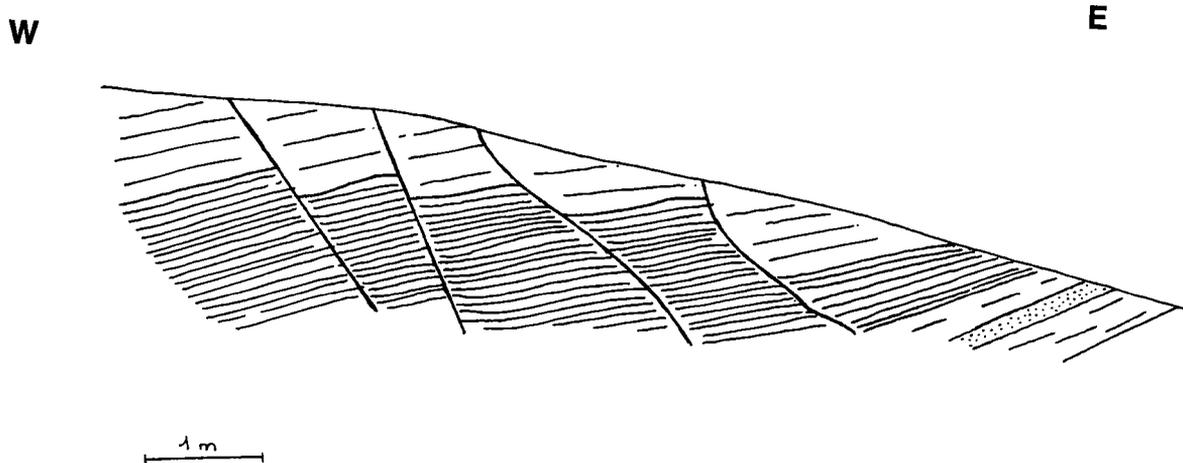


Figure III-6: Réseau de failles normales N150-30 à 50°E décalant la S0-S1 (sur la route de Sainte-Croix-Vallée-Française à Barre-des-Cévennes, D98, après Sainte-Croix-Vallée-Française).

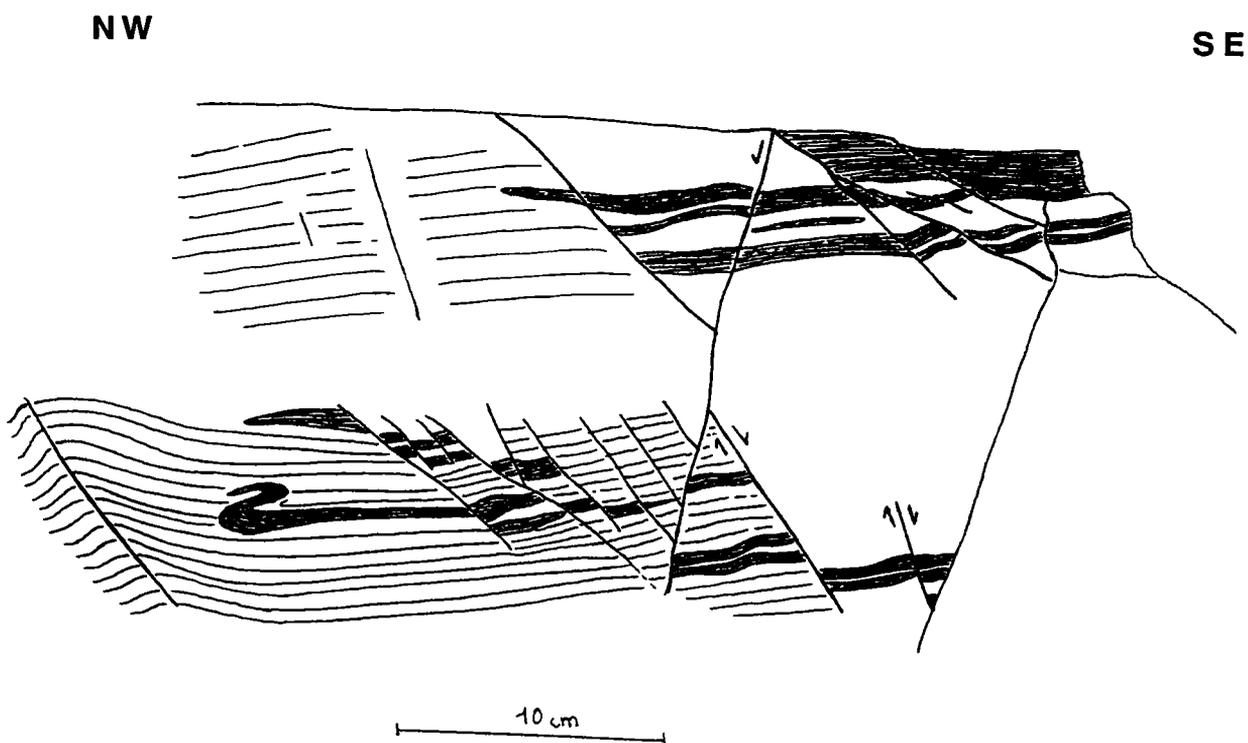


Figure III-7: Réseau de failles normales N150-60E décalant la S0-S1 et les exsudats de quartz parallèles à S1 (en niveaux sombres) (Les Martinets).

alternances lithologiques et les exsudats de quartz parallèles à la schistosité. Leur jeu apparent est en faille normale vers le NE. De tels réseaux s'observent fréquemment à l'affleurement des "Martinets" et présentent les mêmes caractéristiques. Un autre exemple est montré sur la figure III-8 où le jeu des failles recoupe un pli en chevron P3.

- Des plans de rupture, de direction environ N20 à N30 et pendant de 70°E à 90° vers l'W, sont également observés. Ces fractures ne contiennent pas de quartz et traversent l'ensemble des niveaux lithologiques. Elles décalent très peu les structures antérieures. Dans le réseau de la figure III-7 elles recouperont le système de microfailles orientées N150-60E.

#### **2. 3. 4. Fentes tardives déformées**

Une observation (fig. III-9) montre une fente de 5 mm d'épaisseur remplie de quartz recoupant les structures antérieures. Elle est orientée N152 pendant de 70° vers le SW et est replissée. Cette structure peut s'interpréter de deux manières:

- Une formation d'une fente à quartz postérieurement à la S1 de pendage originel vers l'Est affecté par un cisaillement vers le ENE ou le WSW.
- Une formation d'une fente à quartz postérieurement à la S1 de direction N150-70W plissée par une compression verticale.

Dans les deux cas, cette structure ne peut pas s'interpréter par la déformation progressive en cisaillement vers le SE décrite dans le chapitre II. Elle met en évidence une déformation postérieure soit en extension (direction de raccourcissement maximum verticale) soit en cisaillement. La présence de nombreuses fentes à quartz tardives, de cette direction et non plissée est plutôt en faveur de la première hypothèse.

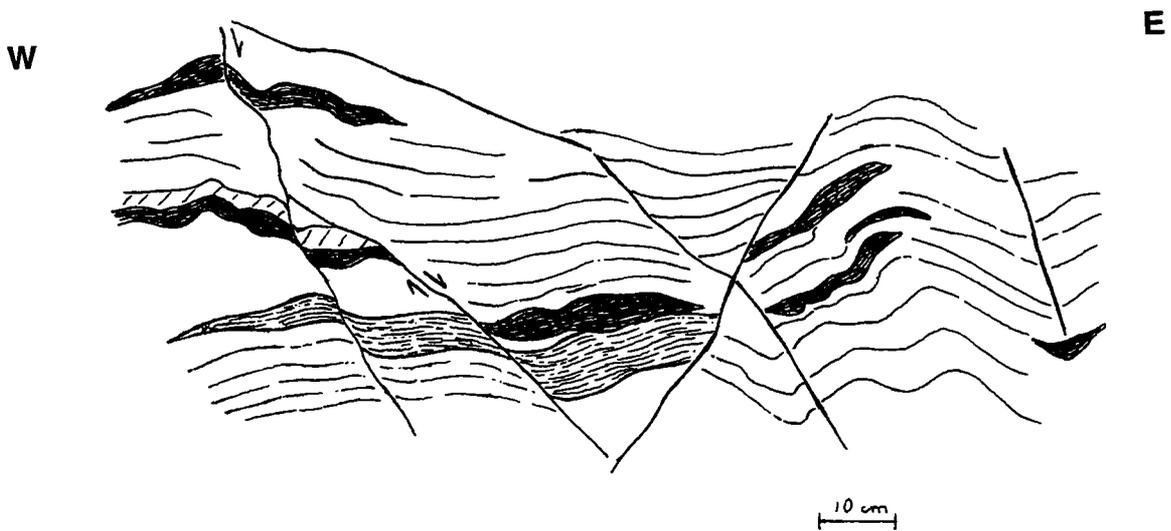


Figure III-8: Réseau de failles normales N150-60E décalant la S0-S1 et les exsudats de quartz parallèles à S1 (en niveaux sombres). Les plis P3 sont affectés par les failles (les Martinets).

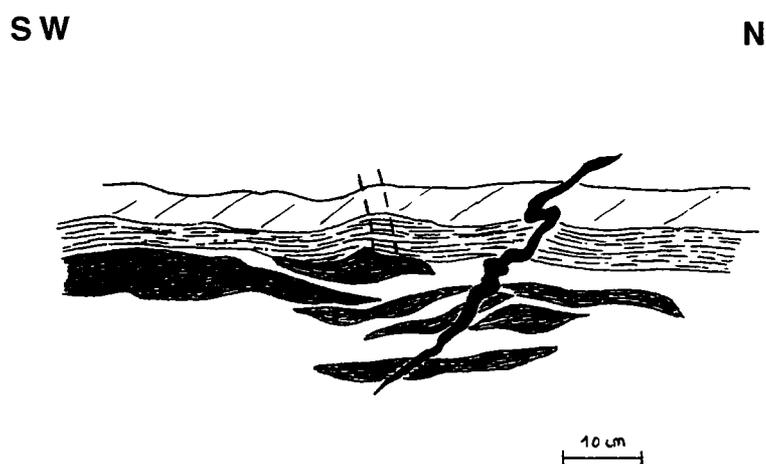


Figure III-9: Veine de quartz plissée, de direction N150-60 SW oblique à la S1 et aux exsudats.

|                 |                   |
|-----------------|-------------------|
| <i>Partie B</i> |                   |
|                 | <i>Discussion</i> |

## *1. Déformation liée au plissement post-varisque*

Le secteur étudié est affecté par un plissement post-varisque de direction NE-SW qui se caractérise par:

- Des plis en chevrons et kink-bands d'axes N45 observés régionalement.
- Une linéation de crénulation régionale parallèle à l'axe de ces plis.
- Des antiformes et synformes d'échelle kilométrique d'orientation N45 mises en évidence par les trajectoires de schistosité dans les micaschistes quartzeux (voir chapitre IV). Ces plis amples ne sont pas observés dans les micaschistes noirs. Par contre, les micaschistes noirs contiennent une linéation de crénulation N45 très développée. Ces deux structures peuvent répondre à une même déformation qui s'exprime différemment en fonction de la lithologie, les schistes noirs étant plus déformables que les schistes quartzeux.

Ces plis replissent les structures liées à la mise en place des nappes et sont affectés par la déformation fragile. Ce plissement peut répondre à un raccourcissement NW-SE postérieur à la mise en place des nappes et antérieur à la déformation fragile.

## *2. Âge de la déformation fragile post-varisque*

En ce qui concerne la faille N120 et la faille de Saint-Michel-de-Dèze, elles appartiennent à un réseau de failles kilométriques, de même direction, dont il est possible de préciser l'âge de fonctionnement d'après les constatations suivantes:

- La faille N120 de Saint-Michel-de-Dèze affecte d'une part le Lias à l'Est du secteur étudié et d'autre part des intrusions de granodiorite sur la bordure SW du Mont-Lozère.
- La faille N120 cartographiée au cours de cette étude affecte le Trias et des intrusions de la granodiorite du Liron au SW de la feuille à 1/50 000 d'Alès.
- Sur la feuille de Génolhac, une faille à proximité de la faille majeure N120 et de même direction décale l'auréole de métamorphisme de contact liée à la mise en place du Mont-Lozère.

- Une faille de même direction localisée sur la bordure Nord du Mont Lozère affecte cette granodiorite.
- Un réseau de failles de même orientation N120 se retrouve à l'W, après les grands Causses, dans la région du Rouergue. Ces failles sont réactivées lors de la formation des bassins permien (Arthaud et Matte, 1977).
- A l'Est de la faille de Villefort, les failles N120 de ce réseau contrôlent les effets topographiques responsables des sous-bassins du bassin d'Alès (Genna, communication personnelle). Elles sont donc des failles syn-sédimentaires lors de la formation du bassin d'Alès.

Les failles de cette direction se sont donc formés postérieurement à la mise en place des granodiorites et leur jeu est Stéphanien entre 300 et 280 Ma (Arthaud et Matte, 1977), synchrone de la formation du bassin d'Alès (Djarar et al., 1996). Certaines failles contrôlent la mise en place des minéralisations péritholiques et sont donc contemporaines des derniers stades de la mise en place des granodiorites (Arthaud et Matte, 1977) dont les âges les plus récents sont entre  $297 \pm 15$  Ma et  $292 \pm 11$  Ma (massif du Finiels et du Bougès, Mont Lozère; Vialette et Sabourdy, 1977a). Toutes ces failles ont refonctionné au Lias.

Les failles orientées N120 qui rencontrent la faille de Villefort sont toutes recoupées et décalées ou arrêtées par cette dernière. Leur jeu est donc antérieur au jeu sénestre de la faille de Villefort.

### *3. Caractérisation de la déformation fragile*

Les observations effectuées au cours de cette étude montrent que la fracturation post-hercynienne est essentiellement marquée par des failles normales et des décrochements. Les failles normales sont les plus fréquentes, et ceci à toutes les échelles:

- La faille N120 présente localement une géométrie (pendage de  $60^\circ$  vers le NE, stries dans la direction de plus grande pente) en faille normale vers le NE.
- Les failles mineures isolées ou en réseaux correspondent pour la plupart à des failles normales de direction N120 ou N150 pendant de  $60^\circ$  vers le NE.
- Les réseaux de microfailles observés au lieu dit les "Martinets" montrent un système de failles normales conjuguées N150-60E et N20-60NW où le système d'orientation N150-60E est nettement plus développé.

L'observation de fentes à quartz N150 à pendage  $70^\circ$  W postérieures aux structures et plissées peuvent s'expliquer par un cisaillement vers l'Est postérieur à leur formation ou à un raccourcissement vertical.

La géométrie des failles, essentiellement pentées vers l'E ou le NE, suggère une déformation non coaxiale vers l'Est à l'échelle régionale. Ces failles

s'observent régionalement, leur densité s'intensifiant vers l'Est du secteur étudié à l'approche de la faille de Villefort et des bassins stéphaniens d'Alès. Une possibilité pour expliquer les caractéristiques de la déformation fragile observée dans les Cévennes est d'envisager une extension ENE-WSW responsable de failles normales de direction N150 suivie d'une extension NNE-SSW responsable de failles kilométriques de direction N120. Cette deuxième extension peut être responsable de la réactivation des failles normales N150 en décrochement sénestre (telle la faille de Villefort). Le jeu en décrochement dextre observé sur la faille N120 cartographiée dans cette étude ne peut pas s'expliquer par une réactivation en décrochement liée à la rotation de la direction d'extension. Ce jeu résulte probablement d'une réactivation au cours d'une déformation ultérieure. La rotation de direction d'extension suggérée dans cette étude est similaire à la rotation de direction d'extension observée dans le bassin d'Alès (Djarar et al., 1996) et correspond à la rotation d'extension qui affecte l'ensemble du Massif Central oriental entre 330 et 260 Ma (Burg et al., 1994).

## CHAPITRE IV

### STRUCTURATION RÉGIONALE

*A: Cartographie et lithologie*

*B: Reconstitution de la colonne stratigraphique*

*C: Trajectoire et champ de déformation finie*

*D: Discussion*

## *Introduction*

Ce chapitre présente la synthèse des données lithologiques et structurales récoltées sur le secteur. Dans une première partie nous présenterons:

- La carte géologique à 1/50 000
- Des coupes détaillées relevées sur le terrain
- Des coupes effectuées à partir de la carte géologique et synthétisant l'ensemble des données lithologiques et structurales de la région.

Ces résultats indiquent que des zones de cisaillement sont additives et correspondent donc à des chevauchements. Un nouveau log stratigraphique prenant en compte ces données est proposé. Dans une deuxième partie nous présenterons les champs de déformation finie (carte de la schistosité régionale S1 et de la linéation d'étirement L1 et L2) du secteur étudié. Ces champs de déformation sont le résultat de plusieurs déformations superposées dont l'analyse permet de distinguer les effets sur la structuration régionale. L'interprétation en système de chevauchement que nous proposons diffère des interprétations proposées par les auteurs précédents (voir chapitre I). Dans un dernier paragraphe nous discuterons la géométrie du système de chevauchement et les points de désaccord avec les différents auteurs.

## *1. Carte géologique à 1/50 000*

Le secteur étudié correspond au découpage de la carte à 1/50 000 de Saint-André-de-Valborgne. Le levé de cette carte a été entrepris par Paul Brouder dont les travaux ont été déposés au B.R.G.M en 1992. La plupart des levés lithologiques effectués par cet auteur ont été vérifiés sur le terrain et étaient précisément cartographiés. Prenant en compte ce travail ainsi que l'impossibilité d'emprunter aujourd'hui de nombreux chemins accessibles autrefois, nous avons adopté la majorité de ses contours, nous concentrant essentiellement sur les marqueurs de la déformation. Cependant, la lithologie a été vérifiée dans le détail et une cartographie précise a été effectuée pour tous les secteurs où les levés de Paul Brouder étaient en désaccord avec nos propres observations. La nouvelle carte géologique synthétisant les travaux de Brouder et les nôtres est présentée dans la figure IV-1. Les tracés ont été levés à 1/25 000 et synthétisés à 1/50 000. Les zones de cisaillement ont été cartographiées à partir des critères décrits dans le chapitre II.

Les zones de cisaillement et les failles expliquent les successions ou les juxtapositions anormales de séries. Les zones de cisaillement se localisent toujours aux limites de niveaux repères qui constituent un contraste de rhéologie entre ces niveaux et les schistes à proximité. Trois zones de cisaillement majeures et une faille importante N120 ont été cartographiées. Cette faille découpe le secteur en deux domaines distincts, le domaine SW et le domaine NE. Ces deux domaines présentent des différences structurales. Le domaine SW contient de nombreuses zones de cisaillement espacées d'un kilomètre en épaisseur, dont certaines sont interrompues par la faille N120. Le domaine NE contient moins de zones de cisaillement, surtout dans la série des micaschistes quartzeux.

- Dans le domaine SW, deux zones de cisaillement majeures ont été mises en évidence. Elles mettent en contact la série des micaschistes quartzeux sur la série des micaschistes noirs:
  - La première zone passe par Saint-Roman-de-Tousque et le lieu dit "les Martinets" (sur la route de Saint-Jean-du-Gard à Saint-Etienne-Vallée-Française). Elle met en contact des micaschistes quartzeux sur les micaschistes noirs,
  - La deuxième zone de cisaillement longe la Vallée Française et fait reposer des micaschistes quartzeux sur les micaschistes noirs.

Dans ces deux zones, les micaschistes quartzeux sont interprétés comme l'équivalent des micaschistes quartzeux inférieurs définis dans les logs

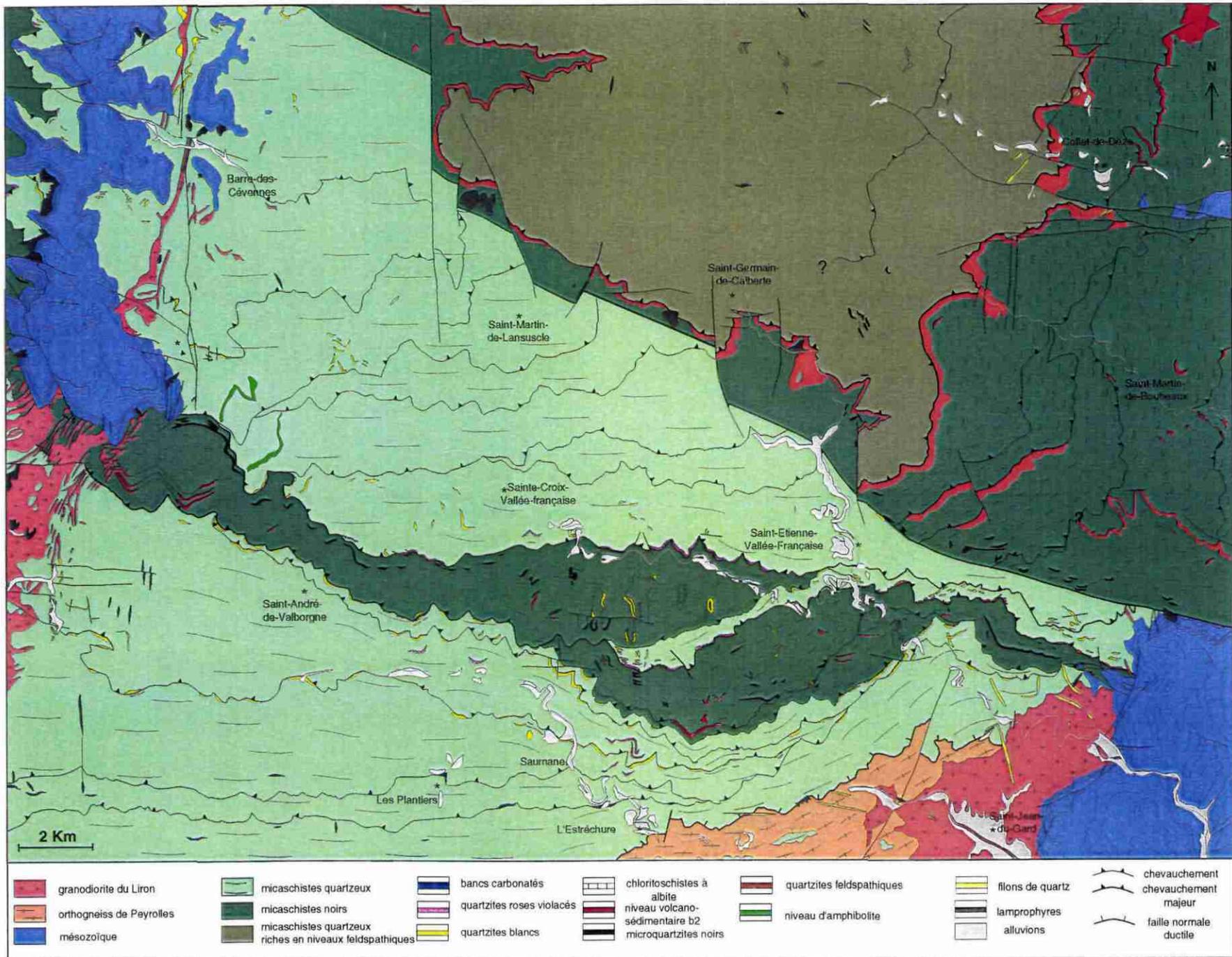


Figure IV-1: Carte géologique à 1/50 000 de Saint-André-de-Valborgne.

stratigraphiques de Brouder (1964) et Munsch (1981) (fig. I-19). Leur position au dessus des micaschistes noirs est une répétition due au fonctionnement de la zone de cisaillement. Sur le terrain, les deux séries de micaschistes quartzeux, dits "inférieurs" et "supérieurs", ne se distinguent pas. Leurs lithologies sont identiques et contiennent des alternances similaires (niveaux plus feldspathiques). De plus, la cartographie montre que le contact entre les micaschistes noirs et les micaschistes quartzeux sus-jacent est toujours tectonique. Cette série de micaschistes quartzeux en position sommitale n'est jamais observée dans les colonnes stratigraphiques des séries paléozoïques des autres secteurs cévenols, de l'Albigeois et des Monts de Lacaune (fig. I-20). Cette série n'a donc pas lieu d'exister et peut correspondre à la série des micaschistes quartzeux inférieurs.

Les autres zones de cisaillement sont internes aux séries et provoquent la répétition de certains niveaux repères (quartzites, niveaux volcano-sédimentaires).

- Dans le domaine NE, un cisaillement majeur passant à l'Ouest du Collet de Dèze et au Sud de Saint-Germain-de-Calberte, a été cartographié. Il porte des micaschistes quartzeux feldspathiques sur la série des micaschistes noirs. Cette série plus feldspathique ne contient pas les niveaux repères de la série des micaschistes quartzeux inférieurs. Elle correspond donc soit à une série plus ancienne (série équivalente à la série de Marcori comme le propose Guérangé-Lozes et Pellet (1990) pour la feuille de Génolhac, par analogie avec les séries de l'Albigeois), soit aux micaschistes quartzeux, dits inférieurs, dans un faciès légèrement différent.

Les autres zones de cisaillement sont limitées à la série des micaschistes noirs et se localisent au-dessus du niveau volcano-sédimentaire b2 du "triplé de Bassurels" défini par Brouder (1964) ou du quartzite feldspathique.

## *2. Coupes détaillées*

Afin de décrire précisément la lithologie et ses relations avec les zones de cisaillement, ainsi que les variations latérales de lithologie, plusieurs coupes ont été levées sur le terrain. Leur trace est indiquée sur la figure IV-2 (coupes A à E) et elles sont représentées sur la figure IV-3 et décrites dans le détail ci-dessous. Les coupes ont été levées perpendiculairement aux chevauchements. Elles sont présentées d'Ouest, où la série du domaine SW est la plus représentée, vers l'Est où est la série du domaine NE est représentée. Chaque coupe est décrite du Sud au Nord, c'est à dire de la base vers le sommet géométrique. Pour plus de clarté, les coupes sont commentées en séparant les successions lithologiques entre deux cisaillements. Avec l'aide de la carte géologique, chaque unité des différentes coupes (1a, 1b', 1b" et 2) correspond à une partie du log stratigraphique qui sera reconstitué (fig. IV-6).

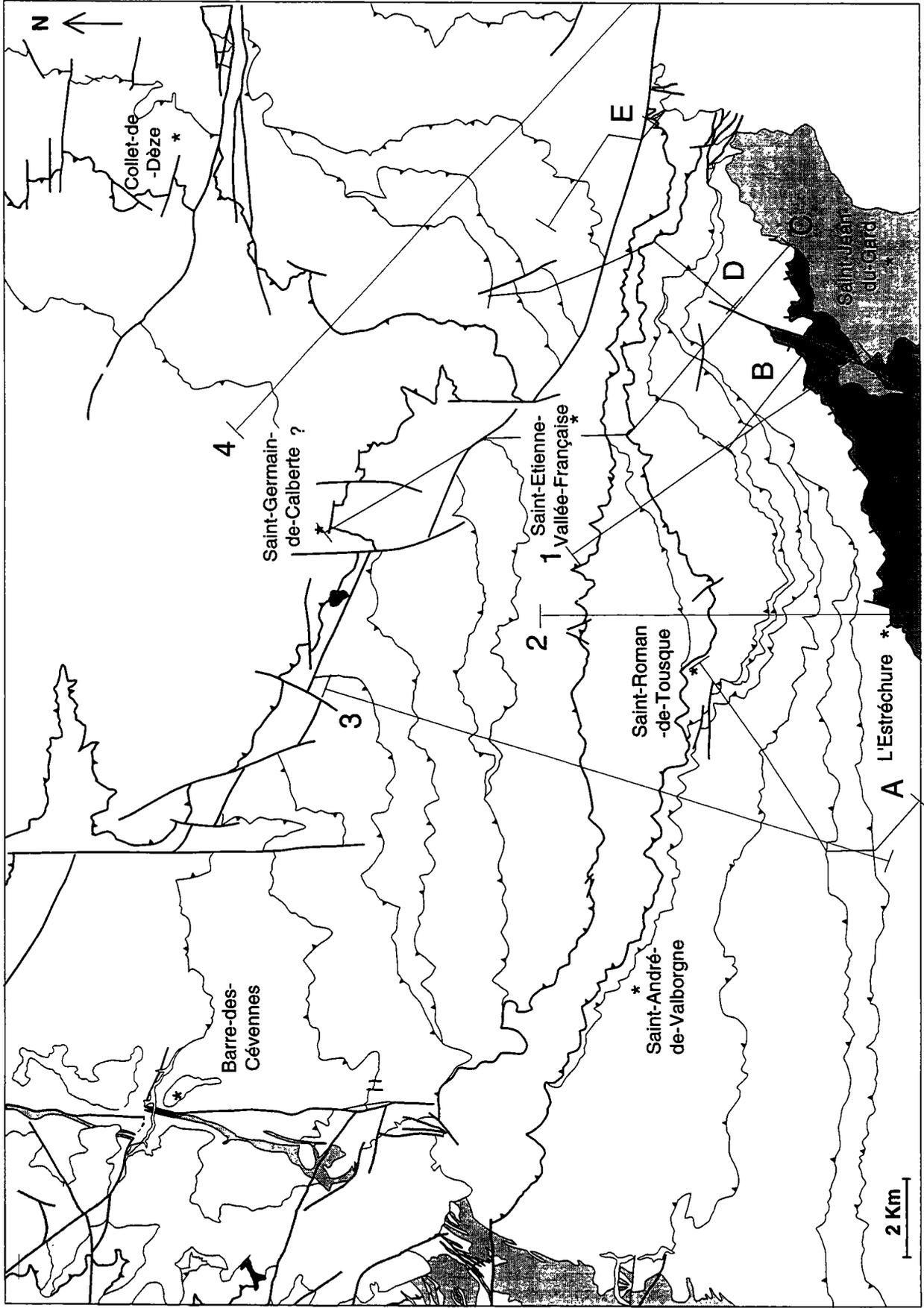


Figure IV-2 : Localisation des coupes détaillées levées sur le terrain (A à E) et des coupes effectuées à partir de la carte géologique (1 à 4).

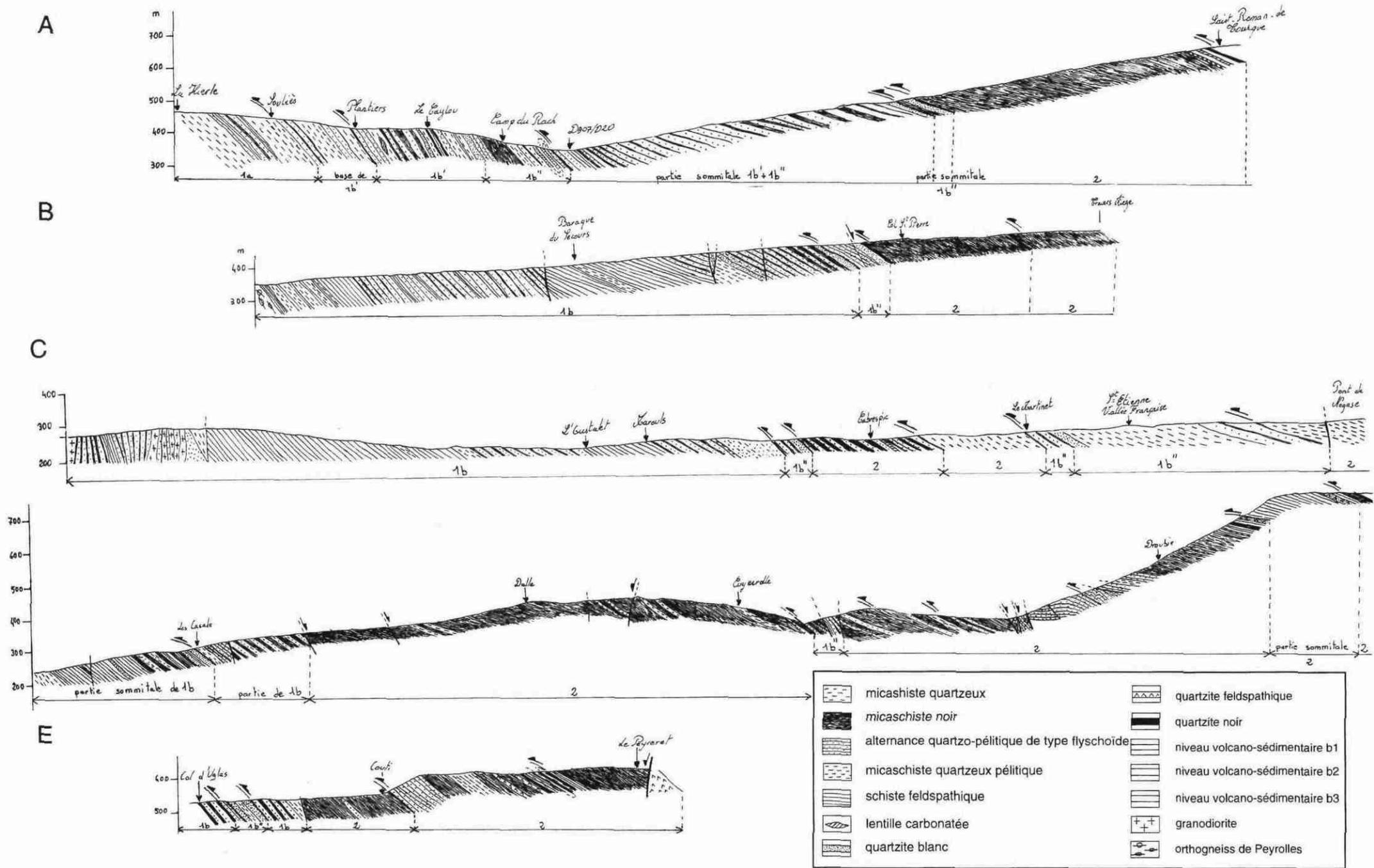


Figure IV-3 : Coupes détaillées relevées sur le terrain. A: La Hierle - Saint-Roman-de-Tousque. B: La Corniche des Cévennes - Col Saint-Pierre. C: Saint-Jean-du-Gard - Pont-de-Négase. D: Malmeillas - Les Abrits. E: Col d'Uglas - Pereyret.



## **2. 1. Coupe A: La Hierle à Saint-Roman-de-Tousque**

- 1-a: La coupe débute par des micaschistes quartzeux gris, assez massifs, à grains fins, contenant de nombreux lits pélitiques, donnant à la roche un aspect satiné. Ils sont surmontés par des lits décimétriques de composition variable, à micaschistes quartzeux gris, micaschistes noirs, micaschistes noirs graphiteux, micaschistes quartzeux beiges. Au-dessus, des micaschistes quartzeux gris, à aspect satiné, sont surmontés de micaschistes quartzeux gris, finement feuilletés, assez pélitiques, contenant des lits millimétriques de composition différente. Ces roches sont affectées par une zone de cisaillement.
- base de 1-b': Des micaschistes quartzeux, à grain très fin, gris-argenté, surmontent la zone de cisaillement. Ces micaschistes très quartzeux contiennent parfois des niveaux plus pélitiques. Ils sont surmontés par des micaschistes quartzeux gris-argenté, contenant des alternances millimétriques de composition différente. Au-dessus, une séquence à alternance de lits décimétriques de composition variable est affectée par une zone de cisaillement.

La coupe se poursuit alors en se décalant un peu vers l'Est

- 1-b': Au-dessus de la zone de cisaillement, un niveau décimétrique carbonaté est surmonté par des micaschistes très quartzeux gris-argenté à aspect satiné. Ils passent à une alternance de micaschistes quartzeux et de schistes noirs, puis à des micaschistes quartzeux gris-argenté très riches en quartz, présentant des alternances millimétriques de lits clairs et plus foncés. Au-dessus, un banc de quartzite blanc de 2 m d'épaisseur environ, est surmonté d'une alternance de bancs décimétriques de micaschistes quartzeux gris-argenté, de micaschistes noirs et quelques bancs de micaschistes quartzeux feldspathiques brun-ocre. Viennent ensuite des micaschistes riches en quartz, compacts, gris-argenté, contenant quelques bancs de micaschistes quartzeux feldspathiques brun-ocre. Le sommet, des micaschistes très quartzeux est marqué par un banc de quartzite schisteux blanc-argenté, très compact.
- 1-b'': Sur cette coupe, le passage de 1-b' à 1-b'' est continu, illustrant une succession lithologique originelle. La barre de quartzite est surmontée par une alternance de bancs décimétriques de quartzites, micaschistes quartzeux et micaschistes noirs. Au-dessus, se trouve un banc de micaschistes quartzeux feldspathiques sur lequel repose des micaschistes noirs, formés de feuillets noirs souvent assez massifs. Ils sont surmontés par des micaschistes très quartzeux gris-beige, alternant avec des bancs plus pélitiques et des bancs de compositions variables, d'échelle décimétrique, très déformés. Au-dessus, une barre de quartzite blanc-gris contenant de fins lits micacés, épaisse de 5 à 10 m, est plissée isoclinalement (route D20, Mas de la Teule). L'axe du pli est EW et le déversement réel est vers le Sud. Elle est surmontée d'une zone de cisaillement au-dessus de laquelle affleure la partie supérieure de 1-b' et 1-b''.
- Partie sommitale de 1-b' et partie 1-b'': au-dessus de la zone de cisaillement une alternance décimétrique de micaschistes quartzeux gris est plus ou moins riches en quartz ou pépite. Les niveaux quartzeux sont

feldspathiques, à grains fins, de couleur ocre. Un niveau de micaschistes très pélitique se retrouve intercalé dans cette succession. Affleure ensuite une épaisse succession de micaschistes quartzeux, à alternance centimétrique de niveaux quartzeux et pélitiques, contenant localement des niveaux feldspathiques. Latéralement cette succession comprend une barre de quartzite, non visible sur cette coupe, mais observable localement dans le paysage. Cette barre de quartzite peut correspondre à celle de la base de la succession 1-b". Le sommet de cette épaisse succession est constitué d'une barre de quartzite schisteuse riche en feldspath, surmontée d'une zone de cisaillement.

- Au-dessus de cette zone de cisaillement des micaschistes quartzeux constitués d'une alternance de niveaux centimétriques de compositions plus ou moins pélitiques sont surmontés d'une barre de quartzite blanc correspondant à la partie sommitale de 1-b".
- 2- Au-dessus de cette barre de quartzite repose la série des micaschistes noirs, très homogènes, essentiellement composés de phyllites. Au sommet de cette série affleurent deux niveaux particuliers, décimétriques, d'origine volcano-sédimentaire, puis un quartzite noir riche en graphite. Cette séquence est surmontée d'une zone de cisaillement qui amène des micaschistes quartzeux sur les micaschistes noirs.

## ***2. 2. Coupe B: Corniche des Cévennes au Col Saint-Pierre***

- 1- b- Cette coupe débute au contact faillé (faille verticale N40) des orthogneiss et des cornéennes. Les cornéennes sont dues au métamorphisme de contact lié à la mise en place de la granodiorite du Liron. Elles sont surmontées par une alternance de niveaux plus ou moins quartzeux gris et de niveaux brun-ocre riches en feldspaths. Cette succession est également affectée par le métamorphisme de contact. Au-dessus affleurent des niveaux très feldspathiques, beiges, ocres, au grain très fin et à l'aspect terreux. Vient ensuite une alternance de niveaux plus ou moins quartzeux ou pélitiques de micaschistes gris comprenant des intercalations de niveaux très feldspathiques ocres, à l'aspect terreux, à grain fin. Au sommet, les niveaux quartzeux s'enrichissent en quartz et des niveaux millimétriques à décimétriques très pélitiques, noirs, s'individualisent. Cette série est affectée par une faille.
- De l'autre côté de la faille, on retrouve des micaschistes quartzeux feldspathiques, beiges et très massifs, sur lesquels affleurent des micaschistes quartzeux gris, localement cisailés. Au-dessus, apparaissent des micaschistes quartzeux beige-ocre, très feldspathiques, à grains fins et d'aspect terreux facilement friables surmontés d'une alternance millimétrique à centimétrique de micaschistes plus ou moins quartzeux ou pélitiques.
- Ces derniers s'arrêtent brusquement sur une faille N90, qui les met en contact avec une barre de quartzite blanc d'un mètre d'épaisseur surmontée de quartzite schisteux gris. Au-dessus, vient une alternance de niveaux quartzeux et pélitiques, localement faillée, où l'épaisseur des bancs pélitiques augmente en montant dans la succession. Elle est surmontée de quartzites schisteux gris clair au-dessus desquels une

alternance de niveaux plus ou moins quartzeux ou pélitiques est affectée par un cisaillement.

- Partie sommitale de 1b": Une faille normale N60 interrompt la succession. De l'autre côté de la faille affleure une barre de quartzite blanc au-dessus de laquelle reposent des micaschistes très pélitiques, comprenant quelques niveaux plus quartzeux, et fortement affectés par une zone de cisaillement. La série des micaschistes noirs (2) est retrouvée au-dessus de cette zone.

2- La série des micaschistes noirs est constituée de micaschistes très pélitiques composés à 90% de phyllosilicates. Elle contient une barre de quartzite noire. L'ensemble de cette séquence est répété par une zone de cisaillement.

### **2. 3. Coupe C: Saint-Jean-du-Gard à Saint-Germain-de-Calberte**

- 1-b: La coupe débute sur le contact intrusif de la granodiorite du Liron avec des micaschistes quartzeux relativement homogènes. Ces micaschistes quartzeux, présentent un litage millimétrique de lits clairs et sombres. Ils s'alternent avec des micaschistes quartzeux, de couleur beige et d'aspect terreux, riches en feldspaths. Ils présentent un litage millimétrique et sont repris par une schistosité qui provoque un débit en plaquette centimétrique. Les schistes proches du contact avec la granodiorite sont parfois intrudés par des filons granitiques et sont cornéifiés, donnant un aspect massif à la roche. Ils sont très riches en biotite due au métamorphisme de contact. Au-dessus affleure une barre de quartzite blanc surmontée de micaschistes quartzeux affectés par une faille verticale.

Au Nord de la faille, affleure une épaisse série de micaschistes quartzeux feldspathiques. Au sein de cette série, un niveau particulier de micaschistes quartzeux de 25 m environ, très massif, de couleur verdâtre et lie de vin s'individualise. A l'œil nu, il est constitué de filonnets très fins vert sombre, alternant avec des niveaux aux grains invisibles formant une pâte vert-lie de vin. Ensuite, une succession d'alternance millimétrique à centimétrique de niveaux micacés et quartzeux, est surmontée par des micaschistes quartzeux de couleur beige, probablement feldspathiques, plus massifs que ceux rencontrés au départ de la coupe, et d'aspect moins terreux. Après Marouls, affleurent des micaschistes quartzeux beiges d'aspect terreux, à débit centimétrique et contenant de nombreuses biotites. Ils sont surmontés de micaschistes quartzeux, contenant des alternances centimétriques de micaschistes quartzeux et pélitiques, souvent brun terreux, riches en biotite. Au-dessus un banc décimétrique, massif, de couleur vert foncé-lie de vin, est surmonté par un petit niveau de micaschistes quartzeux, d'aspect terreux, de couleur beige et très riche en feldspaths. Au-dessus, affleure un quartzite schisteux, épais d'une centaine de mètres, gris-verdâtre, et présentant quelques lits fins noirs sombres de micas. Ce niveau peut correspondre à la barre de quartzite qui est observée latéralement. Au-dessus de cette barre, se localise une zone de cisaillement.

- Partie sommitale de 1b: Cette barre de quartzite est surmontée par une succession de niveaux de schistes noirs et verdâtres. Les feuillets de micas au sein des schistes sont relativement épais. Cette succession contient un banc de quartzite blanc. Elle est affectée à son sommet par une zone de cisaillement au-dessus de laquelle affleure la série des micaschistes noirs.
- 2 - La série des micaschistes noirs se présente, à sa base, comme des micaschistes quartzeux riches en feuillets pélitiques alternant avec des niveaux millimétriques de quartzites. Ces roches ont un aspect gris argenté, dû à la présence de nombreux feuillets de micas. Des niveaux de micaschistes noirs, purs, composés uniquement de feuillets phylliteux, s'intercalent au sein de cette série. Au sein de cette série, un niveau décimétrique de chlorito-schistes à albite s'observe. Une zone de cisaillement interne à cette série juxtapose des micaschistes plus pélitiques sur les micaschistes quartzeux riches en lits pélitiques. Le sommet de cette série, intensément déformée, est affectée par une zone de cisaillement majeure.
- Partie sommitale de 1-b": Au dessus de cette zone, affleurent des alternances de micaschistes quartzeux et pélitiques, affectées à leur sommet par une nouvelle zone de cisaillement. Latéralement, une barre de quartzite affleure à la base de cette série.
- Partie sommitale de 1-b": au-dessus de la zone affleure une barre de quartzite sur laquelle repose une séquence de micaschistes quartzeux gris-verdâtre, contenant de nombreux feuillets micacés plus ou moins épais selon les niveaux. Au-dessus, des micaschistes gris présentent des alternances millimétriques de quartzites et de feuillet gris foncé de micas, sur lesquels reposent des micaschistes quartzeux de couleur verdâtre constitués de niveaux centimétriques quartzeux à pélitiques. Viennent ensuite des micaschistes quartzeux plus homogènes fortement déformés à leur sommet par une zone de cisaillement.

Le reste de la coupe appartient au domaine NE de la carte séparé du domaine précédent par une faille N120. Elle n'est pas représentée sur la figure IV-3.

- Partie sommitale de 2: Dans ce domaine, la coupe débute par des micaschistes quartzeux homogènes assez pélitiques, de couleur gris-argenté, surmontés d'une séquence à alternances de niveaux décimétriques de quartz et de pélite. Ces micaschistes contiennent de nombreux niveaux verdâtres. Au-dessus affleurent des micaschistes quartzeux assez homogènes, d'aspect terreux, feldspathiques, présentant des alternances décimétriques de micaschistes quartzeux, de quartzites schisteux. Ces quartzites contiennent des filonnets de micas d'échelle millimétrique. Ils sont surmontés par des micaschistes quartzeux très riches en feldspaths, de couleur brune, d'aspect terreux sur lesquels reposent des micaschistes quartzeux homogènes beiges feuilletés millimétriquement. Ces derniers niveaux, très feldspathiques, correspondent à un faciès cartographié en quartzites feldspathiques (orange) sur la carte géologique (fig. IV-1).

La coupe reste ensuite plus au moins parallèle à la stratigraphie et à la schistosité qui est ici sub-horizontale. Le passage des micaschistes noirs aux niveaux très feldspathiques s'observe à plusieurs endroits. Il semble très progressif et se caractérise par une alternance de bancs plurimétriques de micaschistes noirs purs avec des micaschistes quartzeux vers des micaschistes quartzeux homogènes très riches en feldspaths, de couleur brun et d'aspect terreux au sein desquels s'intercalent des niveaux de micaschistes homogènes, très micacés gris-argenté, feuilletés, d'échelle millimétrique.

#### **2. 4. Coupe D: Malmeillas aux Abrits**

- Partie sommitale 1b: La coupe débute par des micaschistes quartzeux cornifiés, déformés et cisailés. Ils sont surmontés par des micaschistes quartzeux très feldspathiques, blanc-jaunâtre, d'aspect terreux, à grain très fin à débit en plaquettes. Un banc de micaschistes noirs, d'un mètre d'épaisseur environ, puis, plus loin, un banc de 2 mètres d'épaisseur environ de quartzite blanc à grain très fin s'observent au sein de ces micaschistes. Ces micaschistes sont surmontés d'une alternance de bancs de micaschistes quartzeux feldspathiques plus ou moins pélitiques. A son sommet se trouve un niveau de 2 m d'épaisseur de quartzite blanc au-dessus duquel se développe une zone de cisaillement.
- Partie de 1-b: Au-dessus, des micaschistes quartzeux gris sont surmontés de micaschistes quartzeux feldspathiques, présentant des bancs décimétriques plus ou moins pélitiques. Une faille sépare ces derniers d'une alternance de micaschistes quartzeux gris plus ou moins pélitiques. Ils sont juxtaposés, par l'intermédiaire d'une faille normale, à la série des micaschistes noirs.
- 2- Cette série débute par des niveaux très noirs, mats et graphiteux. Puis viennent ensuite les micaschistes noirs classiquement majoritairement constitués de niveaux phylliteux. Cette série contient localement quelques niveaux gréseux et est affectée par de nombreuses failles normales à pendage vers le N à NE. Plus loin ces micaschistes noirs sont cisailés et contiennent beaucoup d'exsudats de quartz.
- Partie 1-b": Au dessus du cisaillement des micaschistes quartzeux riches en feldspaths sont surmontés par des micaschistes quartzeux, contenant des alternances décimétriques de compositions différentes (quartzites, micaschistes quartzeux, micaschistes noirs au sein desquelles s'intercale un niveau de quartzite blanc). Cette succession est affectée par une faille normale 045-60N. Au dessus, des alternances de micaschistes quartzeux et pélitiques sont recoupées par une deuxième faille normale 180-60E. Au-dessus une alternance de micaschistes plus ou moins quartzeux et pélitiques affleure. Elle est affectée par trois failles normales proches l'une de l'autre de direction N115 et de pendage de 70° vers le Nord.

Cette zone très faillée correspond à la localisation de la faille N120 qui sépare les deux domaines de notre secteur. La coupe se poursuit donc par la suite dans le domaine NE.

- 2: Au Nord de ces failles, la série des micaschistes noirs satinés contient localement des niveaux plus gréseux affectés, par endroits, par des

cisaillements. Ces micaschistes noirs sont séparés des micaschistes quartzeux gris, présentant des alternances de lits décimétriques plus ou moins pélitiques ou quartzeux, par une faille (125-70N). Ces schistes sont très plissés (plis en chevron) par le jeu de nombreuses failles. L'une d'entre elles (140-50N) les met en contact avec des micaschistes noirs. A leur sommet, la transition progressive entre les micaschistes noirs et les quartzites feldspathiques s'observe bien. Les micaschistes noirs deviennent de plus en plus riches en niveaux quartzeux et feldspathiques mais restent très micacés. La roche acquiert alors une couleur brune. Au sein de ces micaschistes quartzo-feldspathiques s'intercalent des niveaux de micaschistes noirs francs et des niveaux de quartzites feldspathiques. Au dessus, des niveaux de schistes quartzeux très feldspathiques, de couleur brun-ocre et se débitant facilement affleurent. Viennent ensuite des micaschistes bruns, présentant des alternances de lits millimétriques très pélitiques et très feldspathiques. Ils sont surmontés par un quartzite schisteux, très massif, brun-vert et très riche en feldspaths. Au-dessus de ce quartzite feldspathique se localise une zone de cisaillement.

- Partie sommitale de 2: Cette zone de cisaillement est surmontée par des micaschistes quartzeux feldspathiques assez riches en micas de couleur brun-ocre. Au fur et à mesure que l'on monte dans la série, les micaschistes s'enrichissent en feldspaths et s'appauvrissent en micas. Ils sont surmontés par un quartzite feldspathique très massif, brun-ocre. Au-dessus une zone de cisaillement est surmontée de micaschistes noirs uniquement composés de minéraux phylliteux.

## ***2. 5. Coupe E: le Col d'Uglas au Pereyret***

- Partie de 1-b: La coupe débute par une alternance de bancs très quartzeux, gris-violacé, avec des bancs plus pélitiques. Juste au-dessus une zone de cisaillement est localisée.
- Partie sommitale de 1b": Au-dessus de cette zone de cisaillement, affleure une alternance de bancs décimétriques de micaschistes quartzeux gris-argenté contenant des bancs plus ou moins pélitiques ou quartzeux. A l'intérieur de cette séquence, quelques niveaux plus massifs se distinguent, notamment un quartzite schisteux beige-rosacé feldspathique. Au sommet de la séquence, affleure un quartzite schisteux blanc- gris, très massif, épais de 10 mètres environ, surmonté d'une zone de cisaillement.

Au-dessus de cette zone, affleurent des micaschistes quartzeux gris qui passent brutalement à la série des micaschistes noirs. Le contact entre les deux formations est probablement dû à la présence d'une faille que je n'ai pas observée sur le terrain mais dont la trace correspond à la continuité de la faille majeure N120.

La coupe se prolonge alors dans le domaine NE de la carte:

- 2: Ce domaine débute par des micaschistes quartzeux gris-argenté devenant de plus en plus pélitiques à leur sommet et surmontés de micaschistes noirs finement feuilletés. Au sein des micaschistes noirs, il existe un banc de microquartzite noir, puis un banc de deux mètres

environ de quartzite blanc. La série des micaschistes noirs se poursuit, puis ces derniers sont déformés par une zone de cisaillement.

- 2: Ils sont alors surmontés de micaschistes quartzeux alternant des bancs décimétriques de composition différente. Les micaschistes quartzeux sont caractérisés par une alternance millimétrique de lits clairs et de lits foncés. Au-dessus, les micaschistes quartzeux, très pélitiques, contiennent des lits millimétriques micacés gris-argenté d'aspect satiné. Au sommet affleure un niveau de micaschistes quartzeux feldspathiques brun-ocre à aspect terreux surmonté de micaschistes noirs à l'intérieur desquels s'intercalent des niveaux de micaschistes quartzeux très feldspathiques à grains fins de couleur brun-ocre et présentant un aspect terreux. Ils sont surmontés de micaschistes quartzeux très feldspathiques d'aspect identique aux niveaux décrits précédemment. Ces micaschistes contiennent un niveau décimétrique de microquartzite gris-clair plissé isoclinalement. Au-dessus semble être localisée une zone de cisaillement.
- 2: Cette dernière est surmontée par des micaschistes noirs homogènes, essentiellement pélitiques séparés d'un banc massif de quartzite feldspathique par l'intermédiaire d'une faille normale (050-70S).

La carte géologique et les coupes détaillées montrent que les zones de cisaillement sont responsables de répétitions lithologiques. D'après le pendage des zones de cisaillement, parallèle à la schistosité régionale, les critères de cisaillement vers le S à SE (voir chapitre II) et le caractère additif de leur fonctionnement, nous interprétons ces zones de cisaillement comme des chevauchements vers le S à SE selon la direction de la linéation d'étirement. Par ailleurs, la carte et les coupes détaillées soulignent l'importance de la déformation fragile tardi-varisque décrite dans le chapitre précédent.

### *3. Coupes régionales*

A partir de la carte géologique et des observations de terrain, plusieurs coupes ont été dressées selon le principe expliqué sur la figure IV-4. Les zones de cisaillement ont été dessinées en profondeur d'après leurs relations observées latéralement en carte. Les coupes 1 à 4, localisées sur la fig. IV-2, sont présentées sur la figure IV-5. Les coupes mettent en évidence la présence d'un décollement, dans la série des micaschistes quartzeux, au dessus duquel viennent se brancher les chevauchements à vergence Sud à SE selon la direction de la linéation d'étirement. Le chevauchement sommital est interprété d'après les données du métamorphisme. Dans les deux domaines, la structuration régionale a donc été essentiellement contrôlée par un système de chevauchements entre deux décollements basal et sommital. Au Sud, ce système en duplex est repris par une faille normale mylonitique tardive qui longe le contact orthogneiss de Peyrolles - schistes.

Surface topographique

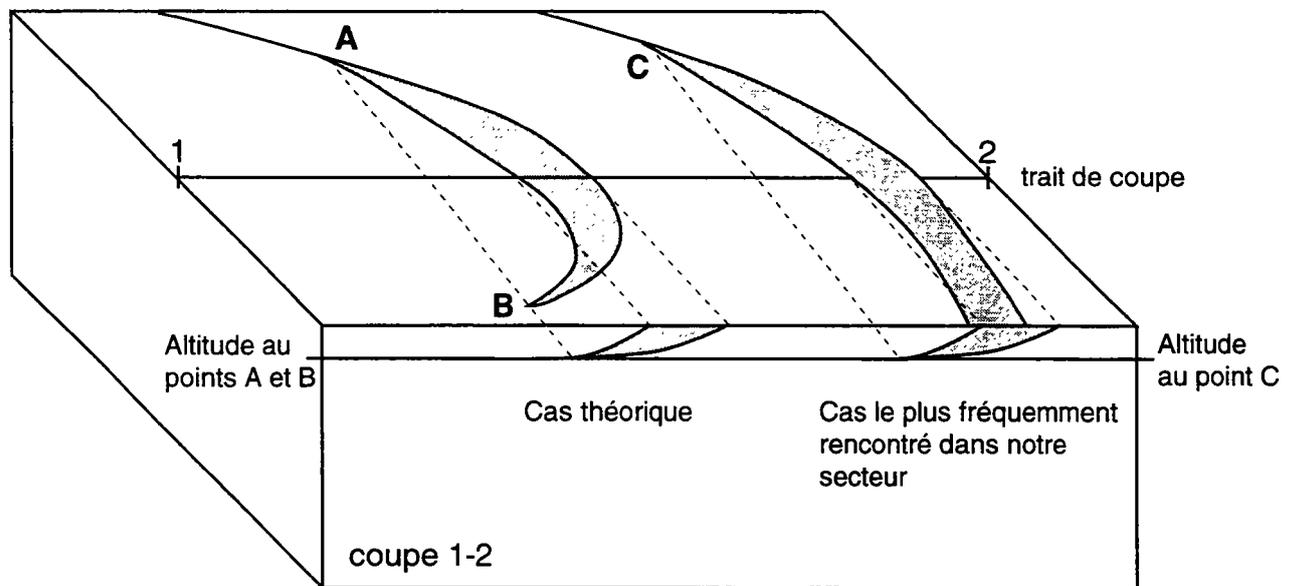


Figure IV-4: Bloc-diagramme illustrant les relations géométriques utilisées pour la construction des coupes.

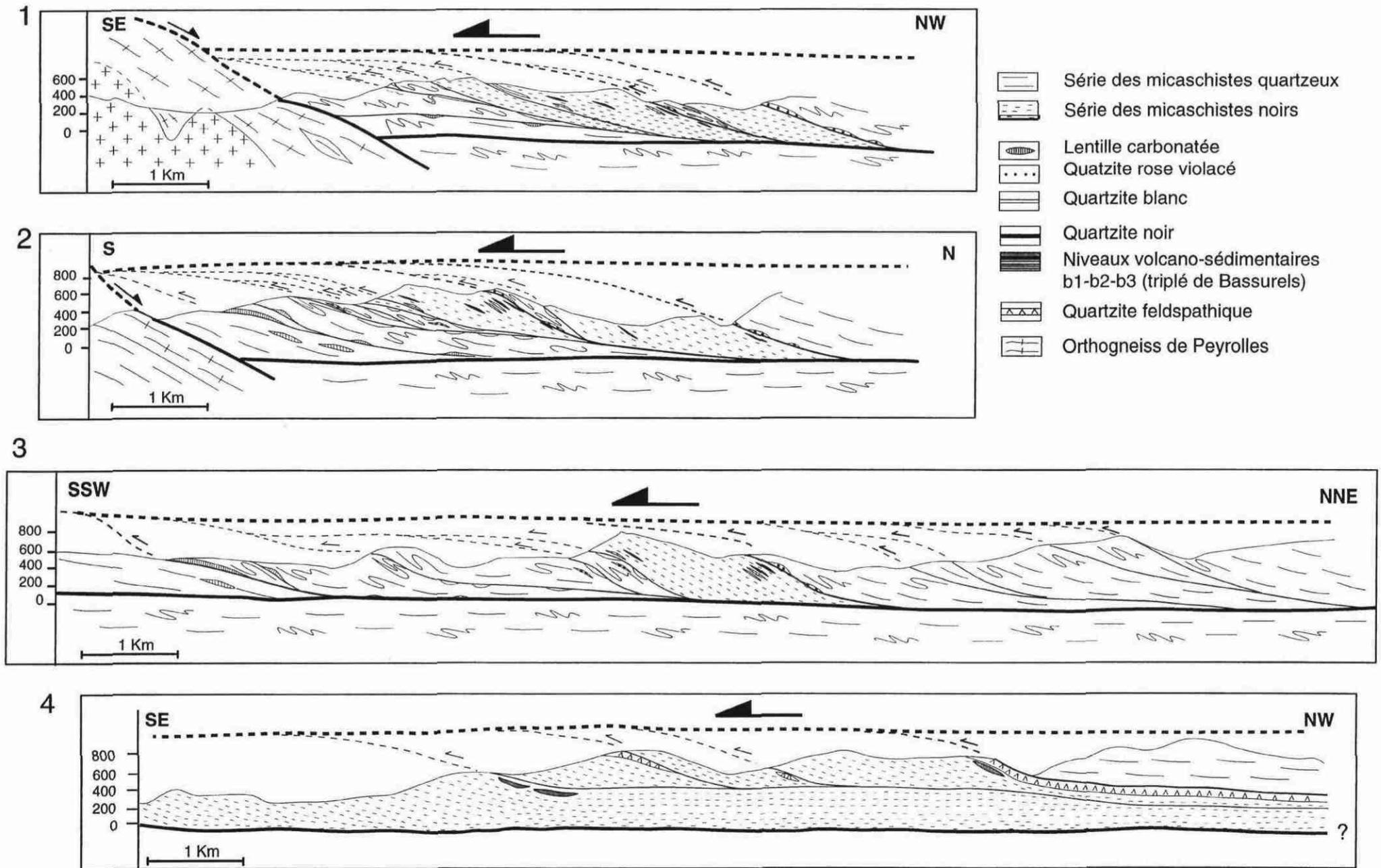


Figure IV-5: Coupes interprétatives construites à partir de la carte géologique (localisation sur la fig. IV-2), modifiées et complétées à partir de Arnaud et Burg (1993).

|                 |   |
|-----------------|---|
| <i>Partie B</i> |   |
|                 | <i>Reconstitution de la colonne stratigraphique</i> |

A partir des coupes détaillées et de la carte géologique, nous pouvons essayer de reconstituer la colonne stratigraphique supposée paléozoïque du secteur étudié (fig. IV-6). Compte tenu des zones de cisaillement, des failles et des variations latérales, les séries schisteuses sont rarement définies entièrement et leurs épaisseurs sont difficiles à estimer. Une colonne stratigraphique est proposée pour chacun des deux domaines séparés par la faille N120.

## *1. Description de la colonne stratigraphique*

La colonne stratigraphique est décrite en détail dans le paragraphe A-2 de ce chapitre pour différentes coupes. Les séquences 1a, 1b', 1b", et 2 de la figure IV-6 correspondent au découpage dans la présentation des coupes. Dans cette partie nous allons présenter brièvement les principales caractéristiques de la colonne stratigraphique, et la relation entre les niveaux lithologiques et les zones de cisaillement.

### **1. 1. Dans le domaine SW**

La colonne stratigraphique A comprend les deux séries principales, les micaschistes quartzeux et les micaschistes noirs. Les micaschistes quartzeux, dont la base ne s'observe pas sur le secteur étudié, comprennent un niveau carbonaté vers le bas et deux barres de quartzite d'extension régionale vers le sommet de la série. Ces niveaux localisent les zones de cisaillement. Le contact entre les micaschistes quartzeux et les micaschistes noirs est toujours marqué par une zone de cisaillement. Ainsi il existe toujours une incertitude sur la succession lithologique des deux séries. Les micaschistes noirs présentent vers leur sommet trois niveaux repères volcano-sédimentaires (triplé de Bassurels "b1, b2 et b3" selon Brouder 1964) surmontés d'un niveau de quartzite noir d'extension régionale. Ce niveau de quartzite localise aussi les cisaillements. Ainsi la partie terminale de la série des micaschistes noirs n'est pas observée.

Les séries deviennent plus quartzieuses et plus feldspathiques vers les sommets des séries et vers l'Est, au détriment des termes pélitiques. Cette évolution s'observe aussi bien dans les micaschistes quartzeux que dans celle des micaschistes noirs.

### **1. 2. Dans le domaine NE**

Les micaschistes quartzeux de la base de la série ne s'observent pas. Des micaschistes quartzeux plus feldspathiques surmontent en position anormale

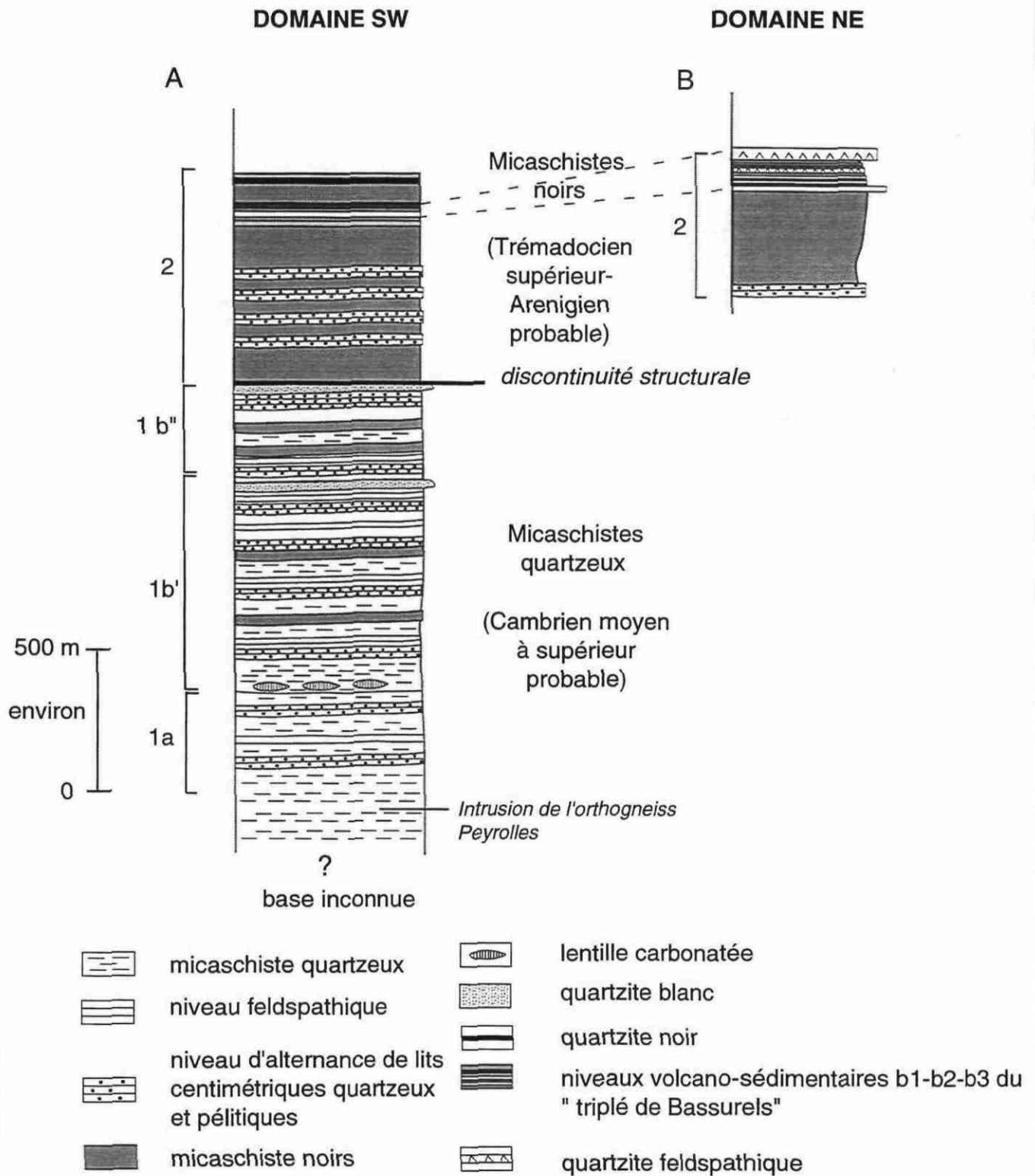


Figure IV-6: Colonne lithologique du secteur étudié. A: domaine au SW de la faille majeure N120  
B: domaine au NE de la faille majeure N120.

la série des micaschistes noirs. Ils pourraient constituer l'équivalent des micaschistes quartzeux redoublés par une zone de cisaillement. Les micaschistes noirs contiennent les niveaux repères décrits précédemment. Cependant, le niveau volcano-sédimentaire b2 est plus développé au NE et les quartzites noirs sont moins représentés et n'apparaissent qu'au SE. La partie terminale des micaschistes noirs est constituée de niveaux de plus en plus feldspathiques, jusqu'à une barre de quartzite feldspathique pouvant atteindre une dizaine de mètres d'épaisseur, d'extension régionale. La barre de quartzite peut être l'équivalent du niveau volcano-sédimentaire b3 du domaine SW. Cette barre de quartzite et le niveau volcano-sédimentaire b2 servent de plan de localisation des zones de cisaillement.

Par corrélation avec les séries paléozoïques du Sud du Massif central les micaschistes quartzeux sont attribués au Cambrien moyen à supérieur, le quartzite sommital au Trémadocien inférieur et les micaschistes noirs à l'Ordovicien inférieur (fig. I-20).

## ***2. Comparaison des lithologies et structures avec les autres secteurs des Cévennes***

Afin d'avoir une vision d'ensemble de la lithologie et des structures rencontrées dans les Cévennes, une carte compilant les feuilles géologiques à 1/50000 du Vigan, de Nant, de Meyruès, de Génolhac, de Bessèges et d'Alès a été réalisée (fig. IV-7). Certains contacts, vérifiés sur le terrain, ont été modifiés. La faille N120 identifiée sur notre secteur sépare l'ensemble de la région en deux domaines distincts.

### ***2. 1. Le domaine au SW de la faille N120***

Sur la feuille du Vigan et de Nant nous retrouvons la série des micaschistes quartzeux au Nord et au Sud de la granodiorite de Saint-Guiral et du Liron et à l'Ouest de celle de L'Aigoual. Sur la feuille de Meyruès, les micaschistes quartzeux se retrouvent de part et d'autre de l'Aigoual où ils contiennent des lentilles carbonatées ou calciques, aussi observées localement au SW et au S de la feuille de Saint-André-de-Valborgne. De part et d'autre de la granodiorite de Saint-Guiral et du Liron, les micaschistes quartzeux sont composés à la base d'alternances de bancs de micaschistes plus ou moins quartzeux ou pélitiques, et au sommet d'alternance de niveaux quartzeux, parfois feldspathiques et de schistes. En l'absence de niveaux repères d'extension régionale il n'est pas possible de replacer exactement ces séries au sein de la succession lithologique proposée dans notre secteur. Elles ne forment pas forcément la base de la colonne stratigraphique puisqu'elles sont affectées par plusieurs cisaillements observés sur le terrain, sur la route entre le Col du Pas et Valleraugue et juste après Valleraugue. La base de la série des micaschistes quartzeux reste inconnue puisque, sur la feuille du Vigan, son contact avec les séries paléozoïques cambriennes est toujours faillé (faille du Vigan) et, sur la feuille de Nant ce contact est une base de nappe (à l'Ouest d'Arrigas). Notre succession lithologique agée du Cambrien moyen à l'Ordovicien supérieur repose donc anormalement sur les séries datées paléontologiquement du Cambrien moyen. Si les niveaux carbonatés de la

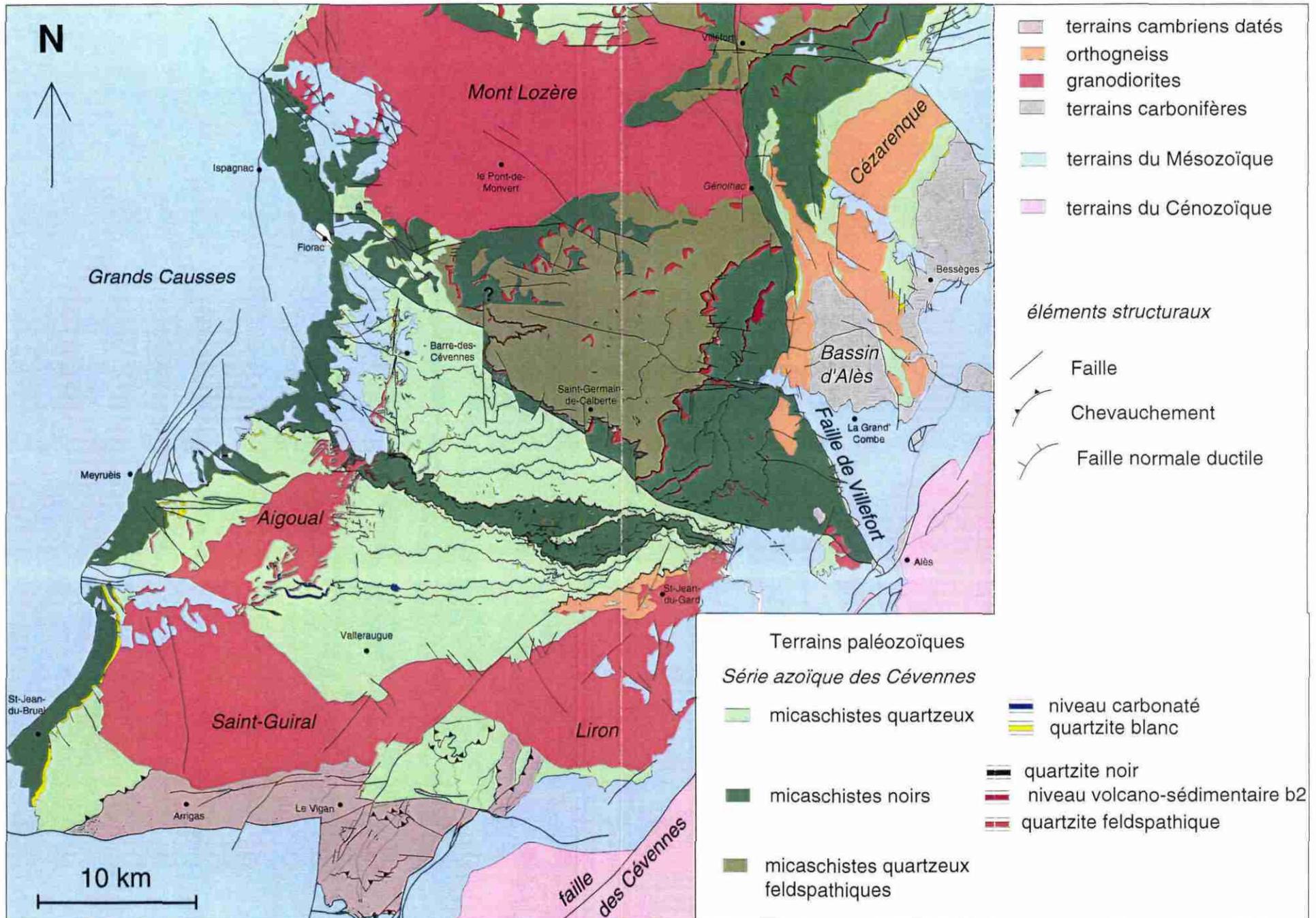


Figure IV-7: Carte géologique des Cévennes méridionales et centrales à partir des feuilles à 1/50 000 (BRGM)



base de notre série correspondent bien aux calcaires du Cambrien moyen (Géorgien supérieur) de Saint-Bresson-les-Malines, les niveaux carbonatés sont répétés par la zone de cisaillement qui correspond à un chevauchement.

A l'Ouest de l'Aigoual, sur la feuille de Nant, les micaschistes quartzeux et les micaschistes noirs sont séparés par une barre continue de quartzite blanc (à l'Est de Saint-Jean-de-Bruel), très massive, pouvant atteindre 100 m d'épaisseur. Les schistes noirs sont comparables à ceux décrits dans notre secteur et comprennent une barre de quartzite noir vers le sommet de la série. Le sommet éventuel de cette série est absent à cause d'une faille juxtaposant les schistes avec les formations triasiques. Les séries schisteuses se prolongent sur la feuille de Meyruès. Dans la partie supérieure des micaschistes quartzeux une barre de quartzite peut correspondre à celle observée sur notre secteur. La barre de quartzite noir dans les micaschistes noirs s'observe en lambeaux discontinus jusqu'au Nord d'Ispagnac. L'ensemble des formations se prolonge également à l'extrémité Sud Ouest de la feuille de Génolhac.

## **2. 2. Le domaine au NE de la faille N120**

Les micaschistes noirs du domaine NE se prolongent sur la feuille d'Alès où ils sont arrêtés par la faille de Villefort. Ils sont décrits comme des quartzo-micaschistes feldspathiques, gris à gris-vert, à grain fin, d'aspect satiné et contenant des intercalations de niveaux plus ou moins quartzeux et pélitiques (Arène et al., 1978). Localement, quelques bancs de quartzites blancs, centimétriques à plurimétriques, sont observés. L'albite est présente dans des proportions variables dans tous les faciès. La cartographie des zones riches en exsudats globalement parallèles à la schistosité laisse supposer l'existence d'une zone de cisaillement au sein de cette série.

Cette série se poursuit au Nord sur les feuilles de Bessèges et de Génolhac. Le niveau volcano-sédimentaire b2 est bien développé dans les micaschistes noirs de notre secteur. Puis, au-dessus, affleure la barre de quartzite feldspathique surmontée d'une série de micaschistes quartzo-feldspathiques. Sur la feuille de Bessèges, cette série est arrêtée par la faille de Villefort et se retrouve plus au Nord à une dizaine de kilomètre à l'Est de la faille. En descendant dans la série, à l'Est de la faille de Villefort, sous la série des micaschistes noirs (où la présence fréquente d'albite est signalée) se retrouve une barre de quartzite blanc puis la série des micaschistes quartzeux dans lesquels sont interstratifiés les orthogneiss de la Cézarenque. La présence d'un cortège filonien métamorphisé et déformé à proximité de l'orthogneiss indique le caractère intrusif de son contact. Les micaschistes quartzeux sont décrits comme des micaschistes souvent riches en quartz contenant des niveaux de quartzite micacé et de fréquents niveaux riches en feldspath.

Il est important de noter qu'en raison du pendage des schistosités la succession lithologique complète observée sur la feuille de Bessèges est à l'envers avec, en partant du sommet vers la base, les micaschistes quartzeux, la barre de quartzite, les micaschistes noirs, le niveau de quartzite noir, la barre de quartzite feldspathique, et les micaschistes quartzeux feldspathiques. Cette inversion affecte la superposition anormale des micaschistes quartzeux feldspathiques sur la barre de quartzite feldspathique surmontant les micaschistes noirs. Cette inversion peut s'expliquer par un plissement

isoclinal comme cela a déjà été suggéré par plusieurs auteurs pour la région de la Cézarenque (Pellet, 1972; Brouder, 1968 et discuté dans Burg et Matte, 1978). Le plissement en lui même n'est pas la seule hypothèse, de tels renversements sont connus dans des systèmes en plats et rampes (Boyer et Elliot, 1982).

Au niveau lithologique les mêmes successions se retrouvent régionalement dans les domaines au SW et au NE de la faille N120 . Les deux domaines appartenaient donc au même contexte paléogéographique sédimentaire mais devaient être originellement éloignés l'un de l'autre. Leur juxtaposition résulte probablement du fonctionnement dextre de la faille N120 cartographiée sur notre secteur.

|                 |  |
|-----------------|--|
| <i>Partie C</i> |  |
|                 | <i>Trajectoires et champs de déformation</i> |

## *Introduction*

La schistosité et la linéation d'étirement sont des structures qui définissent la déformation finie. X étant le grand axe, Z le petit et Y l'axe intermédiaire de l'ellipsoïde X Y Z de déformation finie, la schistosité correspond au plan XY perpendiculaire à l'axe de raccourcissement maximal Z et la linéation d'étirement indique la direction X d'étirement maximal dans ce plan. Les plans de schistosité et la linéation d'étirement décrits dans le chapitre II ont été reportés sur une carte et la courbe enveloppant l'orientation de ces plans ou lignes donne les trajectoires. La carte de trajectoire de la schistosité est obtenue par l'orientation de la schistosité régionale S1. La carte de la linéation d'étirement est obtenue par l'orientation des linéations d'étirement L1 et L2, les deux linéations ayant une orientation identique sur un même affleurement (voir fig. II-1). Une carte des linéations de crénulation ainsi qu'une carte par secteur des axes de plis P2 ont également été effectuées. L'ensemble des structures a été reporté sur une carte synthétique afin de discuter les relations entre elles.

## *1. Description des cartes*

### *1. 1. Carte de la schistosité majeure*

La schistosité S1 présente des directions et des pendages qui varient à l'échelle de la carte (fig. IV-8). Dans le détail, les variations observées sont les suivantes:

- Du SE au SW de la carte, la schistosité passe de WNW-ESE à EW, puis N50 puis redevient EW au S de la carte. Elle devient ensuite progressivement NW-SE en allant vers l'Ouest. Son pendage de 50 à 60° au S diminue progressivement jusqu'à des pendages faibles (sub-horizontaux à 20°) en allant vers le N.
- A l'extrémité Est de la carte, au Nord de la faille N120, la schistosité passe brusquement d'une direction EW à une direction NE-SW puis NS en allant vers le N et vers l'E.
- Dans la partie Nord de la carte, les plans de schistosité globalement sub-horizontaux ont localement des directions et des pendages très variés, parfois très forts.

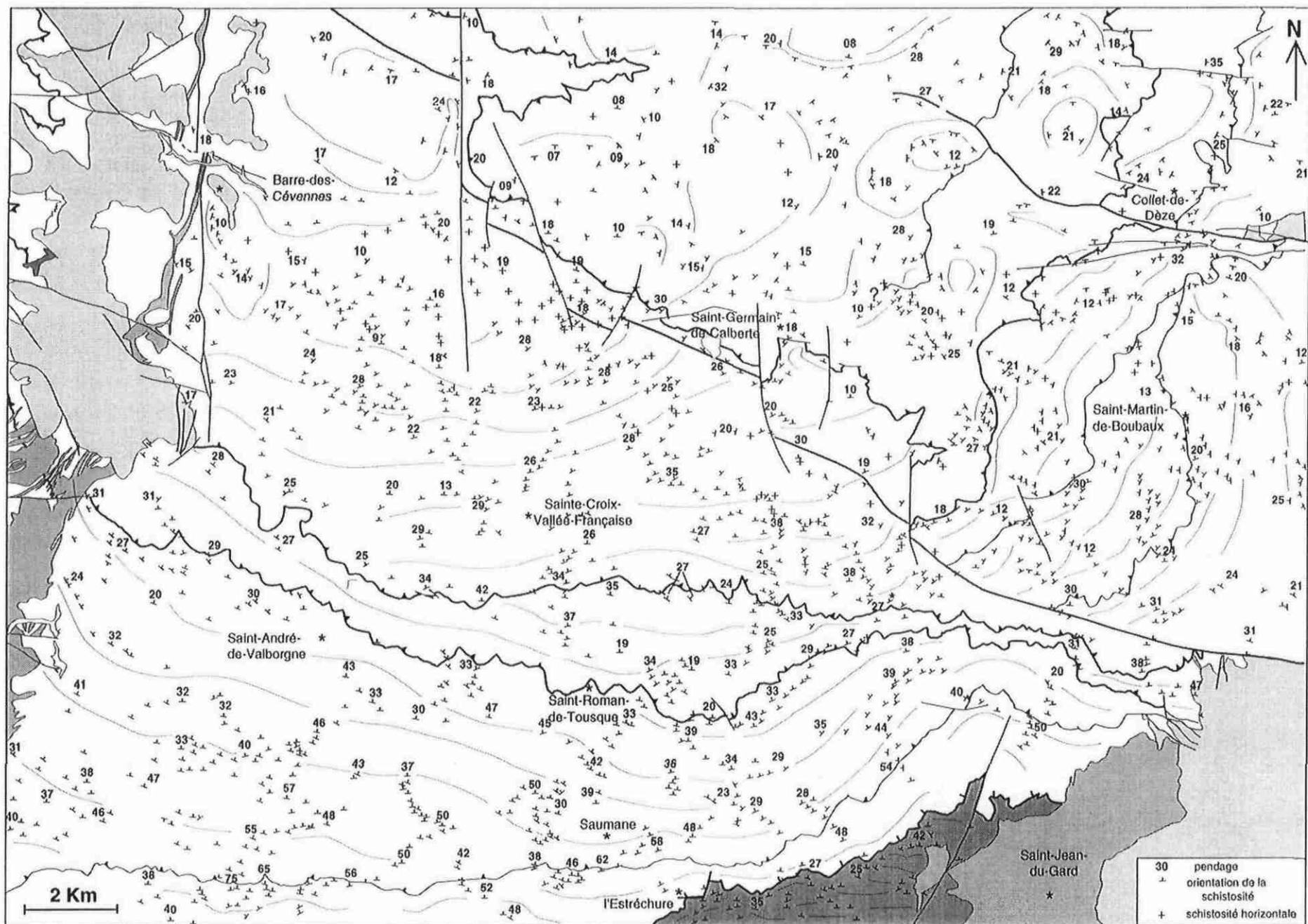


Figure IV-8: Carte des trajectoires de la schistosité régionale S1.

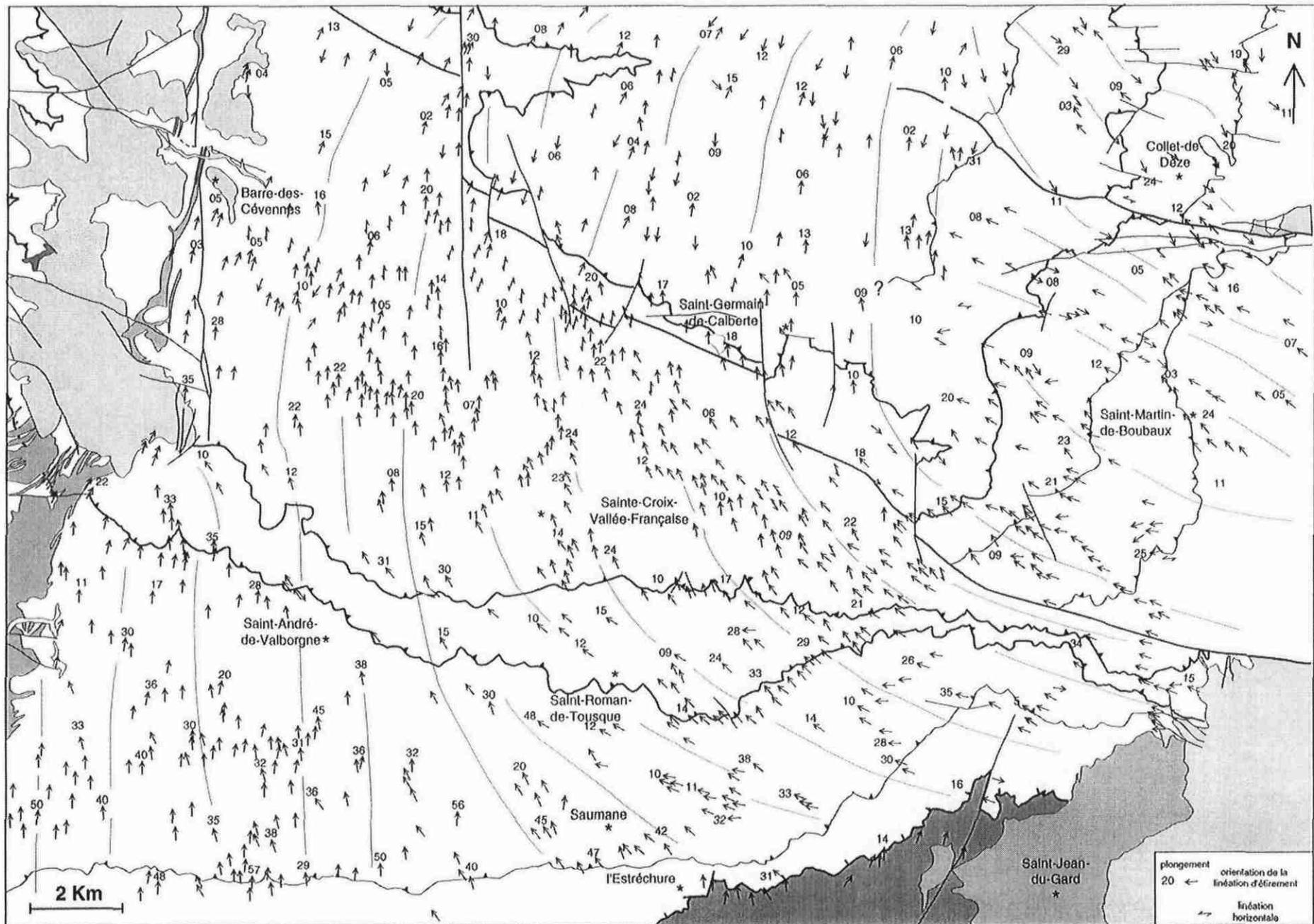


Figure IV-9: Carte des trajectoires des linéations d'étirement L1 et L2.

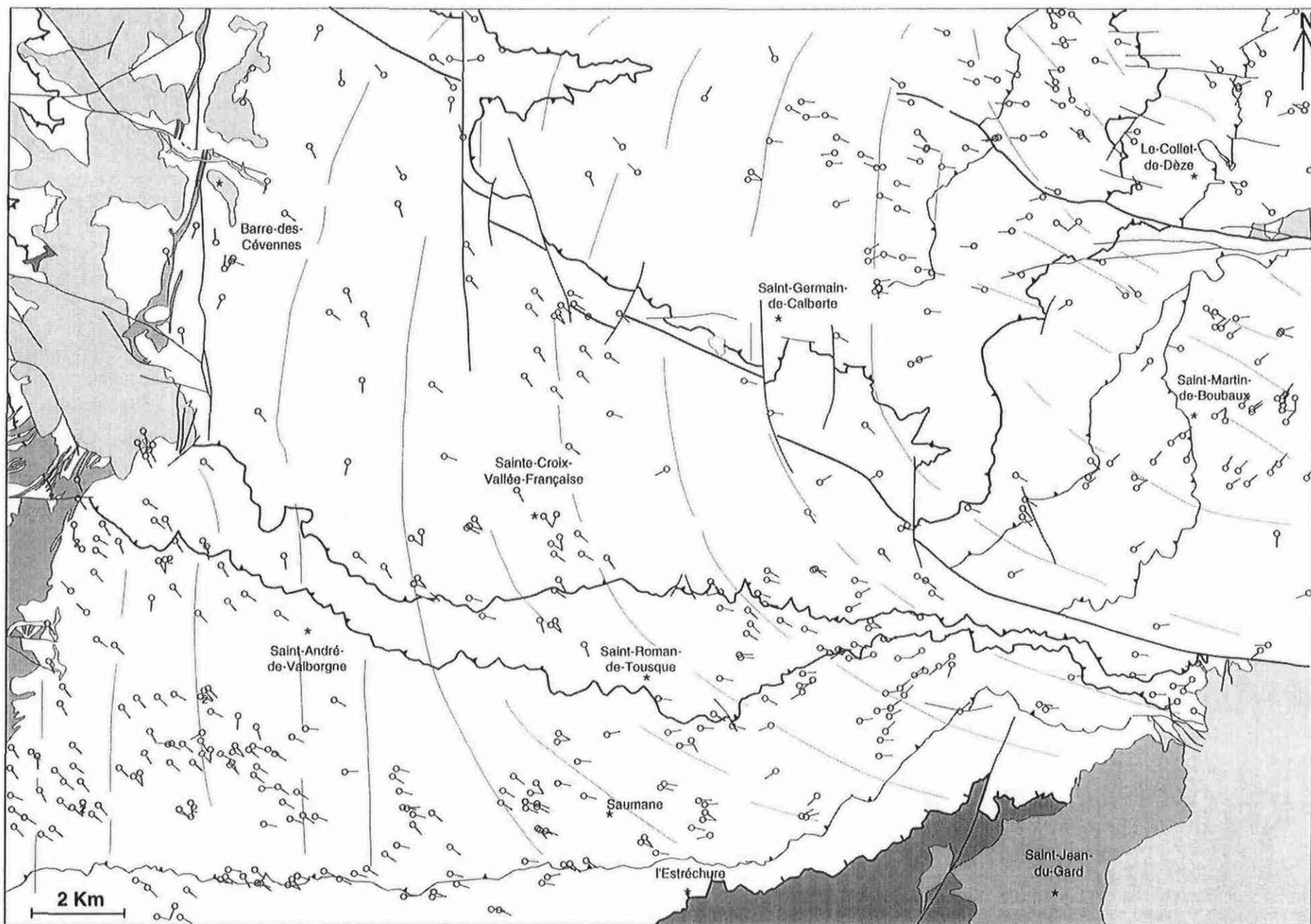


Figure IV-10: Carte des directions des linéations de crénulation. Les trajectoires reportées sont celles des linéation d'étirement L1 et L2.

- A l'extrémité Nord et au NE de la carte la schistosité pend fréquemment d'une vingtaine de degré vers le Sud.

### **1. 2. Carte de la linéation d'étirement**

Les linéations d'étirement L1 et L2 ont été reportées sur la figure IV-9. Dans les séries schisteuses, elles présentent des variations de direction et de plongement:

Dans le domaine SW, leur direction varie progressivement d'une direction EW au SE à une direction proche de NS en allant vers l'Ouest ou vers le Nord de la carte. Son plongement varie de 10 à 30° vers le NW au SE à 30 à 50° vers le N au SW. Dans la partie Nord, sa direction est NS et le plongement est beaucoup plus faible (sub-horizontale à une vingtaine de degré). Au Nord du secteur étudié, la linéation d'étirement, bien que toujours visible, est beaucoup moins marquée qu'au Sud de la carte. Dans le domaine NE, la direction de la linéation d'étirement varie brutalement. A l'extrémité Est de la carte, sa direction varie de N110 à N130 en allant vers le Nord. Elle devient brutalement NS en allant vers l'Ouest. Il faut toutefois souligner que la linéation d'étirement est très faiblement marquée au NE de la carte. Elle est souvent masquée par une crénulation intense qui s'accompagne d'une réorientation des micas et d'un étirement parallèle à cette crénulation de direction NE-SW. Une attention particulière doit être portée à ne pas confondre cette linéation d'étirement, associée à la crénulation, avec la linéation d'étirement liée à la mise en place des nappes. Dans le massif de Peyrolles, la linéation d'étirement a une direction constante NS à N10.

### **1. 3. Carte de la linéation de crénulation**

L'ensemble des linéations de crénulation a été reporté sur une même carte (fig. IV-10) car il est souvent difficile de distinguer l'événement auquel elles sont associées sur l'affleurement. La direction de la linéation de crénulation liée aux zones de cisaillement correspond à la direction de crénulation la plus fréquemment observée. Dans le domaine SW, sa direction varie de N90 à l'E à N160 en allant vers le NW. Dans le domaine NE, sa direction varie de N80 au Sud à N30 en allant vers le Nord à l'extrémité Est. Au Nord, sa direction est proche d'EW. A l'extrémité NE, des directions N150 sont observées. Plus à l'W, elle a une direction constante EW.

### **1. 4. Carte des axes de plis P2**

Pour observer les variations de la direction des axes à l'échelle de la carte, nous avons séparé les mesures d'axes de plis en 6 secteurs (NW, N, NE, SW, S, SE) (fig. IV-11). Pour chaque secteur les variations des directions d'axes des plis P2 sont de 10 à 30° et correspondent aux variations observées au sein d'un même affleurement (fig. II-7). Les axes de plis ont des directions moyennes qui varient selon les secteurs. Dans le domaine SW, leur direction est de N120 à l'Est, puis N110 en allant vers l'Ouest, N160 à l'Ouest de la carte puis N170 en allant vers le Nord. Au NE de la faille, leur direction en

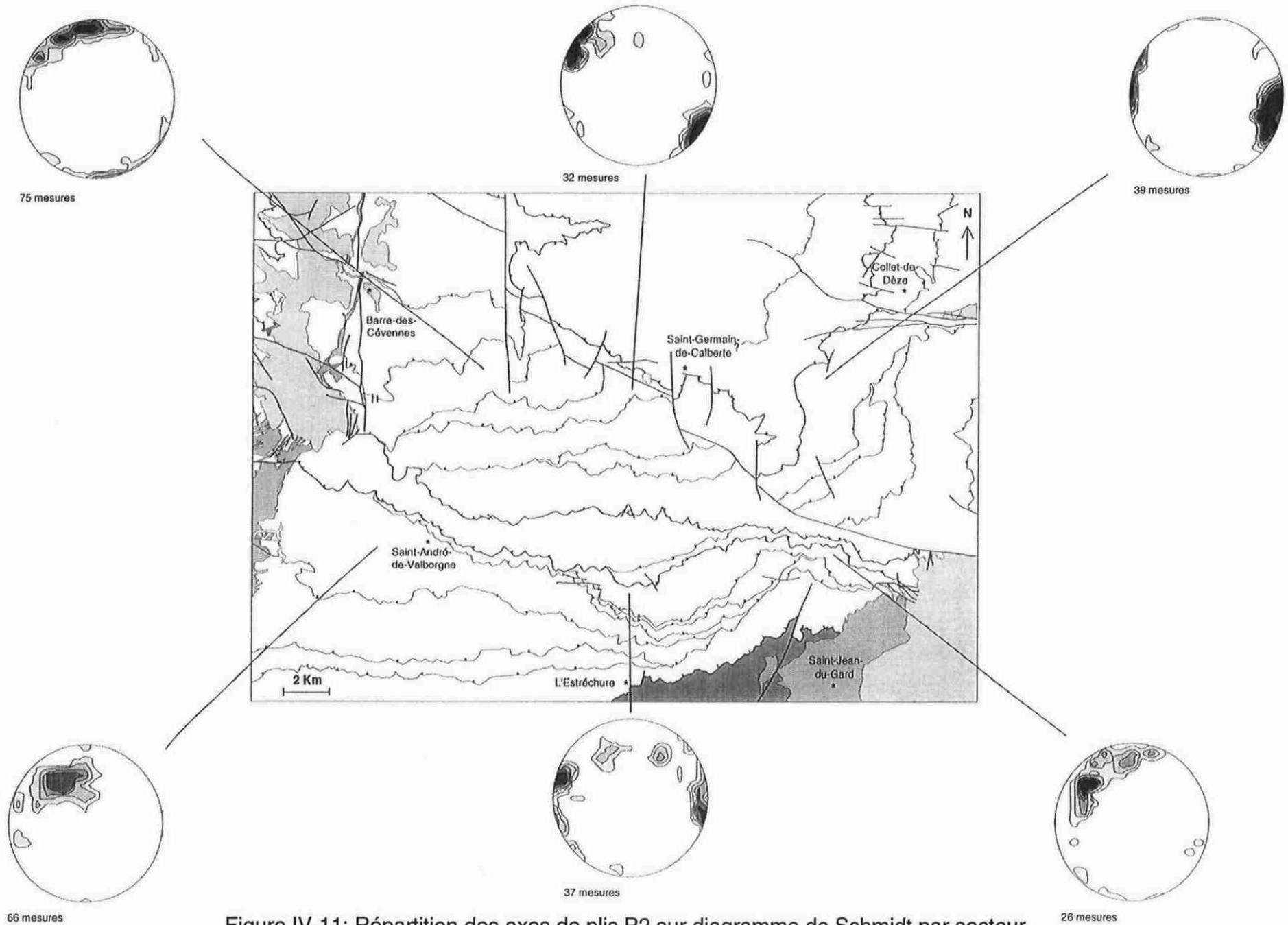


Figure IV-11: Répartition des axes de plis P2 sur diagramme de Schmidt par secteur.  
 Contours de densité: 2%, 6%, 10%, 14%, 18%, hémisphère inférieur.

moyenne N100 à l'Est devient N120 en allant vers le Nord. Dans tous les secteurs leur plongement est sub-horizontale ou faiblement penté vers le NW.

## ***2. Interprétation et discussion***

L'analyse des cartes structurales (fig IV-8 à IV-11) et de la carte synthétique (fig. IV-12) permet de mettre en évidence les relations géométriques entre les mésostructures et les structures d'échelle kilométrique d'une part et d'autre part entre les mésostructures entre elles. Ainsi les événements responsables de leur géométrie seront distingués. En s'affranchissant des déformations post-varisques, l'évolution cartographique des directions des mésostructures liées à la mise en place des nappes pourra nous renseigner sur la cinématique de cette mise en place.

### ***2. 1. Conséquences du plissement tardif***

Dans le domaine NE, dans les micaschistes quartzeux feldspathiques, les plans de schistosité sont globalement sub-horizontaux. Cependant ils ont des directions variables et des pendages parfois forts et soulignent des plissements amples d'axes N45 de longueur d'onde kilométrique. D'autres structures sont associées à ce plissement (voir chapitre III). Ces plissements postérieurs à la déformation varisque sont recoupés par la faille de Saint-Michel-de-Dèze (fig. IV- 8).

### ***2. 2. Conséquences de la mise en place des granodiorites***

Les granodiorites sont responsables du redressement des couches à proximité de leur contact. Le pendage fréquent vers le Sud, à l'extrémité NE de la carte peut s'expliquer par un redressement de la S1 lors de la mise en place du Mont Lozère au Nord. L'évolution progressive des pendages de 30° jusqu'à près de 50° au Sud de la carte est dû à un redressement de la S1 lors de la mise en place des granodiorites du Saint-Guiral et du Liron.

### ***2. 3. Conséquences du fonctionnement des failles***

- La rotation de la schistosité de N50 à EW au SE de la carte (fig. IV-12, diagrammes 1 et 2) est probablement liée au fonctionnement dextre de la faille N120.
- Dans la partie NE, la variation brutale de la linéation d'étirement de N110 à N130 du S au N vers une direction NS en allant vers l'Ouest peut être lié à une rotation des couches lors du jeu sénestre de la faille de Villefort. En effet, au Nord de la faille N120 la direction de la linéation d'étirement est en continuité avec la direction de la linéation d'étirement dans le secteur SE de la carte. Cependant ce domaine étant originellement, avant le jeu du décrochement dextre N120, localisé plus au NW qu'actuellement, les linéations d'étirement devraient plutôt avoir une direction proche de NS. Les directions d'axes de plis P2 et de la linéation de crénulation sont également proches de la linéation d'étirement et l'ensemble de ces

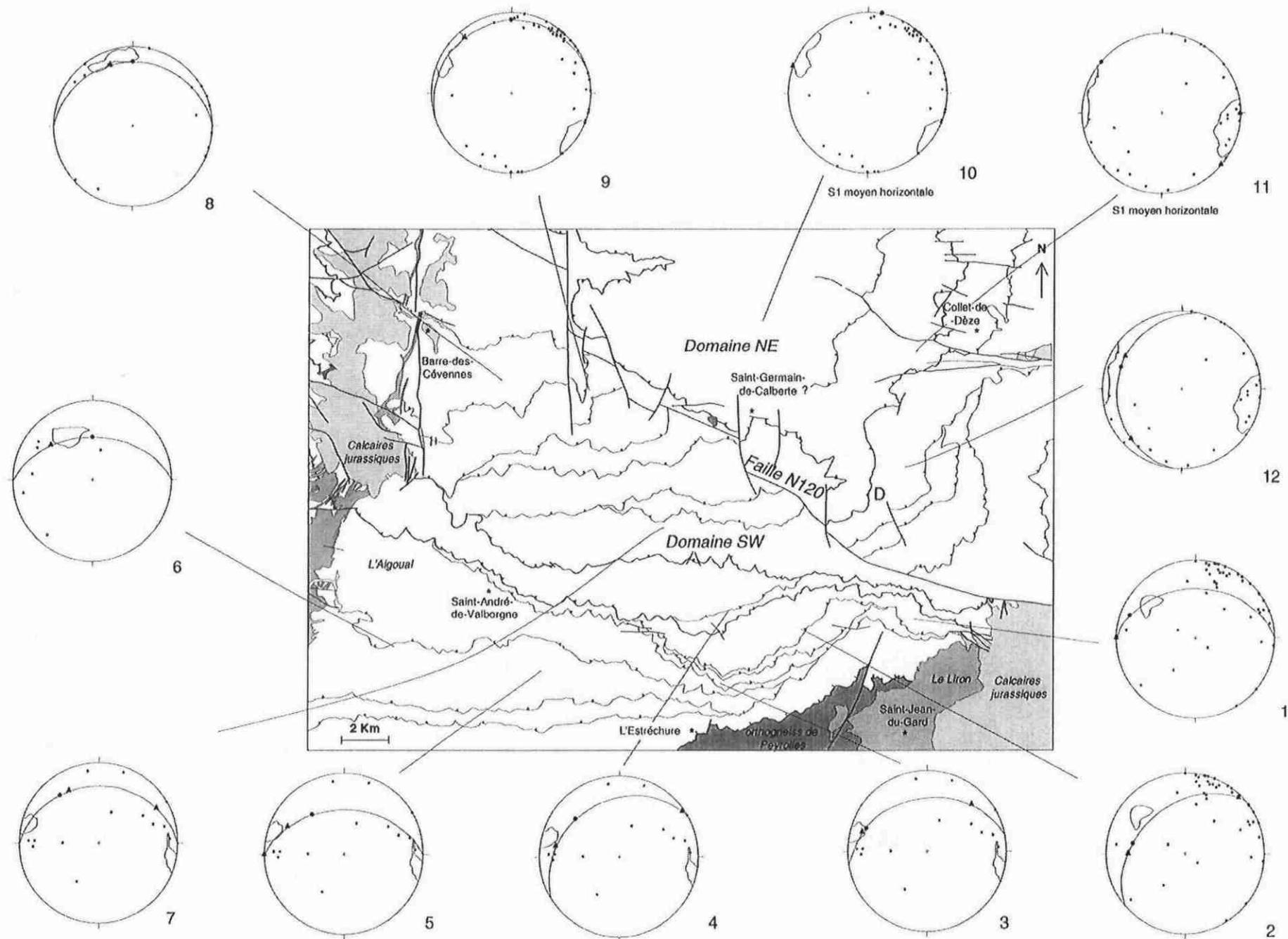


Figure IV-12: Carte synthétisant l'ensemble des structures. Pour 12 secteurs différents est représenté un diagramme de Schmidt (hémisphère inférieur) sur lequel sont reportés le plan de S1 moyen, la linéation d'étirement L1 et L2 (gros point noir), les linéations de crénulation principales (triangle noir), les contours représentent les maxima (14%) des axes de plis P2 et les axes de plis P3 (petits points noirs).

mésostructures est lié à la déformation en cisaillement du deuxième stade. L'hypothèse la plus vraisemblable est de considérer que l'orientation de l'ensemble des structures était originellement proche de NS, comme à l'Ouest de la carte, puis qu'elle a subi une rotation lors du fonctionnement en décrochement des failles N120 et de la faille de Villefort. La variation de la schistosité à l'extrémité Est de la carte, au Nord de la faille N120, de NE-SW à NS résulte de cette même rotation tardive des couches. A l'Est de la faille de Villefort une rotation conforme à un jeu sénestre est également observé sur 5 km.

## **2. 4. Champ de déformation attribué à la mise en place des nappes**

- Les variations locales de schistosité sont attribuées aux déformations post-varisques. Dans les secteurs éloignés des granodiorites et de la faille de Villefort les plans de schistosité sont de 30° à sub-horizontaux avec localement des directions et des pendages très variés, parfois très forts liés à des plissements tardifs. Avant la mise en place des granodiorites et le jeu des décrochements, la schistosité était donc vraisemblablement peu pentée de 30° vers le Nord à proche de l'horizontale.
- Dans le domaine SW, la linéation d'étirement a une direction qui varie progressivement d'EW au SE à une direction proche de NS à l'Ouest ou vers le Nord de la carte. La schistosité a une direction constante EW d'Est en Ouest (voir diagrammes 3, 5, 6 dans fig. IV-12). Au Sud de ce domaine, les redressements des couches, suite à la mise en place des granites, modifient très peu les directions originelles des linéations d'étirement et de crénulation. Ainsi sur la majeure partie de la carte, la variation de la direction de la linéation d'étirement (voir l'évolution des diagrammes 2-3 (EW), 4, 5, 7, 6-8-9-10 (NS) dans fig. IV-12) semble primaire et s'est effectuée lors de la déformation qui a donné naissance à la schistosité majeure et à la linéation d'étirement. Elle correspond donc à une virgation lors de la mise en place des nappes et ne résulte pas d'une rotation tardive des plans de schistosité comme le suggère Najoui (1996). Dans le domaine SW, la direction de la linéation de crénulation subit la même variation que la direction de la linéation d'étirement variant de N90 à l'E à N160 en allant vers le NW ((fig. IV-12) diagramme 1 (N90), 2 (N90), 3 (N100), 4 (N100), 5 (N115), 6 (N130), 8 (N140), 7 (N160)). Elle est souvent incluse ou très proche des maxima des axes de plis P2 qui varient également en liaison avec la rotation de la linéation d'étirement.
- Dans le massif de Peyrolles, la linéation d'étirement a une direction NS à N10, alors que, dans les schistes sus-jacents, elle a une direction EW. Cette variation brutale de direction peut provenir de la juxtaposition tardive des schistes et de l'orthoigneiss de Peyrolles due à la faille normale ductile localisée au contact schistes-orthoigneiss.
- Dans le domaine SW, la direction des chevauchements et de la schistosité évolue d'EW à N50 en allant vers l'Est (fig. IV-12, diagrammes 5, 3 et 2) alors que les linéations d'étirement ont des directions proches dans les deux secteurs (fig. IV-12, comparaison entre les diagrammes 2 et 3). En allant vers l'Ouest, la schistosité et les plans de chevauchement varient

progressivement d'une direction EW à NW-SE puis NS à l'extrémité NW de la carte. La linéation d'étirement présente une direction constante NS.

Cette géométrie peut traduire le passage des chevauchements frontaux au Sud à des rampes latérales vers le NW et vers le NE pour le domaine au SW de la faille N120.

Pour terminer ce chapitre nous allons discuter quelques points de désaccord entre les résultats décrits dans cette étude et ceux des travaux antérieurs (Voir chapitre I-C). Quatre points essentiels seront abordés: sur les causes des répétitions lithologiques observées, l'existence d'une ou de deux schistosités à l'échelle régionale, le caractère monophasé ou polyphasé de la déformation varisque et enfin sur le régime et la cinématique de cette déformation. En dernier lieu nous discuterons la géométrie du système de chevauchement que nous présentons dans cette étude.

### *1. Les structures responsables des répétitions lithologiques*

Les répétitions lithologiques ont été identifiées par Brouder (1968), Pellet (1972), Munsch (1981) et Magontier (1988). Deux types de structures peuvent entraîner ces répétitions, le pli isoclinal et le chevauchement. La plupart des auteurs ont émis l'hypothèse de plissements isoclinaux kilométriques (Brouder, 1968; Pellet, 1972; Munsch, 1981, Magontier, 1988). Certains ont préconisé la présence de zones de cisaillement sans les mettre en évidence (Mattauer et Etchecopar, 1977). Plusieurs zones où des plis isoclinaux, d'échelle kilométrique, ont été cartographiés par les auteurs précédents, ont été vérifiées sur le terrain. La présence de tels plis impliquerait des changements de déversement des plis mésoscopiques dans le flanc normal et le flanc inverse (plis "S" et plis "Z"). Or le déversement réels des plis est partout vers le Sud. Par contre, les contacts entre les lithologies répétées sont soulignés par des zones de cisaillement. Cela n'exclut pas la présence de plissements isoclinaux d'échelle décamétrique et qui peuvent affecter certains niveaux repères. Un exemple des mieux illustrés est le plissement d'une barre de quartzite blanc, d'une dizaine de mètres d'épaisseur, sur la route entre Saumane et les Plantiers (D20), après le hameau de Bourgnolles. Le flanc normal est affecté par des microplis à vergence Sud, le flanc inverse par des microplis à vergence Nord puis le flanc normal se retrouve de l'autre côté de la vallée. La charnière est visible sur le bord de la route. Ce quartzite plissé est surmonté d'une zone de cisaillement d'extension régionale. De nombreux niveaux repères plissés isoclinement au sein même des zones de cisaillement sont également observés. La présence simultanée de zones de cisaillement et de plissement isoclinal n'est pas incompatible (Ramsay, 1981) et est même caractéristique des zones de cisaillement schisteuses étudiées sur notre secteur.

## *2. La schistosité régionale*

Tous les travaux antérieurs (voir tableau I-1) considèrent la schistosité majeure comme une schistosité composite S0-S1-S2. Ils observent à l'échelle mésoscopique et microscopique une première schistosité, souvent sous forme de microlithons, entre les plans d'une deuxième schistosité. Ces deux schistosités sont observées dans de nombreux endroits et ces auteurs admettent que ces deux schistosités sont entièrement transposées lorsqu'une seule schistosité est visible. Dans les travaux antérieurs, un seul présente une carte de répartition de l'observation de microlithons entre les plans de schistosités (Rakib, 1996). Cette répartition apparaît homogène à l'échelle de la région et l'auteur en déduit la présence d'une schistosité composite à l'échelle régionale. L'échelle à laquelle l'auteur se place fausse l'interprétation de la carte. En effet, au cours de ce travail nous avons également observé fréquemment ces deux schistosités, mais leur répartition n'est pas aléatoire et se localise au niveau des zones de cisaillement. La plupart des microlithons localisés sur la carte de Rakib (1996) se situent de fait sur les zones de cisaillement ou à proximité confirmant ainsi nos observations. D'autre part, si les zones où une seule schistosité est observée (localisées en dehors des zones de cisaillement) correspondent à une transposition totale, ceci impliquerait que les zones de cisaillement, où la transposition est partielle, seraient des zones de moindre déformation. Cette conclusion est incompatible avec la définition même d'une zone de cisaillement. Nous proposons donc, contrairement aux auteurs antérieurs que la schistosité majeure régionale est une S0-S1 et qu'une deuxième schistosité se forme localement dans les zones de cisaillement.

## *3. Le caractère polyphasé ou monophasé de la déformation varisque*

Tous les auteurs s'accordent sur l'existence de deux déformations varisques dans la région des Cévennes. Ils interprètent ces déformations comme le résultat de deux phases synmétamorphes, distinctes, excepté Magontier (1988) qui les intègre au cours d'un même continuum de déformation. Pour ces auteurs, la déformation majeure et la plus pénétrative est la deuxième déformation. Dans nos travaux nous avons également mis en évidence deux déformations. Cependant, la déformation la plus pénétrative, responsable de la schistosité majeure, est la première. La deuxième déformation est essentiellement localisée dans des zones de cisaillement. Les linéations d'étirement sur les plans de schistosité majeure ou celles fibreuses sur les exsudats de quartz liés aux zones de cisaillement présentent toute deux une trajectoire complexe, variable dans l'espace, mais identique sur une même localisation. Ainsi, la cinématique des deux stades de déformations est identique. De plus, elles se sont effectuées sous les mêmes conditions métamorphiques (voir chapitre V). Pour ces raisons, nous interprétons ces deux déformations comme un continuum de déformation au cours d'une même phase tectonique.

#### *4. Le régime de déformation et sa cinématique*

Du fait même de la coexistence de cisaillement et de plissement isoclinal au cours de la déformation, une mise au point est nécessaire sur les conséquences pour l'interprétation des critères de cisaillement. Les orientations préférentielles des axes  $\langle c \rangle$  du quartz effectuées sur le flanc apparemment normal et le flanc inverse d'un pli isoclinal (voir chapitre II-3.3, lame CFC42a) montre une inversion de l'orientation de la fabrique. Cette étude montre que le plissement affecte l'asymétrie des microstructures qui peuvent alors indiquer des sens de cisaillement opposés dans les flancs normaux et inverses de plis. Cette observation nous amène à être très prudent quant à l'interprétation des critères de cisaillement observés microscopiquement en terme de vergence originelle des nappes.

Par ailleurs, le plissement isoclinal affecte la S1 et s'accompagne de la formation de la S2. Dans la zone de charnière, la S1 est sous forme de microlithons et en allant vers les flancs elle présente progressivement une légère obliquité entre la S1 et les plans plus espacés S2 (fig. II-4). Ces deux schistosités peuvent être facilement confondues avec une schistosité reprise par un plan de cisaillement (fig. II-8) et l'obliquité indique un sens de cisaillement inverse au sens réel. L'interprétation d'une obliquité entre deux plans en terme de sens de cisaillement doit donc se faire avec précaution à petite échelle, après avoir vérifié la nature des deux plans (schistosité ou cisaillement) et voir si le deuxième plan n'est pas en fait une S2 associée à un plissement.

Ainsi une étude récente sur les critères cinématiques synmétamorphiques de la région (Rakib, 1996, p111) indiquant des cisaillements antagonistes vers le Nord et vers le Sud dans la série schisteuse doit être revue avec critique. L'auteur présente une carte de localisation des critères de cisaillement, montrant l'abondance de critères en faille normale vers le Nord qu'il affirme se localiser essentiellement en dehors des zones de cisaillement. Il utilise cette caractéristique pour argumenter que la déformation est essentiellement coaxiale et en aplatissement dans la région. Plusieurs critiques peuvent être faite sur l'interprétation des observations de terrain:

- La plupart des critères relevés sur la carte sont localisés le long de zones de cisaillement.
- Il y a confusion entre les notions de déformation coaxiale, de déformation non coaxiale, d'aplatissement et de plissement. Pour correction, rappelons que l'aplatissement caractérisant la forme de l'ellipsoïde de la déformation finie est indépendant des notions de déformation coaxiale ou non coaxiale qui indiquent le caractère rotationnel ou non de la déformation progressive. La relation aplatissement - déformation coaxiale ne peut être faite de manière aussi directe. Un autre point concerne la relation entre plissement, déformation coaxiale et aplatissement. L'auteur décrit des microlithons S1 entre des plans de schistosité S2 qu'il interprète comme une déformation de "strain-slip" tantôt cisillante (d'après le décalage de niveaux repères microscopiques), tantôt en aplatissement. Une première remarque peut-être faite sur le fait qu'un plan ne peut être à la fois un plan de schistosité et un plan de glissement. Les plans observés entre les microlithons sont effectivement des plans de schistosité de plan axial du pli

formé. Le décalage des niveaux repères est dû à la dissolution affectant ces plans comme l'indique la trace de matière insoluble concentrée dans ces plans et non à des glissements le long de ces plans (voir chapitre II-B-1-2). De plus, ces plis essentiellement développés dans les zones de cisaillement sont formés lors d'une déformation en cisaillement et ne doivent pas être utilisés comme critère d'aplatissement ou de déformation coaxiale comme le fait cet auteur.

- La grande majorité des critères utilisés (critère  $\delta$  et  $\sigma$  autour des porphyroclastes, disposition des sous-joints de quartz dans les quartzites, l'enroulement hélicitique des inclusions dans les porphyroblastes, l'obliquité entre les plans de schistosité - plans de cisaillement) sont des critères microscopiques à prendre avec précaution à cause des raisons exposées en début du paragraphe. Un seul critère de cisaillement à l'échelle de l'affleurement (asymétrie des exsudats de quartz) est présenté et indique un cisaillement vers le Sud-Est. Dans nos travaux, seuls les critères de cisaillement mésoscopiques, tels les plans de cisaillement décimétriques à métriques déformant la schistosité majeure lui donnant un aspect sigmoïde à l'échelle de tout l'affleurement et induisant la forme sigmoïde de certains exsudats de quartz ont été retenus comme critère de cisaillement avec certitude. Toutes les observations dans l'ensemble de la région étudiée, indiquent clairement un sens de cisaillement vers le S à SE selon la direction de la linéation d'étirement.

Pour résumer, contrairement aux conclusions de Rakib (1996), nous proposons que les critères de cisaillement sont essentiellement localisés dans les zones de cisaillement dont le fonctionnement vers le Sud à Sud-Est s'accompagne d'un plissement isoclinal important. Seuls les critères mésoscopiques doivent être pris en compte pour définir des transports régionaux.

## *5. La géométrie du système de chevauchements*

Les coupes effectuées à partir de la carte géologique mettent en évidence deux chevauchements principaux entre lesquels se trouvent des chevauchements secondaires. Cette géométrie est celle d'un duplex. Nous allons d'abord définir la terminologie, les caractéristiques générales et les mécanismes de formation des duplex. Ensuite nous discuterons de la géométrie du duplex mis en évidence dans les Cévennes.

### **5. 1. Caractéristiques générales des duplex**

Sur la figure IV-13 sont présentés les différents types de système en chevauchement. La géométrie du système en duplex est décrite par Boyer et Elliot (1982) dont le modèle théorique (fig. IV-14) est déduit d'exemples naturels de duplex d'échelle pluri-kilométrique. Elle se caractérise par un chevauchement basal (ou mur) et un chevauchement sommital (ou toit) entre lesquels des failles obliques rejoignent le chevauchement basal et sommital. L'espace contenu entre deux de ces failles délimite une écaille. Le pendage des écaillles peut être conforme (fig. IV-14) ou non conforme au déplacement

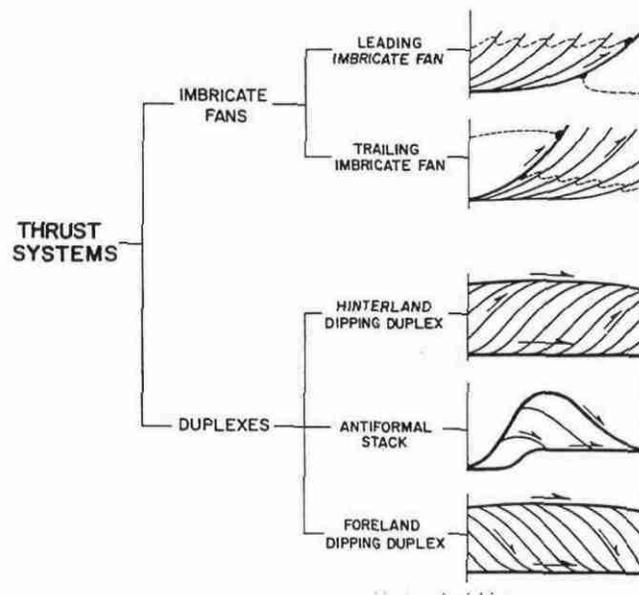


Figure IV-13: Classification des différents systèmes en chevauchement, d'après Boyer et Elliot (1982).

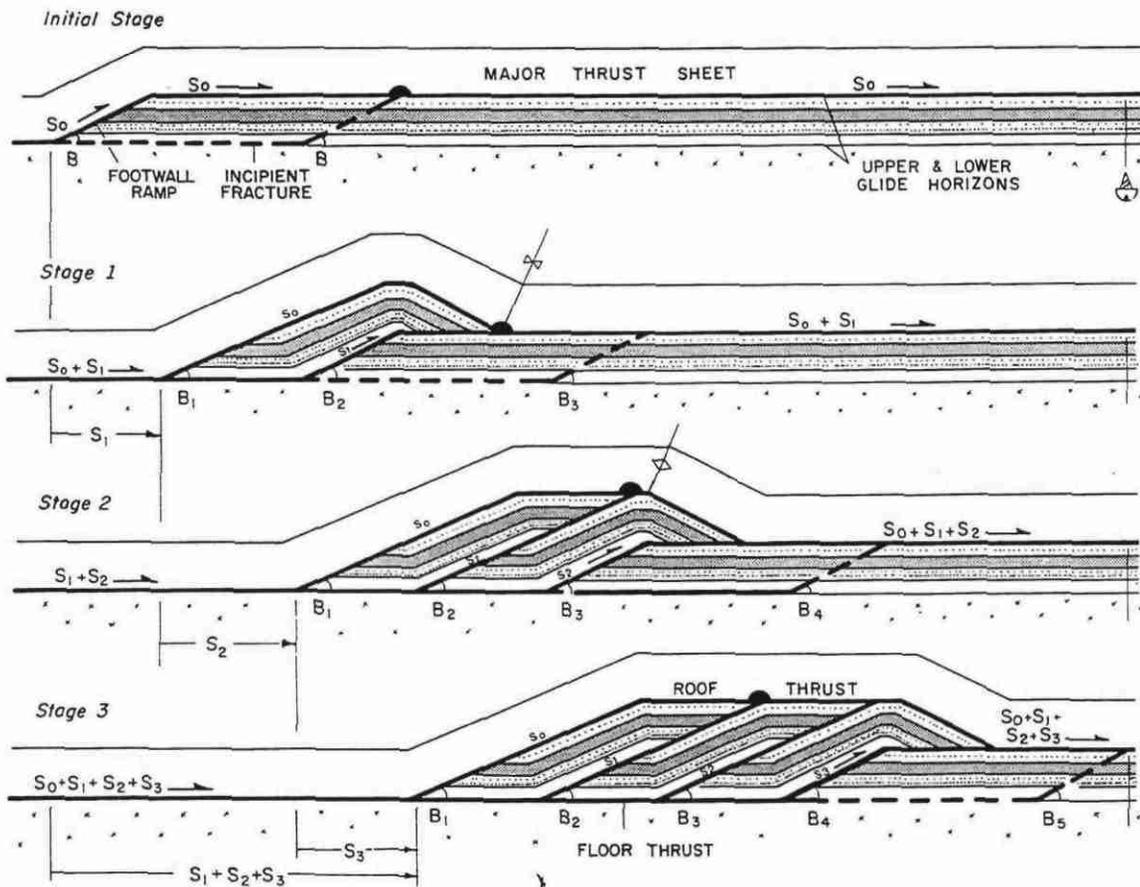


Figure IV-14: Modèle de formation de "duplex". Expérience graphique mesurée assurant une déformation plane, un plissement en kink, avec des angles et dimensions typiques d'exemples naturels (dans Boyer et Elliot, 1982 modifié d'après Boyer, 1978).

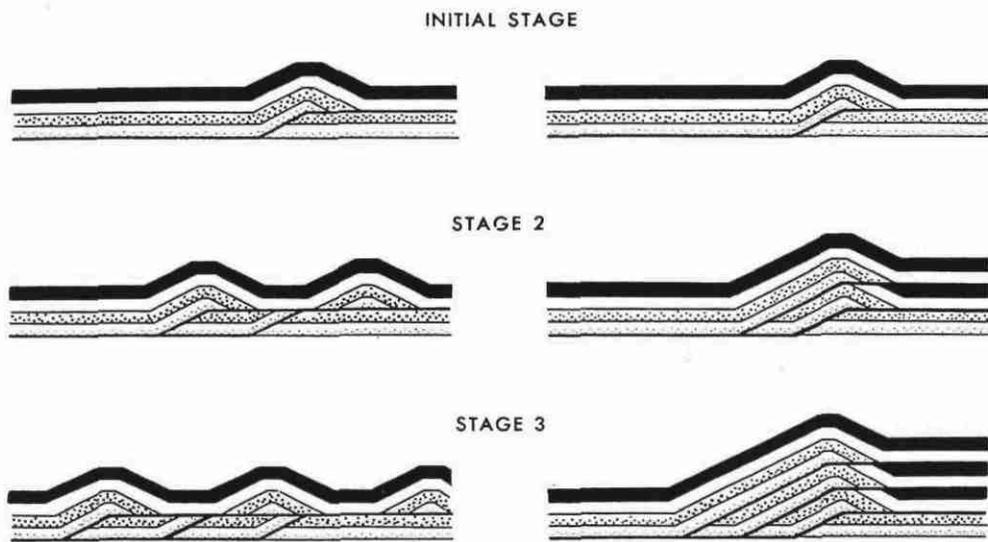


Figure IV-15: deux méthodes alternatives de formation de duplex en séquence inverse d'après les expériences graphiques mesurées (dans Boyet et Elliot, 1982 selon Boyer, 1978)

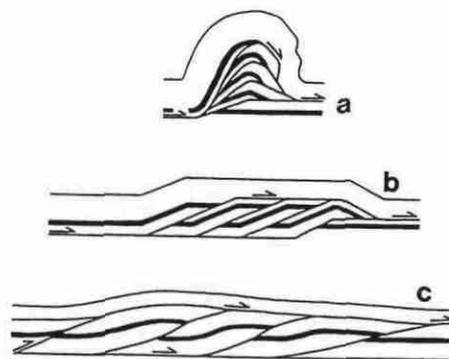


Figure IV-16 géométrie contrastée entre (a) antiforme de chevauchement (b) modèle de duplex" selon Boyer et Elliot (1982) (c) duplex par glissement flexural.

stratification. La formation d'un duplex peut se faire en séquence normale, inverse ou par combinaison des deux modes de propagation. Une propagation en séquence normale correspond à la formation de chaque nouveau chevauchement à l'avant du dernier chevauchement ayant fonctionné (fig. IV-14). A l'opposé, une propagation en séquence inverse correspond à la formation de chaque nouveau chevauchement à l'arrière du dernier chevauchement ayant fonctionné (fig. IV-15). Certaines caractéristiques géométriques permettent de distinguer les deux types de propagation. Le redressement ou le plissement de chevauchements en arrière du duplex est la plus caractéristique d'une propagation en séquence normale. Lorsque les chevauchements se bloquent, la poursuite du raccourcissement peut provoquer le plissement du système formant une antiforme de nappes (fig. IV-16a). La propagation en séquence normale est la plus généralement observée dans la nature.

Le mécanisme de duplex permet le transfert de la déformation d'un niveau de glissement en profondeur vers un niveau de glissement plus superficiel. Par l'intermédiaire de nombreux chevauchements d'ampleur limitée, il permet le déplacement d'un bloc rocheux sus-jacent sur de grandes distances. Dans le cas d'une propagation en séquence normale, le système de chevauchement entre les chevauchements basal et sommital permet le glissement des blocs sous et sus-jacents en décollement. Ces décollements sont limités par deux rampes localisées à l'avant et à l'arrière du duplex. Ce mécanisme s'accompagne d'un raccourcissement et d'un épaissement au dessus du chevauchement basal.

## **5. 2. Caractéristiques du duplex dans les Cévennes**

Un chevauchement basal est déterminé cartographiquement et se localise entre 500 m et 1 km de profondeur au niveau de la série des micaschistes quartzeux (fig. IV-5). Sur notre secteur il apparaît comme un décollement qui émerge, plus au Sud, pour venir chevaucher, vers le Sud, les séries du Vigan (Alabouvette et al., 1988; voir ce chapitre B.2 et fig. IV-7).

La présence d'un chevauchement sommital est déduite des données métamorphiques (voir chapitre V). Les pressions obtenues par la géobarométrie, aussi bien sur les paragénèses métamorphiques synchrones de la mise en place des nappes que sur les inclusions fluides contemporaines de la formation des exsudats de quartz syn-tectoniques, nous indique que la série cévenole était déjà surmontée d'une couche épaisse de 14 à 16 km au moment de la formation et du fonctionnement du chevauchement le plus septentrional du secteur étudié. Cette caractéristique indique également que la propagation des chevauchements s'est effectuée en séquence normale du moins en ce qui concerne la relation entre le chevauchement sommital et les chevauchements secondaires. La séquence de propagation des chevauchements constituant les écaïlles ne peut être déterminée. La géométrie des écaïlles, dont on n'observe actuellement que la moitié inférieure, indique que la trace du chevauchement majeur sommital se situe autour de 1 km par rapport au niveau de la mer actuel.

Les chevauchements cartographiés dans notre secteur sont localisés entre les deux chevauchements majeurs et délimitent les écaïlles du système. Ils ont une vergence vers le S à SE et sont responsables de redoublements de

séries et de niveaux repères. Au centre d'une écaille, les chevauchements sont parallèles à la stratification. En profondeur ils biseautent la stratification pour se raccorder sur un autre chevauchement ou sur le chevauchement basal majeur. L'ensemble des écailles pendent vers le N, NNE à NW indiquant un pendage conforme au déplacement global du duplex vers le S à SE.

La structuration des Cévennes est donc interprétée comme un duplex d'1 à 2 km d'épaisseur environ permettant le déplacement vers le Sud d'une série de 14 à 16 km d'épaisseur. Le secteur étudié ne correspond qu'à une portion du duplex dont l'étendue au Nord et au Sud (relations avec les nappes du Vigan) reste encore à préciser.

## CHAPITRE V

### CARACTÉRISATION DU MÉTAMORPHISME RÉGIONAL ET DÉTERMINATION DU CHEMIN PT

*A: Caractérisation du métamorphisme et thermo-barométrie sur les paragénèses minérales*

*B: Thermo-barométrie par l'étude des inclusions fluides*



|                 |  |
|-----------------|--|
| <i>Partie A</i> |  |
|                 | <i>Caractérisation du métamorphisme et thermo-barométrie sur les paragenèses minérales</i> |

## *1. Introduction*

### **1. 1. But de l'étude du métamorphisme**

Notre étude s'est focalisée sur le secteur étudié et s'est concentrée sur les points suivants:

- Définir les relations entre la cristallisation des minéraux et les déformations varisques présentées dans le chapitre II.
- Estimer les conditions pression-température enregistrées par les phases solides lors de la déformation par l'utilisation des géothermomètres et du programme thermo-barométrique de Powell et Holland (1985).
- Observer s'il existe des variations de ces conditions selon le stade de déformation pour une même localisation.
- Observer s'il existe des variations de ces conditions en rapport avec la géométrie des structures régionales en système chevauchant et les failles cartographiées.

Certaines données microsonde de Rakib (1996) ont été réutilisées, notamment pour préciser l'évolution régionale de certains éléments dans les minéraux et pour déterminer les conditions P-T à partir de ses échantillons afin de les comparer à nos propres résultats. Dans un dernier paragraphe nous discuterons de la validité des différents géothermomètres employés et de la zonation du métamorphisme régional mise en évidence par Rakib (1996).

### **1. 2. Méthodologie**

#### **1. 2. 1 Échantillonnage**

Deux cents échantillons ont été prélevés dans tout le secteur pour y découper des lames minces. La description des paragenèses minéralogiques et celle des relations cristallisation-déformation est une synthèse de l'ensemble des lames minces observées. Quinze lames minces ont été sélectionnées pour

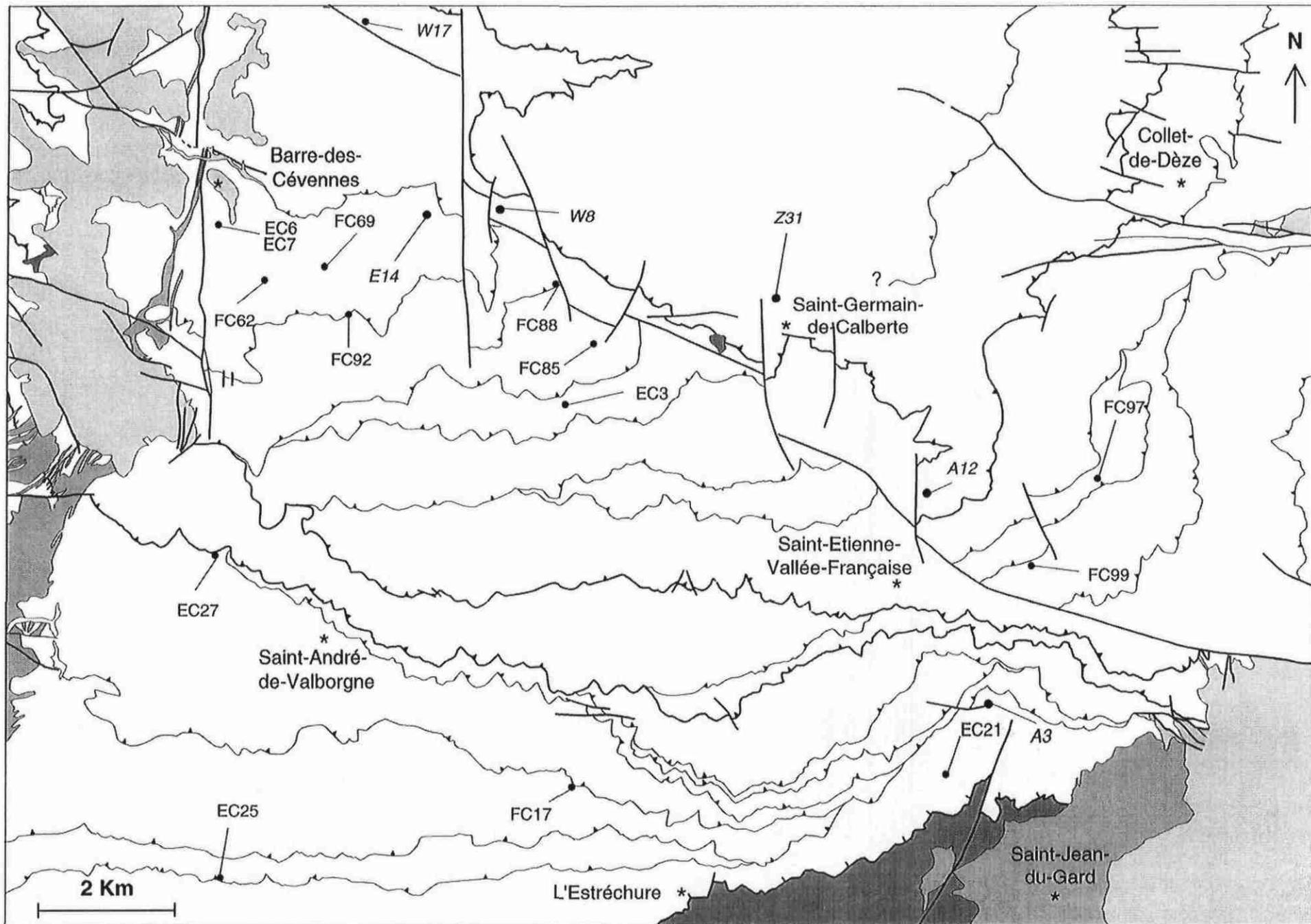


Figure V-1: Localisation des lames minces analysées. Les lames en italique sont celles de Rakib (1996) dans ce secteur. Les lames hors secteur sont reportées sur la figure V-22.

être analysées à la microsonde électronique. Excepté la lame EC21, les lames analysées proviennent de roches échantillonnées en dehors de l'auréole de contact des granodiorites. Elles ont été choisies pour leurs paragenèses représentatives et de manière à pouvoir observer les éventuelles variations géographiques (fig. V-1). Les analyses ont été effectuées:

- Pour tous les minéraux de la matrice, synchrones de chaque stade de déformation, ou postérieurs à toute déformation, dans chaque lame afin d'étudier l'évolution des conditions P-T au cours de la déformation en un même site.
- Pour tous les minéraux constituant la paragenèse des exsudats de quartz, les minéraux localisés à la bordure matrice-exsudat, et les minéraux de la matrice dans les lames contenant des exsudats.

### **1. 2. 2 Conditions analytiques**

Les analyses ont été effectuées sur la microsonde électronique du Département d'Analyse du BRGM (Orléans). Les conditions d'analyses de cette microsonde sont indiquées en annexe 1 partie 1.

## ***2. Description pétrographique et relations déformation-cristallisation***

Dans ce paragraphe nous décrivons les associations minéralogiques observées dans deux objets différents: la matrice schisteuse et les exsudats de quartz, ainsi qu'à la limite entre ces deux objets.

### ***2.1. Dans la matrice***

#### **2. 1. 1. Description des minéraux**

Les minéraux observés dans la matrice, dans les différentes roches des Cévennes, sont le quartz, le plagioclase, le feldspath potassique, la muscovite, la biotite, la chlorite, le grenat, le chloritoïde, la calcite, l'amphibole, les oxydes et les minéraux accessoires (tourmaline, apatite et zircon). Leur présence dépend de la composition de la roche. Leur habitus diffère selon le moment de leur cristallisation en relation avec la déformation.

##### ***2. 1. 1. 1. Le quartz***

Le quartz est omniprésent. Il se présente sous forme de grains de l'ordre de 0,1 mm de diamètre, aux contours rectilignes, légèrement aplatis dans la S1 et S2 et allongés marquant la linéation d'étirement. Les grains de quartz présentent fréquemment une extinction onduleuse. L'origine du quartz est détritique et son abondance varie selon la composition des niveaux.

### *2. 1. 1. 2. Le plagioclase*

Ce minéral, parfois très abondant, s'observe fréquemment dans certains niveaux. Il apparaît sous forme de grains de l'ordre de 0,1 mm, aux contours rectilignes et présente fréquemment la macle polysynthétique de l'albite. C'est essentiellement de l'albite ou de l'oligoclase. Son origine est probablement détritique. En lumière naturelle, il se distingue du quartz par son aspect altéré lui donnant une teinte grisâtre. Il présente généralement une forme aplatie dans les plans S1 et S2.

### *2. 1. 1. 3. Le feldspath potassique*

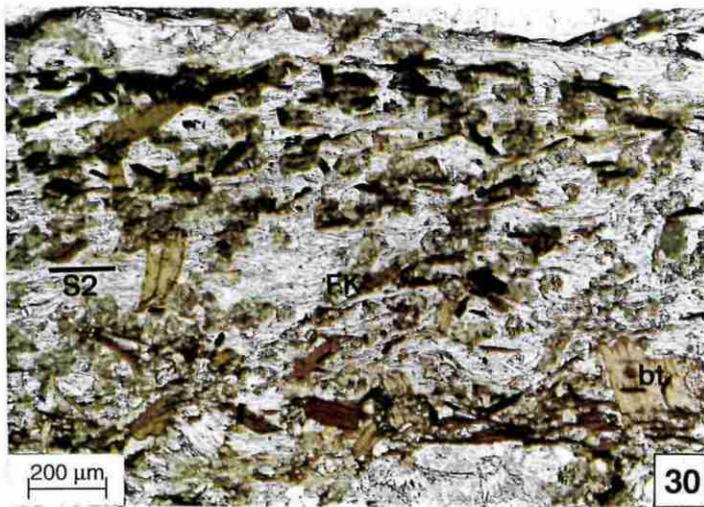
Lorsqu'il est présent, le feldspath potassique se présente sous forme de cristaux ovoïdes, très altérés, statiques sur la schistosité (photo 30). Il est toujours très altéré sur sa bordure et ne présente jamais de contact sain avec les autres minéraux. Sa cristallisation semble donc tardive et ne paraît pas en équilibre avec les autres phases minérales.

### *2. 1. 1. 4. La muscovite*

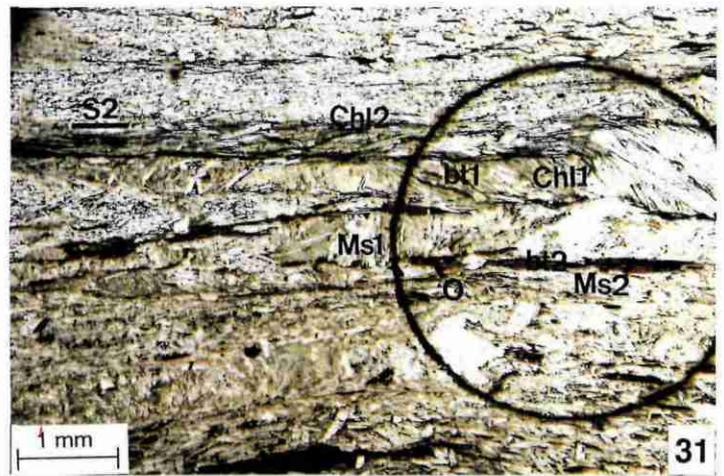
Elle est omniprésente et présente différentes relations avec les microstructures. Lorsqu'elle marque une schistosité S1 plissée entre les plans S2, elle se présente en baguettes ou fins feuillets peu développés et plissés (photo 31 et 32). En lumière naturelle, elle a fréquemment une couleur grisâtre liée à la présence de poussière d'oxydes. Lorsqu'elle marque une S1 non replissée ou une S2, elle se caractérise par des feuillets mieux développés (photo 31 et 32). Lorsqu'elle cristallise postérieurement à la S1 ou S2, les cristaux sont limpides, de taille plus importante, automorphes, de forme rectangulaire. Ils peuvent être très abondants dans certains niveaux et avoir cristallisé de manière statique par rapport à la schistosité. Les muscovites obliques à la schistosité sont parfois alignées, soulignant une troisième schistosité S3 (photo 33). La formation de cette S3, plus pentée vers le Nord que la S2, est cohérente avec une déformation progressive en cisaillement vers le S à SE.

### *2. 1. 1. 5. La biotite*

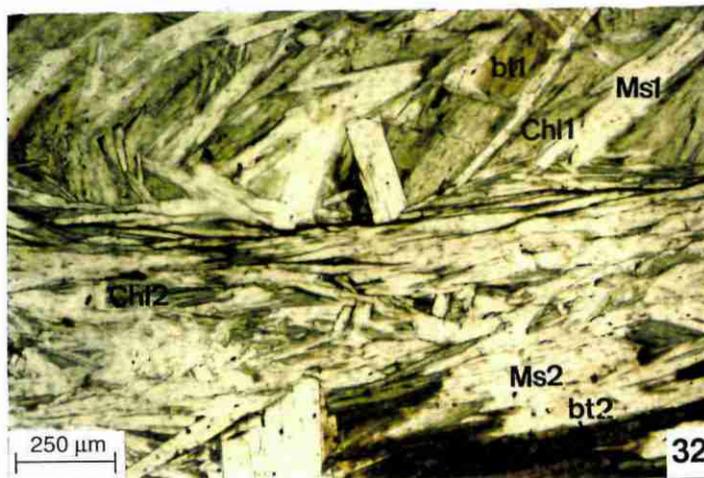
Elle ne s'observe pas dans toutes les lames minces. Lorsqu'elle est présente, on peut observer différentes générations. Les biotites soulignant S1 dans les microlithons entre les plans S2 apparaissent souvent en traces (photo 32). Elles sont de petite taille, tordues entre les plans S2. Les biotites marquant une S1 non replissée ou une S2 sont soit en feuillets (photo 31), soit automorphes. Les cristaux automorphes sont plus ou moins bien développés, souvent de forme rectangulaire, leur grand axe étant parallèle à la schistosité. Les biotites les plus fraîches présentent une couleur brun-foncé. Certaines biotites, en grands cristaux, automorphes et rectangulaires, cristallisent obliquement à la S1 ou la S2 (photo 30). D'autres ont cristallisé postérieurement à la S1 ou la S2 avec un aspect poeciloblastique, sous forme de grands cristaux, ovoïdes, aux contours mal définis. Quel que soit le type de biotite, elle apparaît presque toujours plus ou moins chloritisée.



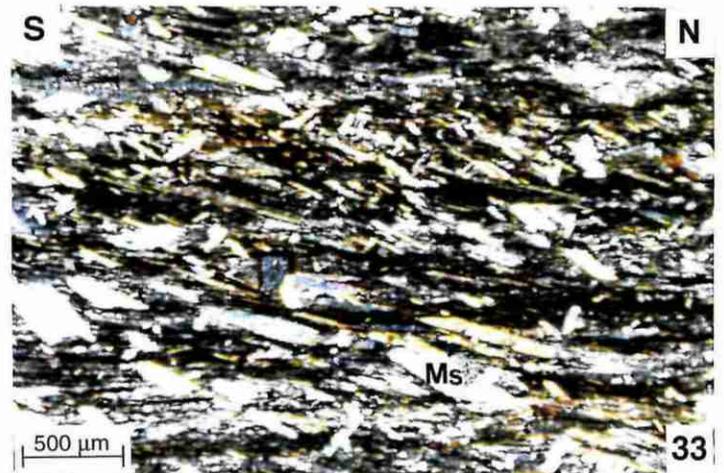
Lame EC 62'



Lame FC 85

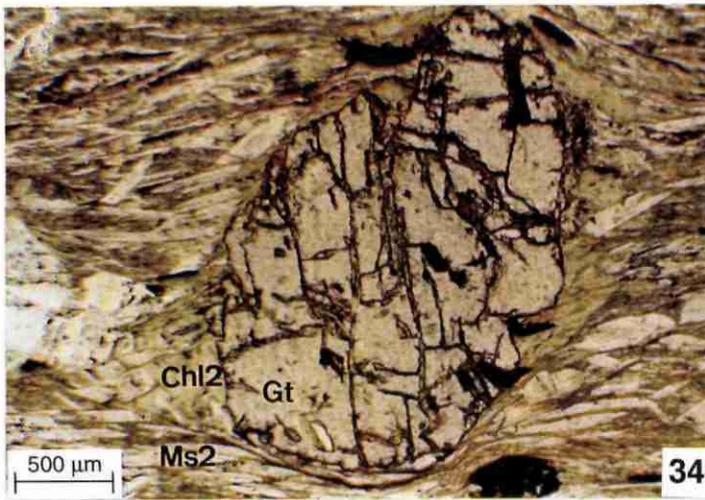


Lame FC 75

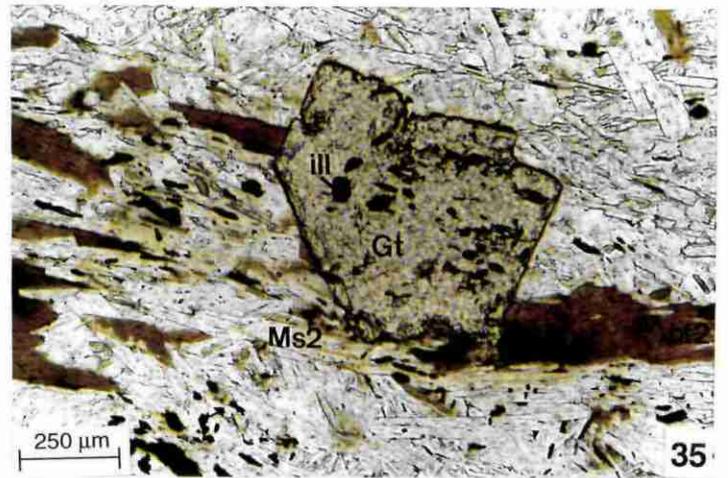


Lame FC 88a

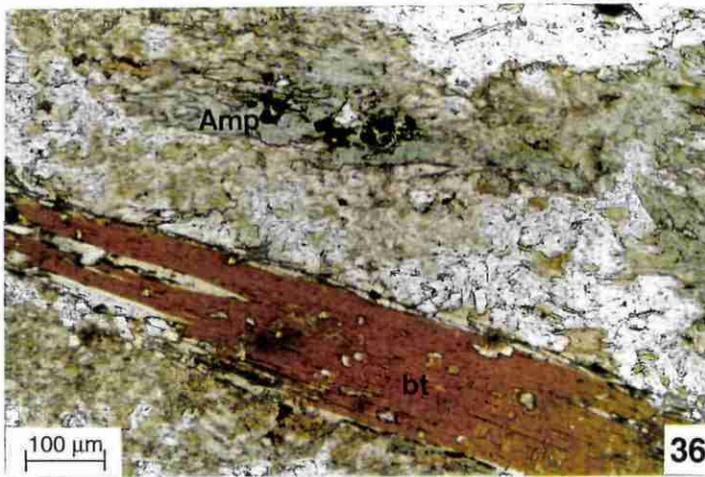
**Planche 18: Paragenèses minérales et relations cristallisation-déformation. 30:** Feldspath potassique (FK) et biotite (bt) post-S2. **31:** Biotite (bt1), chlorite (Chl1) et muscovite (Ms1) syn-S1 en microlithons entre les plans S2 marqués par la muscovite (Ms2), la biotite (bt2), la chlorite (Chl2) et les opaques (O). **32:** Détail de S1 marquée par de la muscovite (Ms1), de la biotite en traces (bt1) et de la chlorite (Chl1) entre les plans S2 marqués par la muscovite (Ms2), la biotite (bt2) et la chlorite (Chl2). **33:** Muscovite post-S2 en cristaux alignés selon une orientation préférentielle.



Lame FC 97



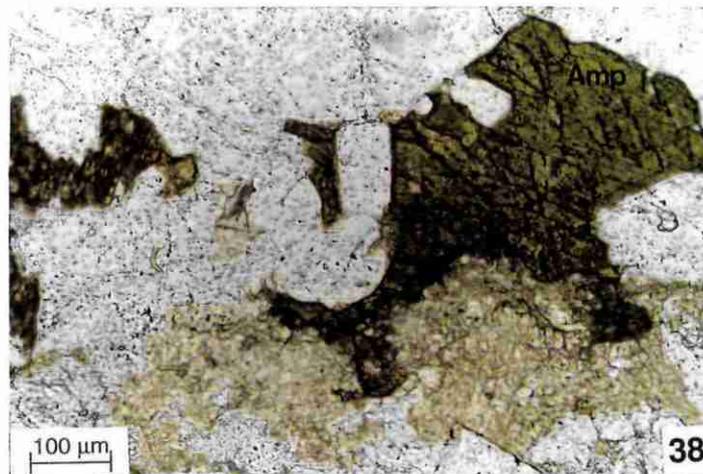
Lame FC 92b



Lame EC 21



Lame EC 6



Lame EC 21

**Planche 19: Paragenèses minérales et relations cristallisation-déformation.** **34:** Grenat (Gt) altéré en chlorite au niveau de sa bordure et dans ses fractures. La S2, marquée par la muscovite (Ms2) moule le grenat. **35:** Grenat en contact avec la biotite et la muscovite syn-S2. Le grenat contient des inclusions de biotite et d'illménite (ill). **36:** Amphibole et biotite dans la matrice. La biotite est chloritisée au niveau de ses bordures. **37:** Paragenèses dans un exsudat de quartz à biotite, chlorite et plagioclase altéré. **38:** Amphibole dans un exsudat de quartz.

#### *2. 1. 1. 6. La chlorite*

Elle est très fréquente. Elle présente de nombreux habitus, différents selon la génération. Les chlorites soulignant la S1 dans les microlithons sont sous forme de petites baguettes, plissées dans les microlithons (photo 32). Lorsqu'elle marque une S1 non replissée ou une S2 elle se présente en feuillets (photo 32) ou en cristaux automorphes, rectangulaires, allongés dans la schistosité. De nombreuses chlorites semblent avoir cristallisé tardivement par rapport à la S1 ou S2. Ces chlorites tardives se présentent sous des formes très diverses:

- De nombreuses chlorites soulignent une schistosité mais semblent dériver d'anciennes biotites entièrement chloritisées.
- Certaines chlorites se présentent sous forme de cristaux automorphes, rectangulaires, ou de baguettes obliques à la S1 ou S2.
- Certaines chlorites s'observent autour des grenats ou des oxydes, parfois dans des ombres de pression.
- Certaines s'observent dans les nombreuses fractures qui affectent les cristaux étirés ou fracturés tels le grenat (photo 34), certains oxydes, ou le chloritoïde (Rakib, 1996).
- De la chlorite tardive s'observe également en forme de rosace, ou de manière interstitielle entre les minéraux. Elle souligne parfois des plans de cisaillement.

La biotite et la chlorite contiennent fréquemment des aiguilles de rutile.

#### *2. 1. 1. 7. Le grenat*

Le grenat ne s'observe que dans la partie Nord du domaine SW, au Nord de la vallée Française et dans l'ensemble du domaine NE. Cependant sa présence est décrite, dans un échantillon, au Sud du domaine SW vers l'Estréchure (Rakib, 1996). Lorsqu'il est présent, il se présente soit sous forme de petits cristaux (photo 35), soit sous forme de grands cristaux, généralement craquelés, moulés par la S2 (photo 34). Dans ce dernier cas, sa cristallisation est précoce par rapport à la schistosité. La présence d'inclusions sigmoïdes dans certains grenats indiquent une cristallisation syn-tectonique. Il est parfois altéré à sa bordure ou au sein des fractures, en chlorite, muscovite et quartz.

#### *2. 1. 1. 8. Le chloritoïde*

Le chloritoïde existe dans les niveaux de composition riche en pépite. Rakib (1996) décrit différentes formes de chloritoïde:

- En baguettes obliques à la schistosité régionale qui le moule et a donc dans ce cas une origine précoce.

- Sous forme aciculaire, enregistrant la forme des microplissements dans les microlithons.
- En minéraux automorphes, rectangulaires, aplatis dans la schistosité et alignés selon la linéation d'étirement. Il est alors parfois étiré et tronçonné.
- En grands cristaux pléochroïques bleus, obliques à la schistosité, pouvant atteindre 6 mm dans certains niveaux.
- Rarement en inclusion dans le grenat marquant une schistosité interne parallèle à une S2 externe.

#### *2. 1. 1. 9. La calcite*

Elle est présente dans les niveaux calcique sous forme de petits cristaux ou interstitielle entre les minéraux.

#### *2. 1. 1. 10. L'amphibole*

Elle s'observe dans des niveaux de composition particulière plus calcique (photo 36). Elle est alors associée à la calcite. Elle se présente en cristaux automorphes, en forme de rosette ou de manière interstitielle entre les cristaux.

#### *2. 1. 1. 11. Les oxydes*

Ils s'observent très fréquemment, surtout dans les niveaux les plus phylliteux. On peut distinguer optiquement deux types d'oxydes:

- des oxydes de titane en fines baguettes ou cristaux automorphes. Ils sont altérés et apparaissent gris en lumière naturelle. Ils sont fréquemment de forme rectangulaire, soit allongés dans la schistosité, soit obliques à cette dernière, et sont souvent tronçonnés. Ils apparaissent parfois en fines baguettes.
- de l'ilménite, de forme plus complexe, constituent des cristaux non altérés opaques en lumière naturelle.

Les cristaux automorphes et les fines baguettes sont aplatis dans la S1, la S2 ou obliques à la schistosité. Certains oxydes s'observent accolés à la biotite, à la muscovite ou à la chlorite, ou en inclusions dans les minéraux. Ils possèdent parfois des ombres de pression où de la chlorite a cristallisé.

#### *2. 1. 1. 12. Les minéraux accessoires*

Les minéraux accessoires fréquemment rencontrés sont l'apatite, la tourmaline et parfois des zircons. L'apatite est très fréquente et présente une forme généralement globuleuse. Elle est souvent moulée par la schistosité se comportant comme un claste. Cependant, elle s'observe également allongée dans la schistosité et parfois tronçonnée. La tourmaline est très fréquente, en

petits cristaux. Elle apparaît parfois en grands cristaux automorphes et peut présenter des inclusions sigmoïdes, des queues de recristallisation et des ombres de pression. Certaines, de formes rectangulaires, apparaissent tronçonnées.

## **2. 1. 2. Paragenèses minérales et relations cristallisation-déformation dans la matrice**

Les paragenèses minérales varient selon la composition de la roche et sa localisation cartographique. La répartition cartographique des paragenèses a été effectuée par Rakib (1996) sur l'ensemble de la région. Sa carte (fig. 1. 22) montre que l'ensemble du secteur étudié se trouve dans une large zone à grenat-chlorite où les paragenèses les plus complètes sont à quartz-plagioclase-grenat-muscovite-biotite et chlorite. Tous ces minéraux s'observent en équilibre textural.

Les relations cristallisation-déformation dans la matrice montrent que la schistosité est soulignée par les phyllites (biotite, muscovite et chlorite) et l'aplatissement des grains de quartz, de plagioclase et d'oxydes. Ces minéraux sont en équilibre textural. Cette schistosité est la S1 en l'absence de traces de schistosité antérieure. Lorsque deux schistosités sont visibles, la première est en microlithons, entre des plans S2 marqués par une paragenèse identique à celle sur S1. Dans quelques lames, la présence d'une troisième schistosité (S3) se distingue et pend de 20 à 30° de plus vers le Nord que la S2. Elle est marquée par de la muscovite, chlorite et biotite en cristaux rectangulaires alignés dans la S3. De nombreuses lames présentent également des minéraux tardifs par rapport à toute schistosité, tels la muscovite, la chlorite, la biotite, le feldspath potassique ou les oxydes.

## **2. 2. Au contact matrice-exsudat**

Les contacts matrice-exsudat sont bien décrits dans le chapitre II. B. 1. Le contact entre la matrice et l'exsudat est tapissé de muscovite, de chlorite et souvent de biotite en larges plages limpides et bien cristallisées. Ces minéraux présentent un aspect différent de ceux observés dans la matrice. Dans la matrice, à proximité du contact, on observe parfois une concentration de poussières noires, d'oxydes et de minéraux accessoires.

## **2. 3. Dans les exsudats**

La composition des exsudats a été décrite dans le chapitre II. B. 2. 2. Le tableau II-1 montre que les exsudats de quartz synchrones de la déformation possèdent une minéralogie identique à celle observée dans la matrice quelle que soit leur relation avec la déformation. Ils contiennent essentiellement du quartz et souvent du plagioclase, ainsi que de la biotite, de la muscovite et de la chlorite (photo 37). Des chlorites s'observent fréquemment sous forme de petits cristaux enchevêtrés, en bordure de l'exsudat ou le long de niveaux parallèles au contact matrice-exsudat. Elle apparaît également en cristaux isolés en forme de "chenille". L'apatite est fréquente dans les exsudats. Lorsque la calcite est présente, elle est associée au feldspath. On peut

également observer des oxydes. Les exsudats tardifs qui recoupent toutes les structures ne contiennent que de grands cristaux de quartz, avec de fines baguettes de muscovite localisées aux joints de grains. La bordure de l'exsudat est constituée de quartz, plagioclases, muscovite et chlorite très altérée ainsi que des tourmalines et des oxydes.

La lame EC21 provient d'un niveau de composition particulièrement riche en carbonate et contient de l'amphibole, localisée essentiellement au contact avec l'exsudat de quartz, dans la matrice (photo 36), dans l'exsudat (photo 38) ainsi que dans un filon tardif recoupant l'exsudat .

## **2. 4. Conclusions**

Les relations cristallisation-déformation sont résumées dans le tableau V-1. Excepté le feldspath potassique, tous les minéraux se sont formés pendant la déformation varisque régionale, localisée dans les zones de cisaillement et postérieurement aux structures. Ceci est compatible avec l'interprétation des données structurales suggérant deux déformations successives au cours d'un même continuum de déformation. Le feldspath potassique, la chlorite tardive et la muscovite d'altération résultent des réactions d'altération tardives ou rétrogrades lors de l'exhumation des roches. Les paragenèses observées dans la matrice ou les exsudats sont identiques dans tout le secteur étudié excepté les variations liées aux différences de composition de la roche. Ces observations suggèrent que l'ensemble du secteur étudié soit affecté par un même degré de métamorphisme (zone à grenat-chlorite) confirmant les résultats de Rakib (1996).

## **3. Composition chimique des roches totales**

Toutes les analyses présentées sont celles de Munsch (1981), au Sud du secteur étudié, et de Sabourdy (1975), à l'Ouest et au Nord de la granodiorite de l'Aigoual, discutées par Rakib (1996).

- Les micaschistes quartzeux ont des compositions de grès argileux ou de grès. Seuls ceux provenant de la séquence des micaschistes quartzeux dit inférieurs par Brouder (1964) ont été analysés.
- Les micaschistes noirs ont des compositions d'argilites ou d'argilites gréseuses.

Les analyses indiquent des compositions de roches silico-alumineuses hypocalcosodiques. La projection des compositions dans le diagramme AFM de Thompson (1957) par la muscovite (fig. V-2) montre deux entités chimiques différentes correspondant aux micaschistes noirs et micaschistes quartzeux. Ces deux entités tombent dans le champ des pélites vraies.

Le report dans le diagramme triangulaire  $K_2O$ - $MgO$ - $Na_2O$  (fig. V-3) montre que la série cévenole dérive d'une même province d'apport terrigène depuis les greywackes jusqu'aux pélites. L'origine des sédiments provient du démantèlement d'un socle de composition intermédiaire de type andésitique (Sabourdy, 1975; Munsch, 1981).

| DÉFORMATION | D1           | D2 | POST D1-D2   |
|-------------|--------------|----|--------------|
| QUARTZ      | [shaded bar] |    |              |
| ALBITE      | [shaded bar] |    |              |
| MUSCOVITE   | [shaded bar] |    |              |
| CHLORITE    | [shaded bar] |    |              |
| CHLORITOÏDE | [shaded bar] |    |              |
| BIOTITE     | [shaded bar] |    |              |
| GRENAT      | [shaded bar] |    |              |
| FELDSPATH K |              |    | [shaded bar] |
| OPAQUES     | [shaded bar] |    |              |

Tableau V-1: Relations cristallisation - déformation dans la série schisteuse du secteur étudié.

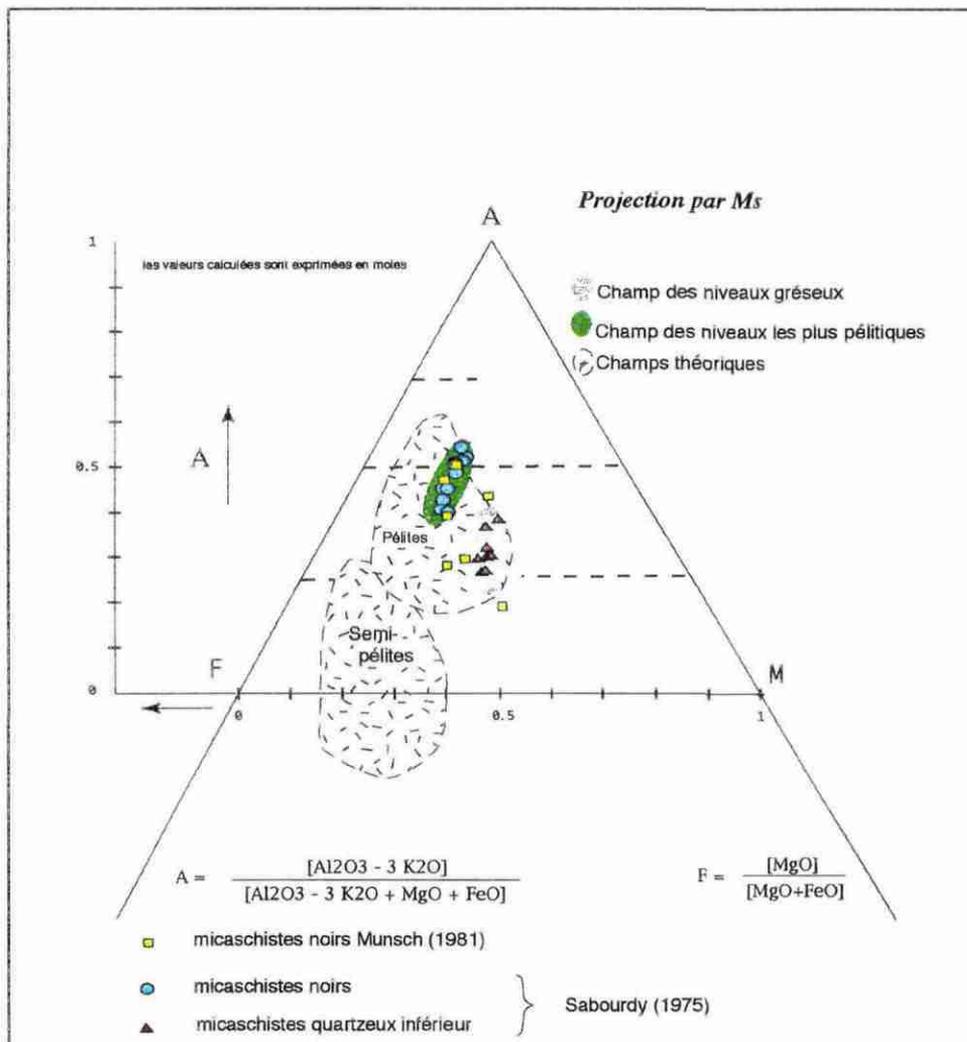


Figure V-2: Projection dans le diagramme AFM des compositions en roches totales des micaschistes quartzeux et noirs d'après Rakib (1996).

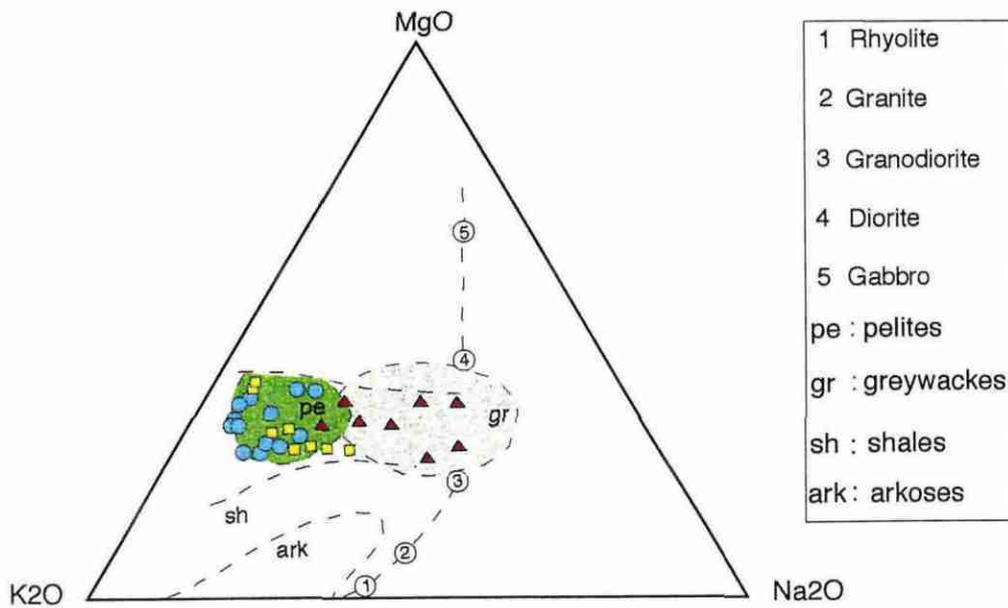


Figure V-3: Composition de la roche dans le diagramme MgO-K<sub>2</sub>O-Na<sub>2</sub>O d'après Rakib (1996).

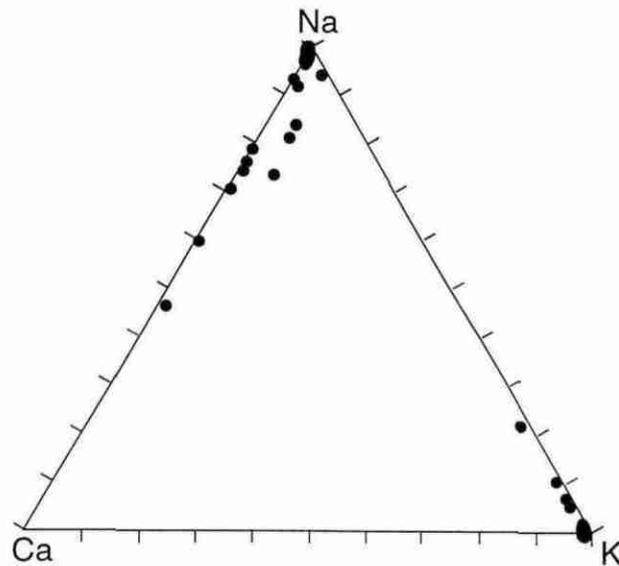


Figure V-4: Composition des feldspaths dans le diagramme triangulaire Na-Ca-K dans le domaine SW.

## ***4. Composition chimique des minéraux***

Les analyses microsondes et leur formule structurale sont présentées dans l'annexe 1 partie 1. Les formules structurales ont été calculées avec le programme de Michel Guiraud (1991, non publié). L'objet dans lequel a été effectué l'analyse (matrice ou exsudat) et le caractère syn S1, syn S2 ou post-déformation est mentionné pour chaque analyse dans l'annexe 1.

### ***4. 1. Les feldspaths***

Les compositions des feldspaths ont été reportées dans un diagramme triangulaire Na-Ca-K (fig. V-4 et V-5). Les feldspaths sont représentés par le plagioclase et, rarement, le feldspath potassique (orthose ou microcline). Dans le domaine SW, les plagioclases contenus dans la matrice (fig. V-5Ba) ont été distingués de ceux contenus dans les exsudats (fig. V-5Bb). Les premiers contiennent de l'albite pure associée à de l'oligoclase (entre 20 et 30% d'anorthite) ou de l'andésine (35 à 50% dans la lame de composition carbonatée EC21). Les exsudats ne contiennent que de l'albite pure en petits cristaux ou en grands cristaux automorphes maclés, fracturés ou cisailés. Généralement on n'observe aucune variation de composition entre le coeur et la bordure du cristal pour les plagioclases dans la matrice et dans l'exsudat excepté dans la lame FC62. Dans cette lame, un plagioclase dans la matrice présente une augmentation de 10% d'anorthite de la bordure vers le centre du cristal. Dans le domaine NE seuls des plagioclases dans la matrice ont été analysés. Ce sont soit de l'albite pure, soit des plagioclases ayant des taux d'anorthite variable entre 0 et 20%. Aucun feldspath potassique n'a été analysé.

Géographiquement nous n'observons aucune variation de composition des feldspaths.

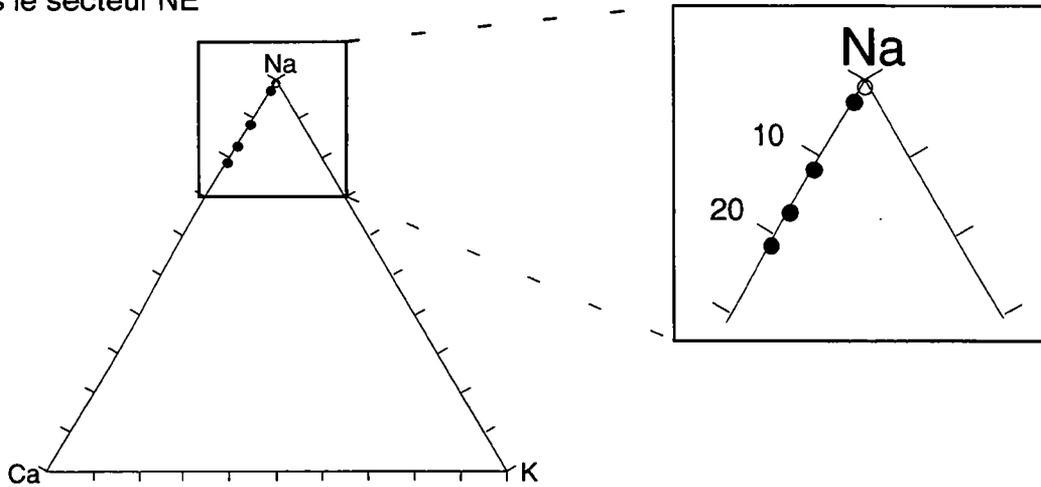
### ***4. 2. Les phyllites***

Leurs compositions ont été reportées sur un diagramme  $K/Al+Fet$  (Fe total)+Mg en fonction de  $Al/Al+Fet+Mg$  où les compositions des pôles théoriques pour le domaine SW (fig. V-6A) et le domaine NE (fig. V-6B) sont indiquées. Tous les minéraux présentent des compositions identiques quelle que soit la lame mince, excepté la lame EC21 (symboles gris dans la diagramme V-6A). Les compositions des minéraux de cette lame s'écartent parfois des autres analyses.

#### **4. 2. 1. Les micas blancs**

Les analyses des micas blancs ont été placées dans un diagramme triangulaire Ca-Na-K qui indique, pour tous les cas, des compositions de muscovite s.l. Le pourcentage de paragonite varie de 3 à 15% dans le domaine SW (fig. V-7A) et de 7 à 18% dans le domaine NE (fig. V-7B). Des variations jusqu'à 10% s'observent pour des mêmes types de muscovite en relation avec la S1, S2 ou post-schistosité (syn-S1, syn-S2 ou post-schistosité). Cette variation s'observe au sein d'une même lame. Les compositions de ces micas blancs ont été également placées dans un

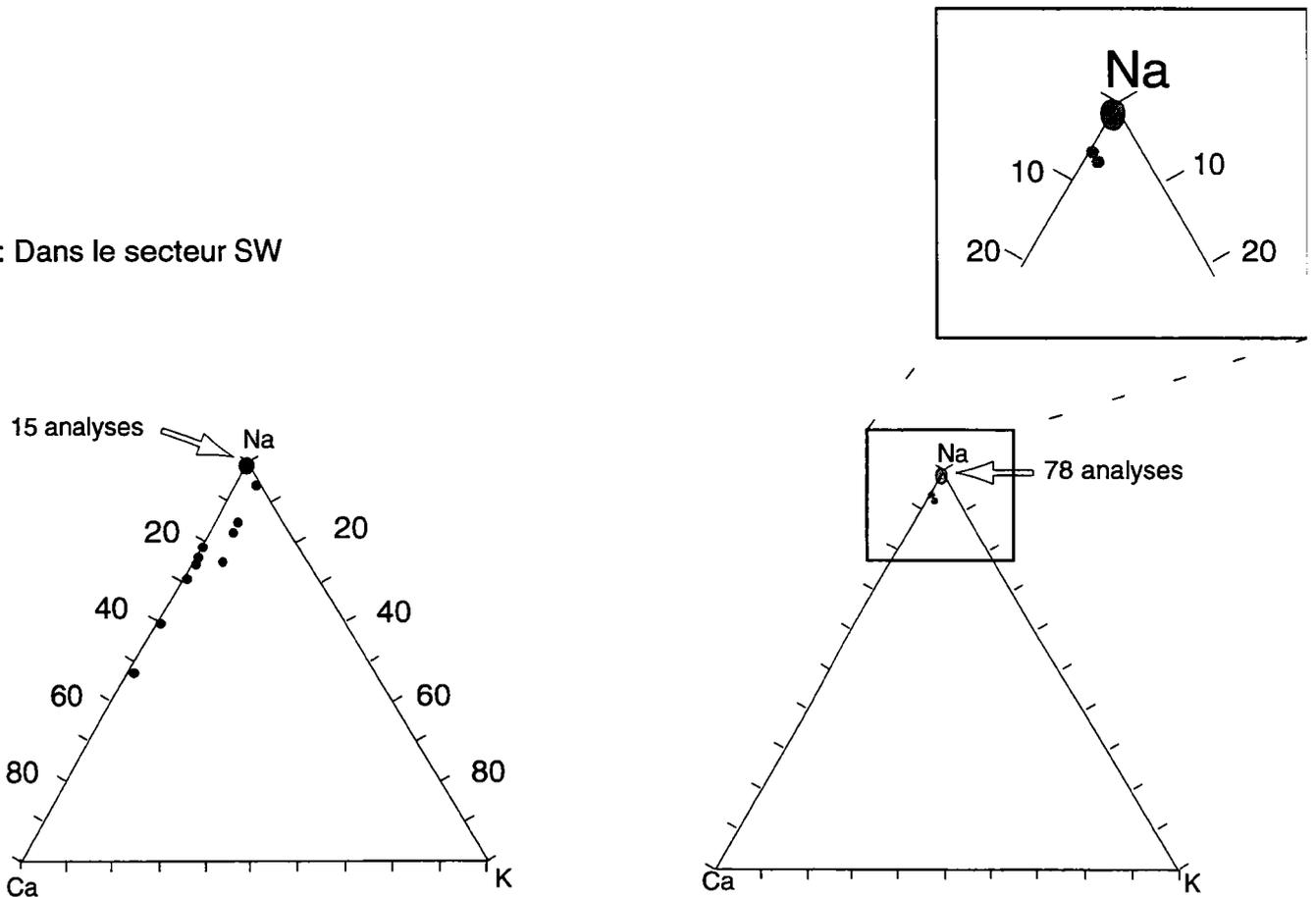
A: Dans le secteur NE



- lame FC99
- lame FC97

Composition des plagioclases dans la matrice

B: Dans le secteur SW



a: Composition des plagioclases dans la matrice

b: Composition des plagioclases dans les exsudats

- composition des plagioclases de grande taille dans les exsudats
- composition des plagioclases de petite taille dans les exsudats

Figure V-5: Composition des plagioclases dans le diagramme triangulaire Na-Ca-K.

diagramme des substitutions phengitiques, Fe+Mg en fonction de Si pour le domaine SW (fig. V-8) et pour le domaine NE (fig. V-9). Quel que soit le type de muscovite (synS1, synS2 ou post-schistosité), les analyses s'alignent selon une droite parallèle et au dessus de la droite théorique de substitution phengitique. Ceci indique la présence de substitutions de fer ferrique Fe<sup>3+</sup>. Dans le domaine SW les teneurs en Si varient de 3,05 à 3,3 dans une même lame mince et il n'existe aucune relation entre la teneur en Si et le type synS1, synS2 ou post de la muscovite analysée. Ceci indique une forte hétérogénéité des compositions de muscovite à l'échelle d'une même lame mince. Des variations s'observent même à l'échelle d'un grain entre la bordure et le coeur du cristal (fig. V-10). Dans la plupart des cas, la bordure est moins phengitique que le coeur. Dans le domaine NE les variations sont de 3.05 à 3.15 dans la lame FC97 et de 3.25 à 3.38 pour la lame FC99.

#### 4. 2. 2. Les biotites

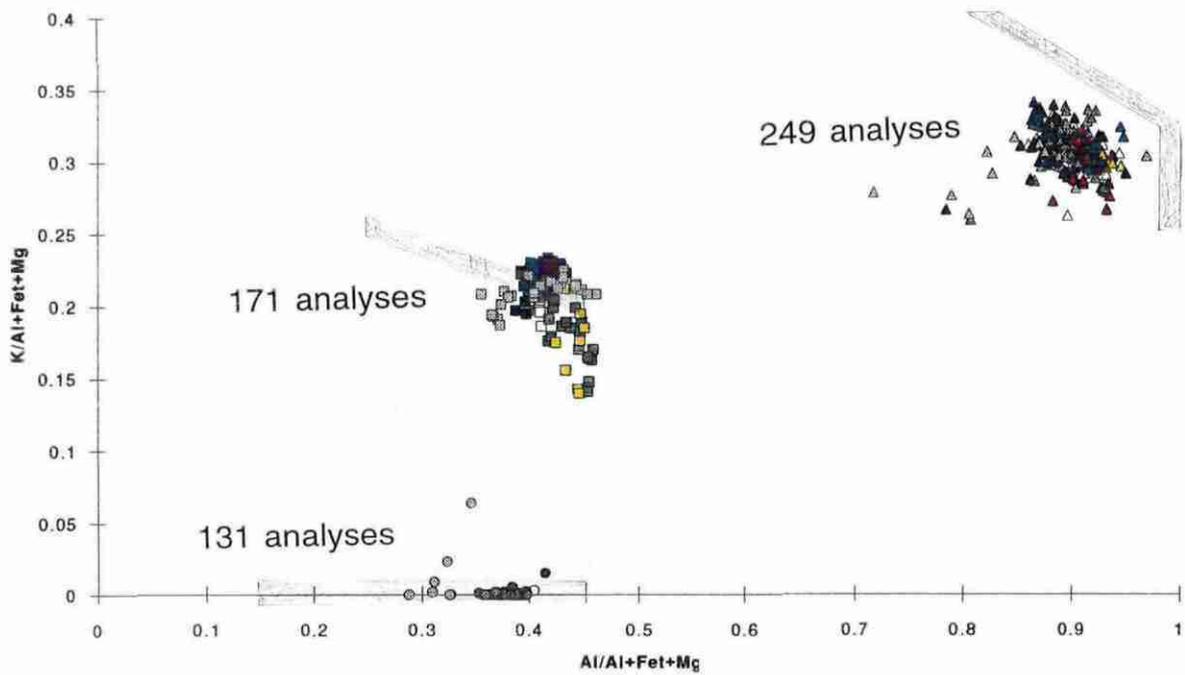
Les biotites sont souvent partiellement voire entièrement altérées en chlorite, et présentent des analyses qui "bouclent" mal. Pour les biotites saines aucune variation de composition n'est observée entre la bordure et le coeur des cristaux. Les compositions des biotites ont été reportées dans le diagramme Annite-Sidérophyllite-Eastonite-Phlogopite (fig. V-11). Leur rapport Si/Al<sub>IV</sub> varie entre 1,78 et 2,41 et le XMg varie de 0.34 à 0.54. Exceptée la lame EC21, les autres lames présentent des rapports Si/Al<sub>IV</sub> qui varient légèrement avec les variations du XMg. Dans le diagramme Ti en fonction de Al<sub>VI</sub> (Schreurs, 1985), les compositions se situent dans le champs de température entre 500 et 650°C. De nombreuses analyses ont des teneurs en Al VI faibles et sont à la limite ou en dehors de ce champs.

#### 4. 2. 3. Les chlorites

Les compositions des chlorites ont été replacées dans le diagramme de Hey 1954 (fig. V-13). Aucune variation de composition notable n'a été observée entre le coeur et la bordure des minéraux analysés. Mis à part la lame de composition particulière EC21, la plupart des chlorites présentent des compositions homogènes de ripidolites, quel que soit le caractère synS1, S2 ou post-schistosité de la chlorite. Dans le domaine SW, les compositions des chlorites se situent entre la limite ripidolite magnésienne et ripidolite ferrifère. Dans le domaine NE les chlorites ont des compositions de ripidolites légèrement plus ferrifères que dans le domaine SW. On observe un léger étalement horizontal des points indiquant une variation du rapport XFe. La lame EC21 présente des compositions de pycnochlorite ou diabantite. Certaines chlorites tardives (lame EC3, FC99) ont des compositions de brunsvigite.

Sur les diagrammes des figures V-14 et V-15 sont reportés les XFe dans la chlorite et dans la biotite respectivement, de chaque lame mince. Dans le domaine SW, les valeurs sont présentées du Sud au Nord afin de mettre en évidence une évolution de ce rapport géographiquement. On peut observer que lorsque la biotite coexiste avec la chlorite, leurs XFe évoluent de manière identique. Le diagramme d'évolution du XFe dans les chlorites du domaine SW (fig. V-14) montre une transition nette entre les lames EC25, EC21 ainsi que les lames au Sud du granite de l'Aigoual (K1, K5 et K11 analysées par

A: Domaine SW



B: Domaine NE

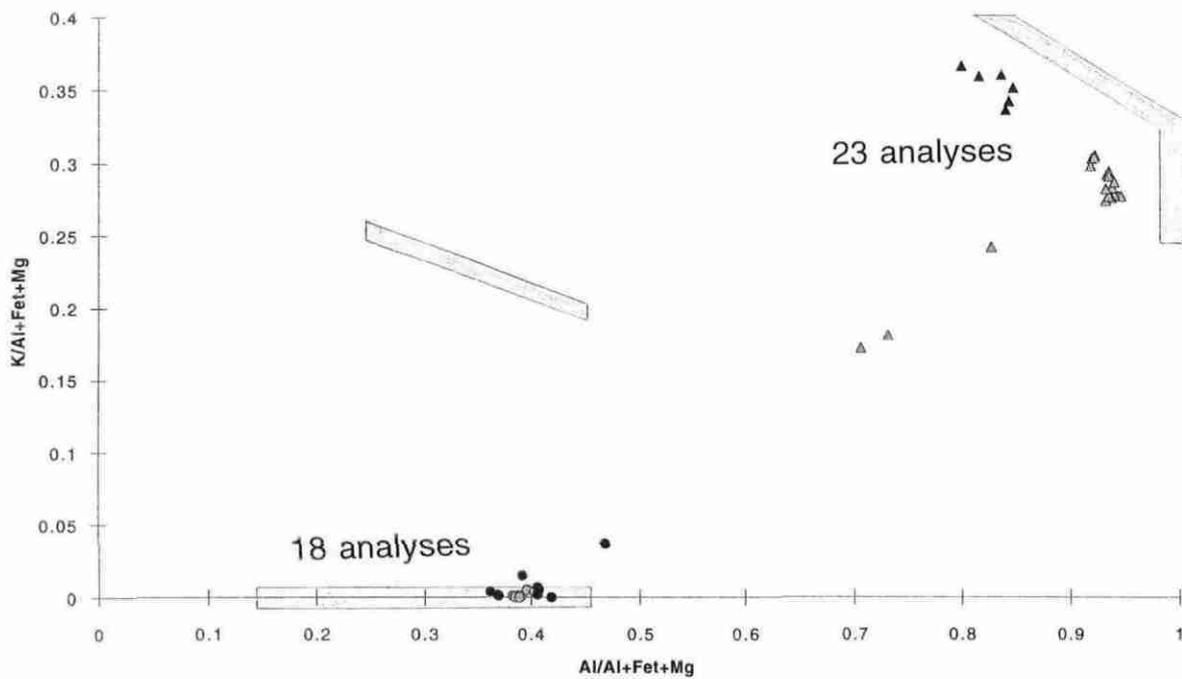
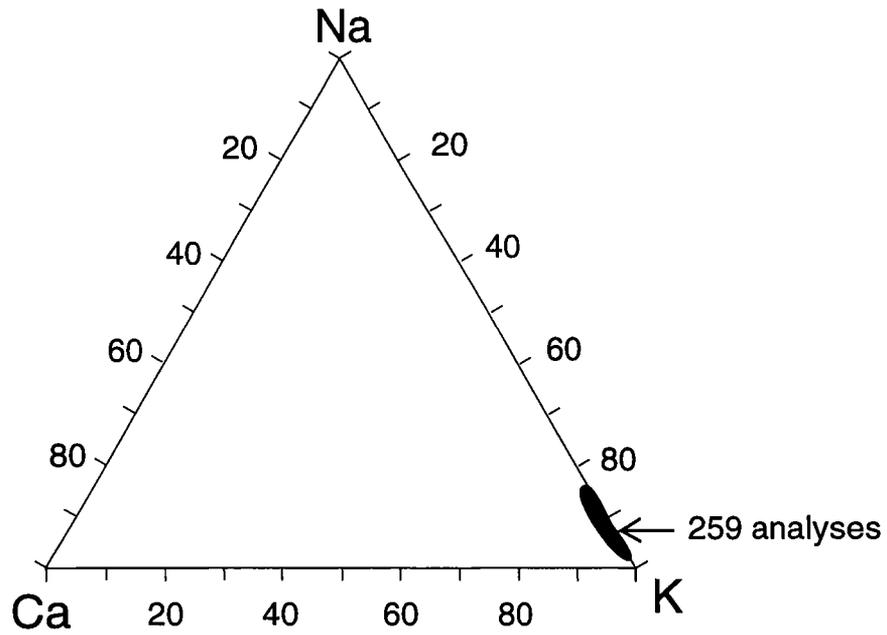


Figure V-6: Composition des phyllites dans le domaine SW (A) et dans le domaine NE (B). Les triangles représentent les muscovites, les carrés les biotites, et les ronds les chlorites. Chaque couleur correspond à une lame mince. Les traits épais en grisé correspondent aux compositions théoriques des principales familles des minéraux phylliteux.

A- Domaine SW



B- Domaine NE

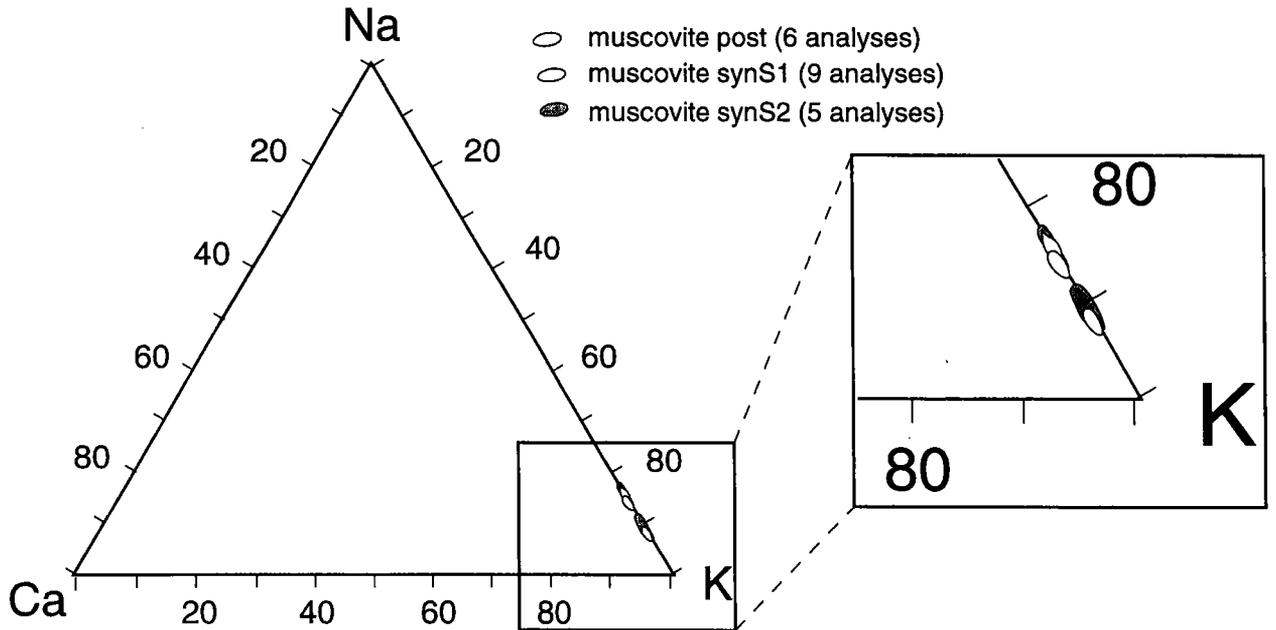


Figure V-7: Composition des micas blancs dans le diagramme muscovite (K)-paragonite (Na)-margarite (Ca) dans le domaine SW (A) et dans le domaine NE (B).

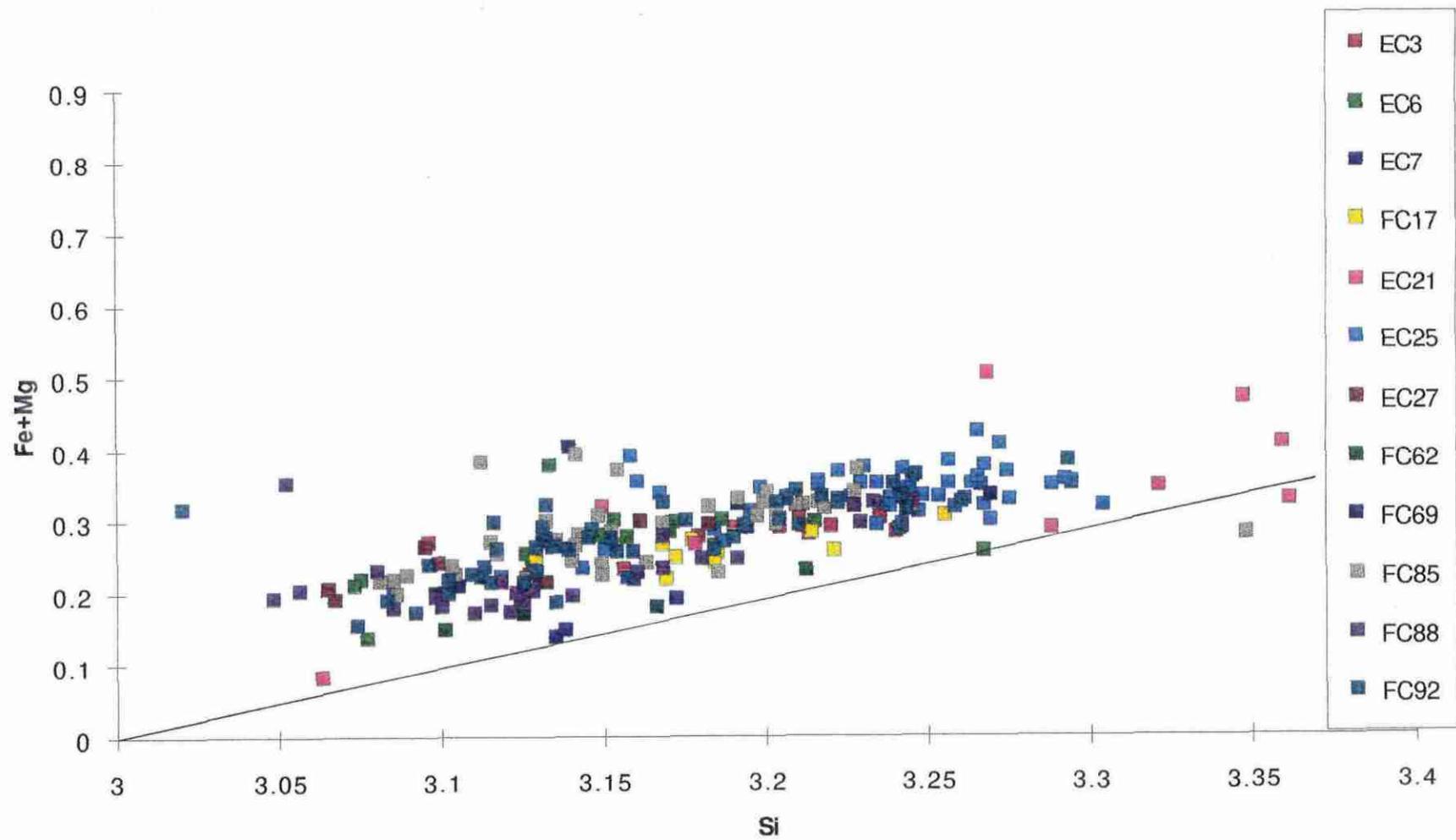


Figure V-8: Composition des micas blancs du domaine SW dans le diagramme des substitutions phengitiques Fe + Mg en fonction de Si

Figure V-9: Composition des micas blancs du domaine NE dans le diagramme des substitutions phengitiques Fe+Mg en fonction de Si.

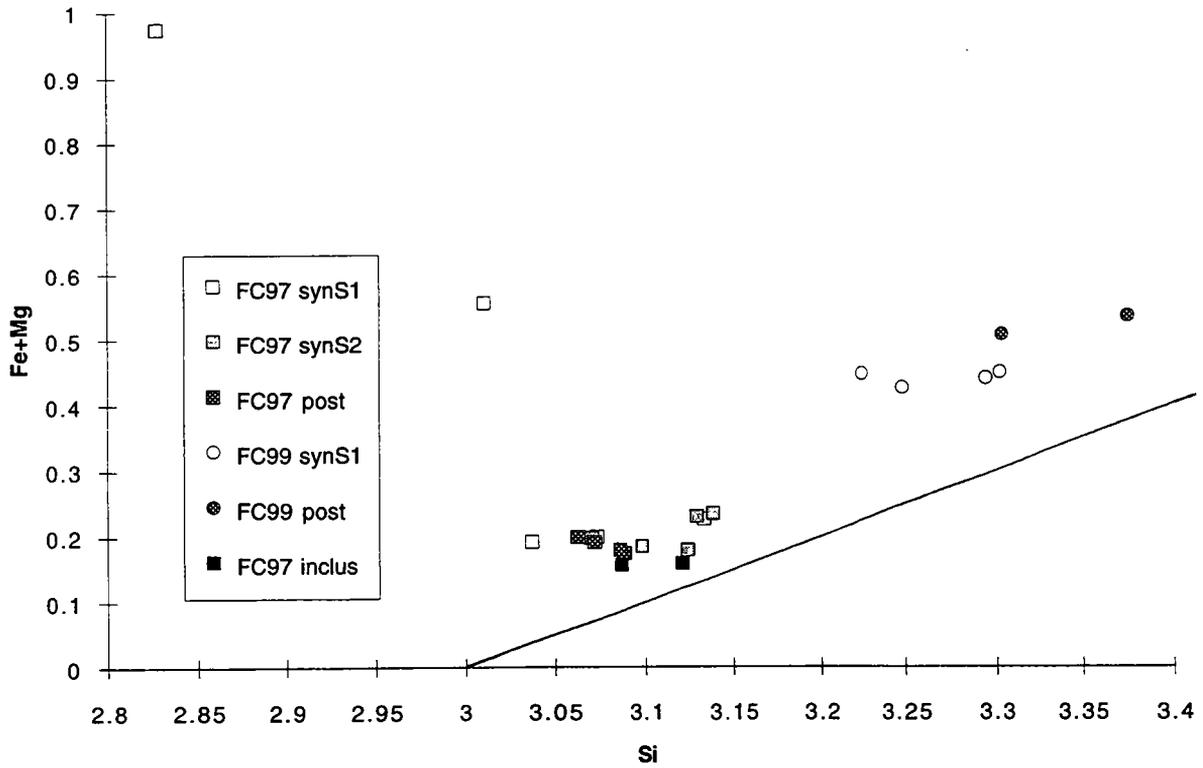
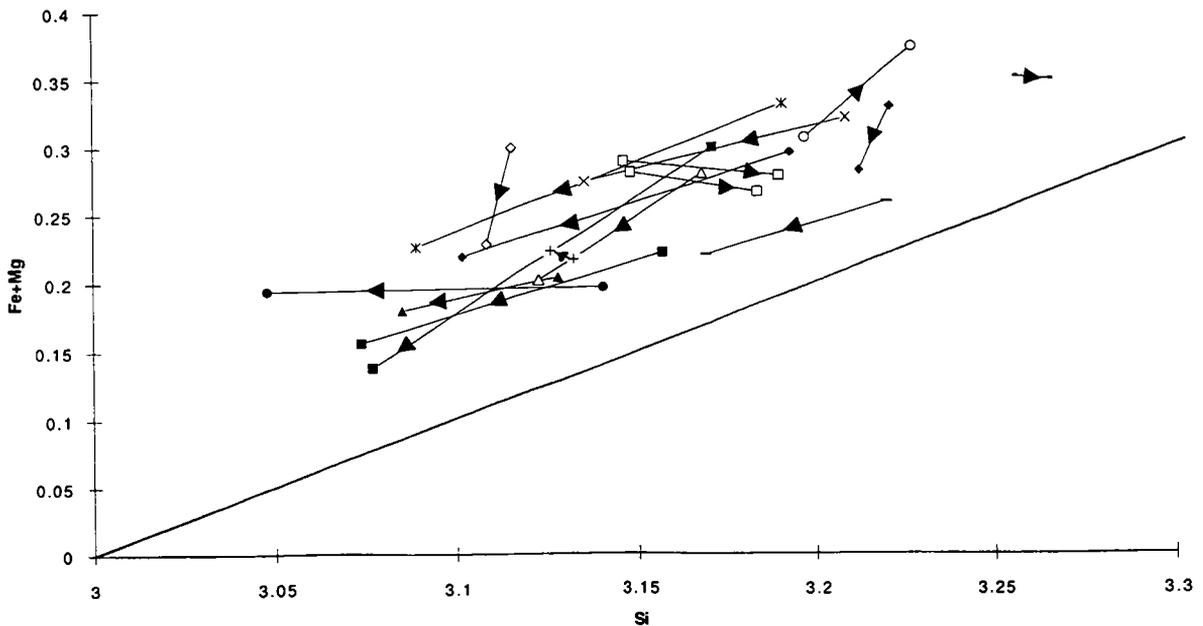


Figure V-10: Composition entre le coeur et la bordure au sein d'une même muscovite (domaine SW). La pointe de la flèche indique la bordure.



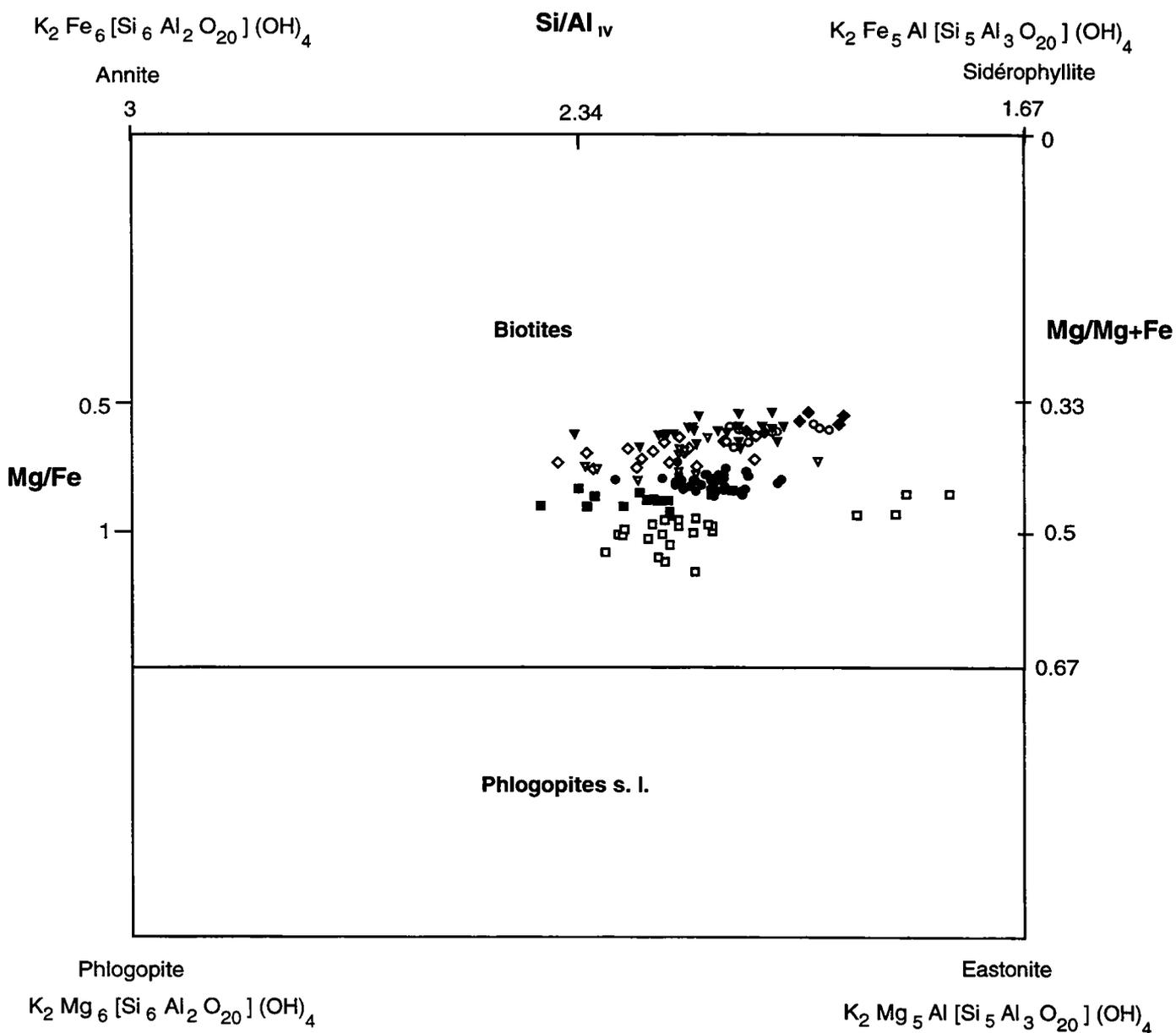
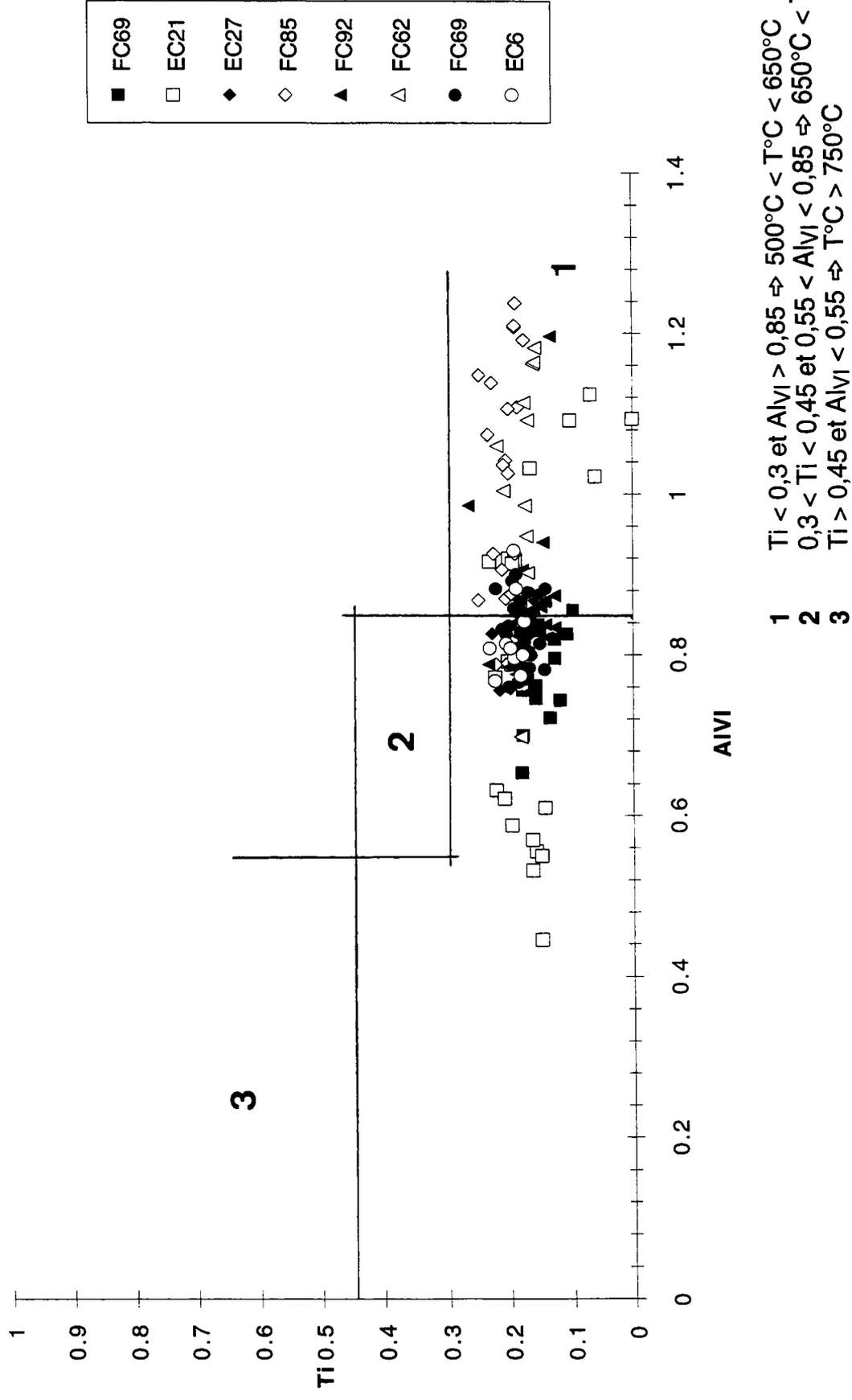


Figure V-11: Composition des biotites dans le domaine SW. Les analyses reportées appartiennent aux roches suivantes:

- |   |      |   |      |   |      |   |      |
|---|------|---|------|---|------|---|------|
| □ | EC21 | ○ | EC6  | ▼ | FC62 | ◇ | FC85 |
| ■ | EC25 | ● | FC69 | ▼ | FC92 | ◆ | EC27 |

Figure V-12: Composition des biotites dans le domaine SW dans le diagramme  $Ti=f(AIVI)$  de Schreurs (1985).



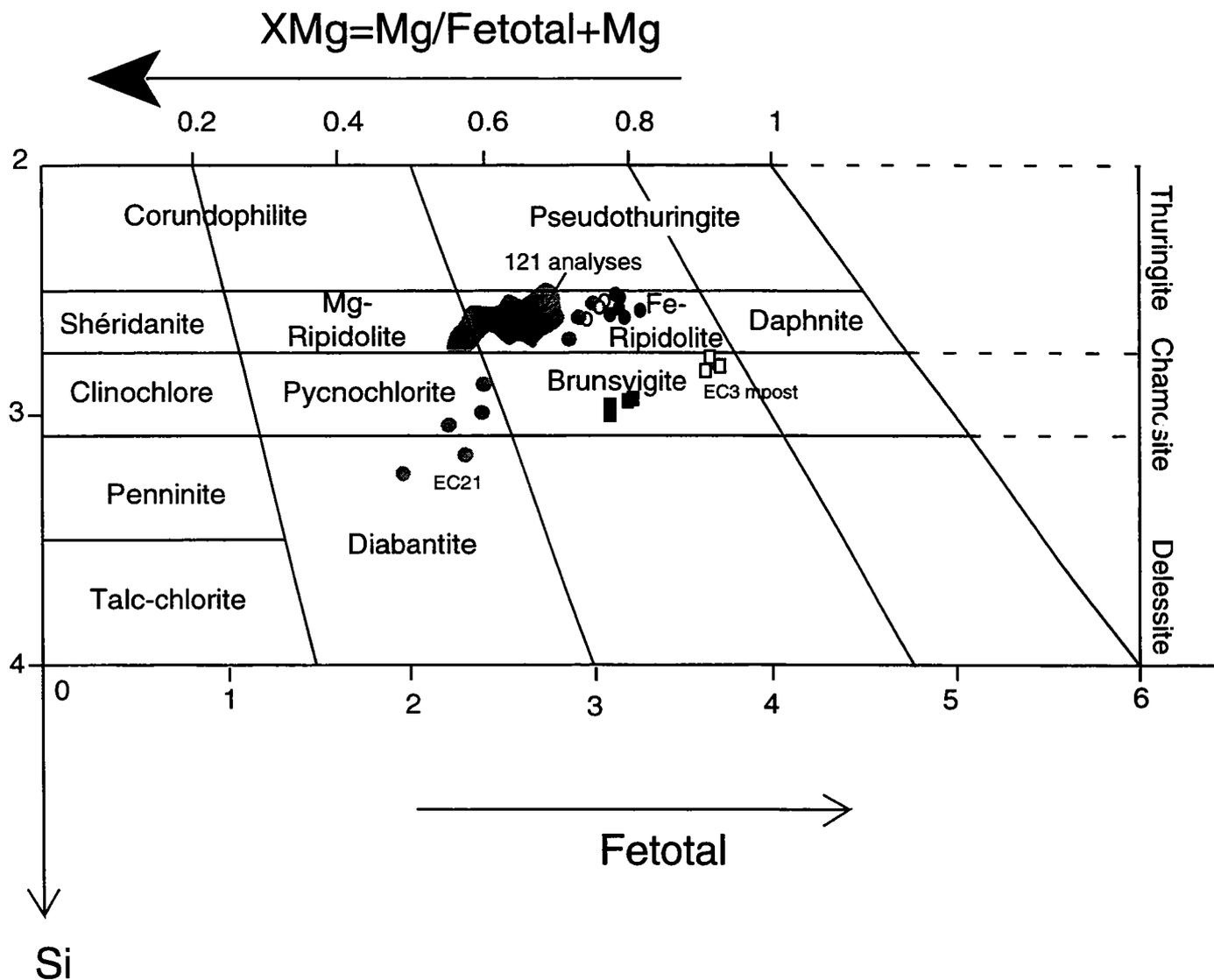


Figure V-13: Composition des chlorites dans la classification de Hey (1954). Les zones en grisé représentent les chlorites dans le domaine SW, les carrés et cercles celles du domaine NE (carré: lame FC99, cercle: lame FC97, blanc pour les minéraux syn-S1, gris clair pour les minéraux syn-S2, et gris foncé pour les minéraux post déformation).

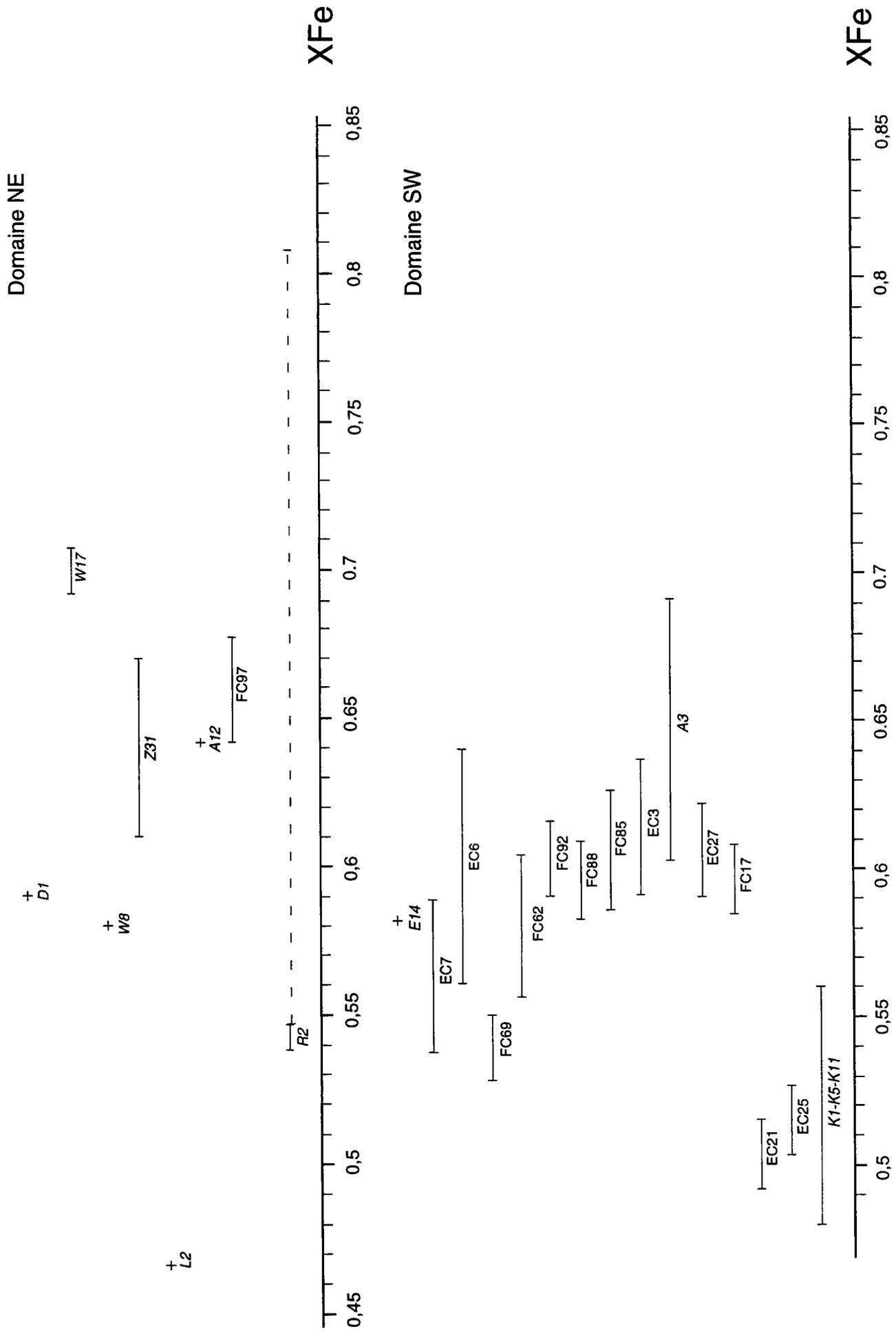


Figure V-14: Evolution du XFe dans les chlorites. Les données des lames K1-K5-K11, A3, R2, A12, L2, Z31, W8, E14, W17, D1 sont celles de Rakib (1996).

Rakib, 1996) et les autres lames étudiées. Toutes les lames au centre et au Nord de la région étudiée (FC17, EC27, EC3, FC85, FC88, FC92) ont des rapports XFe globalement identiques. Les quatre lames les plus septentrionales (FC62, FC69, EC6 et EC7) ont des rapports XFe beaucoup plus dispersés et légèrement moins élevés que ceux cités précédemment.

Dans le secteur NE, une seule analyse de chlorite dans la lame L2 présente un XFe très faible. Les autres lames ont des chlorites au XFe identique à beaucoup plus élevé que dans le domaine SW.

Le diagramme d'évolution du XFe dans les biotites du domaine SW montre la même transition entre les lames EC25 et EC21 et les lames plus septentrionales. Les autres lames ont des XFe beaucoup plus dispersés qui ne présentent pas d'évolution nette du Nord au Sud. Dans le domaine NE, excepté la lame L2, les autres lames ont des biotites aux XFe identiques à ceux du domaine SW ou plus élevés telle la biotite des lames D1 et W17.

#### **4. 3. Le grenat**

Deux lames contenant du grenat ont été analysées. La lame, FC92, est située dans le domaine SW. Le grenat, de petite taille, ne présente pas de variation de composition entre la bordure et le coeur du cristal. Dans la lame, FC97, le grenat présente une zonation nette de composition du coeur vers la bordure. Les analyses de grenat ont été reportées sur la figure V-16 dans un diagramme Mn-Fe-Mg (A) et Mn-Ca-Fe+Mg (B). Ce sont des almandins riches en calcium (teneur entre 0,1 et 0,2) et en manganèse (entre 0,2 et 0,3 dans le coeur). La zonation concerne essentiellement les teneurs en Fe et en Mn. Un profil a été effectué pour mesurer la zonation dans le détail (fig. V-17). Il est similaire aux zonations décrites par Rakib (1996) (fig. V-18) dans le secteur étudié. Il montre:

- Une forte diminution, essentiellement localisée vers la bordure du grenat, de la teneur en spessartine.
- Une importante augmentation de la teneur en almandin vers la bordure du grenat.
- Une légère diminution de la teneur en grossulaire du coeur vers la bordure.
- Une légère augmentation de la teneur en pyrope du coeur vers la bordure

Cette zonation est assez typique pour les grenats dans la zone métamorphique du début de leur apparition car le coefficient de diffusivité du grenat est faible à ces températures (Spear, 1993). Le mécanisme évoqué pour expliquer la zonation dans ces cas est le plus souvent celui de la cristallisation fractionnée associée éventuellement à des variations de conditions P-T. Le grenat intègre le Mn dans son réseau, cet élément diminue donc en proportion lors de la cristallisation du grenat qui en intègre alors de moins en moins lors de sa croissance. Après la croissance, la composition du grenat ne subit aucune modification par diffusion. Les XFe dans les coeurs des grenats ont été reportés sur un diagramme pour le domaine SW et le domaine NE (fig. V-19). Aucune variation notable du XFe n'est mise en évidence géographiquement.

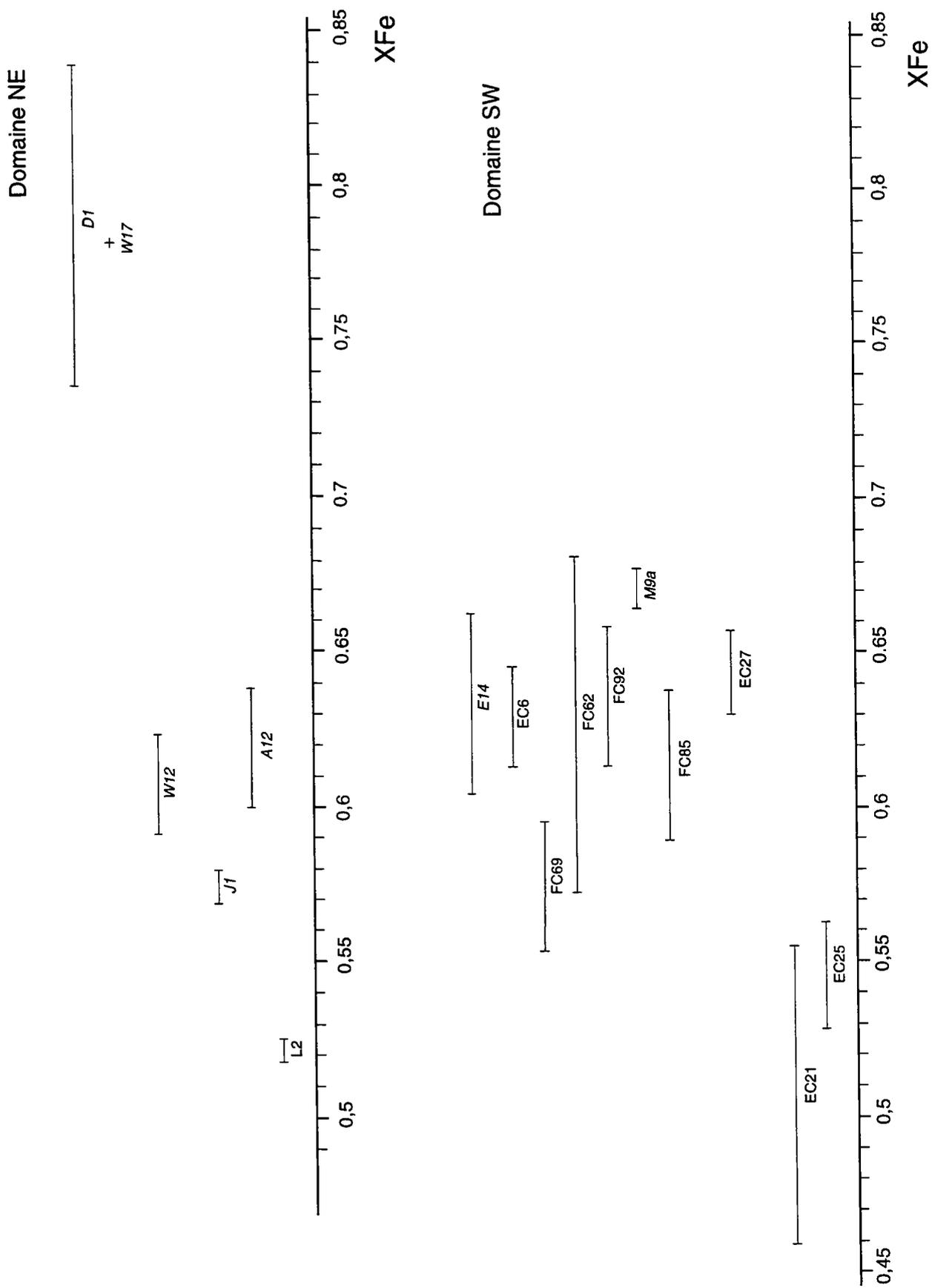


Figure V-15 : Evolution du XFe dans les biotites. Les données des lames M9a, L2, A12, J1, E14, W12, W17, D1 sont celles de Rakib (1996).

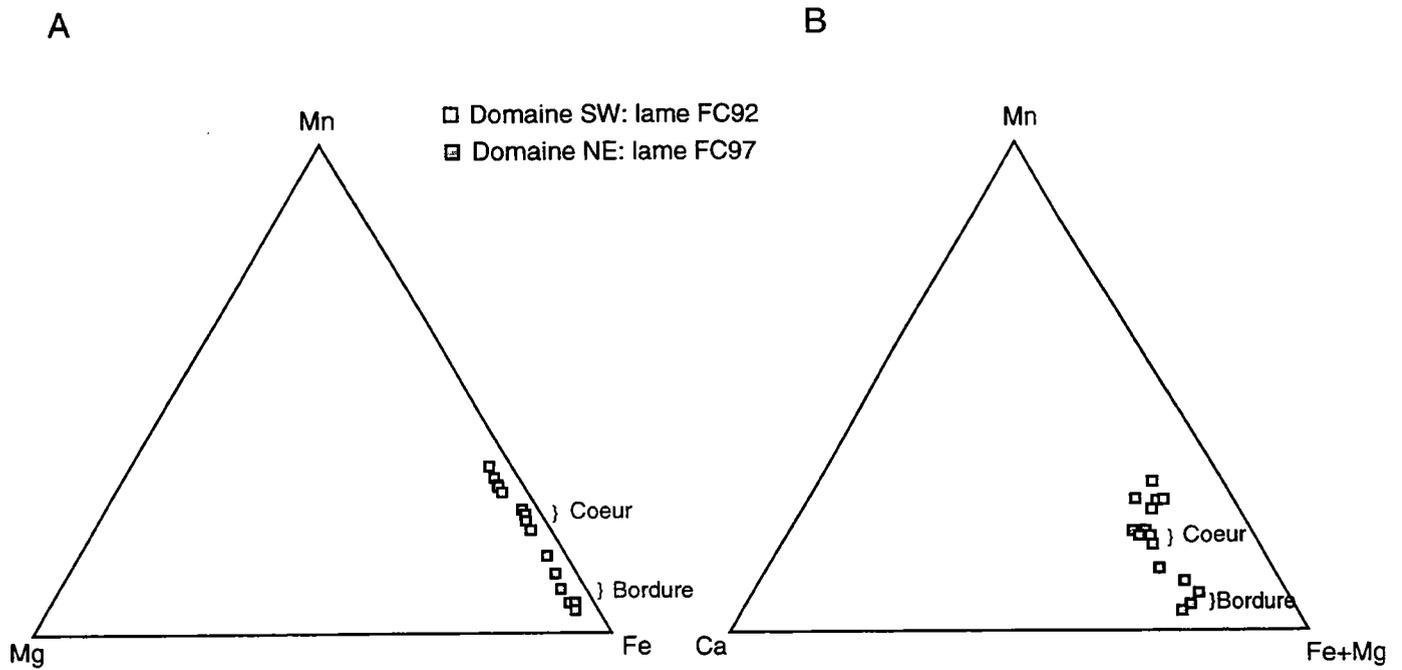


Figure V-16: Composition des grenats reportée dans le diagramme (A) Mn-Mg-Fe et (B) Mn-Ca-Fe+Mg.

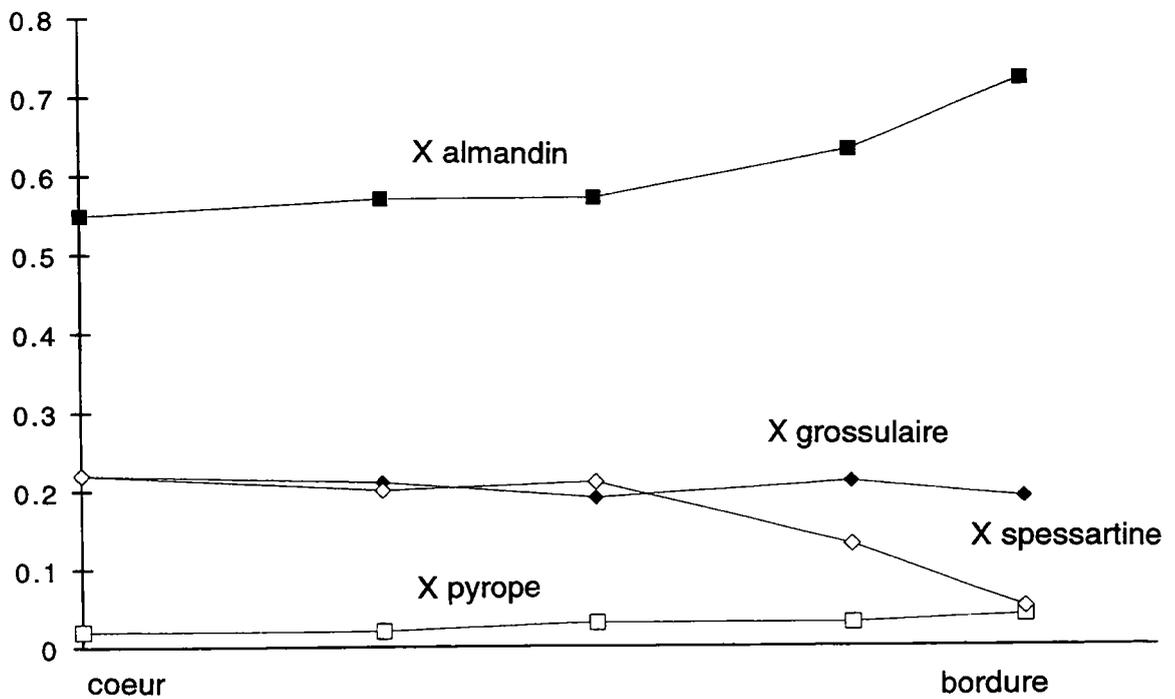
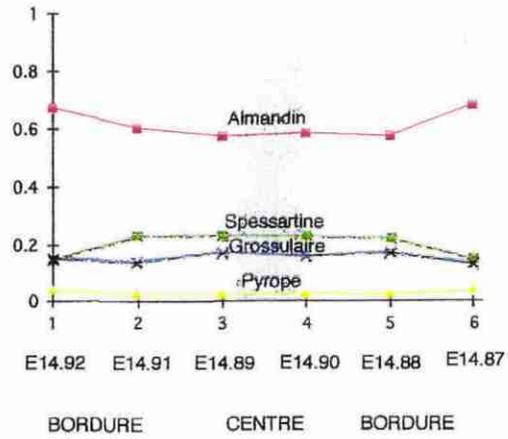
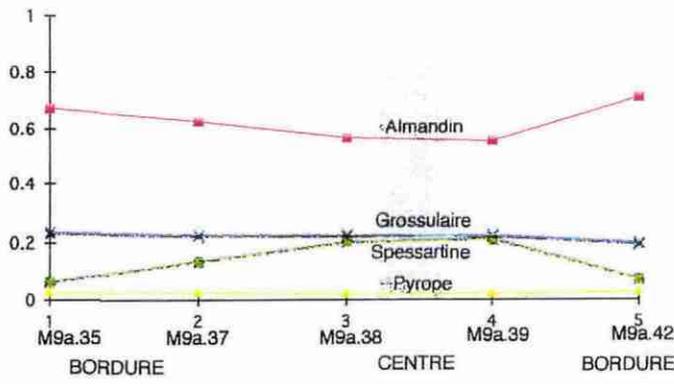
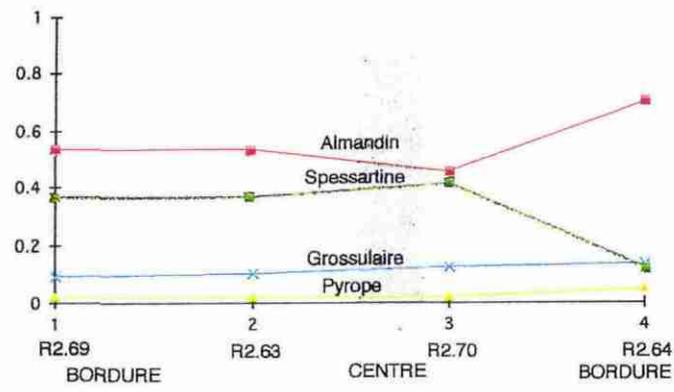


Figure V-17: Evolution de la composition d'un grenat du coeur vers la bordure dans le domaine NE, lame FC97.

### LES CÉVENNES CENTRALES



### LES CÉVENNES SEPTENTRIONALES

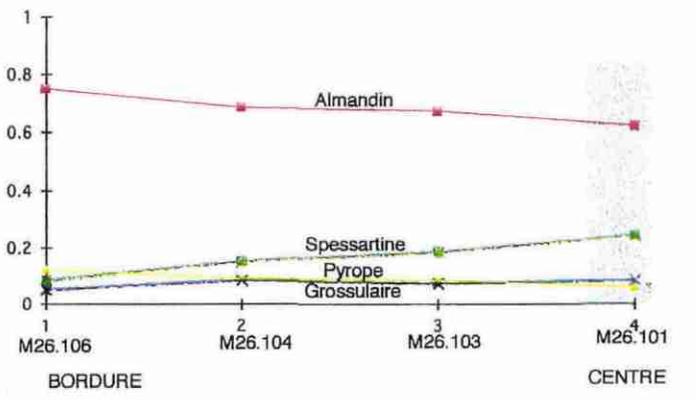
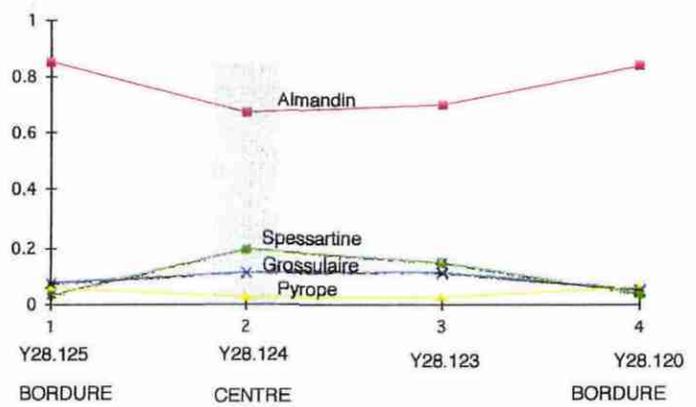
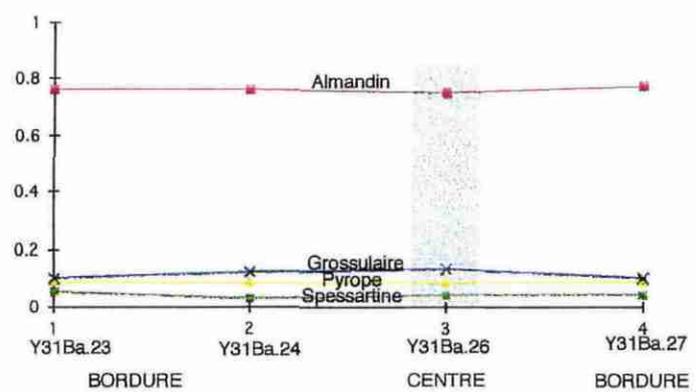


Figure V-18: Zonation des grenats dans les Cévennes centrales et septentrionales d'après Rakib (1996).

#### 4. 4. Les oxydes

Les deux familles d'oxydes distinguées microscopiquement correspondent à du rutile probablement altéré en anatase et de l'ilménite. Seule la lame EC21 possède de la magnétite dans l'exsudat.

En résumé, deux domaines se distinguent:

- Le domaine SW, où l'ensemble des minéraux ont des compositions identiques quelle que soit leur relation avec la déformation et leur localisation. Ceci n'est valable que lorsque l'on considère des lames présentant des compositions similaires, en excluant la lame de composition carbonatée EC21. Deux hypothèses peuvent expliquer les différences de compositions minérales observées dans cette lame: la composition de la roche et sa localisation dans l'auréole de contact de la granodiorite du Liron. L'uniformité des compositions dans les autres lames indique que les roches ont été affectées par un même métamorphisme au cours de la déformation progressive en cisaillement et que l'ensemble du secteur étudié s'est déformé sous un même climat métamorphique. Ces résultats sont en accord avec Rakib (1996) attribuant l'ensemble du secteur à une même zone d'isométamorphisme à grenat-chlorite.
- Le secteur NE, présente les mêmes paragenèses que le domaine SW, mais contient des minéraux aux compositions étant localement légèrement différentes. Cette différence provient d'une augmentation du XFe dans les biotites et chlorites. D'autre part, tout le domaine NE contient des niveaux riches en grenats contrairement au domaine SW où le grenat s'observe très peu au Sud. Ces différences peuvent indiquer seulement une variation de la composition de la roche ou alors une variation légère de conditions P-T, le secteur NE appartenant toujours à la zone d'isométamorphisme grt-chlorite.

### 5. *Pétrologie des schistes des Cévennes*

L'étude pétrologique a été effectuée dans le détail par Rakib (1996). D'après les compositions des minéraux et des roches, le système chimique considéré est NCKFMASHTOMn. L'ensemble des roches de notre secteur se situe dans la zone à chlorite-grenat.

La biotite est présente dans cette zone et a pu se former à partir de la réaction:



qui peut se produire à des températures minimales entre 300 et 400°C.

Le grenat s'observe fréquemment au Nord de la vallée-Française (fig. I-22) dans le domaine SW et dans l'ensemble du domaine NE. Dans le domaine SW, on le retrouve cependant localement dans la partie Sud ce qui laisse suggérer qu'il peut être stable dans tout le domaine SW et que son absence est due au chimisme de la roche qui ne permet pas sa formation. Afin de vérifier cette hypothèse, nous avons reporté le XMn dans la biotite (fig. V-20) et la chlorite (fig. V-21) pour l'ensemble des lames du domaine NE et SW.

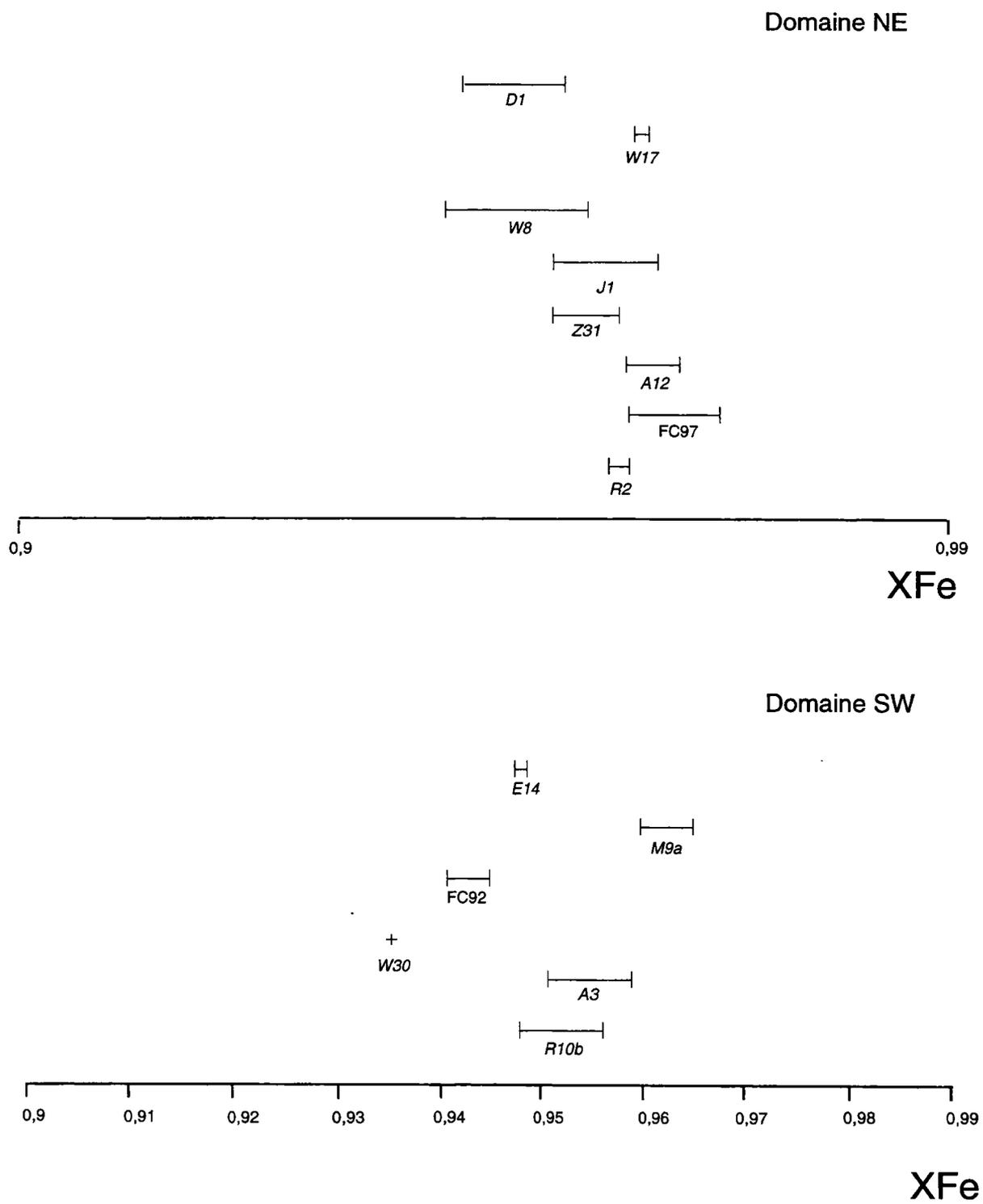


Figure V-19: Evolution du XFe dans le coeur des grenats à partir des données microsonde de Rakib (1996) exceptées les lames FC97 et FC92 analysées au cours de cette étude.

Dans le domaine SW, exceptées les lames M9a, EC3 et FC88, les teneurs en Mn dans les biotites et les chlorites sont sensiblement plus élevées vers le Nord où le grenat est fréquent. Ainsi la présence de grenat essentiellement localisée au Nord du secteur peut provenir d'une teneur plus importante en manganèse dans la composition de la roche vers le Nord. Lorsqu'il intervient dans le système ce constituant a pour effet de stabiliser le champ du grenat à des températures plus basses que dans le système simple KFMASCH (Spear et Cheney, 1989).

Le grenat a pu se former à partir de la réaction:

chloritoïde + biotite + H<sub>2</sub>O ↔ grenat + chlorite.

Les grenats des Cévennes ont un rapport Mn/Mn+Fe+Mg qui peut être important jusqu'à des valeurs de 0,35 dans le coeur des grenats.

Pour un tel rapport, le grenat peut coexister en équilibre avec la chlorite à partir d'une température entre 420°C et 440°C pour des pressions de 3 à 5 Kb (Spear et Cheney, 1989).

En absence de manganèse, le grenat cristallise à partir de cette réaction entre 510 et 540°C.

Une variation de composition de la roche totale peut donc bien expliquer la répartition du grenat au sein d'une zone d'isométagmorphisme pour des températures entre 420 et 540°C.

L'absence de staurotide indique que les roches n'ont pas franchi la réaction: grenat + chlorite ↔ staurotide + biotite + H<sub>2</sub>O. Pour un rapport Mn/Mn+Fe+Mg de 0,35 cette réaction s'effectue entre 560 et 590°C pour des pressions entre 3 et 5 Kb (Spear et Cheney, 1989). En absence de manganèse dans le grenat cette réaction a lieu entre 550 et 570°C. Ces températures constituent une limite supérieure du métamorphisme dans le secteur étudié.

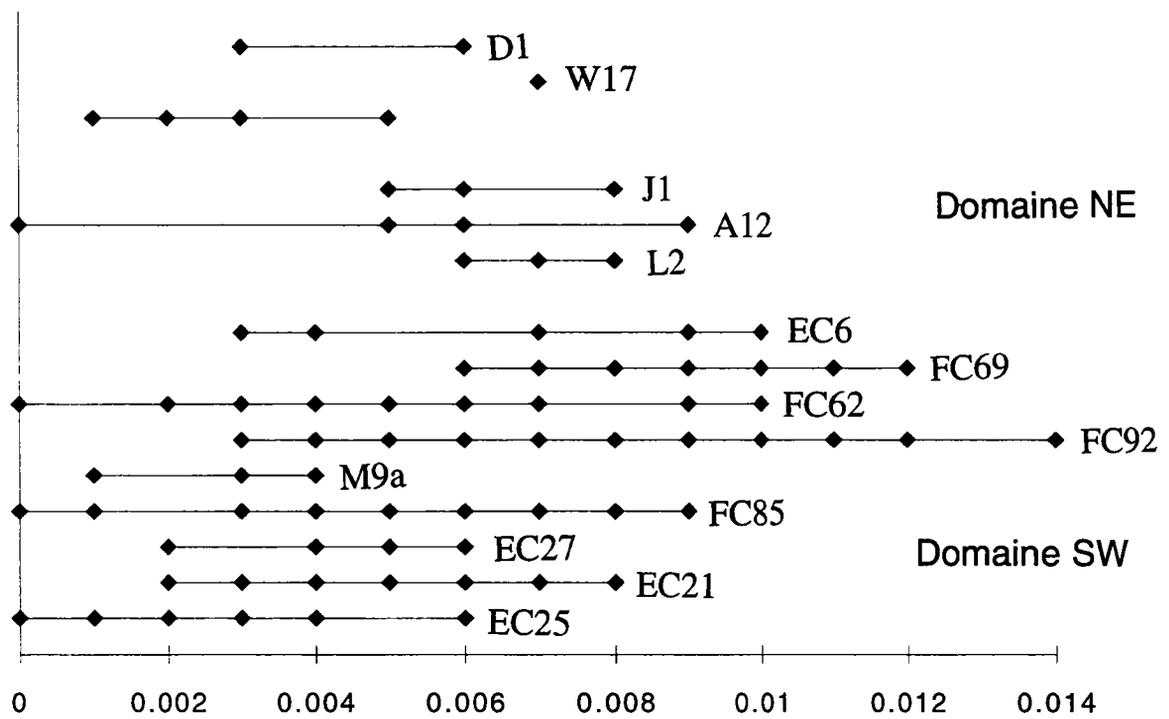
## *6. Détermination des conditions thermobarométriques*

Afin de préciser les conditions pression-température du métamorphisme, plusieurs méthodes thermo-barométriques ont été utilisées. Les géobaromètres classiques n'ont pas été appliqués car, d'une part, ils ont déjà été utilisés dans l'étude de Rakib (1996) et, d'autre part, ils sont moins précis que les méthodes développées par Powell et Holland (1985) et celle des inclusions fluides utilisée au cours de cette étude.

Dans cette partie, nous décrirons brièvement le principe des méthodes employées, les programmes informatiques utilisés et les résultats obtenus en température et pression lorsque cela a été possible.

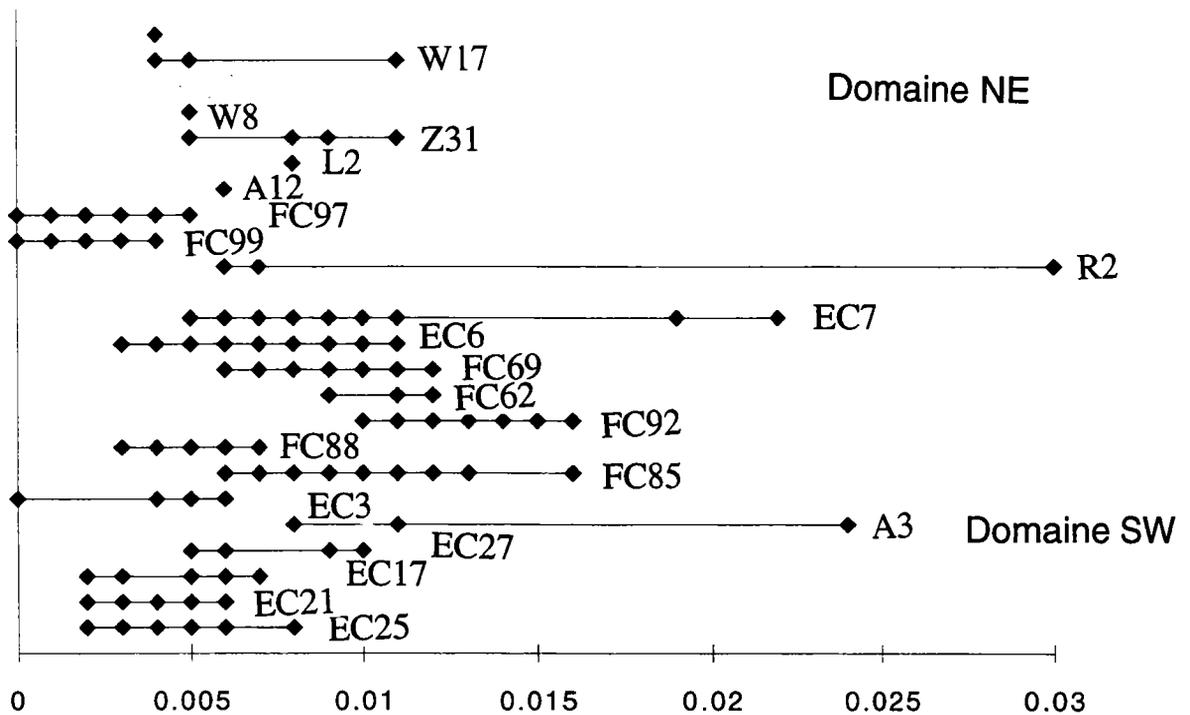
### **6. 1. Principes des méthodes utilisées et choix des programmes**

Les conditions thermo-barométriques des phases solides peuvent être estimées ou calculées par différentes approches:



$$XMn = Mn / Fe + Mg + Mn$$

Figure V-20: Évolution du XMg dans la biotite dans le domaine SW et NE. Les données des lames M9, A3, R2, A12, L2, Z31, W8, E14, W17, D1, J1, W12 et W17 sont issues des données microsonde de Rakib (1996).



$$XMn = Mn / Fe + Mg + Mn$$

Figure V-21: Évolution du XMg dans la chlorite dans le domaine SW et NE. Les données des lames M9, A3, R2, A12, L2, Z31, W8, E14, W17, D1, J1, W12 et W17 sont issues des données microsonde de Rakib (1996).

- La méthode de calcul des équilibres de phases métamorphiques d'après les relations thermodynamiques liant P-T-X-M (pression, température, composition minérale et mode du minéral).

Le principe consiste à établir les équations stoechiométriques pouvant intervenir entre tous les constituants composant un assemblage en équilibre. Ainsi est défini un jeu d'équations linéairement indépendant grâce à une méthode matricielle. La résolution du système d'équations permet d'obtenir les conditions de pression-température lors de l'équilibre. C'est la méthode la plus rigoureuse mais elle n'est pas applicable dans tous les cas. Pour l'utiliser il faut qu'il existe assez de phases en équilibre permettant d'avoir un jeu d'équations indépendant, permettant de définir les équilibres de phases du système. Cette approche a été développée et informatisée par plusieurs auteurs (Berman, 1988; Powell et Holland, 1985). Le programme utilisé dans cette étude est la dernière version THERMOCALC V2.3 (1994) élaborée par Powell et Holland (1985). L'avantage de ce programme par rapport à celui de Berman (1988) est qu'il calcule les incertitudes. Il donne donc des résultats plus rigoureux pour les calculs à partir de données thermodynamiques déjà existantes comme dans le cas de notre étude. L'activité des pôles purs a été calculée à partir des formules structurales avec le programme de Guiraud (1991, non publié). A partir de ces compositions, le programme a permis d'obtenir, selon les cas, soit la détermination des conditions P-T à l'équilibre, soit celle de la pression moyenne ou celle de la température moyenne. Dans les calculs nous avons tenu compte de la composition du fluide. Elle correspond à un rapport ( $X_{H_2O}=0,8$  et  $X_{CO_2}=0,2$ ) obtenu lors de l'étude des inclusions fluides piégées au moment de la cristallisation des exsudats de quartz (voir partie B de ce chapitre).

- La méthode de calcul des équilibres de phases métamorphiques en utilisant une seule relation d'équilibre.

Au cours de cette étude, nous avons utilisé les réactions d'échange du Fe-Mg entre la biotite et le grenat d'une part et la chlorite et le grenat d'autre part et la réaction d'échange du Fe-Mn entre le grenat et l'ilménite. Ces trois réactions étant dépendantes essentiellement de la température ont été utilisées comme géothermomètre.

*Le géothermomètre grenat-biotite:* Au cours des variations des conditions P-T, le grenat et la biotite vont échanger le Fe et le Mg tel que  $(FeMg^{-1})_{\text{grenat}} = (FeMg^{-1})_{\text{biotite}}$ . Le rapport Mg/Fe dans le grenat évolue proportionnellement au rapport Mg/Fe de la biotite selon un coefficient de distribution constant ( $K_D$ ) dans le cas d'une solution solide idéale. Ce coefficient ne varie qu'en fonction de la température (T) selon l'équation:

$$\ln K_D = 2089/T \text{ (K)} - 0,782$$

calibrée expérimentalement par Ferry et Spear (1978).

Cette équation n'est valable que dans le cas de grenats pauvres en Ca ou Mn car ces derniers éléments ne se mélangent pas idéalement avec le Fe et le Mg. De même le Ti,  $Fe^{3+}$ , Mn et Al de la biotite peuvent intervenir

dans les mélanges. Plusieurs autres modèles ont été développés de manière à tenir compte de la présence de certains de ces éléments (Perchuk et Laurent'eva, 1981; William et Grambling, 1990).

Pour les grenats des schistes des Cévennes, qui se caractérisent par des valeurs relativement élevées en Mn ( $X_{\text{spessartine}}$  entre 0 et 0,3) et en Ca ( $X_{\text{grossulaire}}$  entre 0,12 et 0,3), les modèles ne tenant pas compte de ces éléments ne peuvent être appliqués. Le modèle utilisé est celui développé par William et Grambling (1990) calibré à partir de roches naturelles informatisé par Guiraud (1991, non publié), qui est applicable aux grenats riches en manganèse. Ce modèle ne tient pas compte du Ca, ainsi les analyses de grenats présentant des teneurs en Ca les moins élevées sont susceptibles de donner les meilleurs résultats.

*Le géothermomètre grenat-chlorite:* Plusieurs approches ont été développées pour utiliser le fractionnement du Fe et du Mg entre la chlorite et le grenat.

Un premier géothermomètre repose sur la combinaison entre le fractionnement entre le Fe et Mg entre le grenat et la biotite d'une part, calibré expérimentalement par Ferry et Spear (1978), et le fractionnement entre la biotite et la chlorite d'autre part, calibré empiriquement par Lang et Rice (1985).

L'équation tenant compte des deux équilibres est:

$$T = 2109.92 + 0.00608 P / 0.6867 - \ln K$$

d'après Ghent et al. (1987).

Une autre équation a été développée sur les échanges Fe-Mg entre le grenat et la chlorite calibrée à partir de roches naturelles par Grambling (1990). L'équation obtenue est:

$$0.05 P \text{ (bars)} - 19.02 T \text{ (K)} + 4607 \ln K_D + 24,156 = 0$$

Les deux équations, informatisées par Guiraud (1991, non publié) ont été testées sur nos roches et donnent des résultats similaires.

*Le géothermomètre grenat-ilménite:* Il repose sur le fractionnement entre le Fe et le Mn existant entre le grenat et l'ilménite dépendant de la température selon l'équation:

$$\ln K_D = 2641 / T - 1,156$$

où  $K_D = (\text{Mn/Fe})_{\text{grt}} / (\text{Mn/Fe})_{\text{il}}$

calibrée expérimentalement par Pownceby et al. (1987).

## **6. 2. Applications des méthodes aux données microsonde**

### **6. 2. 1. Utilisation des thermomètres grenat-biotite, grenat-chlorite et grenat-ilménite**

Les résultats bruts obtenus par les programmes des géothermomètres de Guiraud (1991, non publié) sont reportés dans la partie 2 de l'annexe 1. Pour chaque lame, le programme prend toutes les compositions de biotite, chlorite ou ilménite selon le géothermomètre utilisé et toutes les compositions de grenat et les couplent entre elles. Pour chaque couple il calcule les températures obtenues à diverses pressions, afin de voir l'effet de la pression sur le géothermomètre. Les résultats présentés sont calculés pour une pression de 5 Kb. Les variations de température en fonction de la pression sont généralement très faibles (une dizaine de degré entre 1 et 5Kb) et généralement en dessous des marges d'incertitude analytiques.

#### *6. 2. 1. 1. Le géothermomètre grenat-biotite*

Ce géothermomètre a été utilisé sur la lame FC92. Les grenats ayant des compositions riches en manganèse, l'équation employée est celle de Williams et Grambling (1990). Les températures les plus fiables sont obtenues avec l'analyse 217 qui correspond a une analyse de bordure du grenat, susceptible d'être le plus en équilibre avec la biotite dans la matrice, et dont la teneur en Ca est la moins élevée (X grossulaire de 0,12). Les températures obtenues varient entre 493 et 541°C avec une majorité de température entre 500 et 520 °C. La variation des températures obtenues ne dépend pas des différents types de biotite utilisées.

#### *6. 2. 1. 2. Le géothermomètre grenat-chlorite*

Les deux équations (Ghent et al., 1987; Grambling, 1990) donnent des résultats similaires à une dizaine de degrés près.

Ce géothermomètre donne une température entre 400 et 440°C pour la lame FC92 localisée dans le secteur SW et entre 420 et 500°C pour la lame FC97 (pour les analyses de bordure du grenat) localisée dans le secteur NE.

Les résultats varient très peu selon le type de chlorite étudié (syn-S1, syn-S2, en bordure d'exsudat, postérieur) puisqu'elles présentent toutes des compositions identiques. Par contre la variation est plus importante selon l'analyse de grenat utilisée en raison des variations de composition du coeur vers la bordure des grenats. Les différences sont faibles pour la lame FC92, où le grenat, de petite taille, ne présente pas de zonation nette. Cependant, dans la lame FC97, les variations sont plus importantes et les analyses de bordure, les plus susceptibles d'être en équilibre avec la chlorite dans la matrice, doivent donner des résultats plus proches de la réalité. Pour ces analyses, les températures obtenues sont légèrement plus élevées .

### 6. 2. 1. 3. Le géothermomètre grenat-ilménite

Ce géothermomètre a été utilisé sur une analyse d'ilménite incluse dans un grenat au niveau de sa bordure. L'analyse dans le grenat utilisée est localisée juste à proximité de l'inclusion de l'ilménite. La température obtenue selon l'équation de Pownceby et al. (1987) est de 500°C.

### 6. 2. 2. Utilisation du programme THERMOCALC

Ce programme a été utilisé pour la lame FC92 qui présente une paragenèse à quartz-muscovite-biotite-chlorite-grenat-oligoclase. Les analyses utilisées proviennent de minéraux en contact entre eux ou à proximité les uns des autres. Un jeu de réactions indépendant a été calculé et a permis d'obtenir directement les conditions moyennes de pression et température pour lesquelles l'assemblage est en équilibre. La température obtenue est de 506 ±12 °C pour une pression de 5,2±0,8 Kb.

A titre de comparaison, le programme a été utilisé sur les analyses microsonde de Rakib (1996) pour les lames contenant les paragenèses les plus complètes à qtz-musc-bi-chl-grt-pl (EC14, A12, M9a et D1). Ne connaissant pas la localisation précise des analyses, les analyses utilisées ont été choisies parmi les plus représentatives des compositions des minéraux pour chaque lame. Ce choix est justifié par le fait que, pour une même famille de minéraux, les compositions varient peu d'un minéral à l'autre, quel que soit le type de minéral (synS1, synS2 ou post-déformation). Les résultats obtenus sont les suivants:

|           | T moyen  | P moyen    |
|-----------|----------|------------|
| Lame EC14 | 510±20°C | 5,7 ±1,2Kb |
| Lame A12  | 494±29°C | non obtenu |
| Lame M9a  | 518±22°C | 5,8±1,29Kb |
| Lame D1   | 488±96°C | 5,9±2,8Kb  |

Les températures indiquées sont celles déterminées à 5Kb, cependant la température est généralement bien contrainte. Elle varie très peu en fonction de la pression, les variations étant inférieures à la marge d'erreur. Les pressions sont moins bien déterminées. Le fait qu'elles ne soient pas obtenues ou présentent des marges d'erreur très importantes, telle la lame D1, provient de l'absence d'analyses du plagioclase.

Tous les calculs ont été effectués avec une pression fluide correspondant à un fluide de composition de 80% d'H<sub>2</sub>O et de 20% de CO<sub>2</sub> déterminée lors de l'étude des inclusions fluides primaires dans les exsudats syn-tectoniques.

## 7. *Discussion*

### 7. 1. *Sur la validité des différents géothermomètres*

Les paragenèses présentes dans la roche permettent de bien déterminer la température du métamorphisme régional à 506°C±12°C dans l'ensemble du

domaine SW. Les thermomètres grenat-ilménite et grenat-biotite confirment cette température, cependant celui à grenat-chlorite indique généralement des températures plus basses entre 400 et 500°C. Les différences entre les températures obtenues entre le géothermomètre grenat-ilménite ou grenat-biotite et le géothermomètre grenat-chlorite s'observent au sein d'une même lame mince. L'analyse texturale détaillée au microscope optique montre que la plupart des chlorites dans les lames minces de l'ensemble des secteurs étudiés est tardive par rapport aux autres minéraux. De nombreuses observations montrant différents stades de chloritisation des biotites jusqu'à des chloritisations totales indiquent que la plupart des chlorites proviennent d'anciennes biotites chloritisées. Seules quelques chlorites en baguette marquant la schistosité semblent contemporaines de la déformation. Elles présentent toutefois des compositions identiques aux chlorites tardives et ont pu être rééquilibrées lors de la phase de chloritisation tardive. A partir de ces observations, nous proposons que les températures obtenues par le géothermomètre grenat-chlorite ne représentent pas les températures du pic du métamorphisme mais sont plus proches des conditions thermiques rétrogrades lors de la chloritisation.

## ***7. 2. Sur l'existence d'une zonation du métamorphisme régional***

### **7. 2. 1. Dans le secteur étudié**

Les résultats obtenus sur les paragenèses à partir de nos données et celles de Rakib (1996) indiquent des conditions de métamorphisme, du moins en ce qui concerne la température, identiques dans une grande partie du domaine SW. Dans l'extrémité SW, les paragenèses n'ont pas permis de déterminer les conditions P-T, cependant la composition des minéraux est identique du Sud vers le Nord. Ceci suggère que l'ensemble du secteur a été soumis à un métamorphisme similaire. Or dans ce domaine, Munsch (1981) décrit l'apparition du grenat vers le Nord qu'il interprète comme le passage d'un isograde. La présence locale de grenat dans le Sud du domaine (Rakib; 1996) et la mise en évidence d'une évolution du XMn dans les biotites et chlorites entre le S et le N dans ce domaine suggèrent que sa présence est essentiellement liée à des variations de composition de roches totales et non à des variations de conditions P-T du métamorphisme. D'autre part, Rakib (1996) montre une évolution du XFe dans les biotites et les chlorites (fig. V-22) et des températures obtenues par les géothermomètres grenat-chlorite et grenat-biotite (fig. V-23). Nos propres résultats associés à ceux de Rakib (1996) montrent que le XFe dans les chlorites et biotites, excepté dans la partie extrême SW, restent stables ou ont tendance à augmenter du SW vers le NE contrairement aux conclusions de Rakib (1996). La carte de Rakib (1996) mettant en évidence une diminution du XFe dans les chlorites et biotites du SW au NE est faussée car l'auteur ne reporte pas l'ensemble des échantillons qu'il a analysé et ne présente pas les écarts de valeurs du XFe obtenues sur une même lame mince. En ce qui concerne la carte de l'évolution des moyennes des températures maximales du métamorphisme obtenues par les géothermomètres grenat-biotite et grenat-chlorite que ce même auteur propose, il convient de souligner l'absence de données au SW de l'isopaléotempérature maximale à 400°C ou au NE de celle à 460°C pour

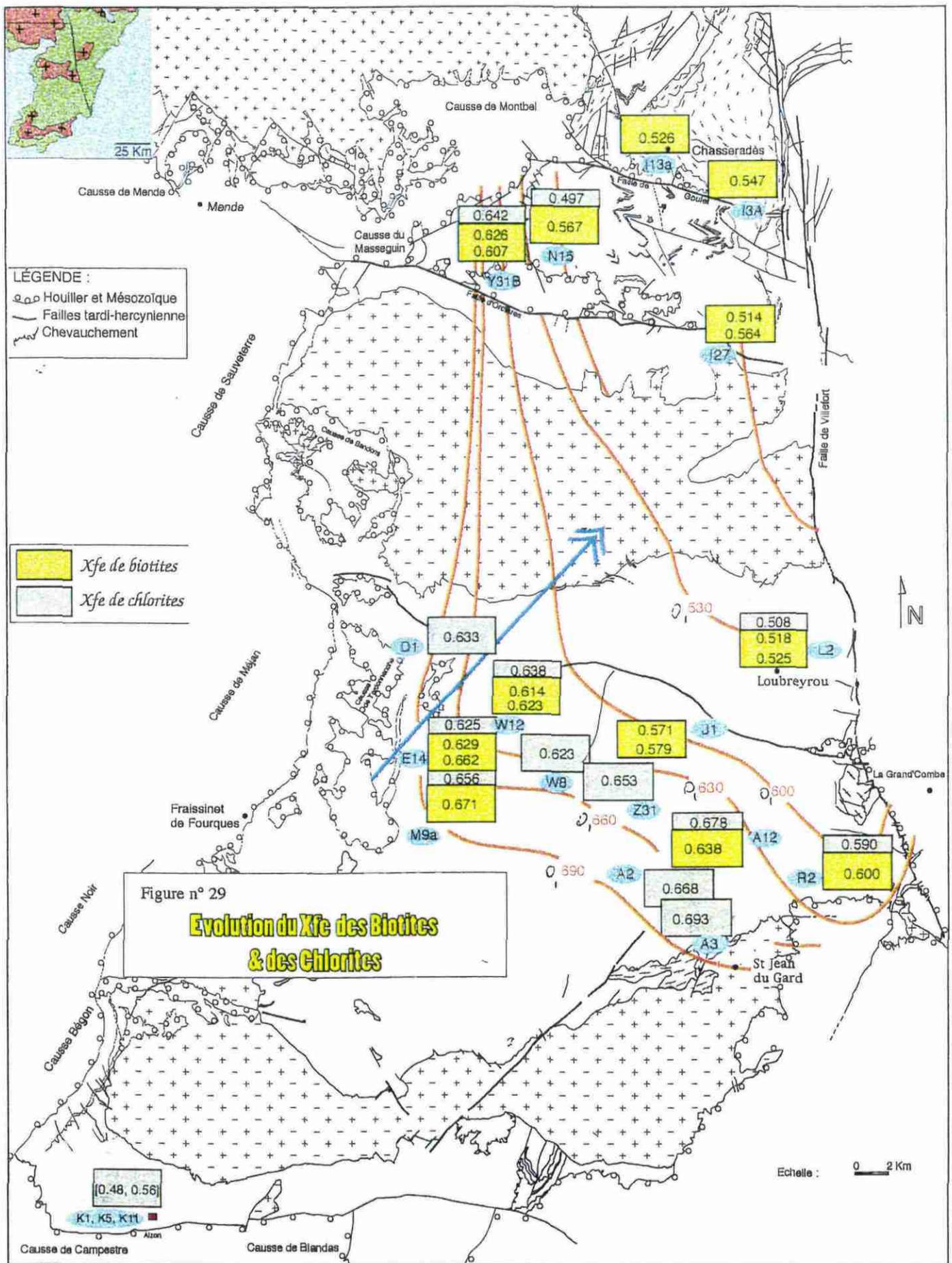


Figure V-22: Évolution du XFe des biotites et des chlorites d'après Rakib (1996).

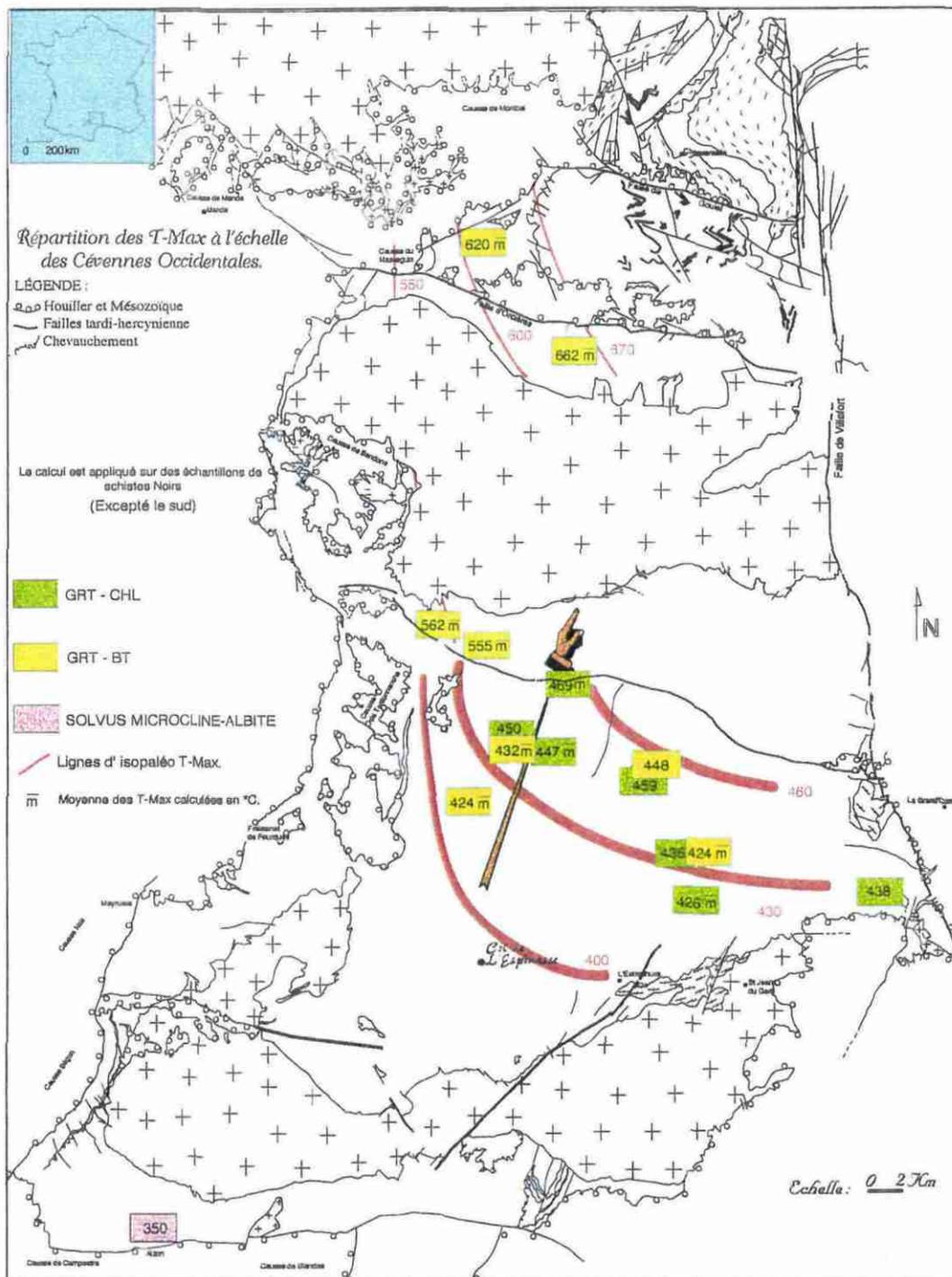


Figure V-23: Répartition des T-Max à l'échelle des Cévennes occidentales d'après Rakib (1996).

justifier leurs positions. D'autre part si une variation existe réellement au niveau de l'isopaléotempérature de 430°C (les variations de température sont au maximum de 30°C ce qui est inférieur aux marges d'erreur) sa trace est localisée au niveau de la faille N120. Cette variation pourrait s'expliquer par une légère différence de métamorphisme due à la juxtaposition tardive des domaines NE et SW. De même des variations de XFe ou de paléotempératures maximales sont localisées de part et d'autre de la faille de Saint-Michel-de-Dèze et pourraient être liées au fonctionnement de cette faille.

Nos données montrent que le domaine SW de la faille N120 est affecté par un métamorphisme régional qui ne varie pas régionalement. Nous ne pensons donc pas qu'il existe une zonation du métamorphisme augmentant vers le NE dans notre secteur. Les fabriques d'axe <c> du quartz suggèrent plutôt une augmentation vers le Sud de la température de la déformation liée à la mise en place des nappes (voir chapitre II-B. 3. 4). Le domaine NE fait partie de la même zone d'isométamorphisme que le domaine SW à grenat-chlorite. Une détermination des conditions P-T par le programme de Powell et Holland (1985) sur des paragenèses à quartz-plagioclase-grenat-muscovite-biotite et chlorite dans de nouveaux échantillons devraient permettre de préciser une éventuelle différence de température maximale du métamorphisme entre les deux domaines.

#### 7. 2. 2. Dans l'ensemble des Cévennes

Rakib (1996) décrit un tracé des zones d'isométamorphisme et des paléotempératures maximales EW à N120 qui tourne brusquement pour devenir NS et se resserrer à l'Ouest des Cévennes et en allant vers le Nord (fig. I-22, V-23). En dehors de notre secteur sont décrites une zone à chlorite-chloritoïde, puis une zone à chlorite en allant vers l'W ou le SW. Plusieurs remarques peuvent être faites sur les paragenèses observées dans ces zones et sur l'interprétation de ces zones à même paragenèse en terme d'isogrades.

En ce qui concerne les secteurs à l'Ouest du secteur étudié et correspondant selon Rakib (1996) à la zone à Ctd-Chl on peut signaler:

- A l'extrémité Ouest au Nord de la faille de Saint-Michel-de-Dèze, dans la région de Florac, la biotite régionale et le grenat sont décrits dans les micaschistes noirs (Gèze et al., 1980). La présence du grenat a été vérifiée sur le terrain.
- Plus au Sud, dans la région de Meyrueis le grenat spessartine est décrit comme fréquent dans les micaschistes noirs (Brouder et al., 1977).
- Dans les micaschistes quartzeux de la vallée de la Dourbie, dans le secteur de Saint-Jean-de-Bruel, la biotite régionale est présente et se différencie de la biotite de contact par ses compositions nettement moins titanifères (Meyer, 1990).

Nous ne pensons donc pas que l'isograde grenat-chlorite de Rakib (1996) soit bien localisé. L'argumentation sur la trace de cet isograde qui recoupe les zones de cisaillement indiquant un métamorphisme postérieur à la déformation varisque n'est donc plus justifiée.

Par contre, certains secteurs montrent une différence brutale des paragenèses mais également du XFe et XMg et des paléotempératures maximales. Ce phénomène est bien observé au Nord-Est du Mont-Lozère au Nord de la faille d'Orclières (fig. I-22, V-22 et V-23). Il faut signaler que la zone de transition correspond à une faille importante, environ NS, qui se poursuit sur 32 km de long de la Montagne du Goulet au SE de la Margeride jusque dans notre secteur où elle affecte les zones de cisaillement au SE de Barredes-Cévennes. Nous avons déjà remarqué qu'une variation du XFe dans les biotites ou chlorite se situait au niveau de la faille N120 cartographiée au cours de cette étude et de part et d'autre de la faille N120 de Saint-Michel-de-Dèze. Sans vouloir tirer de conclusions trop hâtives, une hypothèse de travail serait de reconsidérer les variations du métamorphisme en tenant compte des nombreuses failles importantes connues ou reconnues au cours de cette étude et non prises en compte par Rakib (1996). Les relations déformation-cristallisation montrent que le métamorphisme régional est contemporain de la mise en place des chevauchements lors de la déformation varisque. Ces failles, postérieures à cette déformation, sont fréquentes dans les séries cévenoles, ont probablement eues des jeux complexes et ont sûrement affectés les isogrades métamorphiques originels.

|                 |   |
|-----------------|---|
| <i>Partie B</i> | <i>Thermo-barométrie par l'étude des inclusions fluides</i> |
|-----------------|---|

## *1. Introduction*

L'étude des inclusions fluides (IF) a été menée sur les exsudats de quartz car ce sont les seuls objets contenant des IF étudiables. Cette méthode, associée avec la géothermométrie présentée dans la partie A, permet de déterminer avec précision les conditions de pression de formation de l'exsudat. Par ailleurs, l'étude des IF postérieures à la formation de l'exsudat nous renseignera sur l'évolution des conditions P-T-X (pression, température, composition) des fluides lors de son exhumation. La méthodologie et les conditions analytiques utilisées au cours de cette étude sont expliquées dans l'Annexe 2. Les abréviations se rapportant aux IF sont définies dans cette annexe. De nombreux exsudats ont été échantillonnés au niveau de plusieurs zones de cisaillement dans toute la région afin de faire une étude microstructurale et pétrologique prévisionnelle. Neuf lames minces ont été sélectionnées, de manière à couvrir toute la région, pour faire des lames épaisses et étudier les IF qu'elles contiennent (fig. V-24). Les données brutes obtenues en microthermométrie sont reportées dans la deuxième partie de l'annexe 2. Un exsudat contenant toutes les familles d'IF observées dans l'ensemble des lames épaisses a fait l'objet d'une étude détaillée. Dans un premier temps, nous présenterons les résultats obtenus sur cet exsudat. Par la suite nous présenterons l'ensemble des résultats obtenus dans les autres lames minces, confirmant le caractère régional de cette évolution. Enfin nous discuterons ces résultats et les interpréterons dans le cadre tectono-métamorphique régional.

## *2. Étude de l'exsudat de quartz EC15*

### *2. 1. Description de l'exsudat*

Cet exsudat a été échantillonné dans le domaine SW, au NW du domaine (fig. V-24). Il apparaît sous la forme d'une lentille parallèle à la S2 observée dans toute la zone de cisaillement. Il est constitué de quartz, d'albite, de chlorite, de muscovite, d'apatite et de traces de biotite. En lame mince, on distingue deux types de grains de quartz: des grains de taille relativement importante, à extinction onduleuse et aux contours plus ou moins lobés, et de nombreux grains de petite taille, équants et à extinction nette. Les albites sont de taille relativement importante, automorphes, légèrement altérées sur les bordures, maclées et allongées parallèlement aux épontes de l'exsudat. Elles possèdent fréquemment des fractures perpendiculaires à cet allongement et donc aux épontes de l'exsudat. Autour de l'exsudat, on observe une matrice

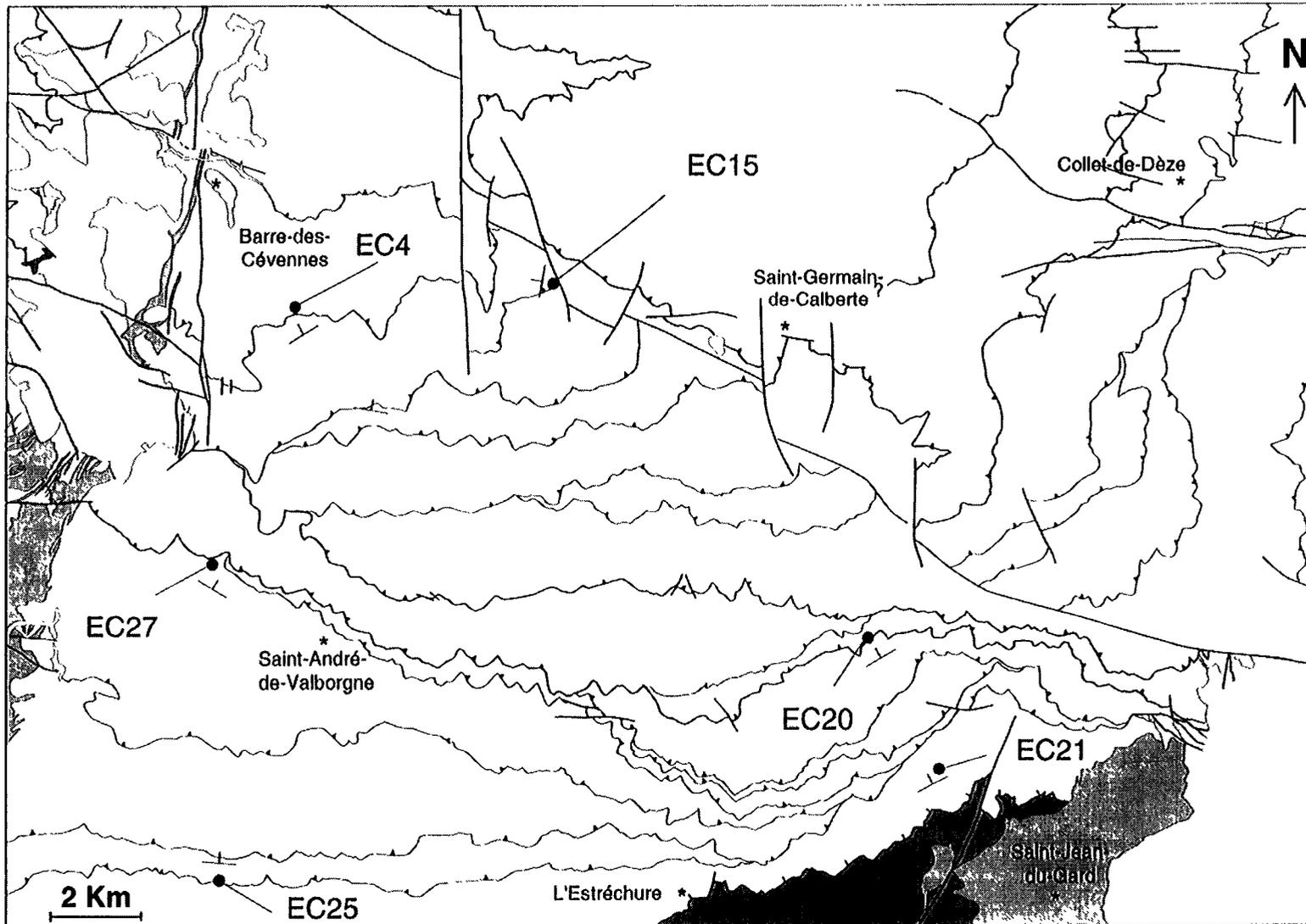


Figure V-24: Localisation des exsudats de quartz échantillonnés pour l'étude des inclusions fluides. L'orientation de la schistosité est notée pour chaque échantillon.

pélique où l'on distingue nettement deux schistosités: une S1 marquée par de la muscovite + quartz sous forme de microlithons et une S2 marquée par muscovite+quartz+albite+oxydes. Le contact de l'exsudat avec la matrice est souligné par de la chlorite et de la muscovite. Les oxydes sont altérés en anatase et entourés de chlorite tardive. Une première observation permet de mettre en évidence la présence de nombreuses inclusions fluides en amas dans l'albite et l'apatite et en plans secondaires dans le quartz.

## **2. 2. Description des différentes familles d'IF**

D'après le type d'IF, les orientations des plans, les mesures microthermométriques et les données Raman, différentes familles d'IF ont été identifiées (photo 38, fig. V-25 et tableau V-2). Les données microthermométriques sont également représentées sur des diagrammes de corrélation (fig. V. 26 et V. 27). Les différentes familles sont numérotées dans les figures selon la nomenclature qui suit.

### **2. 2. 1. Les IF primaires dans l'albite: 1-a (photo 39)**

Les albites contiennent une multitude d'IF, en amas, essentiellement concentrées au coeur du cristal. Leur forme est souvent ellipsoïdale mais peut être rectangulaire ou avec des contours plus ou moins anguleux. Leur taille est petite à moyenne (jusqu'à 10 $\mu$ m, exceptionnellement jusqu'à 20 $\mu$ m dans certaines lames). Elle apparaissent biphasées à température ambiante (phase aqueuse + phase carbonique) avec un degré de remplissage de la phase carbonique de 0,6 relativement constant dans toutes les inclusions de ce type. Au refroidissement, deux formations de solide sont observées, dont l'une (vers -100°C) correspond à une fine enveloppe granuleuse autour de la phase vapeur. Cette cristallisation correspond à une solidification d'une phase liquide carbonique qui ne s'observe pas au microscope à température ambiante à cause de son épaisseur inférieure à la résolution du microscope. Au réchauffement, elle correspond à la fusion du CO<sub>2</sub> qui s'effectue entre -59,7 et -60,4°C indiquant la présence de composés volatils autres que le CO<sub>2</sub> dans la phase carbonique. Lors du réchauffement, on observe une deuxième fusion entre 10,9 et 11,9°C correspondant à la fusion de clathrates. Par contre, les phases carbonique liquide et vapeur, n'étant pas discernables au microscope, aucune ThCO<sub>2</sub> n'a pu être observée. L'analyse de la phase volatile au Raman nous donne une composition de 64,4% de CO<sub>2</sub>, 29,7% de CH<sub>4</sub> et 5,9% de N<sub>2</sub>. Au chauffage elles s'homogénéisent totalement entre 315 et 353°C en phase vapeur.

### **2. 2. 2. Les IF primaires dans l'apatite: 1-b (photo 40)**

Les apatites contiennent des IF en amas, de taille très variable pouvant être assez importante (jusqu'à 20  $\mu$ m). Elles sont souvent en forme de cristaux négatifs et sont plus nombreuses au centre du cristal qu'à la périphérie, ce qui suggère une origine primaire. A température ambiante, elles apparaissent triphasées, avec une phase aqueuse en périphérie et une phase carbonique liquide entourant une phase carbonique vapeur. Elles contiennent parfois des solides dont la nature n'a pu être identifiée. La température de fusion du CO<sub>2</sub>

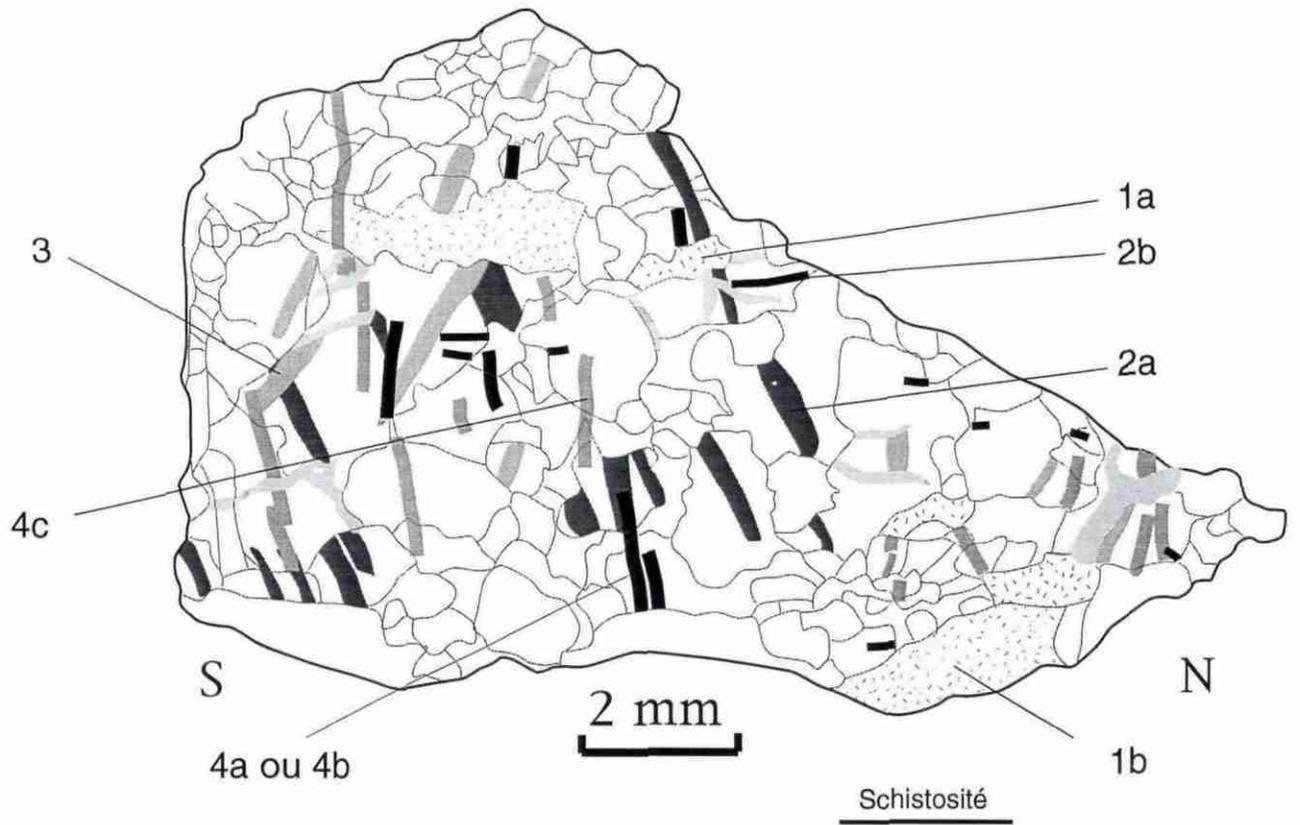


Figure V-25: Dessin illustrant les différentes familles d'IF: 1a, 1b, 2a, 2b, 3, 4a, 4b et 4c (lame EC15).

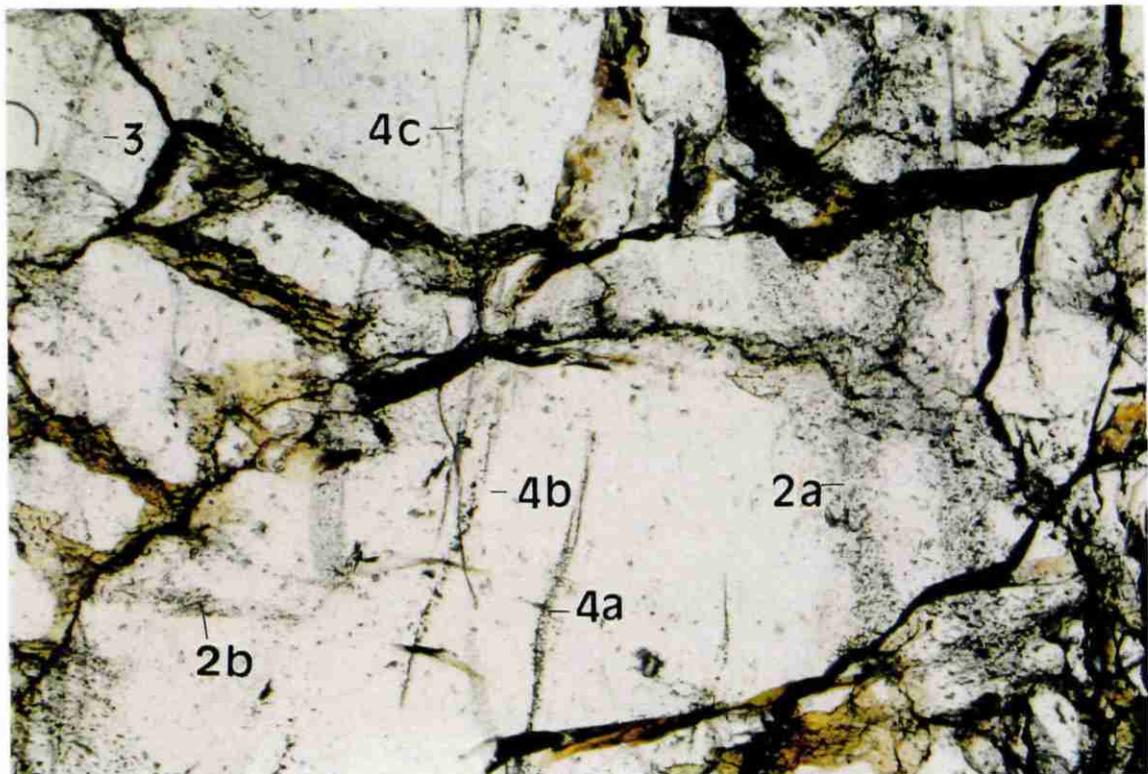


Photo 38: Les différents types de plans d'IF dans la lame EC15.

| Chronologie | type d'IF         | données microthermométriques |         |              |         |                |         |           |         |                     |         | données Raman |      |      |
|-------------|-------------------|------------------------------|---------|--------------|---------|----------------|---------|-----------|---------|---------------------|---------|---------------|------|------|
|             |                   | TfCO2 (range)                | nb d'IF | Tfcl (range) | nb d'IF | ThCar (range)  | nb d'IF | TfG       | nb d'IF | Thtot (range)       | nb d'IF | CO2           | CH4  | N2   |
| 1a          | lere dans albite  | -60.4/-59.7                  | 9       | 10.9/11.9    | 8       | -              | -       | -         | -       | 315-353.2 en V      | 7       | 64.4          | 29.7 | 5.9  |
| 1b          | lere dans apatite | -56.5/-57.4                  | 64      | 9.1/9.8      | 64      | 23.4-28.8 en L | 64      | -         | -       | 263-276 en C        | 7       | 100           | 0    | 0    |
| 2a          | Fcar=0.4          | -58.8/-57.8                  | 31      | 8.8/9.6      | 30      | 11.2-15.8 en V | 9       | -         | -       | 314.5-339 en L      | 6       | 77.9          | 2.4  | 19.7 |
|             |                   |                              |         |              |         | 13.3-16.1 en L | 9       | -         | -       | 350-354.5 en C ou V | 2       | 83.5          | 3.8  | 12.7 |
| 2a          | Fcar=0.6          | -58.8/-58                    | 22      | 8.4/9.3      | 22      | 17.8-19.9 en L | 22      | -         | -       | 360 en V            | 1       | 87.9          | 3.1  | 9    |
| 2a          | Fcar=0.8          | -58/-57.1                    | 48      | 7.6/8.9      | 43      | 18-22.7 en L   | 46      | -         | -       | 292.4-380 en V      | 11      | 92.1          | 2.2  | 7.2  |
| 2b          | ac parallèle      | -57.8/-57.7                  | 6       | 8.1/8.8      | 6       | 15.4-18.8 en L | 6       | -         | -       | 338 en V            | 1       | 90.6          | 2.2  | 7.2  |
| 3           | aqueuse perp S    | -                            | -       | -            | -       | -              | -       | -3.2/-0.1 | 35      | 140.1-334 en L      | 42      | -             | -    | -    |
| 4a          | CO2±N2±CH4        | -58.1/-57.6                  | 19      | 8.6          | 1       | 21.1-22.1 en V | 9       | -         | -       | -                   | -       | 89.6          | 2.6  | 7.8  |
| 4b          | N2-CH4±H2O        | -                            | -       | 8.4          | 1       | -125 en V      | 2       | -         | -       | 290.5 en V          | 1       | 6.2           | 28.7 | 65.1 |
| 4c          | H2O±N2-CH4        | -                            | -       | -            | -       | -              | -       | -3.8/-1.4 | 32      | 188.5-291 en L      | 38      | 0             | 25.5 | 74.5 |

-: transition de phases non observées ou IF non analysée

Tableau V-2: Tableau récapitulatif des données microthermométriques et des données Raman des différents types d'IF étudiées.

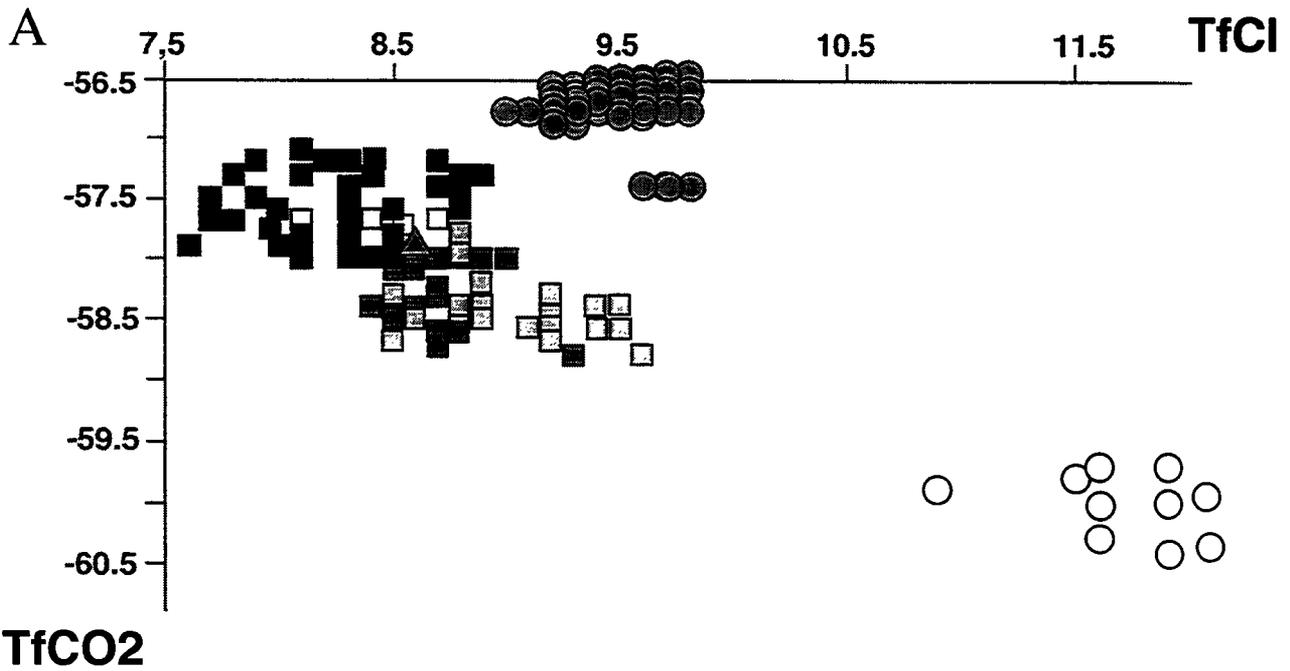


Figure V-26: Diagramme de corrélation TfCO2 en fonction de TfCl.

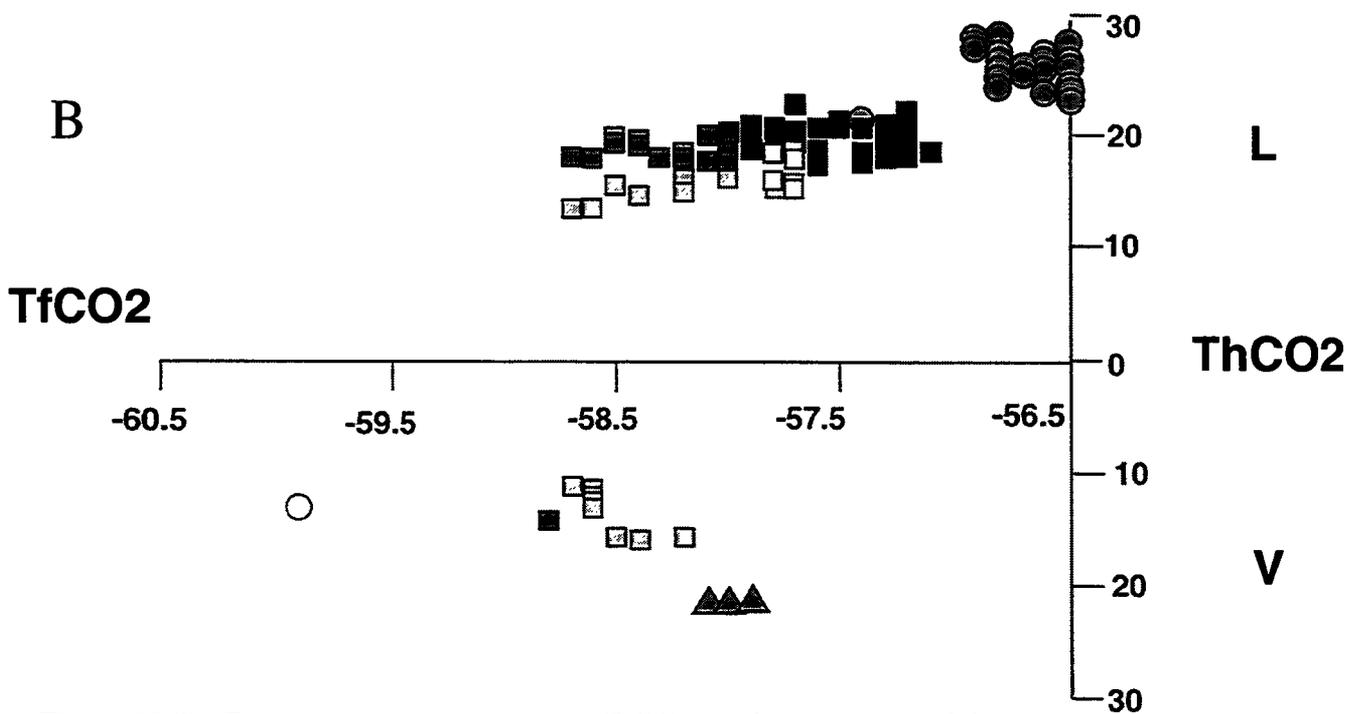


Figure V-27: Diagramme de corrélation ThCO2 en fonction de TfCO2.

- 1 ○ IF primaire dans albite à CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 1a  
 1 ● IF primaire dans apatite à CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 1b
- 2 □ plans d'IF à CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O±CH<sub>4</sub> sub-parallèles à S1 et L 2b  
 2 ▤ Fcar: 0.5  
 2 ■ Fcar: 0.6  
 2 ■ Fcar: 0.85 } 2a plans d'IF à CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O±CH<sub>4</sub> sub-perpendiculaires à S1 avec des orientations variables de L
- 4 ▲ CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>±CH<sub>4</sub>±H<sub>2</sub>O; Fcar: 0.95 4a  
 4 △ H<sub>2</sub>O±N<sub>2</sub>±CH<sub>4</sub> 4c  
 4 ▲ CH<sub>4</sub>-N<sub>2</sub>±H<sub>2</sub>O±CO<sub>2</sub> 4b } plans d'IF sub-perpendiculaires à S1 et à L

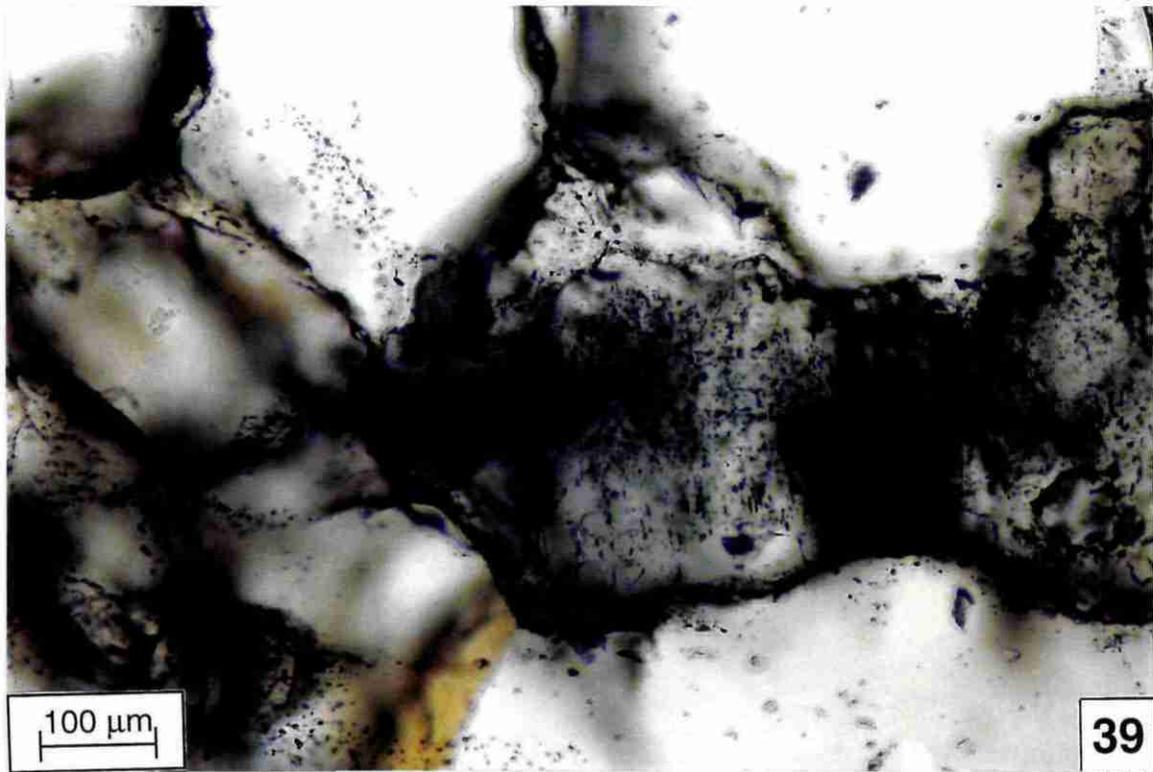


Photo 39: IF primaire en amas dans l'albite. On peut noter la concentration d'IF au centre du cristal par rapport à la périphérie (lame EC15).

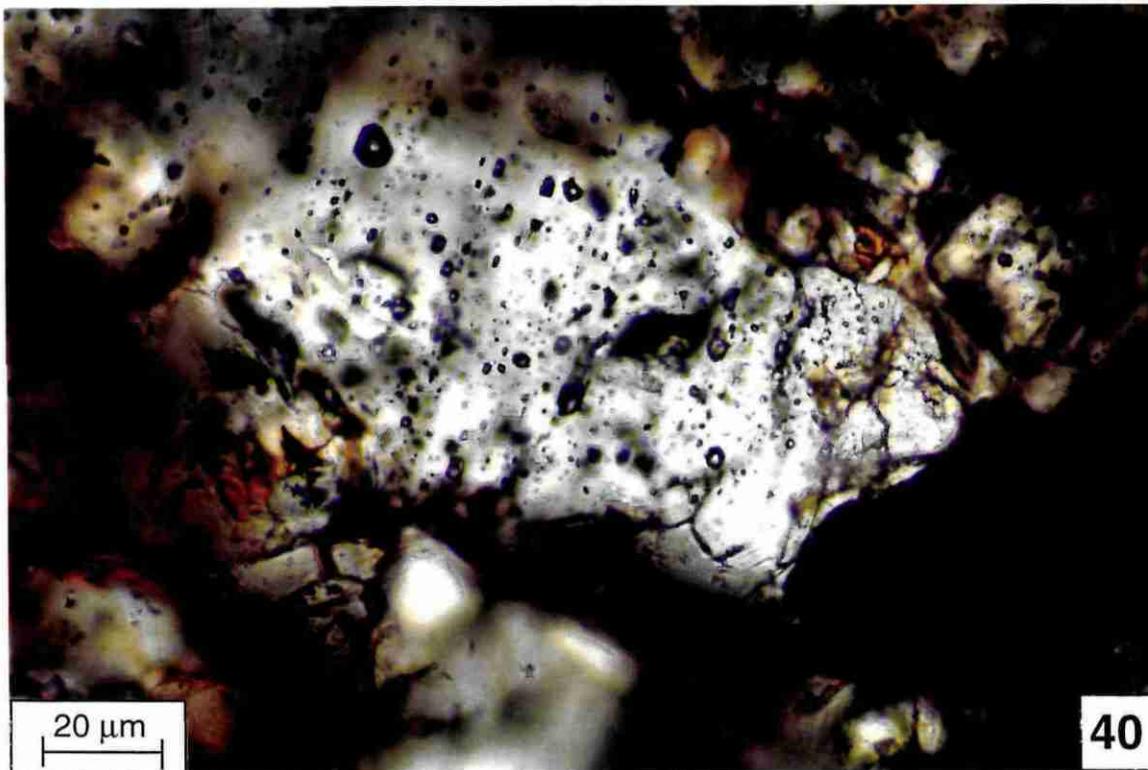


Photo 40: IF primaire en amas dans l'apatite. Alignement des IF selon des lignes cristallographiques perpendiculaires à l'allongement de l'apatite (lame EC15).

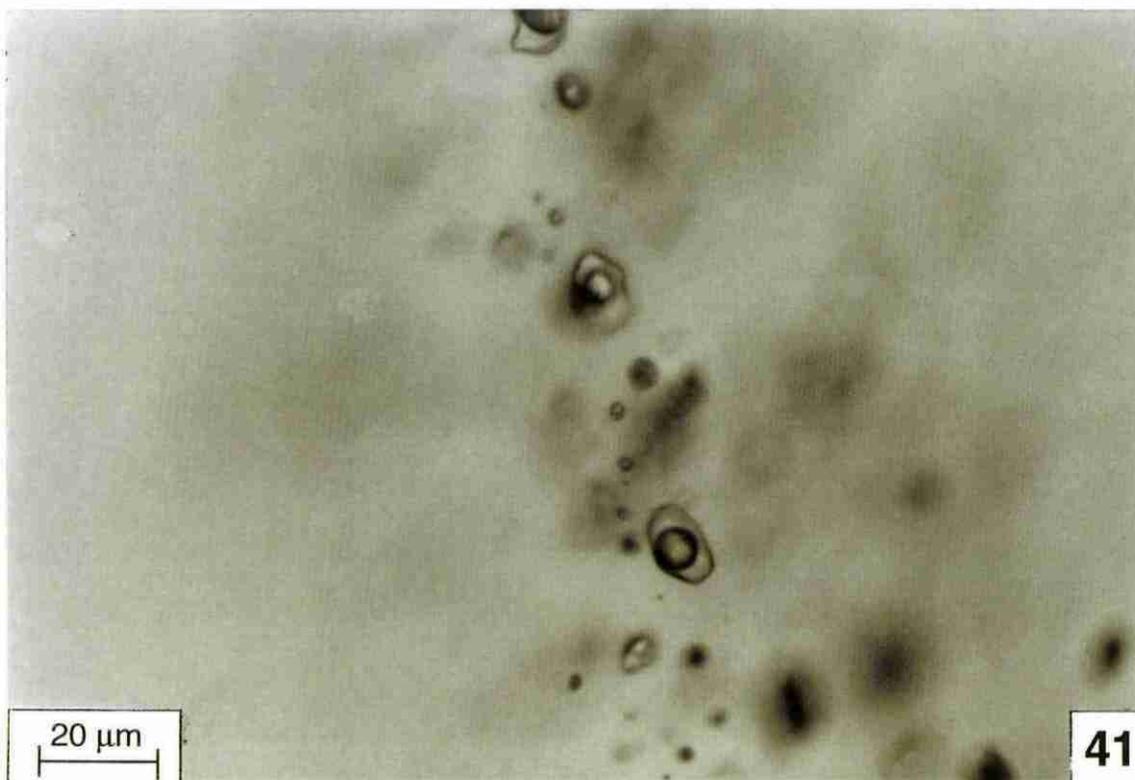


Photo 41 et 42: Plans d'IF aquo-carboniques d'orientation perpendiculaire à la schistosité et faisant un angle variable avec L1 et L2, présentant un  $F_{car}$  de 0,4 (photo 41) et de 0,8 (photo 42), (lame EC15).

s'effectue entre -56,5 et -56,9°C (mis à part deux mesures sur 64 à -57,4°C) suggérant la présence de CO<sub>2</sub> pur dans la phase carbonique, confirmée par les analyses Raman sur deux IF dans deux apatites différentes. La TfCl s'effectue en présence d'une phase carbonique liquide, d'une phase carbonique vapeur et de la phase aqueuse entre 9,1 et 9,8°C. Le degré de remplissage de la phase carbonique est estimé entre 0,4 et 0,5 et les ThCO<sub>2</sub> s'effectuent entre 23,4 et 28,8°C toujours en phase liquide avec de légères variations d'un cristal à l'autre. Par contre aucune corrélation n'est observée entre la ThCO<sub>2</sub> et la position de l'inclusion fluide au sein du cristal. Les Thtot s'effectuent entre 263 et 276°C en phase critique pour quelques unes d'entre elles qui ne décrépitent pas. En effet, la plupart d'entre elles décrépitent à partir de 230°C, certaines dès 145°C.

### **2. 2. 3. Les plans d'IF aquo-carbonique, sub-perpendiculaires à la schistosité et à angles variables avec la linéation: 2a (photos 41 et 42)**

Dans l'exsudat étudié, ces plans ont une orientation fortement oblique par rapport à la schistosité et des orientations variables par rapport à la linéation d'étirement. Certains sont perpendiculaires à la schistosité. Ils sont très nombreux et presque toujours intragranulaires. Ils se caractérisent par les IF qui apparaissent biphasées à température ambiante (une bulle carbonique sombre entourée d'une phase aqueuse translucide) avec des Fcar très variables selon les plans: entre 0,4 (photo 41) et 0,8 (photo 42). Par contre au sein d'un même plan, les IF ont toutes des Fcar identiques. Leur particularité est différente selon les types de plans: les plans présentant des IF à faible Fcar (0,5 à 0,6) ont des géométries diverses et parfois irrégulières, ceux présentant des Fcar importants (0,85) ont des IF aux formes plus simples, rondes, ellipsoïdales ou en forme de cristaux négatifs (comparer photo 41 et 42). Certains de ces plans possèdent des IF en forme des cristaux négatifs toutes allongées selon une direction identique. On peut remarquer que les plans perpendiculaires à la schistosité sont tous composés d'IF à fort remplissage carbonique. La taille des IF est assez variable, les plus petites sont rondes et font 4 µm de diamètre, mais la présence de grosses IF de 10 à 20 µm n'est pas rare. Plusieurs plans ont été étudiés pour chaque catégorie de Fcar. Dans chaque plan, un maximum d'IF (entre 10 à 20) a été mesuré en microthermométrie afin de vérifier la constance des mesures au sein d'un même plan. Dans toutes les catégories de Fcar confondues, les TfCO<sub>2</sub> s'échelonnent entre -58,8 et -57,1°C et les TfCl se font entre 7,6 et 9,6°C. Pour les ThCO<sub>2</sub> on distingue des différences selon les plans et les Fcar. Pour les Fcar de 0,4, deux plans ont été étudiés, l'un présente une ThCO<sub>2</sub> entre 11,2 et 15,8°C en phase vapeur, l'autre entre 13,3 et 16,1°C en phase liquide excepté pour deux IF qui homogénéisent en phase vapeur. Pour les autres catégories de Fcar les ThCO<sub>2</sub> s'effectuent entre 17,8 et 22,7°C en phase liquide. Pour chaque catégorie de Fcar, une IF présentant des valeurs microthermométriques moyennes a été analysée au Raman. Ces IF présentent des compositions de phase volatile très proches (voir tableau V-2). Les TfCO<sub>2</sub> et TfCl sont très constantes au sein de chaque plan, ainsi que pour les plans présentant le même Fcar et varient légèrement pour les IF appartenant à des plans de Fcar différents (fig. V-26). Les Thtot s'effectuent entre 315 et 360°C en phase liquide, critique ou vapeur selon les IF. La plupart des IF décrépitent avant l'homogénéisation totale.

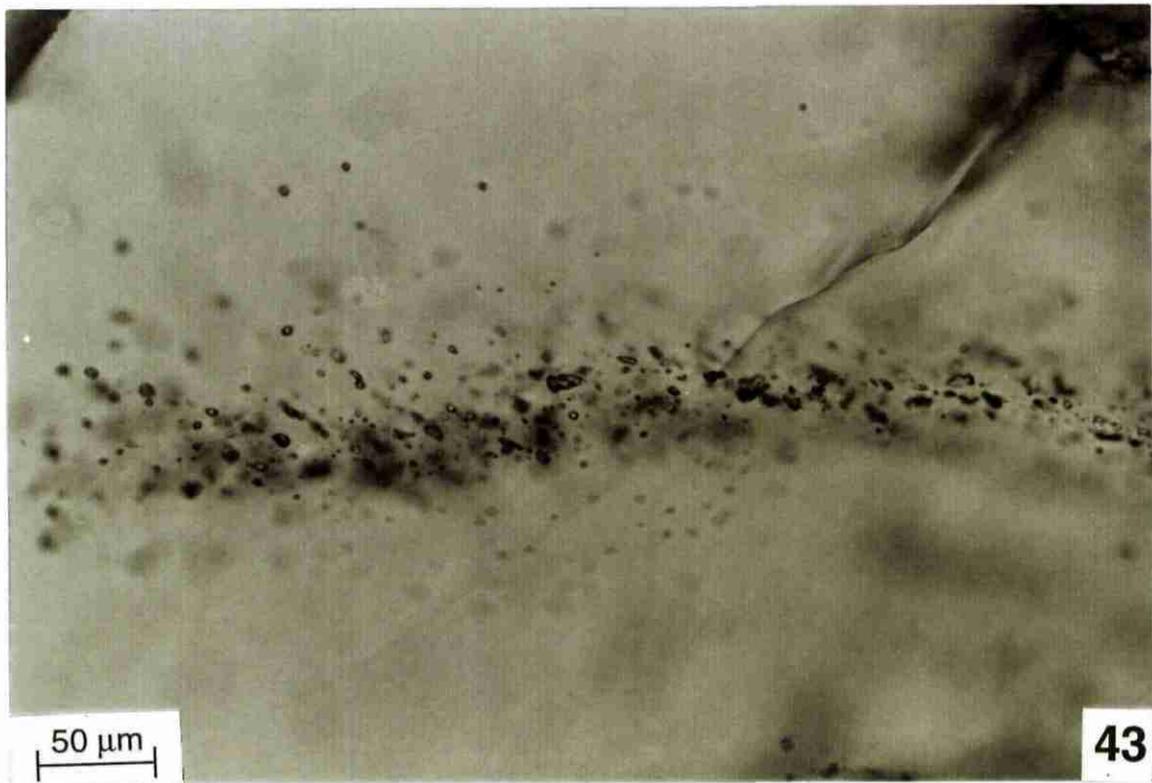


Photo 43: Plan d'IF aquo-carbonique parallèle à la schistosité (lame EC15).

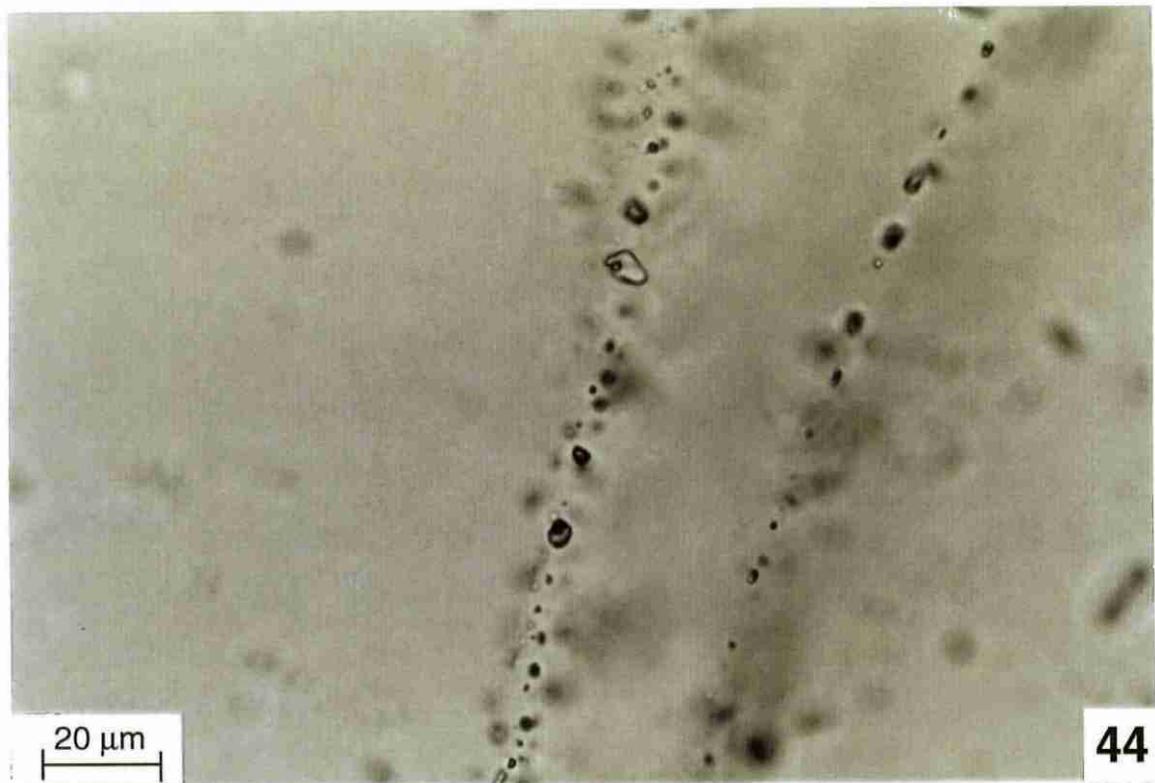


Photo 44: Plan d'IF aqueuse d'orientation perpendiculaire à la schistosité et faisant un angle variable avec L1 et L2 (Lame EC15).

**2. 2. 4. Les plans d'IF aquo-carbonique, parallèles à la schistosité: 2b (photo 43)**

Ces plans sont intragranulaires, souvent assez courts, de forme souvent courbe et de direction parallèle à la schistosité et moyennement penté. Ils sont composés d'IF aquo-carboniques, biphasées à température ambiante, caractérisées par leur forme très irrégulière et leur taille variable (de 2 à 14  $\mu\text{m}$ ). Certaines grandes inclusions présentent des diverticules avec des signes de "necking-down" et sont parfois entourées de nombreuses et minuscules IF qui apparaissent monophasées suggérant des textures de décrépitation. Le  $F_{\text{car}}$  varie selon les plans mais se trouve souvent autour de 0,6. Un seul plan de ce type où certaines IF ne présentaient pas de textures particulières et étaient mesurables a été étudié. Les cinq IF mesurées présentent des valeurs microthermométriques proches de celles des plans présentés au paragraphe précédent ( $T_{\text{fCO}_2}$  à  $-57,7^\circ\text{C}$  et  $-57,8^\circ\text{C}$ ;  $T_{\text{fCl}}$  entre  $8,1$  et  $8,8^\circ\text{C}$  et  $T_{\text{hCO}_2}$  de  $15,4$  à  $18,8^\circ\text{C}$  en phase liquide, une seule  $T_{\text{htot}}$  a pu être mesurée à  $338^\circ\text{C}$  en phase vapeur). De même, une inclusion a été analysée au Raman et présente une composition de la phase volatile identique de celles décrites dans le paragraphe 2.2.3. (famille 2a).

**2. 2. 5. Des plans d'IF aqueuses, perpendiculaires à la schistosité et à angles variables avec la linéation: 3 (photo 44)**

Ces plans sont souvent intragranulaires, assez obliques (+ de  $70^\circ$ ) à la schistosité et moyennement pentés. Ils sont composés d'une multitude d'IF, de taille généralement très petite (généralement inférieure à 4  $\mu\text{m}$ ) et de forme ovoïde. Dans les plus grosses (jusqu'à 10  $\mu\text{m}$  environ), il est possible d'observer deux phases à température ambiante, une phase liquide entourant une phase vapeur très mobile. En microthermométrie, au refroidissement, la phase aqueuse se solidifie vers  $-40^\circ\text{C}$  pour former de la glace qui fondra au réchauffement entre  $-3,2$  et  $-0,1^\circ\text{C}$ . La  $T_{\text{fG}}$  relativement constante au sein d'un même plan, présente quelques variations d'un plan à l'autre (fig. V-28). Au chauffage, les  $T_{\text{htot}}$  se font entre  $176$  et  $334^\circ\text{C}$  en phase liquide avec des valeurs autour de  $225^\circ\text{C}$  dans deux plans, sans beaucoup de variations d'une IF à l'autre, et de grands écarts de température dans d'autres plans.

**2. 2. 6. Les plans d'IF aquo-carbonique perpendiculaires à la schistosité et à la linéation: 4 (photo 45)**

Ces plans sont, dans la plupart des cas, longs, intergranulaires et contiennent des IF de différents types:

- 4a - Des plans à IF sombres, de formes et de tailles variables (jusqu'à 15  $\mu\text{m}$ ). Un seul plan a été étudié dans cette lame (photo 45). A température ambiante, on distingue deux phases. En microthermométrie, la phase externe se solidifie et fond au réchauffement entre  $-58,1$  et  $-57,6^\circ\text{C}$ . Les deux phases homogénéisent entre  $21,1$  et  $22,1^\circ\text{C}$  en phase

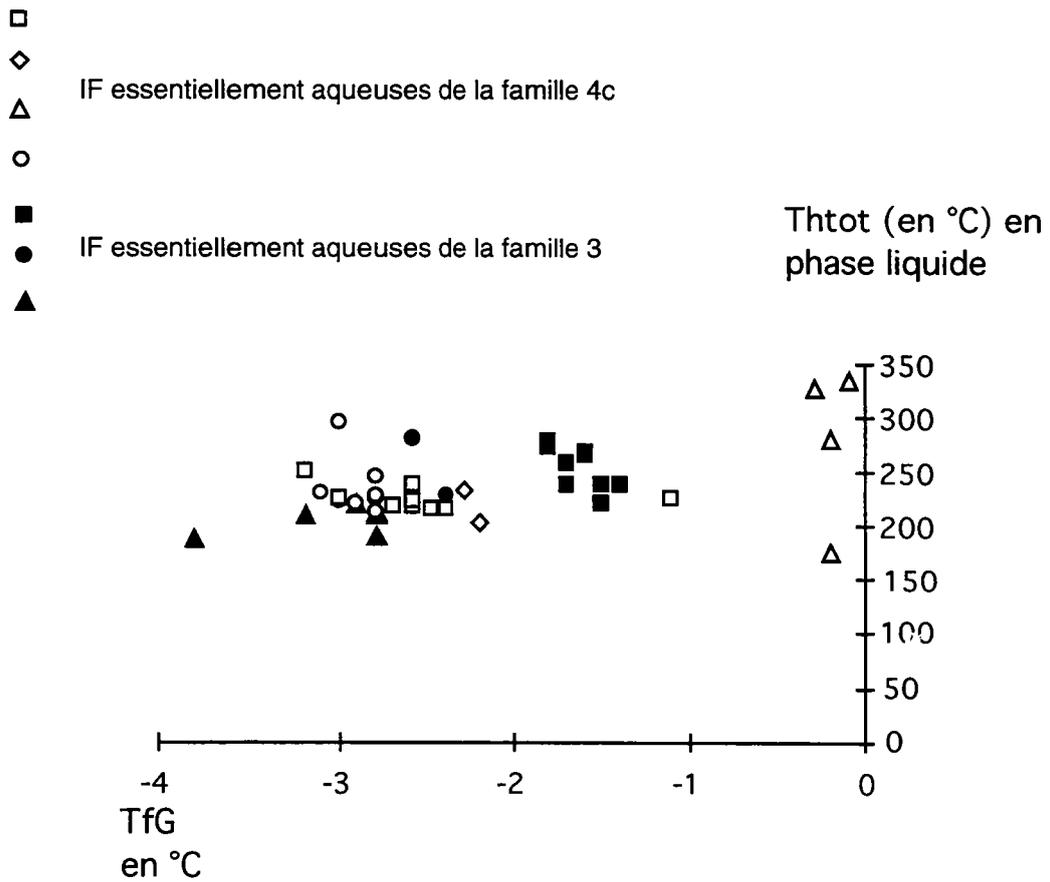


Figure V-28: Diagramme de corrélation de la Tfg en fonction de ThTOT pour les familles d'IF essentiellement aqueuses. Chaque symbole indique un plan d'IF différent dans la lame EC15.

vapeur. Ces caractéristiques indiquent que les deux phases observées sont une phase carbonique liquide et une phase carbonique vapeur. Dans quelques IF aux formes irrégulières, il est possible d'observer un diverticule clair correspondant à une phase aqueuse, indiquant un  $F_{car}$  d'au moins 0,95. Une mesure de  $T_{fCl}$  a pu être effectuée sur l'une d'entre elle et indique  $8,6^{\circ}C$ . Cependant, en raison de la faible proportion d' $H_2O$ , aucune  $T_{htot}$  n'a pu être observée. La composition de la phase volatile est proche de celle des IF aquo-carboniques présentées pour la famille 2 ( $CO_2 \pm N_2 \pm CH_4$ ). A coté de ce plan, mais ne lui appartenant pas, on observe une IF de taille importante ( $30\mu m$  environ) composée à plus de 95% d'une phase sombre et présentant un petit diverticule rempli d'une phase claire probablement aqueuse. En microthermométrie, la phase sombre se démixe à basse température et s'homogénéise à  $-125^{\circ}C$  en phase vapeur. Au chauffage, elle homogénéise entièrement à  $290^{\circ}C$  en phase vapeur juste avant de décrépiter. Ces caractéristiques suggèrent une composition à  $CH_4-N_2$ , confirmée par l'analyse Raman qui détecte ces deux composants dans des proportions de 28,7% et 65,1% respectivement avec 6,2% de  $CO_2$ . Cette inclusion isolée présente des caractéristiques microthermométriques et Raman identiques aux IF observées dans les plans que nous allons décrire dans le paragraphe suivant.

- 4b - des plans à IF très sombres, de tailles variables (de  $4\mu m$  à  $24\mu m$ ) et de formes très irrégulières, parfois triangulaires, toujours avec des contours anguleux. Elles apparaissent monophasées à température ambiante, mis à part quelques IF aux formes particulières qui permettent de détecter une phase aqueuse très faible (5% maximum). Au microscope optique, ces plans peuvent être facilement confondus avec les plans décrits précédemment. Cependant, en microthermométrie la plupart des IF ne réagissent pas, ce qui pourrait laisser penser en premier abord qu'elles sont décrépitées. Cette hypothèse a été contredite par l'analyse Raman effectuée dans l'une d'entre elles et qui met en évidence 64% de  $N_2$ , 29,7% de  $CH_4$  et 6,3% de  $CO_2$ . Une seule IF a réagi en microthermométrie, présentant une démixion à basse température et une homogénéisation à  $-125^{\circ}C$ . En absence d'observation de la phase aqueuse, aucune  $T_{htot}$  n'a pu être déterminée.
- 4c - des plans à IF biphasées à température ambiante comprenant une phase externe translucide probablement aqueuse et une bulle vapeur représentant environ 25% du volume de l'inclusion (photo 45). La morphologie et la taille des IF sont très variables. Les IF de grandes tailles (jusqu'à  $15\mu m$ ) présentent des formes irrégulières aux contours anguleux, alors que les IF de petites tailles (souvent inférieures à  $4\mu m$ ) sont rondes. En microthermométrie, on n'observe qu'une cristallisation de la phase externe vers  $-40^{\circ}C$  qui fond au réchauffement entre  $-3,8$  et  $-1,4^{\circ}C$  selon les plans. Cette fusion correspond à une fusion de glace. Dans un plan, deux IF de grandes tailles présentent une granulation très nette à  $-29^{\circ}C$  pouvant correspondre à l'eutectique de la phase aqueuse. Au chauffage, ces IF homogénéisent entre  $188,5^{\circ}C$  et  $291^{\circ}C$  en phase liquide selon les plans. Les  $T_{htot}$  sont très variables dans un même plan. Ces divergences peuvent s'expliquer par des phénomènes de décrépitation naturelle comme le montre la photo 45. Dans un plan chauffé jusqu'à  $290^{\circ}C$  pour

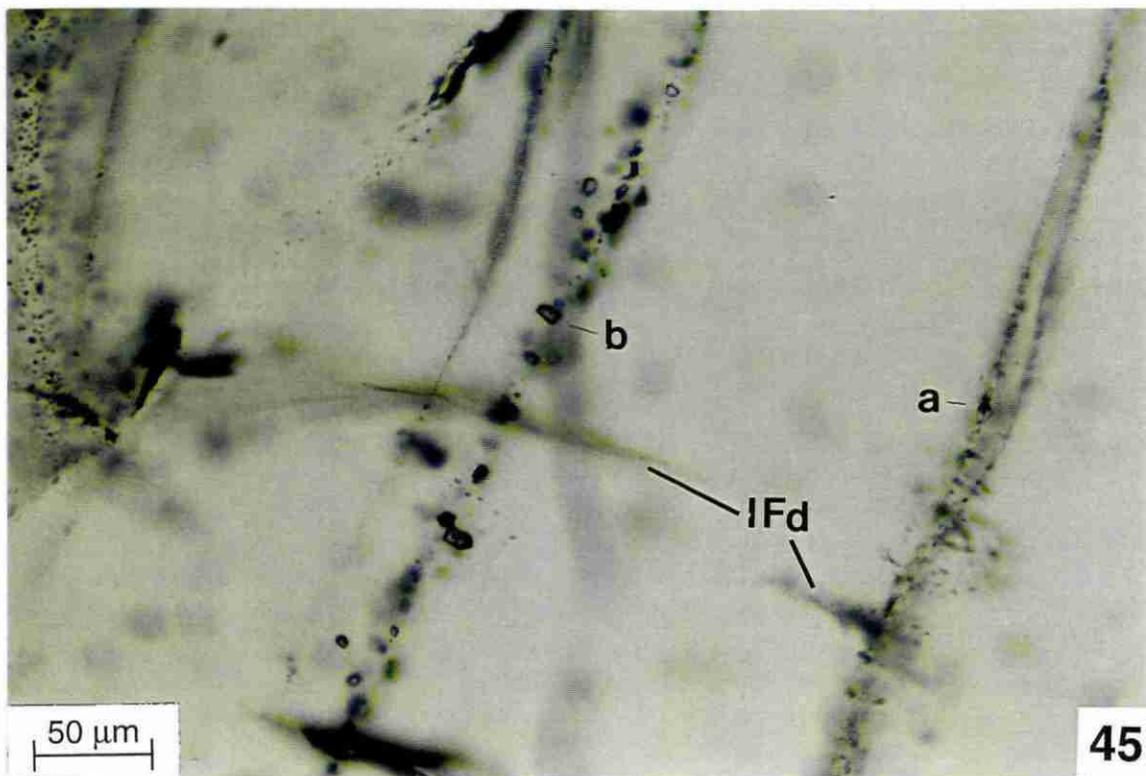


Photo 45: Plans d'IF tardifs perpendiculaires à la schistosité et à la linéation d'étirement composés pour certains d'IF aqueuses avec une phase volatile à  $N_2$  et  $CH_4$  (a) et d'autres d'une phase essentiellement volatile à  $CO_2 \pm N_2 \pm CH_4 \pm H_2O$  ou  $N_2-CH_4 \pm H_2O$  (sur cette photo (b)) (lame EC15). A noter la présence de plans dûs à la décrépitation des IF (IFd).

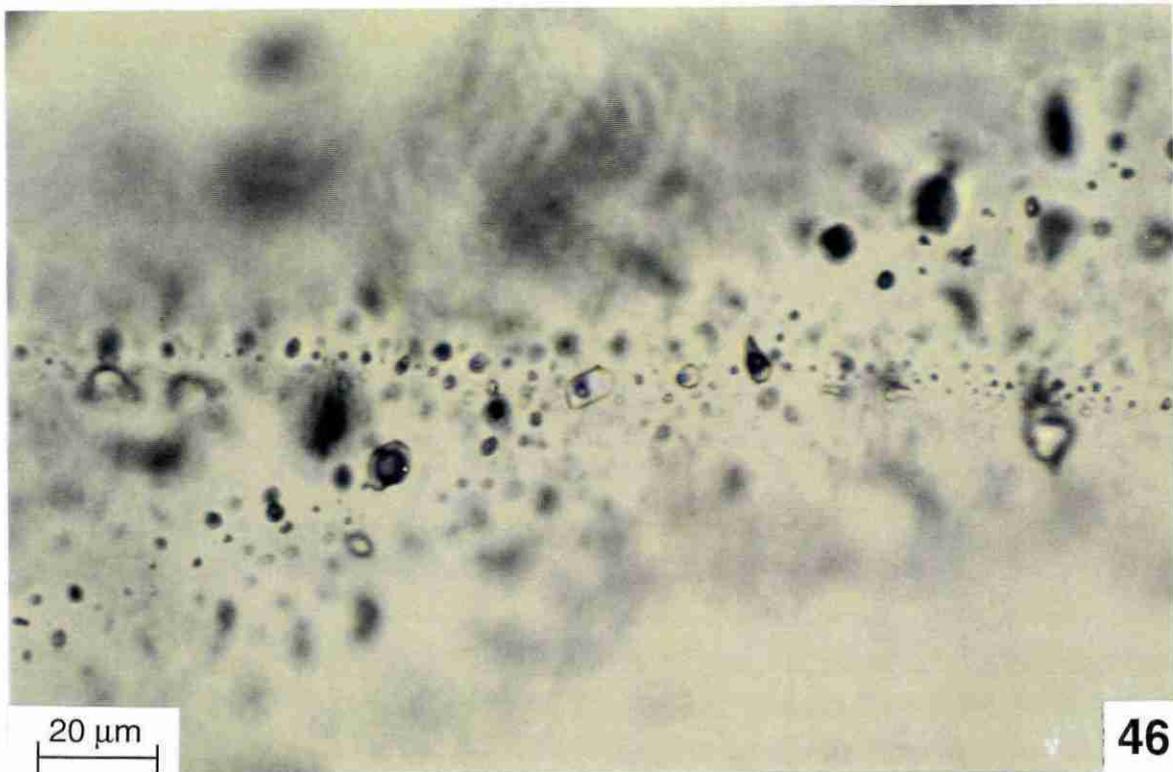


Photo 46: Intersection entre un plan d'IF aquo-carboniques et un plan d'IF aqueuses. On peut noter une diminution de la phase vapeur dans les IF aquo-carboniques à l'intersection des deux plans indiquant l'antériorité des plans d'IF d'aquo-carboniques par rapport aux aqueuses (lame EC15).

l'observation d'une autre famille proche, toutes les inclusions ont été trouvées décrépitées. Dans un autre plan, deux Td ont été observées à 237,2°C et 234,2°C pour deux IF proches l'une de l'autre et de grande taille. L'analyse Raman de la phase vapeur de ces IF met en évidence 74,5% de N<sub>2</sub> et 25,5% de CH<sub>4</sub>.

### **2. 3. Chronologie des différents types d'inclusion fluides**

Les IF primaires sont contemporaines de la cristallisation du minéral hôte et donc de l'exsudat. L'apatite et l'albite contiennent toutes les deux des IF primaires de composition et de densité différentes correspondant aux fluides précoces qui ont circulé lors de la formation de l'exsudat. L'observation texturale ne permet pas de déduire l'ordre de cristallisation entre les deux minéraux.

Dans les plans d'IF intragranulaires, on observe des plans d'IF aqueuses (famille 3) et des plans d'IF aquo-carboniques (famille 2a et 2b). A l'intersection de ces deux plans, les IF aquo-carboniques, de taille plus importante que les aqueuses, voient leur F<sub>car</sub> diminuer (photo 46). Cette observation indique que les IF aquo-carboniques ont été réouvertes et réemplies par un fluide aqueux qui a circulé postérieurement. On observe également de tels critères à l'intersection des plans intragranulaires aquo-carboniques (famille 2a et 2b) et des plans intergranulaires d'aqueuses (famille 4c). Ces critères indiquent que le piégeage des IF aquo-carboniques est antérieur au piégeage des IF aqueuses.

Les plans de la quatrième famille ont tous des orientations similaires et aucune intersection n'a pu être observée. Ainsi aucune chronologie n'a pu être clairement établie. Cependant leur caractère intergranulaire qui recoupe toutes les structures antérieures (joint de grains, fractures) suggère que ce sont les fluides les plus tardifs.

En résumé nous pouvons décrire la chronologie suivante: les IF primaires dans l'albite et l'apatite (1a et 1b), les plans intragranulaires d'IF aquo-carboniques (2a et 2b), les plans intragranulaires d'IF aqueuses (3) et les plans intergranulaires d'IF perpendiculaires à la schistosité et à la linéation (4a, 4b et 4c).

### **2. 4. Analyse tridimensionnelle des plans d'IF**

Les différents types d'IF ont été analysés d'après la méthode d'analyse d'image décrite en annexe 2. Cependant une erreur dans le programme ne permet pas de présenter les diagrammes stéréographiques quantitatifs et seules des indications qualitatives peuvent être déduites actuellement. Les plans d'IF les plus tardifs (famille 4) présentent tous des orientations identiques sub-perpendiculaires à la schistosité, quelle que soit l'orientation actuelle de cette schistosité. Mis à part les quelques plans d'IF parallèles à l'exsudat et à la schistosité, tous les autres types de plan sont sub-perpendiculaires à la schistosité avec des orientations variables par rapport à la linéation. Dans tous les exsudats étudiés, les plans intragranulaires aquo-carboniques ou aqueux, les plus précoces, font des angles peu importants avec la linéation d'étirement (environ 30°). Pour les plans intergranulaires les

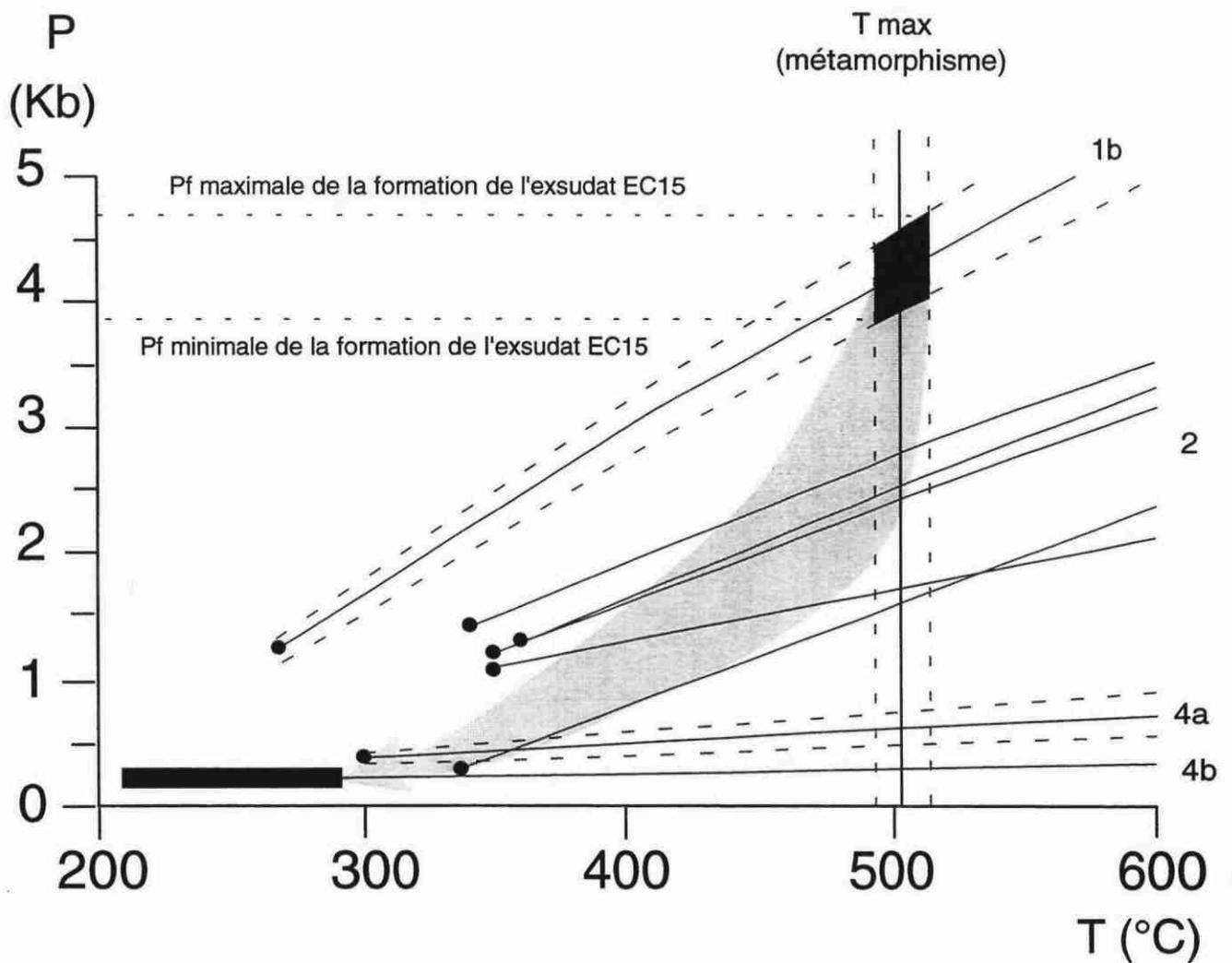
plus tardifs, leur direction est sub-perpendiculaire à la schistosité et à l'exsudat ainsi qu'à la linéation d'étirement. Ces caractéristiques se retrouvent à l'échelle régionale indiquant que la formation des plans d'IF est liée à une contrainte tectonique (plans de microfractures de mode I). De telles orientations sont compatibles avec un  $\sigma_3$  sub-parallèle à la schistosité et donc proche de l'horizontale.

## **2. 5. Détermination des propriétés V-X des différents types d'IF, calcul des isochores**

Les densités et compositions totales des IF ont été déterminées différemment selon le système auquel elles appartiennent et leurs caractéristiques microthermométriques (voir annexe 2, 1ère partie, paragraphe e).

Pour les IF à  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}\pm\text{NaCl}$  (famille 1b), les densités des phases volatiles ont été calculées à partir des équations de Parry (1986) établies d'après les données d'Angus et al. (1976) et la salinité de la phase aqueuse a été estimée d'après le diagramme de Bozzo et al. (1975). Pour les IF essentiellement aquo-carboniques à  $\text{N}_2$  et  $\text{CH}_4$  (famille 2 et 4a), les densités des phases volatiles ont été calculées à partir de l'équation d'état de Peng-Robinson (1976) grâce au programme EQUI-PHASE EQUI 90, Version 1.54 disponible chez D. B. Robinson Research Ltd., Edmonton, Alberta, Canada. La salinité de la phase aqueuse a été calculée selon la méthode décrite par Diamond (1994b). Par contre les densités de la phase volatile des IF primaires dans l'albite n'ont pas été déterminées car aucune température d'homogénéisation du  $\text{CO}_2$  n'a été observée; ainsi aucune composition, densité totale et isochores n'ont été calculés pour cette famille d'IF. Pour les IF aqueuses de la famille 3, la salinité a été calculée à partir de l'équation de Potter et al. (1978) et les densités à partir de celles de Zhang et Frantz (1987). Pour les IF à importante phase volatile à  $\text{N}_2\text{-CH}_4\pm\text{CO}_2$  (famille 4b) les homogénéisations en phase vapeur ont permis de déterminer la densité de la phase volatile à partir des diagrammes de Thiéry et al., (1994). Par contre, pour les IF aqueuses à  $\text{N}_2\text{-CH}_4$  aucune démixion de la phase volatile n'a été observée et leur densité n'a donc pas pu être déterminée.

Connaissant la composition et la densité totale de l'IF (tableau V-3), les isochores ont pu être calculées. Les équations d'état de Bowers et Helgeson (1983), informatisées par Dubois (1992) ont été utilisées pour le calcul des isochores des IF aquo-carboniques de la famille 1b, 2, 4a. L'équation d'état d'après Zhang et Frantz (1987), informatisée par Dubois (1992), a été utilisée pour le calcul des isochores des IF aqueuses de la famille 3. Pour les IF à forte proportion de  $\text{N}_2\text{-CH}_4\pm\text{CO}_2$  (famille 4b), l'équation de mélange d'Holloway (1977) a été utilisée avec l'utilisation du logiciel Flincor (Brown et Hagemann, 1995). Les densités des IF des familles 1a et 4c n'ayant pas été déterminées, aucune isochoire n'a pu être calculée. Les isochores ont été calculées puis tracées pour l'IF analysée au Raman, choisie pour ces valeurs microthermométriques moyennes de la famille d'IF étudiée (fig. V-29).



● Th<sub>tot</sub>

Conditions du métamorphisme: T:  $506 \pm 12$  °C

P:  $5,2 \pm 0,8$  Kb

Figure V-29: Isochores des différentes familles d'IF pour l'exsudat EC15. Le chemin PT probable est représenté par la zone en grisé (voir discussion dans texte). Les chiffres 1b, 2, 4a et 4b représentent la famille d'IF selon la nomenclature dans le texte.

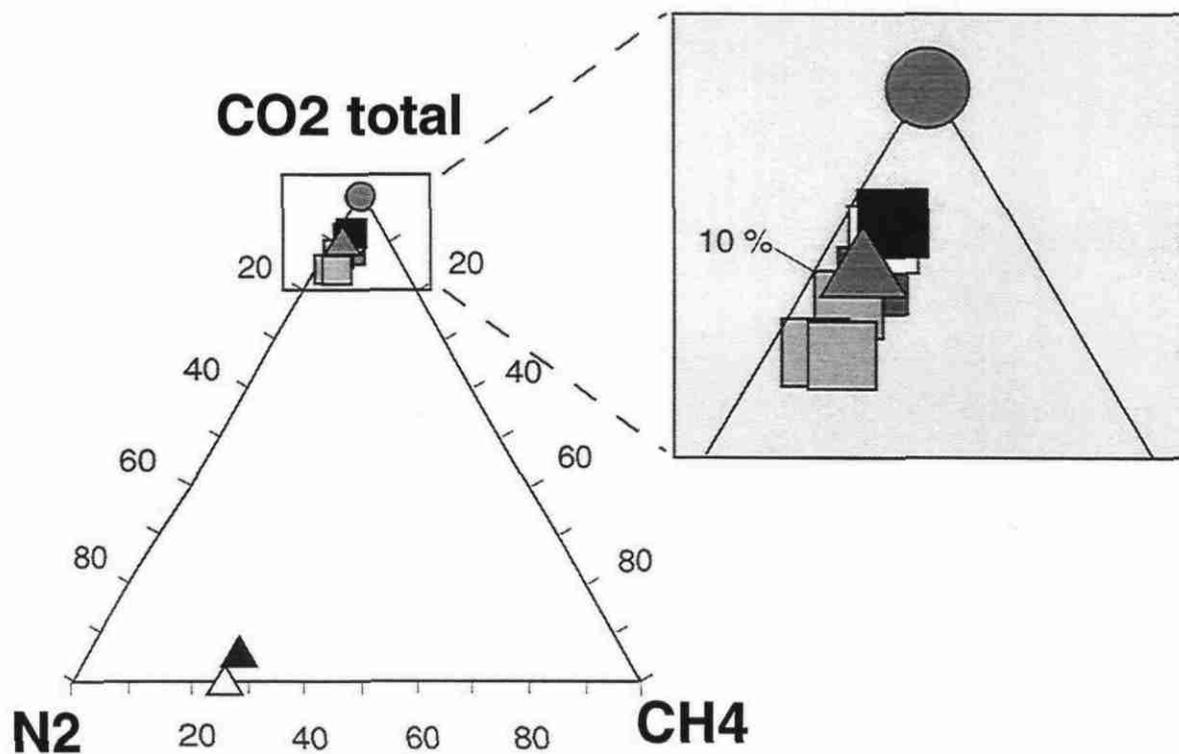
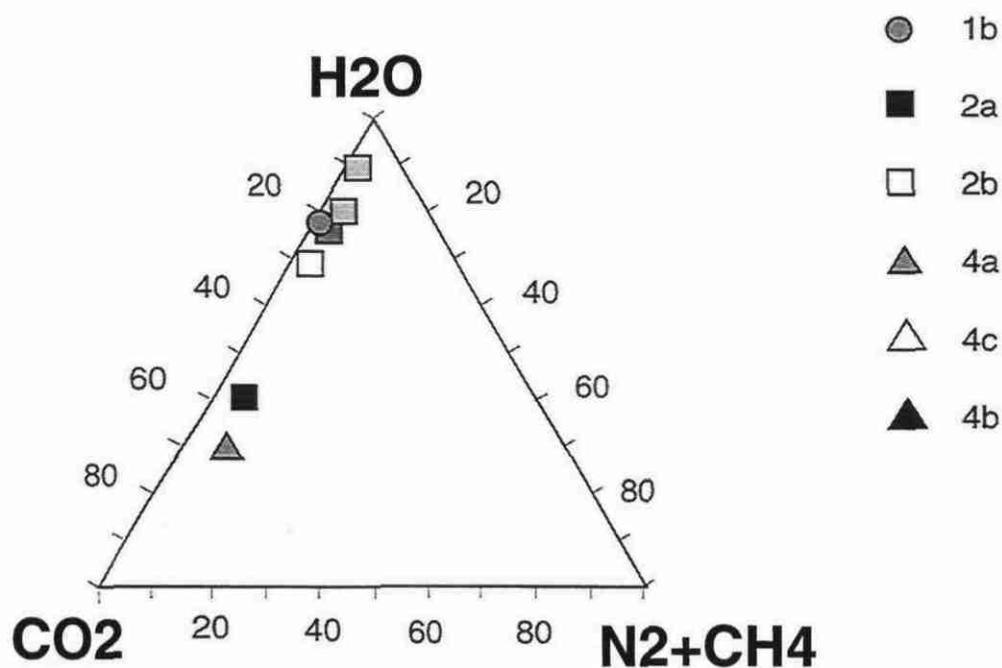
**A****B**

Figure V-30: Composition de la phase volatile dans un diagramme CO<sub>2</sub> total-N<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> (A) et de la composition totale dans un diagramme H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub> (B) pour les différentes familles d'IFde la lame EC15. La légende des symboles est identique à celle utilisée dans les figures V-26 et V-27.

## 2. 6. Évolution de la composition et de la densité dans les IF

### 2. 6. 1. Description

Les compositions et densités totales des IF sont indiquées dans le tableau V-3. Les compositions des phases volatiles, déterminées en spectrométrie Raman pour ces différentes familles d'IF, ont été reportées sur un diagramme CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> en considérant la teneur de CO<sub>2</sub> total dans les IF (CO<sub>2</sub> de la phase volatile plus la teneur de CO<sub>2</sub> dissous dans l'eau) (fig. V-30B). La salinité étant négligeable (voir tableau V-3), les compositions totales des différentes familles d'IF ont été reportées sur un diagramme H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>±CH<sub>4</sub> (fig. V-30b).

Les données microthermométriques ont été reportées dans des diagrammes de corrélation TfCO<sub>2</sub> en fonction de TfCl (fig V-26) et ThCO<sub>2</sub> en fonction de TfCO<sub>2</sub> (fig. V-27) afin de mettre en évidence d'éventuelles informations sur l'évolution de la composition et/ou de la densité des fluides.

L'ensemble de ces diagrammes met en évidence une évolution de la composition et de la densité des fluides ayant circulé dans l'exsudat:

- Les IF primaires dans l'apatite ont une composition de la phase volatile à CO<sub>2</sub> pur et les faibles valeurs de TfCl indiquent des salinités faibles de la phase aqueuse. Les densités sont relativement élevées par rapport aux IF des autres familles. Les IF primaires dans l'albite ont une phase volatile riche en CO<sub>2</sub> mais aussi en CH<sub>4</sub> et contient également une faible proportion de N<sub>2</sub>. La densité de l'IF n'a pu être déterminée cependant la présence d'une enveloppe de CO<sub>2</sub> liquide entourant une bulle vapeur indiscernable au microscope permet d'estimer une densité maximale de 0,45 ce qui indique une très faible densité de ces inclusions. Ces IF forment un groupe à part dans le diagramme TfCl-TfCO<sub>2</sub> qui peut s'expliquer par leur composition et/ou leur densité particulières par rapport aux autres familles d'IF.
- Les IF secondaires à H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>±CH<sub>4</sub>±NaCl (famille 2 et 4a) présentent une évolution de leur composition totale qui généralement diminue en H<sub>2</sub>O et augmente en CO<sub>2</sub> et N<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub> au cours de la décompression et donc au cours du temps. Parallèlement leur densité totale diminue au cours du temps. Cette évolution se traduit par une corrélation négative entre les IF à Fcar à 0,85 et les IF à Fcar à 0,5 dans le diagramme TfCO<sub>2</sub>-TfCl (fig. V-26).
- Les IF secondaires plus tardives appartiennent au système H<sub>2</sub>O-NaCl, la salinité de la phase aqueuse est très faible (entre 1,5 et 5 wt% NaCl, Potter et al., 1978) et la densité des inclusions est proche de 0,87 (Th<sub>tot</sub> entre 200 et 300°C avec un maximum de 230°C).
- Les IF secondaires tardives à N<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>±CO<sub>2</sub>±H<sub>2</sub>O et H<sub>2</sub>O±N<sub>2</sub>±CH<sub>4</sub>±NaCl correspondent à une composition de fluide différente de celle des IF des autres familles.

| Caractéristiques |         |              | Densités<br>totales | Fractions molaires |       |       |       |       |
|------------------|---------|--------------|---------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|
| ech.             | famille | type d'IF    |                     | xH2O               | xNaCl | xCO2  | xCH4  | xN2   |
| EC15             | 1b      | 1ere apatite | 0.88                | 0.790              | 0.002 | 0.208 | 0.000 | 0.000 |
| EC15             | 2a      | Fcar=0.4     | 0.67                | 0.891              | 0.010 | 0.081 | 0.002 | 0.016 |
| EC15             | 2a      | Fcar=0.4     | 0.78                | 0.795              | 0.017 | 0.159 | 0.007 | 0.022 |
| EC15             | 2a      | Fcar=0.6     | 0.76                | 0.762              | 0.014 | 0.198 | 0.007 | 0.019 |
| EC15             | 2a      | Fcar=0.8     | 0.66                | 0.415              | 0.008 | 0.533 | 0.013 | 0.033 |
| EC15             | 2b      | ac parallele | 0.80                | 0.698              | 0.012 | 0.264 | 0.006 | 0.020 |
| EC15             | 4a      | CO2±N2±CH4   | 0.33                | 0.299              | 0.005 | 0.625 | 0.018 | 0.054 |

Tableau V-3: Synthèse des densités et compositions totales des différentes familles d'IF

## 2. 6. 2. Interprétation

- Les IF primaires dans l'albite et celles dans l'apatite présentent des compositions différentes indiquant soit une modification très rapide de la composition fluide au moment de la cristallisation de l'exsudat, soit un changement de composition au cours d'une ré-équilibration. Dans le cas de la première hypothèse, ne pouvant distinguer texturalement quel minéral cristallise avant l'autre, nous ne savons pas comment évolue la composition du fluide dans le temps lors de la cristallisation. Les variations très importantes de densités ne peuvent pas correspondre à des profondeurs différentes de la cristallisation de l'exsudat. De même le passage éventuel d'une pression lithostatique à une pression hydrostatique lors de la formation de l'exsudat ne peut expliquer une telle variation de pression enregistrée par les deux minéraux différents. Il est cependant possible d'envisager un rééquilibrage tardif des IF dans le feldspath qui n'aurait pas affecté les IF contenues dans l'apatite. En effet, l'ensemble des IF met en évidence une décompression accompagnée d'un refroidissement dans le temps au cours de la déformation. Ce chemin P-T rétrograde ne suit pas l'isochore des IF primaires dans l'apatite et entraîne un minimum de surpression de 1Kb dans les IF primaires dans l'apatite par rapport à la matrice lors de la formation des IF de la famille 2 à  $F_{car}$  de 0,8 (fig. V-29). Or, nous savons que la résistance à la ré-équilibration dépend de nombreux paramètres dont un des plus important est la nature du minéral hôte. Ainsi, nous pouvons faire l'hypothèse qu'une ré-équilibration des IF primaires dans l'albite se soit effectuée alors que celles contenues dans l'apatite n'aient subi aucun changement. Malheureusement il n'existe pas de données expérimentales pour ces deux minéraux afin d'étayer notre hypothèse. Toutefois la présence de deux clivages dans le feldspath peut favoriser la diffusion ou les fuites et donc les changements de densité post-piégeage.
- L'évolution de la composition et des densités des différentes familles d'IF correspond à une augmentation du  $CO_2$ ,  $N_2$  et  $CH_4$  aux dépens de  $H_2O$  puis disparition du  $CO_2$  donnant des fluides à  $H_2O-N_2-CH_4$  associée à une décompression avec un refroidissement. Le  $CO_2$  et le  $CH_4$  peuvent provenir de la déstabilisation du graphite (observé dans les niveaux pélitiques) lors du métamorphisme selon la réaction globale  $2C+2H_2O \leftrightarrow CO_2+CH_4$ . L'origine de l'azote peut être due aux ions  $NH_4^+$  libérés lors de la diagénèse ou du métamorphisme de faible degré à partir de la matière organique. Une part de ces ions peut se piéger dans certains minéraux (tels les micas, argiles ou feldspaths; Dubessy et al., 1989) et peut être libéré lors des réactions métamorphiques. Sous certaines conditions le  $NH_4^+$  pourra ensuite être oxydé en  $N_2$  suivant la réaction:  $2NH_4^+ + 1,5 O_2$  donne  $N_2+3H_2O+2H^+$  (Dubessy et al., 1989; Guillot, 1989). Cependant l'évolution d'une augmentation de  $CO_2$ ,  $N_2$  et  $CH_4$  aux dépens de  $H_2O$  ne s'explique pas par les exemples naturels ou les modèles théoriques qui indiquent généralement une telle évolution sont associée à une augmentation de température (Pêcher, 1979; Mullis et al., 1994; Ohmoto et Kerrick, 1977).

- Les plans à  $N_2-CH_4 \pm CO_2 \pm H_2O$  et à  $H_2O \pm N_2 \pm CH_4 \pm NaCl$  ont des directions et des pendages similaires pouvant être compatibles avec une formation contemporaine des deux types de plans d'IF. Dans ces plans, on observe parfois des IF avec des degrés de remplissage de la phase vapeur différents des autres IF présentes dans le plan. La seule homogénéisation totale en phase vapeur observée dans les IF riches en  $N_2-CH_4$  se trouve dans la même gamme de température que les homogénéisations totales en phase liquide des IF à  $H_2O \pm N_2 \pm CH_4$ . Il n'est pas possible de comparer les compositions totales (celles des IF à  $H_2O \pm N_2 \pm CH_4$  n'ayant pu être déterminées) mais les compositions des phases volatiles analysées au Raman sont qualitativement comparables. Toutes ces indications suggèrent que les deux types de plan d'IF proviennent d'un même fluide à  $H_2O-N_2-CH_4 \pm CO_2 \pm NaCl$  piégé en état d'immiscibilité (Ramboz et al., 1982). Dans ce cas la température de piégeage correspond à la température d'homogénéisation totale des deux types de plan d'IF (entre 240 et 260 °C). A cette température, la pression de piégeage est de 200 bars.

L'évolution d'une composition de fluide à  $H_2O-CO_2-N_2 \pm CH_4$  vers une composition à  $H_2O-N_2-CH_4$  est compatible avec une décompression et un refroidissement car les fluides à  $H_2O-CO_2$  sont dominants entre 300 et 400°C, de 200 à 300°C les fluides deviennent à  $H_2O-CH_4$  (Holloway, 1984). Le processus d'immiscibilité entre la phase aqueuse et à  $N_2-CH_4$  pour les fluides les plus tardifs s'intègre bien dans ce modèle.

- Des fluides aqueux (famille 3) peu salés ont circulé après les IF aquo-carboniques de la famille 2. Ils ont probablement une origine différente et leur composition peu salée suggère une origine météorique. Une étude des isotopes stables est nécessaire pour connaître précisément leur origine.

## ***2. 7. Reconstruction du chemin P-T suivi par l'exsudat***

Le chemin pression-température dans le temps suivi par l'exsudat a été construit en essayant de caler la température pour les différents événements (fig. V-29):

- Comme il a été montré auparavant l'exsudat est syn-tectonique et syn-métamorphique de la déformation en cisaillement. L'exsudat possède une paragenèse métamorphique à quartz, albite, muscovite, chlorite et biotite dans une matrice présentant la même paragenèse dont l'étude thermo-barométrique des paragenèses solides indique une température de formation de l'exsudat à  $506 \pm 12^\circ C$ . Les isochores des IF primaires dans l'apatite indiquent une cristallisation de l'exsudat sous des pressions fluides entre 3,9 et 4,7 Kb.

Les exsudats de quartz ont recristallisé lors de la déformation varisque (voir chapitre II, partie B). Les plans d'IF correspondent donc à des fractures postérieures à cette recristallisation et sont donc postérieures à la déformation varisque. Les IF contenues dans ces plans enregistrent les conditions d'exhumation des roches après la mise en place des nappes.

- Si l'on considère que les fluides les plus tardifs à  $\text{H}_2\text{O}-\text{N}_2-\text{CH}_4$  (familles 4a et 4b) sont piégés sous des conditions d'immiscibilité nous pouvons déduire directement les conditions P-T-V de piégeage du fluide. En effet, les températures d'homogénéisation totale nous indiquent une température de piégeage entre 220 et 290°C (240 à 260°C pour le maximum des mesures) et son intersection avec les IF à  $\text{N}_2-\text{CH}_4\pm\text{CO}_2\pm\text{H}_2\text{O}$  (famille 4b) indique une pression fluide de 200 bars.
- Toutes les autres familles d'IF ont été piégées entre la valeur de pression fluide obtenue sur les IF primaires dans les apatites et celle indiquée par les fluides les plus tardifs. Ces plans ont cicatrisés à différents moments de l'évolution de l'exsudat de quartz. La géométrie probable de l'évolution du chemin P-T suivi par l'exsudat (fig. V-29) indique une décompression accompagnée d'un refroidissement. Cette géométrie est contrainte par plusieurs informations.
  - Les températures d'homogénéisation totale des différentes familles d'IF indiquent les températures et pressions minimales de piégeage des IF.
  - La température maximale enregistrée par l'exsudat correspond au pic métamorphique ( $506\pm 12^\circ\text{C}$ , partie A de ce chapitre).
  - L'absence de ré-équilibration ou de décrépitation des IF localisées dans les plans suggère un chemin P-T proche du tracé des isochores de ces plans. En effet, dans le quartz, les IF décrépitent généralement lorsque la différence de pression dans l'IF et celle dans le cristal de quartz dépasse 850 bars (Leroy, 1979; Bodnar et al., 1989). L'absence d'une telle décrépitation dans les IF aquo-carboniques de la famille 2 suggère donc plutôt un chemin P-T proche du tracé des isochores de la famille 2.
- La ré-équilibration des IF primaires dans l'albite suggère que le chemin P-T suivi par l'exsudat ne suit pas l'isochore des inclusions primaires (obtenu par les IF primaires dans l'apatite). Une différence de trajectoire entre le chemin P-T et le tracé des isochores est nécessaire pour provoquer des différences de pression entre les IF et le minéral hôte, entraînant des ré-équilibrages d'IF ou des décrépitations dans les albites.

### 3. *Les exsudats EC4, EC20, EC27, EC21 et EC25*

#### 3. 1. *Description*

##### 3. 1. 1. Exsudat EC4

L'exsudat EC4 provient du NW de la région étudiée. C'est un exsudat parallèle à S1, plissé isoclinalement contenant du quartz, de nombreux cristaux d'albite, de la chlorite, de la muscovite, de la biotite en traces, de la calcite, de l'apatite et des oxydes. Les grains de quartz ont des contours lobés. La bordure entre l'exsudat et l'encaissant est jalonnée de chlorite. Dans la matrice, la S2 est marquée par de la muscovite et de nombreux

oxydes et est parallèle au plan axial du pli . Entre les plans S2, la S1 soulignée par la muscovite, est plissée sous forme de microlithons.

### **3. 1. 2. Exsudat EC20**

C'est un exsudat isoclinalement localisé dans la partie Sud de la carte, parallèle à la S1 et plissé isoclinalement. Il est constitué essentiellement de quartz et de chlorite enchevêtrée ainsi que d'albite, de muscovite et de calcite. Les grains de quartz présentent deux textures distinctes. La plupart des grains de quartz qui constitue l'exsudat sont de taille relativement grande, aux joints de grains à contours lobés et présentant une forte extinction onduleuse. D'autres grains de quartz localisés à proximité des chlorites sont de petites tailles, à contours polygonaux et extinction nette. Le long des joints de grains de quartz on observe fréquemment de fines baguettes de micas ou de chlorite. La calcite est fréquente. L'échantillon est riche en inclusions fluides concentrées soit dans les joints de grains soit dans des plans.

### **3. 1. 3. Exsudat EC27**

C'est une lentille parallèle à la S2. Il est constitué de quartz, d'albite, de muscovite, de biotite, de chlorite, de calcite, d'apatite et d'oxyde. Les grains de quartz, de taille moyenne, présentent une faible extinction onduleuse et des joints de grains au contours droits. Les plagioclases sont très altérés. La bordure entre l'exsudat et la matrice est soulignée par de la muscovite, de la chlorite, de la biotite et de la calcite. La matrice est constituée de deux schistosités, une S1 marquée par la muscovite et le quartz et une deuxième schistosité, soulignée par de la muscovite, biotite et des oxydes allongés. De la calcite, de l'apatite et de nombreuses tourmalines s'observent dans la matrice. De la biotite automorphe cristallise obliquement à la schistosité.

### **3. 1. 4. Exsudat EC21**

L'exsudat se présente sous forme d'une lentille parallèle à la S2. Il est essentiellement constitué de grains de quartz aplatis dans la schistosité et allongés selon la linéation d'étirement. Les joints de grains sont à contours lobés et présentent de fortes extinctions onduleuses. L'exsudat contient également de l'amphibole, de la calcite, de la muscovite, de la chlorite, de l'albite et de l'apatite. Le contact entre l'exsudat et la matrice est jalonné par de la biotite en voie de chloritisation, de l'amphibole, de la calcite et des oxydes localement. Autour de l'exsudat la matrice contient deux schistosités, une S1 marquée par de la muscovite et une S2 soulignée par de la muscovite, des traces de biotite, des oxydes, de l'amphibole, du quartz et de l'albite. Des oxydes automorphes entourés fréquemment de biotite et de la biotite automorphe ont cristallisé postérieurement à la S2. L'exsudat est extrêmement riche en IF notamment pour les IF aqueuses. Une première observation met en évidence de longs plans perpendiculaires à l'exsudat et d'autres, moins longs, sont obliques aux épontes de l'exsudat.

### 3. 1. 5. Exsudat EC25

C'est une lame taillée dans le flanc d'un exsudat parallèle à la S1. L'exsudat est plissé isoclinalement et composé de quartz, d'albite et de calcite. Les grains de quartz ont des tailles moyennes, des extinctions onduleuses et des joints de grains aux contours lobés. Les cristaux d'albite se présentent sous forme de cristaux automorphes plus ou moins altérés, allongés et présentant une extinction onduleuse. La calcite est abondante. La bordure entre l'exsudat et la matrice est jalonnée de chlorite et plus rarement de biotite. La matrice est constituée de deux schistosités, une S1 marquée par la muscovite, le quartz, l'albite, des oxydes et des poussières noires et une S2 marquée par la muscovite, de la biotite, des oxydes et de la tourmaline.

### 3. 2. Description des différents types d'IF

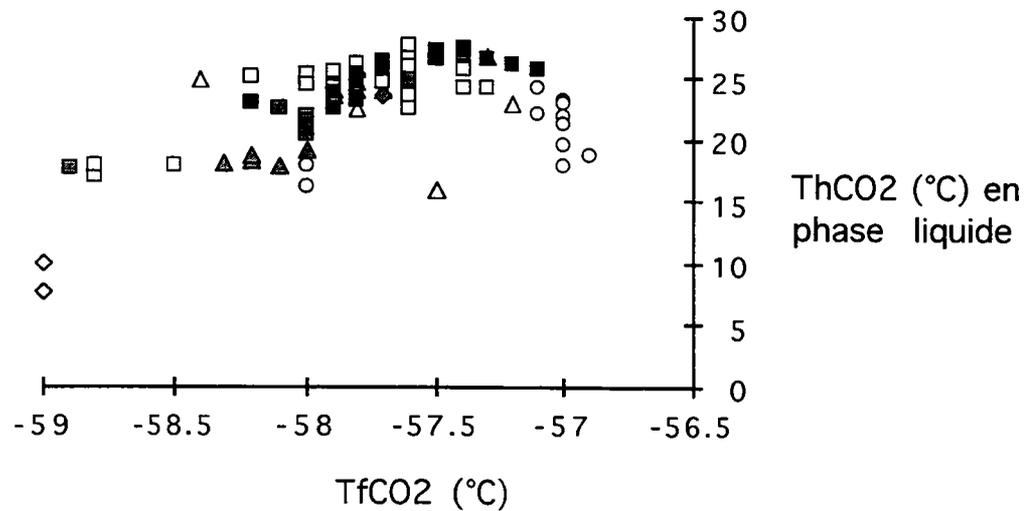
Tous les exsudats étudiés contiennent deux familles principales d'IF, des IF aquo-carboniques et des IF aqueuses. Selon le type d'IF, les orientations des plans, les données microthermométriques et les données Raman, différentes familles d'IF ont été distinguées dans chaque échantillon (tableau V-4). Les données microthermométriques ont été reportées dans les diagrammes de corrélation  $ThCO_2$  en fonction de  $TfCO_2$  (fig. V-31-A),  $TfCO_2$  en fonction de  $TfCl$  (fig. V-31-B) pour les IF aquo-carboniques et  $Thtot$  en fonction de  $TfG$  pour les IF aqueuses (fig. V-32). La plupart des familles étudiées dans ces exsudats présentent les mêmes caractéristiques que celles déjà étudiées dans l'échantillon EC15. Par contre, les familles d'IF en plans perpendiculaires à la linéation et à la schistosité, de composition essentiellement aqueuse avec une phase volatile à  $N_2-CH_4$  et celles de composition essentiellement volatile à  $N_2-CH_4 \pm CO_2 \pm H_2O$  (4b et 4c) étudiées dans l'exsudat EC15 n'ont pas été observées dans les autres exsudats.

#### 3. 2. 1. Exsudat EC4

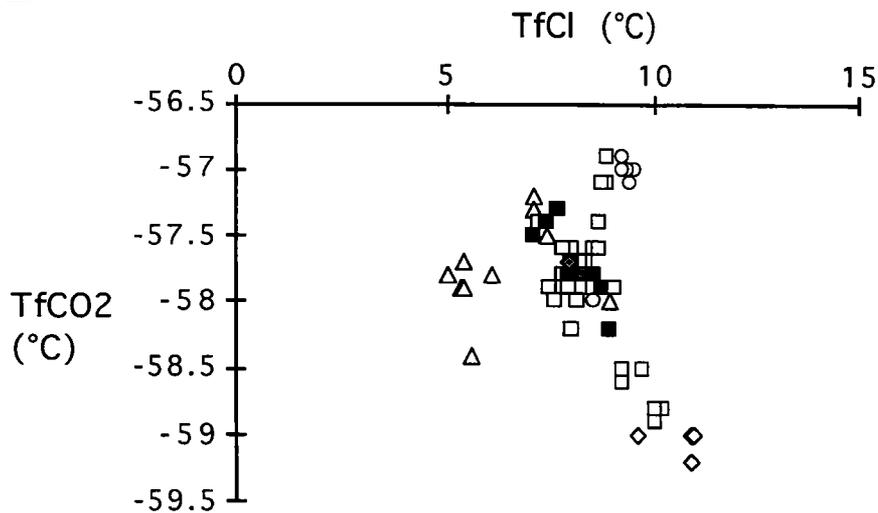
##### 3. 2. 1. 1. Les IF primaires dans l'albite (1a)

Les cristaux d'albite contiennent une multitude d'IF en amas, de taille variable jusqu'à 20  $\mu m$  et de formes généralement ovoïdes aux contours anguleux. A température ambiante elles apparaissent de teinte sombre, biphasées, avec une phase vapeur carbonique et une phase externe aqueuse. Un seul cristal d'albite a pu être étudié car les inclusions des autres cristaux apparaissent décrépitées. Dans ce cristal, les  $F_{car}$  sont constants au sein du cristal avec une valeur d'environ 0,8. La  $TfCO_2$  s'effectue entre -57,1 et -56,9 °C proche de la température de fusion du  $CO_2$  pur. Au Raman aucun autre constituant autre que le  $CO_2$  n'a été détecté dans la phase volatile. La  $TfCl$  a lieu en présence d'une phase carbonique liquide, une phase carbonique vapeur et une phase aqueuse entre 9,2 et 9,5°C. La  $ThCO_2$  s'observe de 17,7 à 24,2°C en phase liquide.

**A**



**B**



- |      |   |   |
|------|---|---|
| EC4  | ○ IF primaire dans albite (1a)                | ○ IF aquo-carbonique isolée (1d)              |
|      | △ IF dans chlorite (1c)                       | □ IF aquo-carbonique en amas (1e)             |
|      | □ plan d'IF aquo-carbonique (2)               | ◇ IF aquo-carbonique aux joints de grain (1f) |
|      |   | △ plan d'IF aquo-carbonique (2)               |
| EC27 | ◆ IF dans chlorite (1c)                       |   |
|      | ■ IF aquo-carbonique aux joints de grain (1f) |   |
|      | ▲ plan d'IF aquo-carbonique (2)               |   |
| EC21 | ■ plan d'IF aquo-carbonique (2)               |   |

Figure V-31: Diagrammes de corrélation ThCO2 en fonction de TfCO2 (A) et de TfCO2 en fonction de TfCl (B) pour les différentes familles d'IF dans les exsudats EC4, EC27, EC21 et EC20.

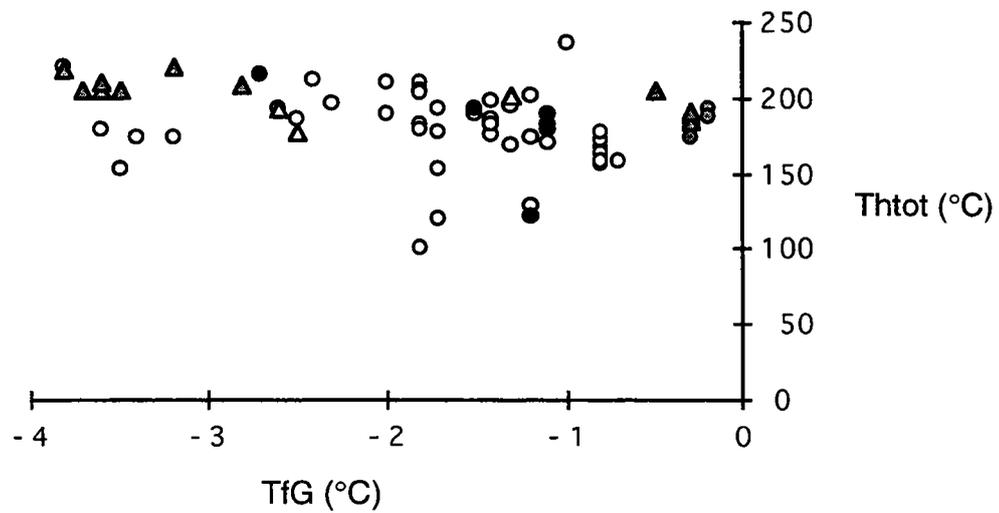


Figure V-32: Diagramme de corrélation Thtot en fonction de TfG pour les familles d'IF aqueuses dans les lames EC4, EC27, EC21 et EC20. Pour les symboles: blanc (lame EC4), gris clair (lame EC20), gris foncé (lame EC27) et noir (lame EC21). Les triangles correspondent aux plans d'IF aqueuses perpendiculaires à la schistosité et la linéation d'étirement et les ronds aux plans d'IF aqueuses perpendiculaires à la schistosité et obliques à la linéation d'étirement.

|      | données microthermométriques |                  |               |         |              |         |                  |         |           |         |                        | données Raman |      |     |     |
|------|------------------------------|------------------|---------------|---------|--------------|---------|------------------|---------|-----------|---------|------------------------|---------------|------|-----|-----|
|      | n°                           | type d'IF        | TfCO2 (range) | nb d'IF | Tfcl (range) | nb d'IF | ThCar (range)    | nb d'IF | TfG       | nb d'IF | Thtot (range)          | nb d'IF       | CO2  | CH4 | N2  |
| EC4  | 1a                           | 1ere dans albite | -57.1/-56.9   | 12      | 9.2/9.5      | 6       | 15.9-26.8 en L   | 9       | -         | -       | IF décrépitées à 150°C |               | 100  | O   | O   |
|      | 1c                           | dans chlorite    | -58.4/-57.2   | 12      | 5/7.4        | 9       | 15.9/26.8 en L/C | 12      | -         | -       | -                      |               | 96.4 | 0.5 | 3.1 |
|      | 2                            | aquo-carbonique  | -58.4/-57.3   | 52      | 7.2/8.6      | 27      | 22.5/27.6 en L/C | 42      | -         | -       | 275/320 en V           | 10            | 93.4 | 1.2 | 5.4 |
|      | 3                            | aqueuse          | -             | -       | -            | -       | -                | -       | -3.8/-0.4 | 70      | 122.8/236.3 en L       | 65            | NO   | NO  | NO  |
| EC27 | 1c                           | dans chlorite    | -57.8/-57.7   | 3       | 7.9          | 1       | 23.6/25.3 en L   | 2       | -         | -       | IF décrépitées à 283°C | 1             | 96.9 | 2   | 1.1 |
|      | 1f                           | joint de grains  | -58.3/-58     | 8       | -            | -       | 17.8/19 en L/C   | 5       | -         | -       | -                      |               | -    | -   | -   |
|      | 2                            | aquo-carbonique  | -58.2/-57.6   | 9       | 8.3          | 1       | 21.9/24.8 en L   | 10      | -         | -       | -                      |               | 89.6 | 1.9 | 8.5 |
|      | 3                            | aqueuse          | -             | -       | -            | -       | -                | -       | -3.8/-0.2 | 24      | 174/219.8 en L         | 16            | NO   | NO  | NO  |
| EC21 | 2                            | aquo-carbonique  | -58.2/-57.1   | 21      | 7.1/8.9      | 8       | 22.5/27.4 en L   | 16      | -         | -       | 275 en V               | 1             | 95.8 | 0   | 4.2 |
|      | 3                            | aqueuse          | -             | -       | -            | -       | -                | -       | -1.2/-1   | 7       | 178.6/215 en L         | 17            | NO   | NO  | NO  |
| EC20 | 1d                           | ac isolées       | -58.7/-58     | 3       | 8.5          | 2       | 16.1/19.5 en L/V | 3       | -         | -       | -                      |               | -    | -   | -   |
|      | 1e                           | ac en amas       | -59.2/-58.2   | 6       | 9.6/11       | 6       | 7.5/10 en V      | 2       | -         | -       | IF décrépitées 322/330 | 2             | 74.9 | 16  | 9.4 |
|      | 2                            | aquo-carbonique  | -58.8/-56.9   | 13      | 8.7/9.2      | 9       | 14               | V       | -         | -       | 167.1/370 en L ou V    | 15            | 79.1 | 1.9 | 19  |
|      | 3                            | aqueuse          | -             | -       | -            | -       | -                | -       | -3.8/-0.4 | 31      | 117.6/253.2 en L       | 37            | -    | -   | -   |
| EC25 | 3                            | aqueuse          | -             | -       | -            | -       | -                | -       | -7.7/-2.8 | 7       | -                      | -             | -    | -   | -   |

-: transition de phases non observées ou IF non analysée

ac: aquo-carbonique

NO: élément non-observé

Tableau V-4: Tableau récapitulatif des données microthermométriques et des données Raman des différents types d'IF étudiées.

### *3. 2. 1. 2. Les IF dans les cristaux de chlorite (1c)*

De nombreuses IF s'observent à l'intérieur de petits cristaux de chlorite de 30 à 50  $\mu\text{m}$  qui se présentent sous forme ovoïdes, isolés dans l'exsudat de quartz. Ces IF de 10 à 20  $\mu\text{m}$  sont de teinte très sombre et apparaissent triphasées à température ambiante, avec une phase liquide et une phase vapeur carbonique et une fine pellicule de phase aqueuse claire dans la partie externe. Elles présentent des  $T_f\text{CO}_2$  entre  $-58,4$  et  $-57,2^\circ\text{C}$  suggérant la présence d'autres constituants que le  $\text{CO}_2$  dans la phase volatile. L'analyse Raman met en évidence 96,4% de  $\text{CO}_2$ , 3,1% de  $\text{N}_2$  et 0,5% de  $\text{CH}_4$  dans la phase vapeur. Selon les inclusions  $T_f\text{Cl}$  varie de 5 à  $7,4^\circ\text{C}$  et  $\text{ThCO}_2$  de  $15,9$  et  $26,8^\circ\text{C}$  en phase liquide excepté une IF qui homogénéise en phase critique. Le  $F_{\text{car}}$  varie de 0,6 à 0,9 selon les IF.

### *3. 2. 1. 3. Les plans d'IF aquo-carboniques (2)*

Tous les plans d'IF aquo-carboniques possèdent des IF aux mêmes caractéristiques microthermométriques et sont donc présentés ensemble. Ils regroupent des plans très courts, des plans d'orientation parallèle à la schistosité et des plans perpendiculaires à la schistosité. Les petits plans courts sont internes aux grains, partent des joints de grains vers l'intérieur, de direction oblique au contact matrice-exsudat moyennement à fortement pentés et composés généralement d'IF de petite à moyenne taille (6 à 15  $\mu\text{m}$ ), de forme rectangulaire à ovoïde, aux contours anguleux et de teinte très sombre. Les plans parallèles à la schistosité, moyennement longs et moyennement pentés, contiennent des IF de teinte très sombre, de forme mal définie, très variable et de taille très variable dont la plupart semblent décrépitées. Les plans perpendiculaires à la schistosité sont généralement faiblement pentés. Les IF ont une taille variant de 6 à 10  $\mu\text{m}$  et présentent parfois des formes en cristaux négatifs allongés dans une direction perpendiculaire à la direction du plan. A température ambiante l'ensemble des IF aquo-carboniques apparaît triphasée avec une phase aqueuse externe et une phase aquo-carbonique liquide et une vapeur. Le  $F_{\text{car}}$  d'environ 0,7 est constant au sein d'un même plan et semble varier très peu selon les différents types de plan. On peut également observer quelques plans perpendiculaires à la schistosité et à la linéation contenant peu d'IF très sombres où la phase aqueuse n'est pas visible. La  $T_f\text{CO}_2$  varie de  $-58,4$  à  $-57,3^\circ\text{C}$  suggérant d'autres composants volatils que le  $\text{CO}_2$  dans la phase carbonique mis en évidence par l'analyse Raman effectuée dans la phase carbonique liquide indiquant: 93,4% de  $\text{CO}_2$ , 5,4% de  $\text{N}_2$  et 1,2% de  $\text{CH}_4$ . La  $T_f\text{Cl}$  varie de  $7,2$  à  $8,6^\circ\text{C}$  et la  $\text{ThCO}_2$  s'effectue entre  $22,5$  et  $27,6^\circ\text{C}$  en phase liquide ou critique.

### *3. 2. 1. 4. Les plans d'IF aqueuses (3)*

Les plans d'IF aqueuses sont soit perpendiculaires à la schistosité et à la linéation soit perpendiculaires à légèrement obliques à la schistosité et à environ  $45^\circ\text{C}$  de la linéation d'étirement. Les IF sont généralement de petite taille (jusqu'à 6  $\mu\text{m}$ ) de forme ovale à rectangulaire. A température ambiante elles apparaissent biphasées, avec une phase liquide externe et une phase

vapeur généralement mobile à l'intérieur. Les deux types de plan présentent des caractéristiques microthermométriques similaires soit une TfG entre -4,3 et -0,8°C. Les analyses Raman n'ont détecté aucun constituant autre que l'eau dans la phase vapeur.

### 3. 2. 2. Exsudat EC20

#### 3. 2. 2. 1. Les IF aquo-carboniques primaires dans l'albite (1a)

Localement, ont été observées des IF en amas très abondantes dans de l'albite. Elles sont généralement de petites tailles, pouvant atteindre parfois 10  $\mu\text{m}$ , de contours ovoïdes, plus ou moins anguleux et qui apparaissent biphasées, avec une phase carbonique et une phase aqueuse, à température ambiante. Leur petite taille n'a pas permis leur étude en microthermométrie.

#### 3. 2. 2. 2. Les IF aquo-carboniques isolées dans le quartz (1d)

Elles sont généralement de tailles importantes (15  $\mu\text{m}$  environ), de forme ellipsoïdale et biphasée à température ambiante. Les deux phases se distinguent alors nettement avec une phase carbonique très sombre à l'intérieur et une phase aqueuse claire à la périphérie. Le Fcar est de 0,4 environ. Trois IF de ce type ont été étudiées en microthermométrie, la TfCO<sub>2</sub> est entre -58,7 et -58°C, la TfCl de 8,5°C et la ThCO<sub>2</sub> est de 16, 1 et 17,8°C en phase liquide et de 19,5°C en phase vapeur.

#### 3. 2. 2. 3. Les IF aquo-carboniques en amas dans le quartz (1e)

Certaines IF aquo-carboniques en amas dans le quartz ou en plans très courts parallèles à la lame présentent des caractéristiques optiques, microthermométriques et Raman, différentes des autres IF aquo-carboniques. A température ambiante elles apparaissent sombres et monophasées ( phase carbonique) ou biphasées ( phase carbonique et phase aqueuse). Le Fcar est alors de 0,4 environ constant au sein d'un même plan. De nombreux amas ou plans de ce type ne réagissent pas en microthermométrie. Celles qui réagissent ont une TfCO<sub>2</sub> entre -59,2 et -58,2°C, une TfCl entre 9,6 et 11°C suggérant la présence de méthane dans la phase volatile et une ThCO<sub>2</sub> entre 7,5 et 17,8°C en phase vapeur ou critique. Les ThCO<sub>2</sub> les plus basses sont en phase vapeur et s'observent difficilement. Dans ce cas les valeurs de ThCO<sub>2</sub> sont donc minimales. Une analyse Raman effectuée dans la phase vapeur d'une IF de ce type indique une composition de 74,6 de CO<sub>2</sub>, 16% de CH<sub>4</sub> et 9,4% de N<sub>2</sub>.

#### 3. 2. 2. 4. Les IF aquo-carboniques aux joints de grains (1f)

L'exsudat est extrêmement riche en IF localisées dans les joints de grains qui apparaissent généralement non décrépitées contrairement à ce type d'IF dans les autres lames étudiées. Ce sont des IF aux formes et tailles variables, souvent ovoïdes, de teinte très sombre, monophasée à température ambiante

ne contenant qu'une phase carbonique. Ces IF ne réagissent pas en microthermométrie.

### *3. 2. 2. 5. Les plans d'IF aquo-carboniques (2)*

Les plans d'IF aquo-carboniques ont des directions généralement à 45° de la schistosité et de la linéation d'étirement. Ils peuvent être également parallèles ou perpendiculaires à l'exsudat de quartz. Ils contiennent des IF de taille moyenne (jusqu'à 15  $\mu\text{m}$ ), de teinte sombre et de forme rectangulaire généralement toutes allongées dans la même direction. A température ambiante, les IF apparaissent biphasées avec une phase carbonique interne et une phase aqueuse à la périphérie. Le  $T_{\text{fcar}}$  est très variable d'un plan à l'autre, de 0,3 à 0,8 mais reste constant au sein d'un même plan. La  $T_{\text{fCO}_2}$  est généralement peu visible car l'enveloppe de  $\text{CO}_2$  liquide qui se forme au refroidissement est une pellicule très fine autour de la phase carbonique vapeur. La  $T_{\text{fCO}_2}$  s'effectue entre -58,8 et -56,9°C indiquant la présence de composés volatils autre que le  $\text{CO}_2$  dans la phase carbonique. Une analyse Raman effectuée dans la phase vapeur met en évidence 79,1% de  $\text{CO}_2$ , 19% de  $\text{N}_2$  et 1,9% de  $\text{CH}_4$ . La  $T_{\text{fCl}}$  s'effectue entre 8,7 et 9,2°C et la  $T_{\text{hCO}_2}$  est généralement non visible car elle s'effectue en phase vapeur et concerne une très fine enveloppe de phase liquide carbonique. Une observation sur une IF indique une  $T_{\text{hCO}_2}$  de 14°C en phase vapeur.

L'exsudat possède également des plans d'IF aquo-carboniques très courts, intra-grains, partant du joint de grain et se propageant vers l'intérieur. Pour la plupart, les changements de phases ne s'observent pas en microthermométrie en raison de la faible épaisseur de phase aqueuse et de phase liquide carbonique autour de la phase carbonique vapeur. Les quelques mesures possibles indiquent une  $T_{\text{fCO}_2}$  entre -58,9 et -58°C, une  $T_{\text{fCl}}$  vers 8,9°C, la  $T_{\text{hCO}_2}$  qui s'effectue en phase vapeur ne s'observe jamais avec précision.

Des plans d'IF perpendiculaires à la schistosité et la linéation, constitués d'IF très sombres, de taille très variable, et ne présentant optiquement qu'une seule phase carbonique s'observent fréquemment. Ces IF ne réagissent pas en microthermométrie.

### *3. 2. 2. 6. Les plans d'IF aqueuses (3)*

Optiquement, deux types de plans d'IF aqueuses se distinguent. Des plans relativement longs, légèrement obliques à la schistosité, faiblement à moyennement pentés. Les IF sont éparées, de taille très variable pouvant atteindre 30  $\mu\text{m}$ , de formes généralement rectangulaires ou carrées et plus complexes pour les plus grosses. Les données microthermométriques indiquent une  $T_{\text{fG}}$  entre -3,8 et -0,4°C selon les plans. L'analyse Raman effectuée sur une IF de ce type n'a détecté aucun autre constituant volatil autre que l'eau dans la phase vapeur. Le deuxième type de plan se présente sous forme de nombreux plans très serrés perpendiculaires à la schistosité et à la linéation. Ils sont généralement longs et recoupent les joints de grains. Ils sont constitués de nombreuses IF de très petite taille (inférieur à 1  $\mu\text{m}$ ). Les IF

les plus grosses montrent deux phases aqueuses liquide et vapeur. En raison de leur petite taille, ces IF n'ont pas pu être étudiées en microthermométrie.

### 3. 2. 3. Exsudat EC27

#### 3. 2. 3. 1. Les IF dans les cristaux de chlorite (1c)

Certains petits cristaux de chlorite, de forme ovoïde à ellipsoïdale, contiennent une IF, de taille de 6  $\mu\text{m}$  jusqu'à 15  $\mu\text{m}$  selon l'IF, de teinte sombre, de forme ovoïde et qui apparaissent triphasées avec une phase carbonique liquide, une phase carbonique vapeur et une pellicule de phase aqueuse à la périphérie à température ambiante. Trois IF ont été étudiées en microthermométrie. La  $T_f\text{CO}_2$  est de -57,8 à -57,7°C, la  $T_f\text{Cl}$  est de 7,9°C et la  $T_h\text{CO}_2$  entre 23,6 et 25,3 °C en phase liquide. Le  $F_{\text{car}}$  est d'environ 0,8 pour l'IF analysée au Raman qui contient 96,9% de  $\text{CO}_2$ , 2% de  $\text{CH}_4$  et 1,1% de  $\text{N}_2$ .

#### 3. 2. 3. 2. Les IF dans les joints de grains (1f)

Les joints de grains de quartz sont très riches en IF aquo-carboniques, de taille moyenne (jusqu'à 10  $\mu\text{m}$ ), de formes variées et monophasées (une phase carbonique) à température ambiante. Les  $T_f\text{CO}_2$  sont entre -58,3 et -58°C, les  $T_f\text{Cl}$  ne sont jamais visibles en raison de l'absence de phase aqueuse ou d'épaisseur si fine qu'elle ne se détecte pas au microscope. Les  $T_h\text{CO}_2$  s'observent difficilement entre 17,8 et 19°C en phase liquide ou critique.

#### 3. 2. 3. 3. Les plans d'IF aquo-carboniques (2)

Ils se présentent sous forme de plans intragranulaires soit parallèles à la schistosité soit très obliques sur cette dernière à 45° de la linéation d'étirement. Les IF sont de taille moyenne (4 à 10  $\mu\text{m}$ ), de forme ovoïde aux contours plus ou moins anguleux et de teinte très sombre. Elles sont triphasées à température ambiante, avec deux phases carboniques importantes, une liquide et une vapeur et une fine pellicule d'eau à la périphérie. Le  $F_{\text{car}}$  est d'environ 0,8 constant pour chaque plan. Les données microthermométriques sont similaires quelque soit l'orientation du plan. La  $T_f\text{CO}_2$  s'observe entre -58,2 et -57,6°C, la  $T_f\text{Cl}$  n'a pu être mesurée que dans une seule IF à 8,3 en raison de la phase aqueuse peu importante. La  $T_h\text{CO}_2$  s'effectue entre 21,9 et 24,8°C en phase liquide. L'analyse Raman dans la phase vapeur d'une IF de ce type indique 89,6 % de  $\text{CO}_2$ , 8,5 % de  $\text{N}_2$  et 1,9% de  $\text{CH}_4$ .

#### 3. 2. 3. 4. Les plans d'IF aqueuses (3)

Différents types de plans d'IF aqueuses se distinguent. Les plans perpendiculaires à la schistosité et à la linéation d'étirement sont longs et traversent plusieurs grains de quartz. Ils présentent parfois des angles

variables avec la linéation d'étirement. Ils contiennent des IF de taille entre 4 et 8  $\mu\text{m}$  et de forme ovoïde aux contours plus ou moins anguleux. Les plans présentent des données microthermométriques identiques quelque soit l'orientation du plan avec une TfG entre  $-3,8$  et  $-0,2^\circ\text{C}$ . Aucun signal indiquant la présence d'un constituant autre que l'eau n'est détecté dans la phase vapeur au Raman. Un autre type de plan d'IF aqueuses, oblique à la schistosité et à la linéation, est composé d'une multitude d'IF de taille inférieure au  $\mu\text{m}$ , de forme ronde, qui n'ont pu être étudiées en microthermométrie.

#### 3. 2. 4. Exsudat EC21

Toutes les IF observées dans cette lame sont distribuées selon des plans.

##### 3. 2. 4. 1. *les plans d'IF aquo-carboniques (2)*

De nombreux plans sont parallèles à l'exsudat, intragranulaires et relativement courts. Certains de ces plans sont perpendiculaires à la schistosité et font un angle avec la linéation. Ils sont constitués d'IF de taille variable de 4 à 15  $\mu\text{m}$ , de forme ovoïde aux contours assez anguleux et de teinte sombre. Dans certains plans, les IF ont des formes en cristaux négatifs allongées selon une direction particulière. A température ambiante elles paraissent triphasées avec une phase carbonique importante ( $F_{\text{car}}$  d'environ 0,85) et une phase aqueuse uniquement visible au niveau d'un ménisque. Les caractéristiques microthermométriques, identiques quel que soit le type de plan, indiquent une TfCO<sub>2</sub> entre  $-58,2$  et  $-57,1^\circ\text{C}$ , une TfCl rarement observée entre 7,1 et 8,9 et une ThCO<sub>2</sub> entre 22,5 et 27,4 $^\circ\text{C}$  en phase liquide. Les températures sont très constantes au sein d'un même plan et varient légèrement selon le plan étudié. L'analyse Raman effectuée dans la phase vapeur met en évidence 95,8% de CO<sub>2</sub> et 4,2% de N<sub>2</sub>. Certains plans, perpendiculaires à la schistosité et à la linéation, contiennent des IF très sombres, monophasées à température ambiante, et qui ne réagissent pas en microthermométrie.

##### 3. 2. 4. 2. *Les plans d'IF aqueuses (3)*

Les plans d'IF aqueuses sont très abondants dans cette lame. Ils sont perpendiculaires à la schistosité et la linéation, certains étant presque parallèles à la linéation d'étirement. Ils sont composés d'IF de taille variable jusqu'à 10  $\mu\text{m}$ , de formes très variables, parfois complexes, et biphasées à température ambiante (deux phases aqueuses, une liquide et une vapeur). En microthermométrie, la TfG s'effectue entre  $-1,2$  et  $-1^\circ\text{C}$ . Certains plans d'IF aqueuses, perpendiculaires à la schistosité et à 45° de la linéation d'étirement, sont constitués d'une multitude d'IF de petites tailles ( $< 4 \mu\text{m}$ ) et de formes ovoïdes. Ces IF sont biphasées à température ambiante, avec une phase aqueuse liquide et une phase aqueuse vapeur très mobile au centre. En raison de leur petite taille, elles n'ont pas pu être étudiées en microthermométrie.

### 3. 2. 5. Exsudat EC25

La majeure partie des IF de cet exsudat sont aqueuses. Quelques types d'IF aquo-carboniques se distinguent toutefois, mais les plans sont rarement bien définis et de nombreuses IF semblent décrépitées.

#### 3. 2. 5. 1. Les IF aquo-carboniques (2)

Dans cette lame, aucune IF aquo-carbonique n'a pu être étudiée en microthermométrie en raison, soit de la taille des IF, soit des changements de phases non observables. En microscopie classique, plusieurs familles d'IF aquo-carboniques se distinguent:

- De très nombreuses IF, sombres, d'environ 4  $\mu\text{m}$ , en amas, et dont la plupart semblent décrépitées, sont réparties dans l'albite.
- Quelques IF, sombres, de formes ovoïdes ou losangiques d'une dizaine de microns sont diffuses dans le quartz
- Des plans d'IF perpendiculaires à l'exsudat sont moyennement pentés et contiennent des IF de taille variant de 1 à 6  $\mu\text{m}$ , parfois allongées dans le plan.

#### 3. 2. 5. 2. Les IF aqueuses (3)

Elles sont très abondantes et sont réparties en plan généralement intergranulaires. L'orientation des plans varie de perpendiculaire à 45° de la schistosité et à 45° de la linéation. Les IF sont généralement de petite taille, de forme ovoïde, et contiennent une phase aqueuse liquide et une phase vapeur à température ambiante. Certains plans, perpendiculaires à la schistosité et à la linéation, sont formés de nombreuses IF de taille inférieure au  $\mu\text{m}$ , et contiennent localement une IF de grande taille (10  $\mu\text{m}$ ), biphasée. De nombreux plans d'IF aqueuses contiennent des IF biphasées avec un cube de sel. La TfG s'effectue entre -7,7 et -2,8°C.

### 3. 3. Chronologie des différents types d'IF

Dans tous les exsudats étudiés, de nombreuses observations mettent clairement en évidence l'antériorité des IF aquo-carboniques par rapport aux plans d'IF aqueuses. Les IF en amas dans l'albite sont primaires. Celles en amas dans le quartz, incluses dans les cristaux de chlorite ou localisées au niveau des joints de grains peuvent être les IF secondaires les plus précoces.

### 3. 4. Propriétés V-X et calcul des isochores

Les propriétés V-X et les isochores des IF aquo-carboniques ont été calculées selon la même procédure que pour la lame EC15. Pour les IF dans le système H<sub>2</sub>O-NaCl la densité a été calculée à partir de la salinité calculée d'après l'équation de Potter et al. (1978) et les isochores ont été tracées selon les

équations de Zhang et Frantz (1987). Le programme utilisé pour ces calculs a été élaboré par Dubois (1992). Dans chaque lame étudiée, une IF aux données microthermométriques représentatives de chaque famille étudiée, a été analysée au Raman. Les densités et compositions totales de chacune de ces IF sont reportées dans le tableau V-5. A partir de ces propriétés V-X les isochores ont été calculées puis tracées sur la figure V-33 pour les IF aquo-carboniques et la figure V-34 pour les IF aqueuses.

### **3. 5. Évolution de la composition et de la densité des fluides**

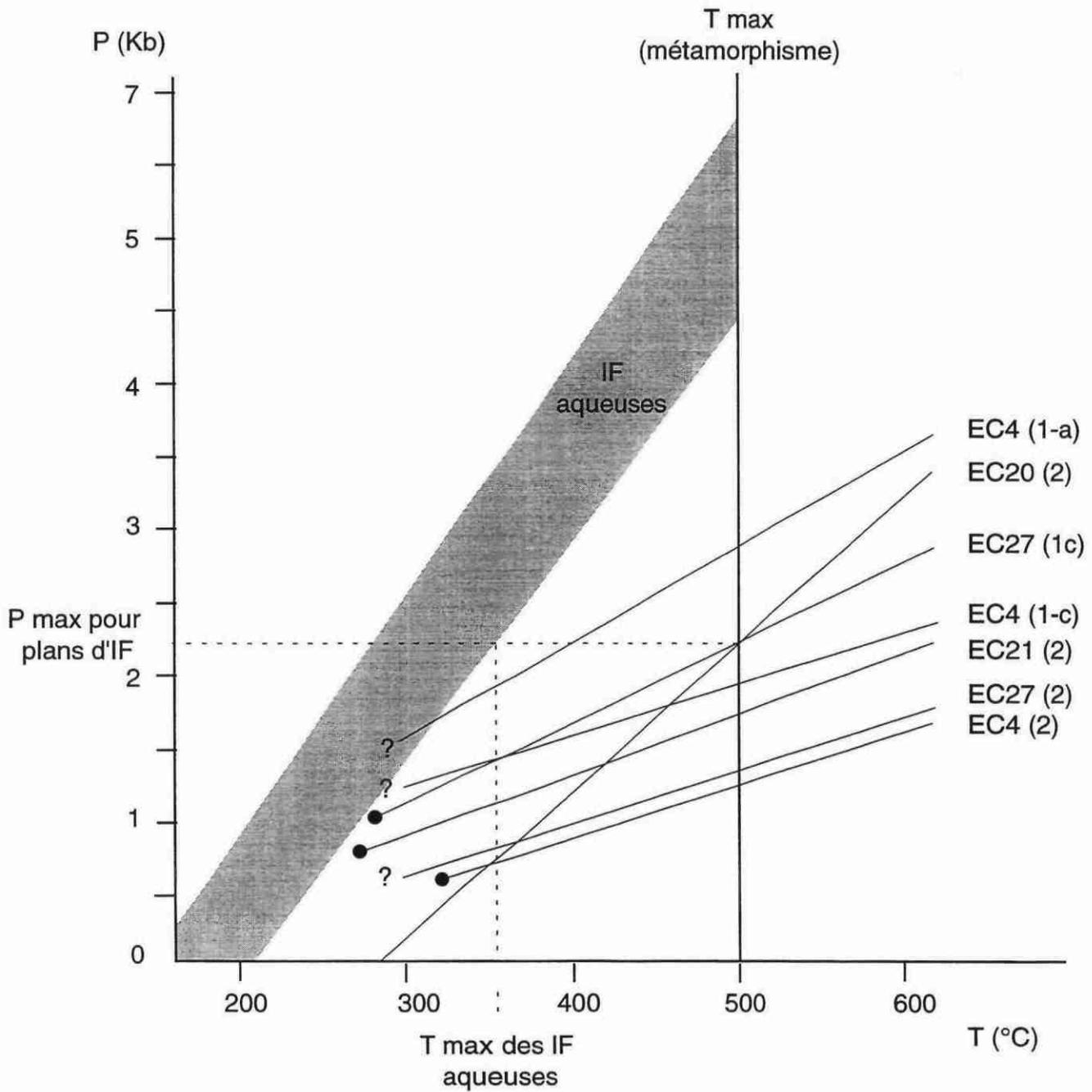
Les compositions totales et celles des phases volatiles ont été reportées dans des diagrammes  $\text{CO}_2\text{total-N}_2\text{-CH}_4$  (fig. V-35A) et  $\text{H}_2\text{O-CO}_2\text{-N}_2\text{+CH}_4$  (fig. V-35B) selon le même principe que pour la lame EC15. Les données microthermométriques ont été reportées dans des diagrammes de corrélation  $\text{ThCO}_2$  en fonction de  $\text{TfCO}_2$  (fig. V-31A) et  $\text{TfCO}_2$  en fonction de  $\text{TfCl}$  (fig. V-31B) afin de mettre en évidence d'éventuelles informations sur l'évolution de la composition et/ou de la densité des fluides. Pour les IF à  $\text{H}_2\text{O-NaCl}$ , les données microthermométriques ont été reportées dans un diagramme  $\text{Thtot}$  en fonction de  $\text{TfG}$  (fig. V-32).

Les lames présentant différentes familles d'IF aquo-carboniques, tels les lames EC4 et EC27, mettent en évidence une évolution de la composition de ces fluides similaire à celle observée dans la lame EC15. Les fluides précoces piégés lors de la cristallisation de l'exsudat de quartz sont à  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}\pm\text{NaCl}$  comme ceux observés dans les IF primaires dans les apatites de la lame EC15. Par la suite ces fluides s'enrichissent essentiellement en  $\text{N}_2$  et légèrement en  $\text{CH}_4$  (fig. V-35A). Cette évolution de composition s'exprime également dans les diagrammes de corrélation de  $\text{ThCO}_2\text{-TfCO}_2$  (fig. V-31A) et  $\text{TfCl-TfCO}_2$  (fig. V-31B). Les différentes familles d'IF dans les différentes lames minces présentent des  $\text{TfCO}_2$  variables pour des  $\text{ThCO}_2$  identiques ou très proches indiquant une variation de composition et de densité des fluides. Cette évolution s'observe également au sein d'une même famille d'IF pour une lame mince donnée. Dans un même plan, les IF présentent toutefois des valeurs microthermométriques constantes d'une IF à l'autre. La lame EC20 possède des IF aquo-carboniques, en amas dans le quartz, dont l'origine peut-être précoce, de composition particulièrement riche en  $\text{CH}_4$  avec une faible teneur en  $\text{N}_2$ .

Dans l'ensemble de ces lames, les fluides les plus tardifs sont à  $\text{H}_2\text{O-NaCl}$ . Les analyses Raman effectuées sur une IF pour chaque famille d'IF d'aqueuse dans chaque lame mince n'ont détecté aucune présence de volatils autre que de l'eau dans la phase volatile. Le diagramme de corrélation  $\text{Thtot-TfG}$  (fig. V-32) met en évidence une très légère variation de composition en salinité liée à la variation de  $\text{TfG}$  pour des  $\text{Thtot}$  similaires. Ceci indique également une légère variation de densité des fluides selon les plans étudiés. Une observation détaillée (voir annexe 2, partie 2) montre que la composition des fluides est constante au sein d'un même plan mais peut varier légèrement d'un plan à l'autre. Par contre, au sein d'un même plan, les  $\text{Thtot}$ , donc la densité des IF peut être variable d'une IF à l'autre. Les plans d'IF aqueuses présentent des données microthermométriques identiques et les caractéristiques énoncées ci-dessus. La salinité varie de 0,35 à 4,62 wt%  $\text{NaCl}$  et la densité de 0,87 à 0,94. Les compositions sont identiques à celles

| Caractéristiques |         |                     | Densités | Fractions molaires |       |       |        |       |
|------------------|---------|---------------------|----------|--------------------|-------|-------|--------|-------|
| ech.             | famille | type d'IF et Fcar   | totales  | xH2O               | xNaCl | xCO2  | xCH4   | xN2   |
| EC4              | 1-a     | lere albite (0,8)   | 0.8306   | 0.433              | 0.002 | 0.565 | 0      | 0     |
| EC4              | 1-c     | dans chlorite (0,7) | 0.7561   | 0.6177             | 0.018 | 0.352 | 0.0018 | 0.011 |
| EC4              | 2       | 0.8                 | 0.5478   | 0.5768             | 0.008 | 0.388 | 0.0049 | 0.022 |
| EC20             | 2       | 0.35                | 0.7476   | 0.9172             | 0.011 | 0.061 | 0.001  | 0.01  |
| EC21             | 2       | 0.85                | 0.6695   | 0.411              | 0.005 | 0.56  | 0      | 0.024 |
| EC27             | 1-c     | 0.8                 | 0.7499   | 0.4703             | 0.009 | 0.504 | 0.0103 | 0.006 |
| EC27             | 2       | 0.8                 | 0.5741   | 0.5557             | 0.009 | 0.391 | 0.0081 | 0.036 |

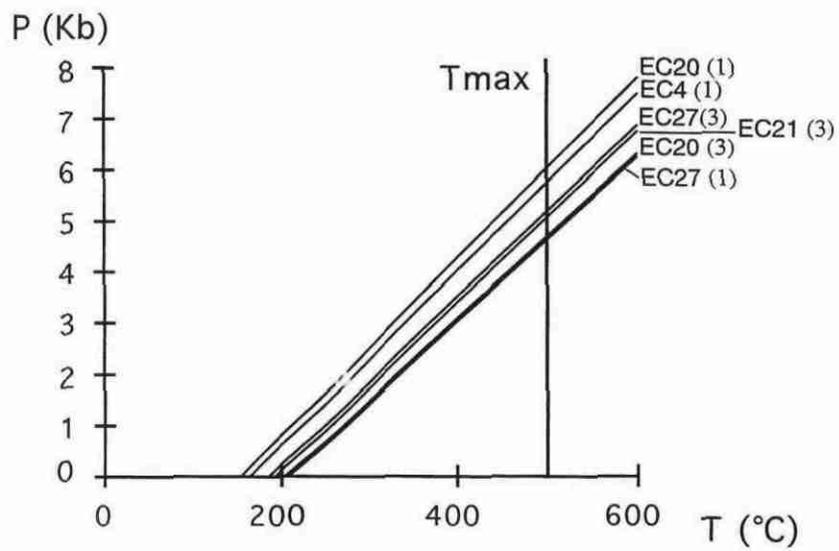
Tableau V-5: Synthèse des densités et compositions totales des différentes familles d'IF des lames EC4, EC27, EC21, EC20 et EC25.



?: Thtot inconnue

●: Thtot

Figure V-33: Isochores des différentes familles d'IF aquo-carboniques (traits noirs) et aqueuses (en grisé) dans les lames EC4, EC21, EC27 et EC20. Les IF les plus précoces sont les familles 1 par rapport aux familles 2, plus tardives.



- (1): plans perpendiculaires à la schistosité et la linéation  
 (3): plans perpendiculaires à la schistosité et oblique à la linéation

Figure V-34: Isochores des IF aqueuses dans les lames EC20, EC4, EC27 et EC21.

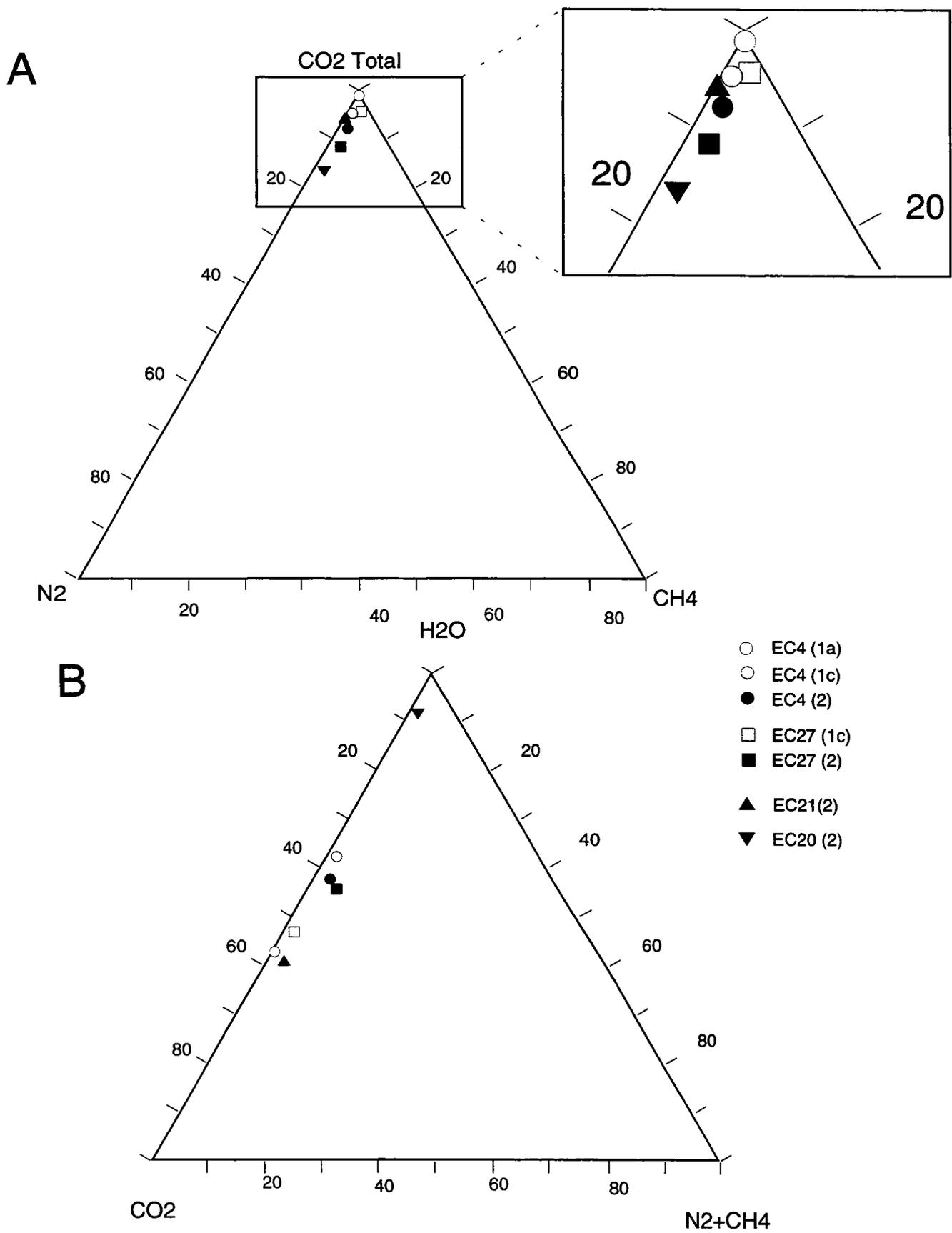


Figure III-35: Composition de la phase volatile CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> (A) et de la composition totale H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>+CH<sub>4</sub> (B) dans les différentes lames pour les différents types d'IF analysées.

des IF aqueuses de la lame EC15 mais les  $T_{tot}$  sont légèrement moins élevées indiquant des densités plus basses.

### **3. 6. Reconstruction du chemin P-T**

Le chemin P-T est reporté dans la figure V-33.

- On peut constater que pour une même lame mince, les IF aquo-carboniques montrent une évolution en décompression entre les conditions de piégeage des IF les plus précoces (1) et celles des IF plus tardives (2). Cette évolution est similaire à celle observée dans la lame EC15.
- Les IF primaires dans l'albite de l'exsudat EC4 indiquent un piégeage des fluides sous des conditions de pression de 2,8 Kb. Ces pressions ne correspondent pas à la pression enregistrée par les fluides primaires de l'exsudat EC15 (3,9 à 4,7 Kb). Or les deux échantillons sont localisés au niveau de la même zone de cisaillement. Dans l'échantillon EC4, une seule albite contient des IF étudiables, toutes les IF dans les autres albités sont décrépitées. Les IF sont sombres et il est difficile d'estimer le  $F_{car}$  qui semble important (de 0,8 environ). Nous avons vu que les IF dans les albités de l'échantillon C15 ont été rééquilibrées postérieurement à leur piégeage. Ce même phénomène peut expliquer les pressions de 2,8 Kb obtenues sur l'échantillon EC4 qui ne correspondraient pas aux conditions de cristallisation de l'exsudat mais à un rééquilibrage tardif des IF primaires dans les albités.
- Les autres plans d'IF aquo-carboniques ont pu cicatriser sous une pression inférieure à 2,2 Kb (correspondant à la pression maximale pour la température maximale de 500°C). Ils ont pu se former sous des températures entre 275°C (température minimale de piégeage donnée par la  $T_{tot}$ ) et 500°C (température maximale correspondant à celle du métamorphisme). Il n'est pas possible d'avoir plus de précisions sur les conditions P-T de leur piégeage dans la mesure où aucun des deux paramètres P ou T n'est calé avec précision.
- Les IF aqueuses sont postérieures aux IF aquo-carboniques. Dans la mesure où les conditions P-T diminuent avec le temps, les plans d'IF aqueuses doivent avoir cicatrisé sous des températures et pressions inférieures aux conditions de piégeage des plans d'IF d'aquo-carboniques. Leur pression de piégeage doit donc être inférieure à 2,2 Kb (correspondant à la P max de piégeage des plans d'IF aquo-carboniques à 500°C) et leurs températures de piégeage se situent entre 150°C (valeurs minimales des  $T_{tot}$  mesurées) et 360°C.

## **4. Discussion**

### **4.1 Marges d'erreur et validité de la méthode**

Afin de s'assurer de la validité de la méthode, il convient de vérifier que les IF ont conservé leur composition et leur densité depuis leur piégeage. Nous

avons vu que les densités anormalement basses dans les IF primaires dans les albites pouvaient s'expliquer par des processus de ré-équilibration post piégeage lors de la décompression. Pour les plans d'IF secondaires à  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{N}_2-\pm\text{CH}_4\pm\text{NaCl}$  et à IF essentiellement aqueuses (famille 3 et 4), un maximum de mesure d'IF dans chaque plan a été effectué afin de détecter de tels changements (entre 10 et 20 IF mesurées par plan). Pour les inclusions aquo-carboniques, le degré de remplissage de la phase vapeur est très constant dans chaque plan étudié et les mesures microthermométriques sont très rapprochées (jamais plus de  $5^\circ\text{C}$  d'écart qui correspondent aux valeurs extrêmes de  $\text{ThCO}_2$ ). Ceci indique, d'une part que le plan d'IF a cicatrisé rapidement avant tout changement de conditions P-T, et d'autre part que les IF n'ont pas été affectées par des changements post-piégeage. Ainsi leurs propriétés V-X reflètent bien les conditions P-T-X au moment de leur piégeage.

Un autre point est de discuter la validité des équations d'état utilisées dans les différents systèmes pour calculer les isochores. L'équation d'état de Bowers et Helgeson (1983) dans l'intervalle P-T utilisé est bien contrainte et correspond aux données expérimentales dans le système  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$  (Gehrig, 1980). Par contre l'équation d'état sur les mélanges de gaz d'Holloway (1977), utilisée pour déterminer la pression de 200 bars dans les IF à  $\text{N}_2-\text{CH}_4\pm\text{CO}_2\pm\text{H}_2\text{O}$ , ne tient pas compte des interactions entre les espèces. De plus, à ma connaissance, aucune étude expérimentale n'a été effectuée pour des IF de cette composition. Pour cette raison, le gradient très élevé de  $120^\circ\text{C}/\text{km}$  déduit de ces IF doit être pris avec précaution.

Les marges d'erreur les plus importantes au cours de cette étude sont de deux natures:

- l'estimation des conditions de température à caler sur l'isochore pour connaître la pression,
- et le degré de remplissage de la phase vapeur dans le calcul des densités et compositions globales.

La première est bien calée par la géothermométrie sur les paragenèses solides à  $506\pm 12^\circ\text{C}$ . La seconde est difficile à connaître car la géométrie en 3D des IF n'est pas connue. Nous avons estimé le degré de remplissage de l'IF sur les IF aux formes les plus ellipsoïdales et estimé l'incertitude à 10%. Les isochores tenant compte de cette erreur ont été tracées en pointillé sur la figure V-29. Dans le cas du piégeage à partir d'un fluide en état d'immiscibilité, l'incertitude la plus grande vient d'une part, de la difficulté de prouver que les deux types de familles d'IF proviennent d'un fluide en état d'immiscibilité, et d'autre part de la validité de l'équation d'état discutée auparavant.

#### **4.2 Le contexte tectonique du piégeage des IF**

L'évolution des conditions P-T-X des fluides est bien déterminée dans l'exsudat EC15. L'étude des lames EC4, EC20, EC21 et EC27 montre une évolution semblable. Cette évolution résulte donc d'une cause régionale et non localisée. Exceptée la lame EC21, toutes les autres lames ont été échantillonnées en dehors de l'auréole du métamorphisme de contact

cartographiée par Najoui (1996). Les données des IF nous apportent les informations suivantes (fig. I-36):

#### 4.2.1. Conditions P-T de la mise en place des nappes

L'étude des IF primaires associée à la géothermobarométrie sur les paragenèses solides nous indique les conditions P-T de la formation de l'exsudat et donc de la déformation progressive en cisaillement à  $506 \pm 12^\circ\text{C}$  et 3,9 à 4,7 Kb. Le contexte tectonique est en compression, avec une formation des exsudats de quartz parallèlement à la schistosité proche de l'horizontale, dont la composition semble être contrôlée par la roche environnante. Dans un tel contexte, et pour de telles profondeurs, il est difficile d'imaginer une connexion des fluides jusqu'à la surface induisant un passage de pressions lithostatiques à des pressions hydrostatiques. La pression fluide doit être lithostatique et indique une profondeur de 14 à 16 km. De plus ces valeurs sont en accord avec les pressions de  $5,2 \pm 0,8$  Kb déterminée par la géobarométrie sur les paragenèses solides. Cette concordance montre bien que les IF primaires dans les apatites n'ont pas été rééquilibrées postérieurement à leur piégeage contrairement aux IF primaires dans les albites. Le gradient thermique au moment de la formation des exsudats est donc entre 31 et  $35^\circ\text{C}/\text{km}$  si l'on considère une densité des roches de  $2,8 \text{ g.cm}^{-3}$ . Ce gradient reflète un gradient normal à légèrement élevé (gradient normal entre 25 et  $30^\circ\text{C}/\text{km}$ ). La série cévenole était donc déjà épaissie lors du fonctionnement du cisaillement montrant une propagation normale des chevauchements qui s'effectue des zones internes vers les zones externes.

#### 4. 2. 2. Chemin P-T lors de l'exhumation des nappes

Les plans d'IF aquo-carboniques montrent un chemin P-T suivi par l'exsudat en décompression jusqu'à 500 bars avec un refroidissement jusqu'à  $300^\circ\text{C}$ . Dans le contexte tectonique en chevauchement et pour les raisons citées dans le paragraphe précédent, cette chute de pression ne peut pas provenir d'un passage brusque d'une pression lithostatique à une pression hydrostatique lié au fonctionnement de la zone de cisaillement (phénomène de valve-sismique (Sibson, 1975)). D'autre part, ces plans ce sont formés après la recristallisation des exsudats de quartz lors de la déformation varisque. Ces plans d'IF nous renseignent donc sur l'exhumation des exsudats postérieure à la déformation progressive en cisaillement. Si l'on exclue les IF aux isochores très peu pentées (car les données sont peu nombreuses et sujettes à discussion) plusieurs hypothèses peuvent expliquer la géométrie des isochores de ces plans d'IF:

- Les fluides sont en équilibre thermique avec la roche environnante.

Dans ce cas, la pression fluide peut correspondre à une pression intermédiaire entre la pression lithostatique et la pression hydrostatique entre 3 et 6 Km de profondeur (fig. V-37). Pour une profondeur de 6 km, les fluides sont piégés sous des pressions entre 600 bars (conditions hydrostatiques) et 1,6 Kb (conditions lithostatiques). La pression des fluides piégés dans nos exsudats est au minimum de 1,2 Kb (pression minimale correspondant à la température minimale de piégeage). correspondant à 4,5 km en pression lithostatique. Dans ces conditions, la

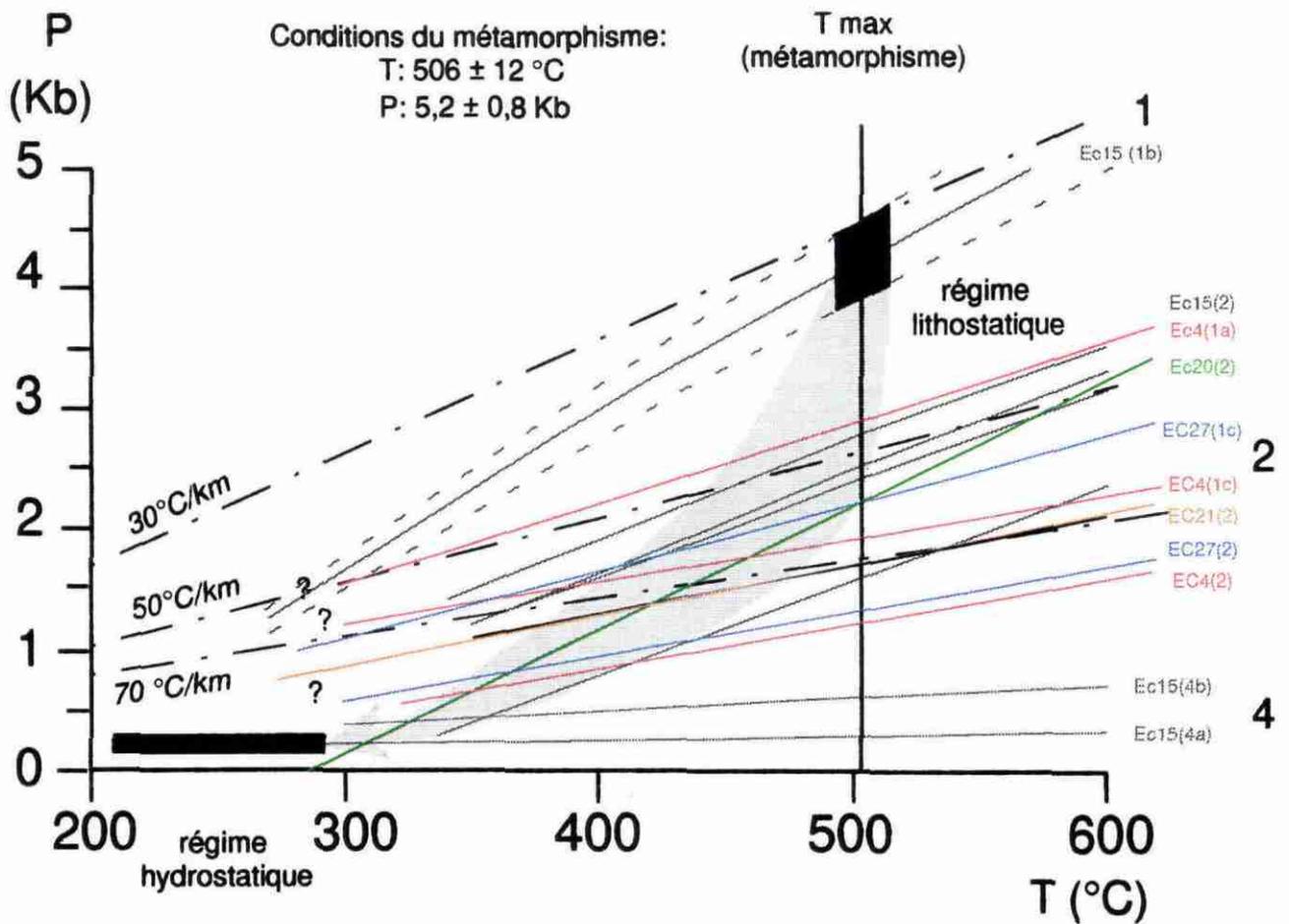


Figure V-36: Synthèse des isochores des différentes familles d'IF pour l'ensemble des lames étudiées (regroupant la fig. V-29 et V-33). Le chemin PT probable est représenté par la zone en grisé. Les chiffres 1, 2, et 4 indique la chronologie de la formation des IF.

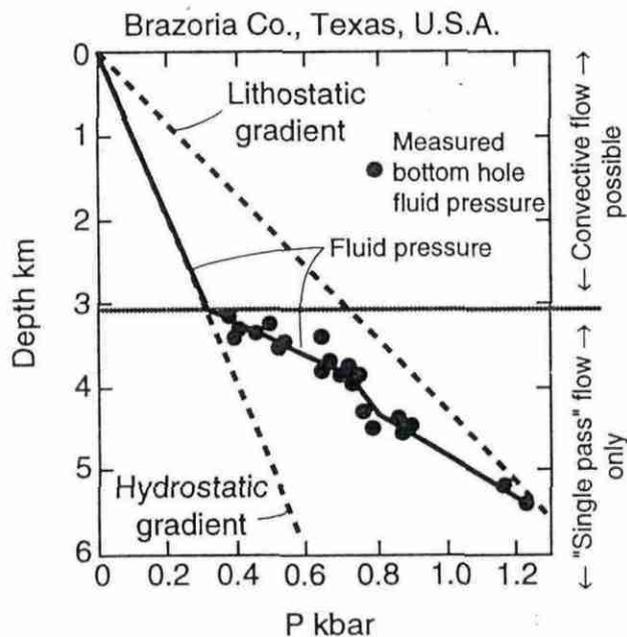


Figure V-37: Diagramme de la pression fluide en fonction de la profondeur pour un puit dans un bassin sédimentaire au Texas (USA) d'après Grégory et Backus (1980) cité dans Wood et Walther (1986).

pression est proche de la pression lithostatique et les données indiquent l'existence de gradients thermiques élevés d'au moins 50°C/km lors de l'exhumation des nappes. Afin de visualiser cette interprétation, nous avons reporté les gradients lithostatiques de 30°C/km, 50°C/km et 70°C/km sur le diagramme où sont reportées les isochores (fig. V-36). Les gradients lithostatiques possibles pour expliquer le piégeage des IF sont ceux qui recoupent les isochores. Les plus pentés s'expliquent par un gradient de 50°/km pour les moins pentés ils nécessitent un gradient de 70°C/km. Cette interprétation doit cependant être prise avec précaution. En effet, les nouvelles données sur l'évolution en profondeur de la pression fluide obtenues sur le forage profond KTB indiquent des pressions hydrostatiques jusqu'à 9 km de profondeur (Grawinkel et Stöckhert, 1997). De plus, des conditions plus proches des conditions hydrostatiques sont favorisées par un contexte tectonique en extension. Or l'orientation des plans d'inclusions fluides suggère un état de contrainte en extension lors de la formation de ces plans. Dans le cas où les fluides auraient enregistré une pression proche de la pression hydrostatique, les gradients thermiques seraient donc moins élevés.

- Les fluides ne sont pas en équilibre thermique avec la roche environnante.

C'est le cas de circulation de fluides chauds qui remontent rapidement de zones plus profondes. Les circulations de tels fluides sont localisées le long de passage tel des failles ou des zones de cisaillement. Nous avons vu que des circulations fluides importantes et rapides sont peu probables dans nos zones de cisaillement. Dans le cas de circulations de fluides chauds postérieurs à la déformation varisque, le caractère régional de la présence de ces fluides, leur situation en dehors de l'auréole de contact et l'absence de failles fragiles importantes dans le secteur où on été échantillonnés les exsudats semblent écarter cette hypothèse.

Dans le cas où les IF tardives à  $H_2O-N_2-CH_4\pm CO_2$  proviennent bien d'un piégeage sous des conditions d'immiscibilité, les IF ont été piégées à 200 bars. Sachant que les pressions sont hydrostatiques pour des profondeurs inférieures à 3 Km environ (fig. V-37), cela implique des profondeurs de piégeage de 2 km correspondant à un gradient géothermique de 120 à 130°C/km minimum ce qui est un gradient extrêmement élevé par rapport à la normale (25-30°C/km). Dans la mesure où les données sont peu importantes, uniquement localisées dans l'exsudat EC15 et les systèmes thermodynamiques pour de telles conditions peu connus nous resterons prudent sur l'existence d'un tel gradient. Un tel processus d'immiscibilité résultant d'une décompression associée à de très forts gradients est toutefois réaliste. Des gradients supérieurs à 100°C/km enregistrés par des IF ont déjà été décrits dans la littérature (Craw et al., 1994). Selon ces auteurs, ils résultent d'un "uplift" rapide (de 5 à 10 Ma par an) du Massif Nanga Parbat (Pakistan) durant la collision himalayenne. Cet "uplift" provoque le passage des fluides sous des conditions de pression hydrostatique et dans des conditions d'immiscibilité du système  $H_2O-NaCl$ .

#### **4. 3. Remarques**

Cette étude met en évidence deux points importants à souligner:

- Les IF primaires, non ré-équilibrées dans les apatites sont des bons témoins pour déterminer les conditions de pression de formation des exsudats. L'apatite s'avère être un minéral résistant aux surpressions fluides et donc aux phénomènes de décrépitation naturelle. Ainsi, dans les Cévennes, il serait intéressant d'étudier l'évolution des conditions de pression au sein du système de chevauchement. Pour cela, l'échantillonnage doit être ciblé sur les exsudats contenant des apatites. L'apatite est souvent associée avec l'albite qui se distingue clairement du quartz sur le terrain. L'étude des IF doit essentiellement se concentrer sur les inclusions primaires dans les apatites afin de résoudre une telle problématique. Cette démarche peut éventuellement être appliquée dans des secteurs autres que les Cévennes et pour d'autres problématiques lorsque l'apatite est présente. L'étude des IF qu'elle contient pourra fournir des informations qui ne seront plus accessibles par l'étude des autres minéraux.
- Les exsudats de quartz renferment de nombreuses familles d'IF, qui ne sont pas contemporaines et ne reflètent pas des conditions de circulation fluide identiques. En effet, les compositions minérales similaires dans les exsudats et la matrice suggèrent un contrôle de la composition de la matrice et donc une circulation réduite des fluides lors de la formation des exsudats. Les plans d'IF, se sont formés postérieurement, parfois sous des conditions hydrostatiques, et peuvent résulter de conditions de circulation de fluides différentes. Une méthode couramment utilisée pour mettre en évidence l'existence de paléo-circulation de fluides est la géochimie des isotopes stables. Cependant, cette méthode ne peut être utilisée dans notre cas sans précaution. En effet, cette méthode, non sélective, ne distingue pas les différentes familles d'inclusions fluides. Les données obtenues sur la plupart des exsudats proviendraient de fait d'un mélange de différentes conditions de circulation de fluides. Les exsudats les plus tardifs peuvent renseigner sur les caractéristiques des fluides tardifs, car les IF primaires sont absentes. Par contre pour étudier les caractéristiques des fluides associés aux zones de cisaillement, la seule solution possible serait de trier les apatites dans les exsudats, ce qui ne semble pas concevable, au vu des quantités exigées pour les analyses géochimiques.



# *CONCLUSIONS*



# *1. Les zones de cisaillement schisteuses*

## **1. 1. Les critères de reconnaissance**

Cette étude a permis d'établir des critères de reconnaissance des zones de cisaillement dans les séries schisteuses, zones qui se caractérisent par un gradient de déformation croissant marqué par:

- le développement d'une deuxième schistosité (S2), voire plusieurs. La S2 est généralement plan axial de plis P2 qui affecte la schistosité régionale S1. Le pendage de la S2 est systématiquement plus penté vers le Nord que la S1.

- une linéation d'étirement marquée dont l'orientation varie progressivement de NW-SE au SE du secteur étudié à NS en allant vers le N et vers l'W,

- la présence de nombreux plis isoclinaux, non cylindriques, d'échelle centimétrique à décimétrique. L'orientation des axes varie d'une trentaine de degré sur un même affleurement et fait systématiquement un angle de 10 à 30° dans un sens anti-horaire avec la linéation d'étirement. Ces plis sont déversés vers l'W ou le SW selon l'orientation de la linéation d'étirement.

- l'abondance de plans de cisaillement, équivalent de plans C', d'orientation moyenne sub-horizontale.

- et une richesse en exsudats de quartz, concentrés exclusivement dans ces zones. Ces exsudats ont une minéralogie similaire à la roche à leur proximité. Ils sont parallèles soit à S1, soit à S2, soit aux plans de cisaillement. Ces exsudats s'observent soit plissés, soit boudinés ou cisailés. La concentration des exsudats de quartz dans les zones de cisaillement et leur relation avec les structures liées à la déformation en cisaillement indiquent qu'ils se sont formés, à différents moments, au cours du fonctionnement de la zone de cisaillement.

## **1. 2. Les mécanismes de déformation**

Dans les zones de cisaillement, la S2 correspond à une schistosité de dissolution. Le mécanisme de déformation dominant dans ces zones semble donc la dissolution-cristallisation. Dans le secteur étudié, ce mécanisme est activé pour des conditions de déformation de  $\pm 500^{\circ}\text{C}$  et  $4,3\pm 0,4$  Kb. Des zones de cisaillement présentant des caractéristiques identiques ont été observées dans d'autres régions d'avant-pays schisteux (Montagne Noire, Sardaigne, Himalaya; Sauniac, 1981, Brunel, 1983) pour des contextes métamorphiques variés. Ainsi nous suggérons que le mécanisme de dissolution-cristallisation est le mécanisme dominant dans les séries schisteuses, même pour des conditions métamorphiques relativement élevées ( $500^{\circ}\text{C}$  dans le cas des Cévennes). Cette conclusion est en accord avec le modèle théorique développé par Bell et Cuff (1989). Le fait que la dissolution-cristallisation soit le mécanisme de déformation dominant n'exclut pas la possibilité de déformation intracristalline plastique. Les deux mécanismes peuvent être associés (Mitra, 1978) et la déformation

intracrystalline plastique domine généralement dans les niveaux essentiellement composés de quartz alors que la dissolution-cristallisation affecte les niveaux riches en phyllosilicates. Dans le cas de notre étude, une fois formé les exsudats de quartz sont affectés par la déformation intracrystalline plastique et la recristallisation. Cette déformation est responsable de la plupart des microtextures du quartz observées en lame mince et de l'orientation des axes cristallographiques du quartz observés pour la plupart des exsudats.

### **1. 3. Les processus de transfert**

Les modalités de transfert dépendent essentiellement de la distribution des fluides intergranulaires. Cette distribution dépend de plusieurs paramètres (P, T, nature du cristal et du fluide). Les observations au microscope à balayage sur des quartz de synthèse (non déformés) (Watson et Brenan, 1987) comme des quartz naturels déformés (White et White, 1981; Hippertt, 1994a) indiquent une répartition de la phase fluide au niveau des points triples de joints de grains, ou de poches isolées sans interconnexion des fluides selon des films de fluides le long des joint de grains. Les travaux d'Hippertt (1994a et b) mettent en évidence que même en l'absence d'une interconnexion des fluides le mécanisme de dissolution-cristallisation est activé dans des quartzites affectés par une zone de cisaillement dans le faciès schiste-vert. Cet auteur doit toutefois faire intervenir une infiltration de fluides dans son modèle le long de microfractures intergranulaires. Dans les Cévennes, le contrôle minéralogique de la composition des exsudats par la matrice schisteuse environnante suggère une circulation réduite à absente des fluides au cours du processus de dissolution-cristallisation. Cette conclusion n'est pas en désaccord avec une étude des isotopes stables effectuée sur des exsudats syn-tectoniques dans des zones de cisaillement similaires dans le moyen pays Himalayen (Boullier et al., 1991) et dans les Alpes suisses (Marquer et Burkhard, 1992). Ces études montrent que les fluides sont tamponnés par les roches environnantes en O et C. Ainsi les connaissances actuelles sur ces zones de cisaillement suggèrent plutôt un mécanisme de dissolution-cristallisation en milieu fermé à l'échelle de la zone de cisaillement.

### **1. 4. La formation des exsudats de quartz**

Au cours du fonctionnement de la zone de cisaillement, les exsudats se forment, pour la plupart parallèlement à la schistosité. Dans la littérature, les veines ou exsudats de quartz, parallèles à la schistosité dans des contextes tectoniques en chevauchement sous des conditions métamorphiques schistes-vert sont généralement interprétés comme résultant d'une surpression fluide (Valenta, 1989; Coli et Sani, 1990; Henderson et al., 1990; Cosgrove, 1993; Kennedy et Logan, 1997). La dissolution-cristallisation provoque un changement de forme des grains et a pour conséquence une réduction de la porosité (Fyfe, 1976). Dans le contexte tectono-métamorphique des Cévennes, des fluides sont libérés au cours des réactions métamorphiques progrades. La libération de ces fluides associée à la diminution de la porosité peut engendrer des surpressions fluides provoquant ainsi de la fracturation hydraulique comme cela est déjà suggéré par Kerrick (1977). Les exsudats de quartz observés dans les zones de

cisaillement des Cévennes peuvent résulter d'un tel processus. Dans cette étude, la fracturation s'effectue parallèlement à la schistosité, la résistance à la traction étant généralement moins importante dans ce plan (Gratier et Vialon, 1980 dans Gratier, 1984).

## *2. Place des Cévennes dans la chaîne Varisque d'Europe Occidentale*

### *2. 1. La mise en place des nappes lors de l'épaississement crustal*

La cartographie des zones de cisaillement et des lithologies met en évidence un système de chevauchements imbriqués dans les Cévennes. La géométrie de ce système correspond à un duplex à pendage conforme formé en séquence normale. Ces chevauchements sont des zones de cisaillement résultant d'une déformation progressive responsable de la schistosité régionale S1 parallèle à la stratification, d'une linéation d'étirement L1 et de plis à axes parallèles à cette linéation. A l'affleurement, ces zones de cisaillement se caractérisent par un plissement isoclinal avec formation d'une S2 parallèle au plan axial de plis P2, une linéation d'étirement marquée, une linéation de crénulation, de nombreux plans de cisaillement et une abondance en exsudat de quartz. D'après la trajectoire des linéations d'étirement et les critères de cisaillement observés, les chevauchements sont à vergence vers le Sud au NW de la carte, vergence qui devient progressivement vers le SE à E en allant vers le SE. La déformation régionale et les zones de cisaillement sont synchrones d'un métamorphisme à  $506 \pm 12^\circ\text{C}$  et  $4,3 \pm 0,4 \text{ Kb}$  daté à 340 Ma ( $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ; Caron, 1994). Les Cévennes correspondent à une zone de décollement d'échelle kilométrique sur laquelle ont été charriées 14 à 16 km de série.

La formation du duplex dans les Cévennes s'intègre dans la propagation des chevauchements dans l'espace (Matte, 1986, 1991) et dans le temps (Costa, 1990) responsable de l'épaississement de la chaîne varisque. Ce système en duplex se caractérise par:

- un chevauchement sommital

Les nappes allochtones au dessus du chevauchement sommital ne s'observent plus dans la région des Cévennes. Cependant, des témoins de nappes allochtones existent au NW de la région étudiée, au niveau des klippes de Marvejols, du Vibal, du Lézou, de Najac-Carmaux et de la Bessenois. Ces klippes contiennent des reliques de haute-pression et présentent toutes les caractéristiques de l'unité supérieure des gneiss définie en Limousin (Ledru et al., 1989). Elles reposent directement sur les séries schisteuses de l'Albigeois, considérées comme le para-autochtone et équivalent des Cévennes. Il est donc probable que la nappe allochtone surmontant les séries cévenoles corresponde à l'unité supérieure des gneiss. Cette hypothèse s'intègre difficilement avec l'empilement des nappes (de la base au sommet: para-autochtone, unité inférieure des gneiss, unité supérieure des gneiss) proposé par Ledru et al. (1989). Cependant, cet empilement, bien caractérisé dans le Limousin, est plus hypothétique dans le

Massif central oriental (Ledru et al., 1989; Quenardel et al., 1991). Des études doivent être effectuées au niveau des contacts supposés entre les gneiss inférieurs et les para-autochtones afin de déterminer la géométrie des nappes dans le Massif Central oriental. Dans le cas où l'unité inférieure des gneiss existerait, on peut toutefois constater que la klippe du Vibal, témoin de l'unité supérieure des gneiss, repose sur le contact présumé entre l'unité inférieure des gneiss et les séries schisteuses para-autochtone de l'Albigeois (Ledru et al., 1989). Dans ce cas, la flèche de l'unité supérieure des gneiss semble donc plus importante que celle de l'unité inférieure des gneiss. La mise en place des séries allochtones est contemporaine d'un métamorphisme rétrograde. Elle s'effectue avant 350-360 Ma (Costa, 1990) ( $344 \pm 13$  Ma sur pegmatites syn-métamorphe du faciès amphibolite; Pin et Lancelot, 1982).

- Les chevauchements secondaires constituant les écaillés du système:

Ces chevauchements sont localisés dans la région des Cévennes et se retrouvent probablement dans l'Albigeois qui est structuré en nappes (Guérangé-Lozes, 1987) entre 340 Ma et 330 Ma (Costa, 1990). Dans les Cévennes, les datations  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  sur différents minéraux syn-métamorphique donnent des âges entre 340 Ma et 330 Ma (Caron, 1994). Les âges obtenus sur amphibole à 343 Ma doivent correspondre aux âges les plus proches de la mise en place des nappes, la température de fermeture de l'amphibole (500-550°C) étant supérieure ou égale à la température du métamorphisme.

-Le chevauchement basal:

Le chevauchement basal peut correspondre au chevauchement vers le Sud des Cévennes et de l'Albigeois sur les séries plus externes du Vigan (Alabouvette et al., 1988) et des Monts de Lacaune (Guérangé-Lozes, 1987) respectivement. Les Monts de Lacaune chevauchent vers le Sud les séries du versant Sud de la Montagne Noire, correspondant aux séries les plus externes du Massif central. Ces séries sont structurées en nappes dont l'âge de mise en place se situe à 310 Ma (Engel et al., 1981).

La formation du duplex s'est donc effectué entre 360 Ma minimum, correspondant au chevauchement principal sommital, et 330 Ma pour les chevauchements les plus méridionaux. Cette durée de formation du duplex est compatible avec une étude géochronologique récente effectuée dans un système de chevauchements en duplex pour des conditions métamorphiques moins importantes (Dunlap et al., 1997). Ces auteurs montrent que le duplex de Ruby Gap (Australie) se forme entre 340 et 310 Ma alors que la nappe sus-jacente était déjà en partie exhumée dès le début de la formation du duplex. Dans un tel système de chevauchement en duplex, le gradient thermique apparent est très faible et directement corrélé avec les variations d'épaisseur de la nappe sus-jacente. Dans le duplex de Ruby Gap à vergence Sud, le gradient thermique est de 10°C/km décroissant du Nord vers le Sud. Dans les Cévennes, le secteur est affecté par une déformation ultérieure, et notamment par de nombreuses failles dont l'importance et les rejeux successifs sont mal connus. Ainsi il n'est pas possible de reconstituer entièrement la géométrie initiale du système de chevauchement et le gradient thermique horizontal associé à la mise en place des nappes ne peut être déterminé. Cependant, l'étude des paragenèses minérales dans le domaine SW du secteur étudié, indique une absence de variations de métamorphisme

du Sud vers le Nord. Ce résultat suggère une très faible variation de l'épaisseur de la nappe allochtone du N au S dans ce secteur. A grande échelle, le métamorphisme diminue des régions les plus septentrionales vers les régions les plus méridionales. Ce métamorphisme est compatible avec une diminution progressive de l'épaisseur des nappes allochtones en allant vers les zones plus externes.

## **2. 2. L'exhumation des nappes**

- L'absence de témoins des nappes allochtones dans la région des Cévennes indique qu'elle a été entièrement érodée. Les inclusions fluides piégées dans les microfractures des exsudats de quartz ont enregistré cette exhumation. Leur étude indique une décompression accompagnée d'un refroidissement après la mise en place des nappes. Cette décompression s'effectue soit dans un contexte régional à fort gradient géothermique ( $> 70^{\circ}\text{C}$ ), soit dans un contexte de circulations de fluides sous des conditions de pression hydrostatique. Les nouvelles données sur l'évolution en profondeur de la pression fluide obtenues sur le forage profond KTB indiquent des pressions hydrostatiques jusqu'à 9 Km de profondeur (Grawinkel et Stöckert, 1997). Ainsi la plupart des pressions obtenues peuvent correspondre à des pressions hydrostatiques pour des gradients géothermiques normaux (environ  $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ). D'après les lois de diffusion de la chaleur, la décompression s'est effectuée relativement lentement puisque la chute de pression s'accompagne d'un refroidissement. Une telle géométrie de chemin pression-température suggère une exhumation des nappes par de l'érosion. Cependant, l'orientation des plans d'IF les plus tardifs suggèrent un régime de contrainte d'un contexte tectonique en extension. Cet événement pourrait correspondre à l'extension syn- à post-orogénique qui affecte l'ensemble de la chaîne varisque à partir du Westphalien (Burg et al., 1994).

## **2. 3. L'extension syn- à post-orogénique**

Faure (1995) propose que les granodiorites du Saint-Guiral et du Liron se soient mise en place lors de l'extension syn-orogénique de direction EW. A cet événement sont associés un réseau de filons de lamprophyres de direction NNE-SSW recoupé par un réseau de filons proche de EW. Dans les séries schisteuses, les fluides les plus tardifs indiquent que les schistes actuellement à l'affleurement étaient déjà fortement exhumés au moment de l'intrusion des granodiorites. Ceci est confirmé par la faible pression de mise en place de la granodiorite de St-Guiral-Liron (1 à 1,5 Kb) déduite des paragenèses métamorphiques de contact (Najoui, 1996). Postérieurement à l'intrusion des granodiorites, les séries cévenoles sont affectées par une déformation fragile importante. Cette déformation fragile se caractérise par des failles normales et des décrochements de directions N150-160, N120-N130 et N50. Ces failles présentent les mêmes caractéristiques que celles associées à la formation du bassin carbonifère d'Alès (Djarar et al., 1996). Dans l'hypothèse où ces failles sont associées à un même événement, elles correspondent à une extension dont la direction évolue de manière anti-horaire de N70 à N140. Une étude plus quantitative est cependant nécessaire pour discuter le contexte tectonique régional responsable de cette fracturation.

Dans l'hypothèse où l'extension est responsable des déformations fragiles tardi-varisques, cette extension peut s'intégrer dans la déformation extensive post-orogénique qui affecte l'ensemble de la chaîne varisque à partir du Stéphanien (Burg et al., 1994).

Dans ce cas, dans les Cévennes, cette extension s'est effectuée essentiellement de manière fragile, du moins en ce qui concerne l'extension post-orogénique. Aucune remontée de croûte ductile n'est observée dans le secteur et de plus nous conservons les structures compressives acquises lors de l'épaississement crustal.

Dans le cadre d'une telle hypothèse, afin de comprendre la géométrie régionale liée au processus en extension post-orogénique entre 300 et 280 Ma, nous avons effectué une coupe synthétique partant de la Montagne Noire jusqu'au Velay en intégrant les coupes effectuées dans les régions voisines présentées dans le chapitre I (fig. 1). Nous proposons que les grandes failles N120 qui traversent les Cévennes aient fonctionné en failles normales à pendage NE ou SW entre 300 et 280 Ma. Elles juxtaposent des lithologies différentes et pourraient expliquer les variations de métamorphisme notées par Rakib (1996). Ces failles ont probablement joué en décrochement dextre. Entre les failles normales, la déformation liée à la mise en place des nappes lors de l'épaississement crustal est conservée.

La coupe interprétative proposée pour le Sud du Massif central met en évidence deux détachements majeurs avec remontée de la croûte ductile et formation contemporaine de bassins stéphanien. La mise en place des dômes migmatitiques s'est effectuée à  $297 \pm 3$  Ma ( $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  par Maluski et al., 1991) pour la Montagne Noire et  $301 \pm 5$  Ma pour le Velay (U/Pb sur monazites du granite principal; Mougeot et al., 1997). Entre ces deux secteurs l'extension s'exprime par des horsts et grabens séparés par des failles normales sans remontée de croûte ductile. Cette géométrie est comparable à celles obtenues lors de la plupart des modélisations analogiques en extension (fig. 2). L'extension de la croûte ductile en profondeur liée à l'étalement gravitaire de la chaîne provoque une extension de la croûte fragile en horsts, grabens et blocs basculés. Le cas où l'extension se localise le long d'un détachement qui s'accompagne d'une remontée de la croûte ductile responsable d'un dôme se rencontre dans les modèles analogiques comprenant une hétérogénéité rhéologique juste sous l'interface croûte fragile - croûte ductile (fig. 3) (Van Den Driessche, 1994; Brun et al., 1994). Dans ce cas, le champ de déformation dans la croûte fragile est dissymétrique, en blocs basculés à proximité du dôme. Lorsque l'on s'en éloigne la géométrie dans la croûte fragile redevient en horsts et grabens.

L'apport essentiel de ce travail concerne la caractérisation de zones de cisaillement dans les séries schisteuses, permettant ainsi de débrouiller des séries réputées comme monotones et difficiles à interpréter. La reconnaissance de telles zones de cisaillement a permis de replacer les Cévennes dans le cadre de l'évolution de la chaîne varisque. D'autre part, cette étude montre l'importance d'une approche pluri-disciplinaire (cartographie, données de terrain, analyses de la déformation, thermo-barométrie par diverses méthodes) pour résoudre des problèmes géologiques souvent complexes.

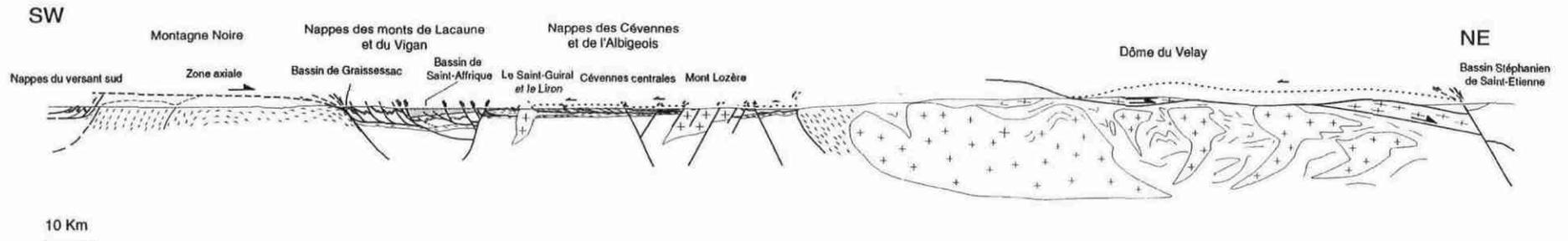


Figure 1: Coupe interprétative du Sud du Massif central (des nappes du versant Sud de la Montagne Noire au bassin stéphanien de Saint-Etienne).

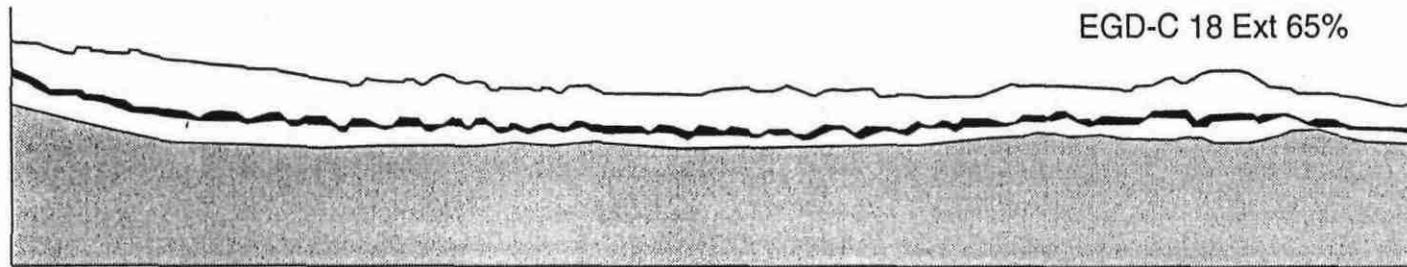


Figure 2: Modélisation analogique en extension (modèle avec découplage basal total pour 65% d'extension) d'après Van den Driessche (1994).

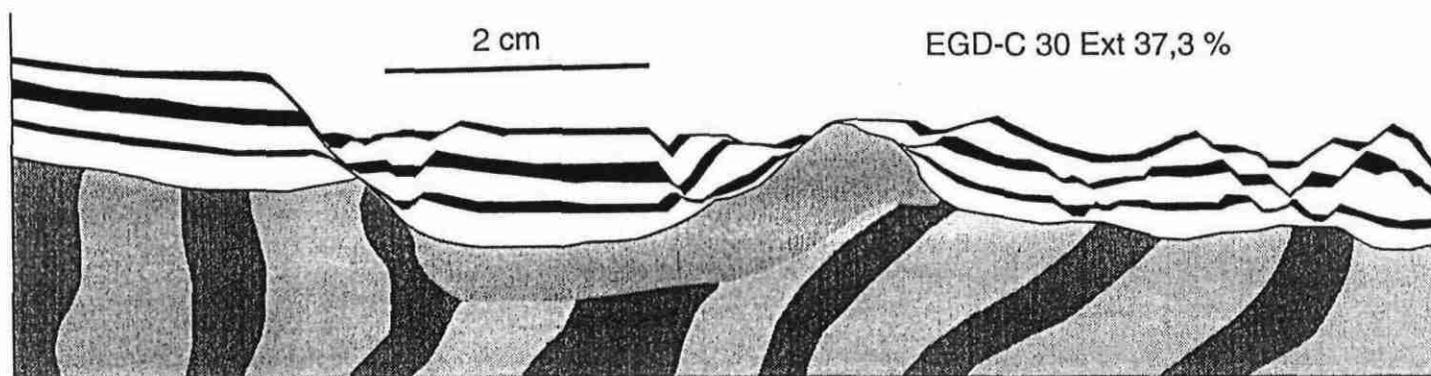


Figure 3: Modélisation analogique en extension (modèle avec découplage basal et hétérogénéité rhéologique à l'interface croûte fragile - croûte ductile pour 37,3% d'extension) d'après Van den Driessche (1994).



*BIBLIOGRAPHIE*



Alabouvette B., Arthaud F., Bodeur Y., Barthes J., Paloc H., Aubague M. (1988). *Carte et notice explicative de la feuille le Vigan à 1/50 000. n° 937*, BRGM, 68 p.

Allemand P., Lardeaux J., Dromart G., Ader M. (1997) Extension tardi-orogénique et formation des bassins intracontinentaux: le bassin stéphanien des Cévennes. *Geodinamica acta*, **10**, 2, p. 70-80.

Angus S., Armstrong B., de Reuck K., Altunin V., Gadetskii O., Chapela G., Rowlinson J. (1976) International thermodynamic tables of the fluid state, carbon dioxide. In (Vol. 3), Pergamon Press.

Arène J., Berger G., Gras H., Poidevin J., Sauvel C. (1978). *Carte et notice explicative de la feuille d'Alès à 1/50 000. n° 912*, BRGM, 58 p.

Arnaud F., Burg J. (1993) Microstructures des mylonites schisteuses: cartographie des chevauchements varisques dans les Cévennes et détermination de leur cinématique. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Paris)*, **11**, 317, p. 1441-1447.

Arthaud F. (1970) Etude tectonique et microtectonique comparée de deux domaines hercyniens: les nappes de la Montagne Noire (France) et l'anticlinorium de l'Iglesiente (Sardaigne). Univ. Montpellier, thèse 3ème cycle, 175 p.

Arthaud F., Mattauer M., Matte P. (1969) La direction des plis couchés penniques de la phase majeure hercynienne est sub-méridienne dans les Cévennes méridionales. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Paris)*, **269**, série D, p. 556-559.

Arthaud F., Matte P. (1977) Late palaeozoic strike-slip faulting in southern Europe and northern Africa: result of a right-lateral shear zone between the Appalachians and the Urals. *Bulletin of the Geological Society of America*, **88**, p. 1305-1320.

Bakker R., Jansen J. (1991) Experimental post-entrapment water loss from synthetic CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O inclusions in natural quartz. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **55**, p. 2215-2230.

Ballevre M., Paris F., Robardet M. (1992) Corrélations ibéro-armoricaines au Paléozoïque: une confrontation des données paléobiogéographiques et tectonométamorphiques. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Paris)*, **315**, II, p. 1783-1789.

Bard J., Burg J., Matte P., Ribeiro A. (1981) La chaîne hercynienne d'Europe occidentale en termes de tectonique de plaques. *Mémoire du BRGM (France)*, **108**, p. 233-246.

Beach A. (1976) The interrelations of fluid transport, deformation and geochemistry and heat flow in early Proterozoic shear zones in the Lewisian complex. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **A280**, p. 529-604.

Bell T. (1978) Progressive deformation and reorientation of fold axes in a ductile mylonite zone: the Woodroffe thrust. *Tectonophysics*, **44**, p. 285-320.

Bell T., Cuff C. (1989) Dissolution, solution transfert, diffusion versus fluid flow and volume loss during deformation/metamorphism. *Journal of Metamorphic Geology*, **7**, 4, p. 425-447.

Bergeron J. (1904) Note sur les nappes de recouvrements du versant méridional de la Montagne Noire et des Cévennes aux environs du Vigan. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **4**, p. 180-194.

Bergeron J. (1905) Sur la tectonique de la région située au Nord de la Montagne Noire. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Paris)*, **111**, p. 466-467.

- Berman R. (1988) Internally-consistent thermodynamic data for minerals in the system  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{MgO}-\text{FeO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ . *Journal of Petrology*, **29**, p. 445-522.
- Berthé D., Brun J. (1980) Evolution of folds during progressive shear in the south Armorican Shear Zone, France. *Journal of Structural Geology*, **2**, 1/2, p. 127-133.
- Berthé D., Choukroune P., Jegouzo P. (1979) Orthogneiss, mylonite and non coaxial deformation of granites: the example of the South Armorican Shear Zone. *Journal of Structural Geology*, **1**, 1, p. 31-42.
- Blumenfeld P., Mainprice D., Bouchez J. (1986)  $\langle C \rangle$  slip in quartz from subsolidus deformed granite. *Tectonophysics*, **127**, p. 97-115.
- Bodnar R., Binns P., Hall D. (1989) Synthetic fluid inclusions-VI. quantitative evaluation of the decrepitation behaviour of fluid inclusions in Quartz at one atmosphere confining pressure. *Journal of Metamorphic Geology*, **7**, p. 229-242.
- Boiron M., Essarraj S., Sellier E., Cathelineau M., Lespinasse M., Poty B. (1992) Identification of fluid inclusions in relation to their host microstructural domains in quartz by cathodoluminescence. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **56**, p. 175-185.
- Bouchez J.L. (1977) Le quartz et la cinématique des zones ductiles. Univ. Nantes, thèse 3ème cycle, 175 p.
- Boullier A., Michot G., Pêcher A., Barrès O. (1989) Diffusion and/or plastic deformation around fluid inclusions in synthetic quartz : new investigations. In : Bridgwater D, *Fluid Movements-Element Transport and the Composition of the Deep Crust*, p. 345-360.
- Boullier A.M., France-Lanord C., Dubessy J., Adamy J., Champenois M. (1991) Linked fluid and tectonic evolution in the High Himalaya mountains (Nepal). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **107**, p. 358-372.
- Bowers T., Helgeson H. (1983) Calculation of the thermodynamics and geochemical consequences of nonideal mixing in the system  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$  on phase relations in geological systems : Equation of state for  $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$  fluids at high pressures and temperatures. *Geochimica Cosmochimica Acta*, **47**, p. 1247-1275.
- Boyer S. (1978) Structure and origin of the Grandfather Mountain window, North Carolina. Univ. Johns Hopkins, P. H. D. thesis.
- Boyer S., Elliot D. (1982) Thrust systems. *American association of petroleum geologists bulletin*, **66**, 9, p. 1196-1230.
- Bozzo A.T., Chen H.S., Kass J.R., Bardhun A.J. (1975) The properties of the hydrates of chlorine and carbon dioxide. *Desalination*, **16**, p. 303-320.
- Brace W.F., Bombolakis E.G. (1963) A note on brittle crack growth in compression. *Journal of Geophysical Research*, **68**, p. 3709-3713.
- Brantley S.L. (1992) The effect of fluid chemistry on quartz microcrack lifetimes. *Earth and Planetary Science Letters*, **113**, p. 145-156.

Brantley S., Evans B., Hickman S., Crerar D. (1990) Healing of microcracks in quartz: implications for fluid flow. *Geology*, **18**, p. 136-139.

Brouder P. (1963) Description d'une succession lithologique avec niveaux repères dans les schistes cristallins des Cévennes près de Villefort. *Bulletin de la Société géologique de France*, **7**, V, p. 828-834.

Brouder P. (1964) Niveaux-repères dans la série métamorphique des Cévennes centrales (Massif central français). *Bulletin de la Société géologique de France*, **7**, VI, p. 699-703.

Brouder P. (1968) De la présence de nappes plis de style pennique dans la série métamorphique hercynienne: les Cévennes, Massif central français. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Paris)*, **267**, série D, p. 575-578.

Brouder P. (1971) Les étapes de la formation d'un édifice hercynien polyphasé: les Cévennes. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Paris)*, **273**, série D, p. 27-29.

Brouder P., Gèze B., Macquar J., Paloc H. (1977). *Carte et notice explicative de la feuille Meyrueis à 1/50 000. n° 910*, BRGM, 29 p.

Brown P., Hagemann S. (1995) MacFlincon and its application to fluids in Archean lode-gold deposits. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **59**, p. 3943-3952.

Brun J., Sokoutis D., Van Den Driessche J. (1994) Analogue modeling of detachment fault systems and core complexes. *Geology*, **22**, 4, p. 319-322.

Brunel M. (1980) Quartz fabrics in shear-zone mylonite: evidence for a major imprint due to late strain increments. *Tectonophysics*, **64**, p. 33-44.

Brunel M. (1983) Étude pétrostructurale des chevauchements ductiles en Himalaya (Nepal Oriental et Himalaya du NW). Univ. Paris VII, Thèse d'état, 395 p.

Burg J. (1977) Tectonique et microtectonique des séries cristallophylliennes du Haut-Allier et de la vallée de la Truyère. Univ. Montpellier, thèse 3ème cycle, 79 p.

Burg J., Matte P. (1978) A cross section through the French Massif Central and the scope of its Variscan geodynamic evolution. *Z. dt. geol. Ges.*, **129**, p. 429-460.

Burg J.P., Leyreloup A., Marchand J., Matte P. (1984) Inverted metamorphic zonation and large-scale thrusting in the Variscan Belt: an exemple in the French Massif Central. In : Hutton D, Sanderson D, *Variscan tectonics of the North Atlantic region*, p. 47-61.

Burg J.P., Van Den Driessche J., Brun J.P. (1994) -Syn- to post-thickening extension in the Variscan belt of Western Europe: modes and structural consequences. *Géologie de la France*, **3**, p. 33-51.

Caron C. (1994) Les minéralisations Pb-Zn associées au Paléozoïque inférieur d'Europe Méridionale. Traçage isotopique Pb-Pb des gîtes de l'Iglésiente (SW Sardaigne) et des Cévennes et évolution du socle encaissant par la géochronologie U-Pb, 40Ar/39Ar et K-Ar. Univ. Montpellier, thèse de doctorat.

Caron C., Lancelot J. (1996) Datation U-Pb et Rb-Sr à 390 Ma de l'orthogneiss de Peyrolles (Cévennes, Massif central). Implications géodynamiques. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Paris)*, **323**, 4, p. 305-312.

- Carreras J., Estrada A., White S. (1977) The effects of folding on the C-axis fabrics of a quartz mylonite. *Tectonophysics*, **39**, p. 3-24.
- Cathelineau M., Lespinasse M., Bastoul A., Bernard C., Leroy J. (1990) Fluid migration during contact metamorphism: the use of oriented fluid inclusions for a time/space reconstruction. *Mineralogical Magazine*, **54**, p. 169-182.
- Champenois M. (1989) Interactive image analysis system: contribution to structural analysis, fluid inclusion studies and petrography. *Terra Abstracts*, **1**, p. 83.
- Coli M., Sani F. (1990) Vein distribution in a thrust zone: a case history from the Northern Apennines, Italy. In : Knipe R, Rutter E, *Deformation mechanisms, Rheology and Tectonics*, p. 475-482.
- Collins P. (1979) Gas Hydrates in CO<sub>2</sub>-Bearing Fluid Inclusions and the use of Freezing Data for Estimation of salinity. *Economic Geology*, **74**, p. 1435-1444.
- Cordier P., Doukhan J., Ramboz C. (1994) Influence of dislocations on water leakage from fluid inclusions in quartz: a quantitative reappraisal. *European Journal of Mineralogy*, **6**, p. 745-752.
- Cosgrove J. (1993) The interplay between fluids, folds and thrusts during the deformation of a sedimentary succession. *Journal of Structural Geology*, **15**, p. 491-500.
- Costa S. (1990) De la collision continentale à l'extension tardi-orogénique: 100 Ma d'histoire varisque dans le Massif Central français. Une étude chronologique par la méthode <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar. Univ. Montpellier, thèse de doctorat, 441 p.
- Costa S., Maluski H., Lardeaux J. (1993) <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar chronology of Variscan tectonometamorphic events in an exhumed crustal nappe: the Monts du Lyonnais complex (Massif central, France). *Chemical Geology*, **105**, p. 339-359.
- Coward M., Potts G. (1983) Complex strain patterns developed at the frontal and lateral tips to shear zones and thrust zones. *Journal of Structural Geology*, **5**, 3/4, p. 383-399.
- Cox S. (1991) Geometry and internal structures of mesothermal vein system - implications for hydrodynamics and ore genesis during deformation. In : *Structural Geology in Mining and Exploration. Extended abstract, Geology department (Key Centre) and University Extension, University of Western Australia, Nedlands*, p. 47-53.
- Craw D., Koons P., Winslow D., Chamberlain C., Zeiliter P. (1994) Boiling fluids in a region of rapid uplift, Nanga Parbat Massif, Pakistan. *Earth and Planetary Science Letters*, **128**, p. 169-182.
- Dallain C. (1997) Cartographie et analyse structurale des granitoïdes du Velay (MCF). Univ. Rennes, thèse de doctorat.
- Darimont A., Heyen G. (1986) Simulation des équilibres de phases dans le système CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>. Application aux inclusions fluides. *Bulletin de Minéralogie*, **111**, p. 179-182.
- Davidson D. (1973) Clathrate hydrates. In : F F, *Water in crystalline hydrates; Aqueous solutions of simple nonelectrolytes*, p. 115-234.
- Dell'Angelo L., Tullis J. (1989) Fabric development in experimentally sheared quartzites. *Tectonophysics*, **169**, p. 1-21.

- Demay A. (1931) Les nappes cévenoles. *Mém. expl. Carte géol. Dét. Fr.*, 320p.
- Demay A. (1948) Tectonique antéstéphanienne du Massif central. In Mémoires de la carte géologique de France. 250 p).
- Dhamelincourt P. (1979) Étude et réalisation d'une microsonde moléculaire à effet Raman. Quelques domaines d'application. Univ. Lille, Thèse d'état.
- Diamond L. (1990) Fluid inclusion evidence for P-V-T-X evolution of hydrothermal solutions in late-Alpine gold-quartz veins at Brusson, Val d'Ayas, northwest Italian Alps. *American Journal of Science*, **290**, p. 912-958.
- Diamond L. (1992) Stability of CO<sub>2</sub> hydrate + CO<sub>2</sub> liquid + CO<sub>2</sub> vapour + aqueous KCl-NaCl solutions: Experimental determination and application to salinity estimates of fluid inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **56**, p. 273-280.
- Diamond L. (1994a) Introduction to phase relations of CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O fluid inclusions. In : *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*, Pontignano, Sienna, De Vivo B, Frezzotti M, p. 131-158.
- Diamond L. (1994b) Salinity of multivolatile fluid inclusions determined from clathrate hydrate stability. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **58**, p. 19-51.
- Djarar H., Wang H., Guiraud M., Clermonté J., Courel L., Dumain M., Laversanne J. (1996) Le bassin stéphanien des Cévennes (Massif central): un exemple de relation entre sédimentation et tectonique extensive tardi-orogénique dans la chaîne varisque. *Geodinamica acta*, **9**, 5, p. 193-222.
- Donnelly H., Katz D. (1954) Phase equilibria in the carbon dioxide-methane system. *Indus. Eng. Chem.*, **46**, p. 511-517.
- Donnot M., Guérange B. (1978) Le synclinorium cambrien de Brusque. Implications stratigraphiques et structurales dans les Monts de l'Est de Lacaune (Tarn, Aveyron, Hérault). Versant Nord de la Montagne Noire. *Bulletin du BRGM*, **4**, section I, p. 333-363.
- Drummond S. (1981) Boiling and mixing of hydrothermal fluids: chemical effects on mineral precipitation. Univ. Pennsylvanie, Ph. D., 380 p.
- Dubessy J. (1994) Single component systems: Phase diagrams and their application to fluid inclusions. In : *Inclusions in minerals*, Pontignano, Sienna Italie, De Vivo B, Frezzotti M, p. 95-115.
- Dubessy J., Geisler D., Kosztolanyi C., Vernet M. (1983) The determination of sulfate in fluid inclusions using the MOLE Raman microprobe. Application to a Keuper halite and geochemical consequences. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **47**, p. 1-10.
- Dubessy J., Poty B., Ramboz C. (1989) Advances in C-O-H-N-S fluid geochemistry based on micro-Raman spectrometric analysis of fluid inclusions. *European Journal of Mineralogy*, **1**, p. 517-534.
- Dubessy J., Boiron M., Moissette A., Monnion C., Sretenskaya N. (1992a) Determination of water, hydrates and PH in fluid inclusions by micro-Raman spectrometry. *European Journal of Mineralogy*, **4**, p. 885-894.
- Dubessy J., Thiéry R., Canals M. (1992b) Modelling of phase equilibria involving mixed gas clathrates: Application to the determination of molar volume of the vapour phase and salinity of the aqueous solution in fluid inclusions. *European Journal of Mineralogy*, **4**, p. 885-894.

- Dubois M. (1992) Fluides crustaux: approche expérimentale et analytique. 1- Détermination du solvus des systèmes H<sub>2</sub>O-MCl. 2- Caractérisation et dynamique des fluides des dômes thermiques sur l'exemple du diapir vellave (SE Massif Central français). Univ. Nancy 1, Thèse 3ème cycle, 208 p.
- Dunlap W., Hirth G., Teyssier C. (1997) Thermomechanical evolution of a ductile duplex. *Tectonics*, **16**, 6, p. 983-1000.
- Durney D. (1972) Solution-transfert, an important geological deformation mechanism. *Nature*, **235**, p. 315-316.
- Ellis A., Golding R. (1963) The solubility of carbon dioxide above 100°C in water and in sodium chloride solutions. *American Journal of Science*, **261**, p. 47-60.
- Elmi S., Bouder P., Berger G., Gras H., Busnardo R., Bérard P., Vautrelle C. (1989). *Carte et notice explicative de la feuille Bessèges à 1/50 000. n° 888*, BRGM, 115 p.
- Engel W., Feist R., Franke W. (1981) Le Carbonifère anté-Stéphanien de la Montagne Noire: rapports entre mise en place des nappes et sédimentation. *Bulletin du B.R.G.M.*, **1**, 4, p. 341-389.
- Escher A., Watterson J. (1974) Stretching fabrics, folds and crustal shortening. *Tectonophysics*, **22**, p. 223-231.
- Etchecopar A. (1977) A plane kinematic model of progressive deformation in a polycrystalline aggregate. *Tectonophysics*, **39**, p. 121-139.
- Etchecopar A., Vasseur G. (1987) A 3-D kinematic model of fabric development in polycrystalline aggregates: comparison with experimental and natural examples. *Journal of Structural Geology*, **9**, p. 705-718.
- Etheridge M., Wall V., Vernon R. (1983) The role of the fluid phase during regional metamorphism and deformation. *Journal of Metamorphic Geology*, **1**, p. 205-226.
- Fabre G. (1896) Feuille d'Alais. *Bull. Serv. Carte géol. Fr.*, **8**, 53, p. 73-77.
- Faure M. (1995) Late orogenic carboniferous extensions in the Variscan French Massif Central. *Tectonics*, **14**, 1, p. 132-153.
- Faure M., Pons J., Babinault J. (1992) Le pluton du Pont-de-Monvert: un granite syntectonique extravasé vers l'Est pendant le désépaississement crustal varisque du Massif central français. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Paris)*, **315**, II, p. 201-208.
- Ferry J., Spear F. (1978) Experimental calibration of the partitioning of Fe and Mg between biotite and garnet. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **66**, p. 113-117.
- Foxford K.A., Nicholson R., Polya D.A. (1991) Textural evolution of W-Cu-Sn-bearing hydrothermal veins at Minas de Panasqueira, Portugal. *Mineralogical Magazine*, **55**, p. 435-445.
- Fyfe W.S. (1976) Chemical aspects of rock deformation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **A283**, p. 221-228.
- Gapais D., Barbarin B. (1986) Quartz fabric transition in a cooling syntectonic granite (Hermitage massif, France). *Tectonophysics*, **125**, p. 357-370.

Garbutt J.M., Teyssier C. (1991) Prism <c> slip in the quartzites of the Oakhurst Mylonite Belt, California. *Journal of Structural Geology*, **13**, p. 657-666.

Gardien V., Lardeaux J., Misseri M. (1988) Les péridotites des Monts du Lyonnais (M. C. F.): témoins privilégiés d'une subduction de lithosphère paléozoïque. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Paris)*, **307**, II, p. 1967-1972.

Gehrig M. (1980) Phasengleichgewichte und PVT-Daten ternärer Mischungen aus Wasser, Kohlendioxid und Natriumchlorid bis 3 Kbar und 550°C. Univ. Karlsruhe (W. Germany), Ph.D., 109 p.

Gehrig M., Lentz H., Franck E. (1979) Thermodynamic properties of water-carbon dioxide-sodium chloride mixtures at high temperatures and pressures. In Timmerhaus K, Barber M (Ed.), *High-Pressure Science and Technology* (Vol. 1).

Gèze B. (1949) Etude géologique de la Montagne Noire et des Cévennes méridionales. In *Mém. Soc. Géol. Fr (nouv. sér.)* (Vol. XXIV, pp. 215).

Gèze B. (1952) Révision de la feuille de Séverac à 1/80 000 (n°225). *Bulletin de la Carte géologique de France*, **50**, p. 195-205.

Gèze B., Pellet J., Paloc H., Bambier A., Roux J., Senaud G. (1980). *Carte et notice explicative de la feuille Florac à 1/50 000*. n° **886**, BRGM, 29 p.

Gèze B., Bambier A., Paloc H. (1985). *Carte et notice explicative de la feuille Nant à 1/50 000*. n° **936**, BRGM, 51 p.

Ghent E., Stout M., Black P., Brothers R. (1987) Chloritoid-bearing rocks associated with blueschists and eclogites, northern New Caledonia. *Journal of Metamorphic Geology*, **5**, p. 239-254.

Goffé B., Murphy W., M L. (1987) Experimental transport of Si, Al and Mg in hydrothermal solutions: an application to vein mineralization during high-pressure, low temperature metamorphism in the French Alps. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **97**, p. 438-450.

Grambling J. (1990) Internally consistent geothermometry and H<sub>2</sub>O barometry in metamorphic rocks: the exemple garnet-chlorite-quartz. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **105**, p. 617-628.

Gratier J. (1984) La déformation des roches par dissolution-cristallisation. Aspects naturels et expérimentaux de ce fluage avec transfert de matière dans la croûte supérieure. Univ. Grenoble, Thèse d'état, 315 p.

Gratier J. (1987) Pressure solution - deposition creep and associated tectonic differentiation in sedimentary rocks. In : Jones ME, Preston RMF, *Deformation of sediments and sedimentary rocks*, :London, p. 25-38.

Gratier J., Vialon P. (1980) Deformation pattern in a heterogeneous material: folded and cleaved sedimentary cover immediately overlying a cristalline basement (Oisans, French Alps). *Tectonophysics*, **65**, p. 151-180.

Gratier J., Jenatton L. (1984) Deformation by solution - deposition and reequilibration of fluid inclusions in crystals depending on temperature, internal pressure and stress. *Journal of Structural Geology*, **5**, p. 329-339.

Grawinkel A., Stöckhert B. (1997) Hydrostatic pore fluid pressure to 9 km depth-Fluid inclusion evidence from the KTB deep drill hole. *Geophysical Research Letters*, **24**, 24, p. 3273-3276.

Gregory A., Backus M. (1980) Geopressured formation parameters, geothermal well, Brazoria County, Texas. In : *Proc 4th U S Gulf Coast Geopressure-Geothermal Energy*, Dorfman M, Fisher W, p. 235-311.

Guerangé-Lozes J. (1987) Les nappes varisques de l'Albigeois cristallin (lithostratigraphie, volcanisme et déformations). Univ. Toulouse, thèse 3 ème cycle, 347 p.

Guérangé-Lozes J., Pellet J. (1990). *Carte et notice explicative de la feuille de Génolhac à 1/50 000*. n° **887**, BRGM, 62 p.

Guillot C. (1989) Origine et comportement de l'azote dans les formations métamorphiques: étude des inclusions fluides et géochimie de l'ammonium dans le dôme de Montredon (Montagne Noire, France). Univ. Paul Sabatier, Toulouse, thèse 3ème cycle, 239 p.

Henderson J. R., Henderson M. N., Wright, T.O. (1990) Water-sill hypothesis for the origin of certain veins in the Meguma Group, Nova Scotia, Canada. *Geology*, **18**, p. 654-657.

Hey M. (1954) A new review of the chlorites. *Mineralogical Magazine*, **30**, p. 277.

Heyen G., Ramboz C., Dubessy J. (1982) Simulation des équilibres de phases dans le système CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> en dessous de 50°C et de 100 bar. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Paris)*, **294**, p. 203-206.

Hippertt J. (1994a) Grain boundary microstructures in micaceous quartzite: significance for fluid movement and deformation processes in low metamorphic grade shear zones. *The Journal of Geology*, **102**, p. 331-348.

Hippertt J. (1994b) Microstructures and c-axes fabrics indicative of quartz dissolution in sheared quartzites and phyllonites. *Tectonophysics*, **229**, p. 141-163.

Holloway J.R. (1977) Fugacities and activity of molecular species in supercritical fluids. In : Fraser D, *Thermodynamics in geology*, p. 161-181.

Holloway J.R. (1981) Compositions and volumes of supercritical fluids in the Earth's Crust. In : *Short Course on fluid inclusions: application to petrology*, Mineralogical association Canada Hollister, L.S.; Crawford, M.L., 6, p. 13-18.

Holloway J.R. (1984) Graphite CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> equilibria at low-grade metamorphic conditions. *Geology*, **12**, p. 455-458.

Hubbert M., Rubey W. (1959) Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting. *Bulletin of the Geological Society of America*, **70**, p. 115-166.

Jacobs G., Kerrick D. (1981) Methane : an equation of state with application to the ternary system H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>. *Geochimica Cosmochimica Acta*, **19**, p. 607-614.

Kennedy G.C. (1954) Pressure-volume-temperature relations in CO<sub>2</sub> at elevated temperatures and pressures. *American Journal of Science*, **252**, p. 225-241.

Kennedy L., Logan J. (1997) The role of veining and dissolution in the evolution of fine-grained mylonites: the McConnell thrust, Alberta. *Journal of Structural Geology*, **19**, 6, p. 785-797.

Kerkhof A. (1988) The system CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-N<sub>2</sub> in fluid inclusions: theoretical modelling and geological applications. Univ. Amsterdam, 206 p.

Kerkhof A. (1990) Isochoric phase diagrams in the systems CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>: Application to fluid inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **54**, p. 621-629.

Kerrick R. (1977) An historical review and synthesis of research on pressure solution. *Zentralblatt für Geologie und Palaeontologie*, **1**, p. 512-550.

Kerrick D., Jacobs G. (1981) A modified Redlich-Kwong equation for H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, and H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> mixtures at elevated pressures and temperatures. *American Journal of Science*, **281**, p. 735-767.

King M. (1969) The fugacities of carbon dioxide and propylene shown as functions of the temperature and pressure. In : *phase equilibrium in mixtures*. Pergamon press.

Kowallis B., Wang H., Jang B. (1987) Healed microcrack orientations in granite from Illinois borehole UPH-3 and their relationship to the rock's stress history. *Tectonophysics*, **135**, p. 297-306.

Lang H., Rice J. (1985) Geothermometry, geobarometry, and T-X (Fe-Mg) relations in metapelites, Snow Peak, northern Idaho. *Journal of Petrology*, **26**, p. 889-924.

Lapique F., Champenois M., Cheilletz A. (1988) Un analyseur vidéographique interactif: descriptions et applications. *Bulletin de Minéralogie*, **111**, p. 679-687.

Larson S. (1955) Phase studies of the two-component carbon dioxide-water system, involving the carbon dioxide hydrate. Univ. Illinois, PhD, 235 p.

Law R. (1986) Relationships between strain and quartz crystallographic fabrics in the Roche Maurice quartzites of Plougastel, western Brittany. *Journal of Structural Geology*, **8**, p. 493-515.

Law R., Schmid S., Wheeler J. (1990) Simple shear deformation and quartz crystallographic fabrics: a possible natural example from the Torridon area of NW Scotland. *Journal of Structural Geology*, **12**, 1, p. 29-45.

Ledru P., Lardeaux J., Santallier D., Autran A., Quenardel J., Floc'h J., Lerouge G., Maillet N., Marchand J., Ploquin A. (1989) où sont les nappes dans le Massif central français. *Bulletin de la Société géologique de France*, **8**, V-3, p. 605-618.

Leroy J. (1979) Contribution à l'étalonnage de la pression interne des inclusions fluides lors de la décrépitation. *Bulletin Minéralogie*, **102**, p. 584-593.

Lespinasse M. (1990) Microfissuration and paleofluid circulations. In : *Rock mechanics and rock physics at great depth*, Pau, Maury V, Fourmaintraux D, p. 1503-1508.

Lespinasse M., Pêcher A. (1986) Microfracturing and regional stress field : a study of the preferred orientations of fluid-inclusion planes in a granite from the Massif Central, France. *Journal of Structural Geology*, **8**, 2, p. 169-180.

- Lespinasse M., Cathelineau M. (1990) Fluid percolations in a fault zone: a study of fluid inclusion planes in the St Sylvestre granite, northwest Massif Central, France. *Tectonophysics*, **184**, p. 173-187.
- Lister G., Hobbs B. (1980) The simulation of fabric development during plastic deformation and its application to quartzite: the influence of deformation history. *Journal of Structural Geology*, **2**, p. 355-370.
- Lister G.S., Dornsiepen U.F. (1982) Fabric transitions in the Saxony Granulite Terrain. *Journal of Structural Geology*, **4**, p. 81-92.
- Magontier J. (1988) Etude géologique de la Gardonnenque, entre Saint-Jean-du-Gard et la Grand'Combe, à l'ouest d'Alès (GARD-FRANCE). Univ. Bordeaux, thèse 3ème cycle.
- Mainprice D., Lloyd G., Casey M. (1993) Individual orientation measurements in quartz polycrystals: advantages and limitations for texture and petrophysical property determinations. *Journal of Structural Geology*, **15**, Microstructures and rheology of rocks and rock-forming minerals, p. 1169-1187.
- Malavieille J. (1993) Late orogenic extension in mountain belts: insights from the basin and range and the late paleozoic variscan belt. *Tectonics*, **12**, 5, p. 1115-1130.
- Maluski H., Costa S., Echtler H. (1991) Late Variscan tectonic evolution by thinning of earlier thickened crust. An  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  study of the Montagne Noire, southern Massif Central, France. *Lithos*, **26**, p. 287-304.
- Marckham A., Kobe K. (1941) The solubility of carbon dioxide and nitrons oxide in aqueous salt solutions. *Journal of American Chemical Society*, **63**, p. 449-452.
- Marjoribanks R. (1976) The relation between microfabric and strain in a progressively deformed quartzite sequence from Central Australia. *Tectonophysics*, **32**, p. 269-293.
- Marquer D., Burkhard M. (1992) Fluid circulation, progressive deformation and mass-transfert processes in the upper crust: the example of basement-cover relationships in the External Crystalline Massifs, Switzerland. *Journal of Structural Geology*, **14**, 8/9, p. 1047-1057.
- Mattauer M., Etchecopar A. (1977) Argument en faveur de chevauchements de type Himalayen dans la chaîne hercynienne du Massif central français. In : *Coll. C. N. R. S., Paris*, p. 261-267.
- Matte P. (1986) La chaîne varisque parmi les chaînes paléozoïques péri atlantiques, modèle d'évolution et position des grands blocs continentaux au Permo-Carbonifère. *Bulletin de la Société géologique de France*, **8**, 1, p. 9-24.
- Matte P. (1991) Accretionary history and crustal evolution of the Variscan belt in Western Europe. *Tectonophysics*, **196**, p. 309-337.
- Mazeran R. (1969) Etude tectonique et microtectonique des séries épimétamorphiques de la partie Sud-Ouest des Cévennes méridionales. Univ. Montpellier, thèse 3ème cycle.
- Ménard G., Molnard P. (1988) Collapse of a Hercynien Tibetan Plateau into a late Palaeozoic European Basin and Range Province. *Nature*, **334**, p. 235-237.
- Meyer V. (1990) Etude pétro-structurale de la Vallée de la Dourbie et de la région de Sauclières (Cévennes Méridionales). Univ. Montpellier, DEA.

Mialhe J. (1980) Le massif granitique de la Borne (Cévennes). Univ. Clermont-Ferrand, thèse 3ème cycle, 170 p.

Mitra S. (1978) Microscopic deformation mechanisms and flow laws in quartzites within the south anticline. *Journal of Geology*, **86**, p. 129-152.

Montel J., Marignac C., Barbey P., Pichavant M. (1992) Thermobarometry and granite genesis: the Hercynian low-P, high-T Velay anatectic dome (French Massif Central). *Journal of Metamorphic Geology*, **10**, p. 1-15.

Mougeot R., Respaut J., Ledru P., Marignac C. (1997) U-Pb geochronology on accessory minerals of the Velay anatectic dome (French Massif Central). *European Journal of Mineralogy*, **9**, p. 141-156.

Mullis J., Dubessy J., Poty B., O'Neil J. (1994) Fluid regimes during late stages of a continental collision: Physical, chemical, and stable isotope measurements of fluid inclusions in fissure quartz from a geotraverse through the Central Alps, Switzerland. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **58**, 10, p. 2239-2267.

Munsch H. (1981) Etude cartographique, pétrologique et structurale des séries métamorphiques d'un segment des Cévennes méridionales entre Saint-Jean-du-Gard et Saint-Germain-de-Calberte. Univ. Bordeaux, thèse 3ème cycle, 155 p.

Najoui K. (1996) Conditions et âges de mise en place des granitoïdes de la zone externe sud du Massif central français: Etude pétro-structurale et géochronologique  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  des roches de leurs auréoles de contact. Implications géotectoniques. Univ. Montpellier, thèse de doctorat, 271 p.

O'Hara K. (1988) Fluid flow and volume loss during mylonitization: an origin for phyllonite in an overthrust setting, North Carolina, U.S.A. *Tectonophysics*, **156**, p. 21-36.

Ohmoto H., Kerrick D. (1977) Devolatilisation equilibria in graphitic systems. *American Journal of Science*, **277**, p. 1013-1044.

Paris F., Robardet M. (1990) Early Paleozoic paleobiogeography of the Variscan regions. *Tectonophysics*, **177**, p. 193-213.

Parry W.T. (1986) Estimation of  $\text{XCO}_2$ , P, and fluid inclusion volume from fluid inclusion temperature measurements in the system  $\text{NaCl-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ . *Economic Geology*, **81**, p. 1009-1013.

Pêcher A. (1979) Les inclusions fluides des quartz d'exsudation de la zone du MCT himalayen au Népal Central : données sur la phase fluide dans une grande zone de cisaillement crustal. *Bulletin de Minéralogie*, **102**, p. 537-554.

Pêcher A., Boullier A.M. (1984) Evolution à pression et température élevées d'inclusions fluides dans un quartz synthétique. *Bulletin de Minéralogie*, **107**, p. 139-153.

Pêcher A., Lespinasse M., Leroy J. (1985) Relations between fluid inclusion trails and regional stress field : a tool for fluid chronology. An example of an intragranitic uranium ore deposit (northwest Massif Central, France). *Lithos*, **18**, p. 229-237.

Pellet J. (1972) Données lithologiques et structurales sur les terrains cristallins Cévenols affectés par l'accident de Villefort. *Bulletin du Service de la Carte Géologique de France*, **282**, 61 p.

Peng D., Robinson D. (1976) A new two-constant equation of state. *Ind. Eng. Chemical Fundamentals*, **15**, p. 59-64.

- Perchuk L., Lavrent'eva I. (1981) Experimental investigation of exchange equilibria in the system cordierite-garnet-biotite. In : SK S, *Kinetics and equilibrium in mineral reactions*, :New York, p. 199-240.
- Pin C., Lancelot J. (1982) U/Pb dating of an early Paleozoic bimodal magmatism in the French Massif Central and of its further metamorphic evolution. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **79**, p. 1-12.
- Pitra P. (1996) Etude pétrostructurale des régions marginales du Moldanubien de Bohême et de ses relations avec le bloc du Barrandien. Univ. Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, thèse de doctorat, 242 p.
- Platt J., Vissers R. (1980) Extensional structures in anisotropic rocks. *Journal of Structural Geology*, **2**, 4, p. 397-410.
- Poirier J.-P., Nicolas A. (1975) Deformation induced recrystallization due to progressive misorientation of subgrains, with special reference to mantle peridotite. *Journal of Geology*, **83**, p. 707-720.
- Potter R., Clyne M., Brown D. (1978) Freezing point depression of aqueous sodium chloride solutions. *economical geology*, **73**, p. 284-285.
- Powell R., Holland T. (1985) An internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations: 1. methods and a worked example. *Journal of Metamorphic Geology*, **3**, p. 327-342.
- Pownceby M., Wall V., O'Neill H. (1987) Fe-Mn partitioning between garnet and ilmenite: experimental calibration and applications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **97**, p. 116-126.
- Quenardel J., Santallier D., Burg J., Bril H., Cathelineau M., Marignac C. (1991) Le Massif Central. *Sciences Géologiques Bulletin*, **44**, 1-2, p. 105-206.
- Rakib A. (1996) Le métamorphisme régional de basse pression des Cévennes occidentales: une conséquence directe de la mise en place du dôme thermique vellave. Univ. Montpellier, thèse de doctorat, 207 p.
- Ramboz C., Pichavant M., Weisbrod A. (1982) Fluid immiscibility in natural processes: use and misuse of fluid inclusion data. II Interpretation of fluid inclusion data in terms of immiscibility. *Chemical Geology*, **37**, p. 29-48.
- Ramboz C., Schnapper D., Dubessy J. (1985) The P-V-T-X-f(O<sub>2</sub>) evolution of H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-bearing fluid in a wolframite vein. Reconstructions from fluid inclusion studies. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **49**, p. 205-219.
- Ramsay J. (1980a) Shear zone geometry: a review. *Journal of Structural Geology*, **2**, 1/2, p. 83-99.
- Ramsay J. (1980b) The crack-seal mechanism of rock deformation. *Nature*, **284**, p. 135-139.
- Ramsay J. (1981) Tectonics of the Helvetic Nappes. *Geological Society London Special Publication*, **9**, p. 293-309.
- Redlich O., Kwong J. (1949) On the thermodynamics of solutions. V. An equation of state. fugacity of gaseous solutions. *Chem. Rev.*, **44**, p. 233-244.

Rey P. (1992) Effondrement de la chaîne varisque dans les Vosges et fabrique sismique de la croûte continentale. Univ. Grenoble I, Thèse de Doctorat, 270 p.

Ridley J. (1986) Parallel stretching lineations and fold axes oblique to a shear displacement direction - a model and observations. *Journal of Structural Geology*, **8**, 6, p. 647-653.

Robardet M., Blaise J., Bouyx E., Gourvenec R., Lardeux H., Le Hérisse A., Le Menn J., Mélou M., Paris F., Plusquellec Y., Poncet J., Régault S., Riout M., Weyant M. (1993) Paléogéographie de l'Europe occidentale de l'Ordovicien au Dévonien. *Bulletin de la Société géologique de France*, **164**, p. 683-695.

Robardet M., Verniers J., Feist R., Paris F. (1994) Le paléozoïque anté-varisque de France, contexte paléogéographique et géodynamique. *Géologie de la France*, **3**, p. 3-31.

Rochette J. (1984) Niveaux volcaniques et minéralisations antimonifères en Cévennes. Univ. Paris 6, 3ème cycle, 133 p.

Roedder E. (1962) Ancient fluids in crystals. *American Journal of Science*, **207**, p. 38-47.

Roedder E. (1981) Origin of fluid inclusions and changes that occur after trapping. In : Short course in fluid inclusions: applications to petrology. Hollister L.S., Crawford M.L. (eds). Mineralogical association Canada Short Course Notes, **6**, p. 103-137.

Roedder E. (1984) Fluid inclusions. In Ribbe P (Ed.), Reviews in mineralogy (Vol. 12, pp. 646). Mineralogical Society of America.

Roger G. (1969) Etude géologique de la Cézarenque et du S.E. du Mont Lozère. *Thèse B.R.G.M.*, 66 p.

Sabourdy G. (1975). Apport de la géochimie à la connaissance de la genèse des granitoïdes des Cévennes méridionales, Massif central français No. 52. Ann. Sc. Univ. Clermont.

Sanderson D. (1973) The development of fold axes oblique to the regional trend. *Tectonophysics*, **16**, p. 55-70.

Sauniac S. (1980) Mise en évidence de critères de cisaillement par les exsudats de quartz: exemple de la base de la nappe de Pardailhan (versant sud de la Montagne Noire). *Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique*, **22**, 3, p. 177-186.

Sauniac S. (1981) Étude des exsudats syn-tectoniques liés à de grands chevauchements, exemples de la Montagne Noire, de la Sardaigne S.E. et de l'Himalaya du N.W. Univ. Montpellier, Thèse 3ème cycle, 239 p.

Schmid S., Casey M. (1986) Complete fabric analysis of some commonly observed quartz C-axis patterns. In : C HBEeHH, *Mineral and rock deformation: laboratory studies*, p. 263-286.

Schmid S., Casey M., Starkey J. (1981) An illustration of the advantages of a complete texture analysis described by the orientation distribution function (ODF) using quartz pole figure data. *Tectonophysics*, **78**, p. 101-117.

Schreurs J. (1985) Prograde metamorphism of metapelites, garnet-biotite thermometry and prograde changes of biotite chemistry in high-grade rocks of West-Uusimaa, South-West Finland. *lithos*, **18**, p. 69-80.

- Scotese C. (1994) *Late Carboniferous paleogeographic map*. in Klein G.D., ed., Pangea: Paleoclimate, tectonics and sedimentation during accretion, zenith and breakup of a supercontinent: Geological Society of America Special Paper 288, Boulder, Colorado.
- Secor D. (1965) Role of fluid pressure in jointing. *American Journal of Science*, **263**, p. 633-646.
- Selverstone J., Morteani G., Staude J. (1991) Fluid channeling during ductile shearing: transformation of granodiorite into aluminous schist in the tauern Window, Eastern Alps. *Journal of Metamorphic Geology*, **9**, p. 419-431.
- Selverstone J., Axen G.J., Bartley J.M. (1995) Fluid inclusion constraints on the kinematics of footwall uplift beneath the Brenner Line normal fault, eastern Alps. *Tectonics*, **2**, p. 264-278.
- Sibson R., McMoore J., Rankin R. (1975) Seismic pumping - a hydrothermal fluid transport mechanism. *Journal of the Geological Society of London*, **131**, p. 653-659.
- Sibson R., Robert F., Poulsen K. (1988) High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposits. *Geology*, **16**, p. 551-555.
- Spear F. (1993) *Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths*. Mineralogical Society of America, Washington. 799 p.
- Spear F., Cheney J. (1989) A petrogenetic grid for pelitic schists in the system  $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO-MgO-K}_2\text{O-H}_2\text{O}$ . *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **101**, p. 149-164.
- Sterner S. (1992) Homogenization of fluid inclusions to the vapour phase: the apparent homogenization phenomenon. *Economic Geology*, **87**, p. 1616-1623.
- Sterner S.M., Bodnar R.J. (1989) Synthetic fluid inclusions. VII. Re-equilibration of fluid inclusions in quartz during laboratory. Simulated metamorphic burial and uplift. *Journal of Metamorphic Geology*, **7**, p. 243-360.
- Sterner S.M., Bodnar R.J. (1991) Synthetic fluid inclusions. X. Experimental determination of P-V-T-X properties in the  $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$  system to 6kb and 700°C *American journal of science*, **291**, p. 1-54.
- Tapponnier P., Brace W.P. (1976) Stress induced microcracks in Westerly granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mineralogical Science*, **13**, p. 103-112.
- Thiéry R., Vidal J., Dubessy J. (1994) Phase equilibria modelling applied to fluid inclusions: liquid-vapour equilibria and calculation of the molar volume in the  $\text{CO}_2\text{-CH}_4\text{-N}_2$  system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **58**, p. 1073-1082.
- Thompson J. (1957) The graphical analysis of mineral assemblages in pelitic schists. *American Mineralogist*, **42**, p. 842-858.
- Thoral M., Debraban M. (1935) Les formations paléozoïques de la région du Vigan (Gard). In: *69ième Congr. Soc. Sav., Montpellier*, p. 117-121.
- Tullis J., Christie J., Griggs D. (1973) Microstructures and preferred orientation of experimentally deformed quartzites. *Geological Society of America Bulletin*, **84**, p. 297-314.

- Turner F., Weiss L. (1963) *Structural analysis of metamorphic tectonites*. McGraw-Hill, New York. 560 p.
- Tuttle O.F. (1949) Structural petrology of planes of liquid inclusions. *Journal of Geology*, **57**, p. 331-356.
- Valenta R. (1989) Vein geometry in the Hilton area, Mount Isa, Queensland: implications for fluid behaviour during deformation. *Tectonophysics*, **158**, p. 191-207.
- Van Den Driessche J. (1994) L'effondrement gravitaire de la chaîne hercynienne. Univ. Paris 7, thèse d'état.
- Van Den Driessche J., Brun J. (1991) Tectonic evolution of the Montagne Noire (French Massif Central): a model of extensional gneiss dome. *Geodinamica Acta*, **5**, p. 85-99.
- Van Der Sijp J. (1950) Petrology of the Saint-Jean-du-Gard area. *Proc. Kon. Ned. Ak. Wetensch*, **LIII**, p. 337-346.
- Van Der Voo R. (1993) *Paleomagnetism of the Atlantic, Tethys and Iapetus Oceans*. Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge. 411 p.
- Viallette Y., Sabourdy G. (1977a) Age et origine des granitoïdes du Mont Lozère dans le Massif central français. *Compte rendu sommaire de la Société géologique de France*, **XIX**, 1, p. 127-129.
- Viallette Y., Sabourdy G. (1977b) Age du granite de l'Aigoual dans le Massif des Cévennes (France). *Comptes rendu sommaire de la Société géologique de France*, **XIX**, 1, p. 130-132.
- Vityk M., Bodnar R. (1995) Textural evolution of synthetic fluid inclusions in quartz during reequilibration, with applications to tectonic reconstruction. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **121**, p. 309-323.
- Vollbrecht A., Rust S., Weber K. (1991) Development of microcracks in granites during cooling and uplift: examples from the Variscan basement in NE Bavaria, Germany. *Journal of Structural Geology*, **13**, p. 787-799.
- Waard D.d. (1950) Tectonics of a pre-tectonic orthogneiss massif near St-Jean-du-Gard in the southeastern Cévennes, France. In : *Wetensch PKNAV*, :Amsterdam, p. 549-559 and 662-674.
- Waard D.d. (1952) Linear structures in the phyllite area of the Cévennes, France. *Indonesian Jour. for nat. Sc*, **3/4**, p. 61-70.
- Watson E., Brenan J. (1987) Fluids in the lithosphere, 1. Experimentally-determined wetting characteristics of CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O fluids and their implications for fluid transport, host-rock physical properties, and fluid inclusion formation. *Earth and Planetary Science Letters*, **85**, p. 496-515.
- White J., White S. (1981) The structure of grain boundaries in tectonites. *Tectonophysics*, **78**, p. 613-628.
- White S. (1976) The effects of strain on the microstructures, fabrics and deformation mechanisms in quartz. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **283**, A, p. 69-86.
- Williams M., Grambling J. (1990) Manganese, ferric iron, and the equilibrium between garnet and biotite. *American Mineralogist*, **75**, p. 886-908.

Wood B., Walther J. (1986) Fluid flow during metamorphism and its implications for fluid-rock ratios. In : Walther J, Wood B, *Fluid-rock interactions during metamorphism*, :New-York, p. 89-108.

Zhang Y., Frantz J. (1987) Determination of the homogenization temperatures and densities of supercritical fluids in the system NaCl-KCl-CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O using synthetic fluid inclusions. *Chemical Geology*, **64**, p. 335-350.

*ANNEXES*



# *Annexe 1*

## *Partie 1*

### **Conditions analytiques de la microsonde électronique: CAMECA SX50 (service du B. R. G. M).**

Tension d'accélération 15 KV.  
Intensité incidente du faisceau: 12 A

Chaque élément a été mesuré sur la  $K\alpha$ .  
Les programmes de corrections utilisés sont: P. A. P.

Les standards utilisés sont::

K: orthose  
Si: albite  
Fe: composé de synthèse  
Ca: andradite  
Na: albite  
Ti et Mn:  $MnTiO_3$  synthétique  
Al:  $Al_2O_3$  synthétique  
Cr:  $Cr_2O_3$  synthétique  
Mg: forstérite

### **Liste des abréviations des analyses**

accol: accolé  
allS2: allongée dans la S2  
bag: baguette  
bord: bordure  
ex: exsudat  
exsfil: filonnet dans exsudat  
gd: grand  
incl: inclus  
mat ou m: matrice  
post: postérieur à S2  
pt: petit  
synS1: contemporain de la S1  
synS2: contemporain de la S2

## Analyses des plagioclases

|       | EC21<br>matpt<br>107 | EC21<br>matpt<br>108 | EC21<br>matpt<br>124 | EC21<br>matpt<br>132 | EC21<br>exspt<br>140 | EC21<br>exspt<br>141 | EC21<br>exsgd<br>149 | EC21<br>matpt<br>166 | EC21<br>matpt<br>167 | EC25<br>matpt<br>1   | EC25<br>matpt<br>19   | EC25<br>matpt<br>24 |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|
| SiO2  | 68.14                | 67.57                | 67.91                | 54.53                | 67.85                | 68.23                | 67.52                | 56.53                | 62.10                | 67.44                | 67.57                 | 68.34               |
| TiO2  | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                |
| Al2O3 | 19.56                | 19.26                | 19.37                | 28.06                | 19.41                | 19.37                | 19.42                | 26.83                | 24.24                | 20.11                | 19.89                 | 19.31               |
| Cr2O3 | 0.02                 | 0.07                 | 0.06                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.04                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.03                 | 0.02                  | 0.00                |
| MgO   | 0.00                 | 0.01                 | 0.01                 | 0.25                 | 0.01                 | 0.02                 | 0.00                 | 0.02                 | 0.03                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                |
| FeO   | 0.00                 | 0.12                 | 0.16                 | 0.66                 | 0.04                 | 0.15                 | 0.12                 | 0.16                 | 0.07                 | 0.00                 | 0.22                  | 0.03                |
| MnO   | 0.00                 | 0.10                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.09                 | 0.03                 | 0.08                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.13                 | 0.00                  | 0.01                |
| CaO   | 0.22                 | 0.12                 | 0.01                 | 10.30                | 0.09                 | 0.11                 | 0.45                 | 7.30                 | 7.00                 | 0.71                 | 0.35                  | 0.00                |
| Na2O  | 11.49                | 11.83                | 11.35                | 5.27                 | 11.73                | 11.76                | 11.83                | 6.50                 | 6.06                 | 11.12                | 11.72                 | 11.65               |
| K2O   | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.22                 | 0.03                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.19                 | 0.00                 | 0.09                 | 0.00                  | 0.00                |
| Sum   | 99.43                | 99.09                | 98.86                | 99.28                | 99.25                | 99.67                | 99.44                | 97.52                | 99.50                | 99.63                | 99.76                 | 99.34               |
| Si    | 2.991                | 2.985                | 2.997                | 2.481                | 2.988                | 2.992                | 2.976                | 2.586                | 2.752                | 2.962                | 2.966                 | 3.001               |
| Ti    | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                 | 0.000               |
| Al    | 1.012                | 1.003                | 1.008                | 1.504                | 1.008                | 1.001                | 1.009                | 1.447                | 1.266                | 1.041                | 1.029                 | 1.000               |
| Cr    | 0.001                | 0.002                | 0.002                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.001                | 0.000                | 0.000                | 0.001                | 0.001                 | 0.000               |
| Mg    | 0.000                | 0.001                | 0.001                | 0.017                | 0.001                | 0.001                | 0.000                | 0.001                | 0.002                | 0.000                | 0.000                 | 0.000               |
| Fe2   | 0.000                | 0.005                | 0.006                | 0.025                | 0.001                | 0.005                | 0.004                | 0.006                | 0.003                | 0.000                | 0.008                 | 0.001               |
| Mn    | 0.000                | 0.004                | 0.000                | 0.000                | 0.003                | 0.001                | 0.003                | 0.000                | 0.000                | 0.005                | 0.000                 | 0.000               |
| Ca    | 0.010                | 0.006                | 0.000                | 0.502                | 0.004                | 0.005                | 0.021                | 0.358                | 0.332                | 0.033                | 0.016                 | 0.000               |
| Na    | 0.978                | 1.013                | 0.971                | 0.465                | 1.002                | 1.000                | 1.011                | 0.576                | 0.521                | 0.947                | 0.997                 | 0.992               |
| K     | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.013                | 0.002                | 0.000                | 0.000                | 0.011                | 0.000                | 0.005                | 0.000                 | 0.000               |
| Sum   | 4.992                | 5.019                | 4.984                | 5.006                | 5.010                | 5.007                | 5.025                | 4.985                | 4.876                | 4.994                | 5.018                 | 4.995               |
| Xan   | 0.01                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.51                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.02                 | 0.38                 | 0.39                 | 0.03                 | 0.02                  | 0.00                |
| Xab   | 0.99                 | 0.99                 | 1.00                 | 0.47                 | 0.99                 | 1.00                 | 0.98                 | 0.61                 | 0.61                 | 0.96                 | 0.98                  | 1.00                |
| Xor   | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                  | 0.00                |
|       | EC25<br>exspt<br>62  | EC25<br>exspt<br>64  | EC25<br>exspt<br>65  | EC25<br>exspt<br>75  | EC25<br>exspt<br>76  | EC25<br>exspt<br>77  | EC25<br>exspt<br>78  | EC25<br>exspt<br>85  | EC25<br>exsgd<br>99  | EC27<br>exspt<br>291 | EC27<br>msynS2<br>315 |                     |
| SiO2  | 67.86                | 67.92                | 67.76                | 68.01                | 68.32                | 67.52                | 68.16                | 67.83                | 68.20                | 67.61                | 60.05                 |                     |
| TiO2  | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.07                 | 0.08                  |                     |
| Al2O3 | 19.23                | 19.28                | 19.41                | 19.08                | 19.58                | 19.22                | 19.42                | 19.27                | 19.55                | 19.69                | 24.58                 |                     |
| Cr2O3 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.04                 | 0.00                 | 0.09                 | 0.00                 | 0.08                 | 0.00                  |                     |
| MgO   | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                  |                     |
| FeO   | 0.00                 | 0.10                 | 0.10                 | 0.06                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.05                 | 0.00                 | 0.21                 | 0.00                 | 0.15                  |                     |
| MnO   | 0.04                 | 0.03                 | 0.05                 | 0.00                 | 0.03                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.12                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  |                     |
| CaO   | 0.01                 | 0.05                 | 0.06                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.08                 | 0.11                 | 0.11                 | 0.10                 | 0.18                 | 6.32                  |                     |
| Na2O  | 11.50                | 11.64                | 12.02                | 11.82                | 11.95                | 11.54                | 11.59                | 11.28                | 11.66                | 11.31                | 8.05                  |                     |
| K2O   | 0.00                 | 0.02                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.16                  |                     |
| Sum   | 98.64                | 99.04                | 99.40                | 98.97                | 99.88                | 98.40                | 99.34                | 98.69                | 99.71                | 98.96                | 99.40                 |                     |
| Si    | 3.001                | 2.996                | 2.984                | 3.001                | 2.989                | 2.995                | 2.995                | 2.999                | 2.989                | 2.982                | 2.691                 |                     |
| Ti    | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.002                | 0.003                 |                     |
| Al    | 1.002                | 1.002                | 1.008                | 0.993                | 1.010                | 1.005                | 1.006                | 1.004                | 1.010                | 1.023                | 1.299                 |                     |
| Cr    | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.001                | 0.000                | 0.003                | 0.000                | 0.003                | 0.000                 |                     |
| Mg    | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.001                | 0.000                 |                     |
| Fe2   | 0.000                | 0.004                | 0.004                | 0.002                | 0.000                | 0.000                | 0.002                | 0.000                | 0.008                | 0.000                | 0.006                 |                     |
| Mn    | 0.001                | 0.001                | 0.002                | 0.000                | 0.001                | 0.000                | 0.000                | 0.004                | 0.000                | 0.000                | 0.000                 |                     |
| Ca    | 0.001                | 0.003                | 0.003                | 0.000                | 0.000                | 0.004                | 0.005                | 0.005                | 0.005                | 0.009                | 0.304                 |                     |
| Na    | 0.986                | 0.995                | 1.026                | 1.012                | 1.014                | 0.992                | 0.988                | 0.966                | 0.991                | 0.967                | 0.700                 |                     |
| K     | 0.000                | 0.001                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.009                 |                     |
| Sum   | 4.991                | 5.001                | 5.026                | 5.008                | 5.013                | 4.998                | 4.996                | 4.981                | 5.002                | 4.987                | 5.011                 |                     |
| Xan   | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.30                  |                     |
| Xab   | 1.00                 | 1.00                 | 1.00                 | 1.00                 | 1.00                 | 1.00                 | 0.99                 | 0.99                 | 1.00                 | 0.99                 | 0.69                  |                     |
| Xor   | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.01                  |                     |

|       | EC3<br>exsgd<br>95  | EC3<br>exsgd<br>102 | EC3<br>exsgd<br>103 | EC3<br>exspt<br>105 | EC3<br>exspt<br>106 | EC3<br>exspt<br>107 | EC3<br>exsgd<br>108 | EC3<br>exsgd<br>109 | EC3<br>exspt<br>135 | EC3<br>exspt<br>138 | EC3<br>exspt<br>139 | EC3<br>exsgd<br>141 |
|-------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| SiO2  | 67.77               | 67.96               | 68.21               | 68.37               | 67.78               | 67.65               | 67.14               | 66.77               | 67.13               | 67.96               | 68.54               | 67.40               |
| TiO2  | 0.05                | 0.00                | 0.00                | 0.04                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.09                | 0.00                | 0.00                | 0.01                | 0.02                |
| Al2O3 | 19.41               | 19.20               | 19.27               | 19.41               | 19.45               | 19.27               | 19.20               | 19.43               | 19.41               | 19.41               | 19.03               | 19.54               |
| Cr2O3 | 0.07                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.02                | 0.09                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00                |
| MgO   | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.01                | 0.01                | 0.01                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00                |
| FeO   | 0.00                | 0.00                | 0.07                | 0.00                | 0.05                | 0.01                | 0.10                | 0.03                | 0.00                | 0.09                | 0.00                | 0.00                |
| MnO   | 0.07                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.06                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00                |
| CaO   | 0.11                | 0.06                | 0.03                | 0.04                | 0.13                | 0.08                | 0.03                | 0.04                | 0.18                | 0.01                | 0.10                | 0.12                |
| Na2O  | 11.71               | 11.81               | 11.80               | 12.16               | 11.86               | 11.69               | 11.76               | 11.87               | 11.78               | 11.90               | 11.84               | 12.16               |
| K2O   | 0.28                | 0.05                | 0.01                | 0.12                | 0.05                | 0.04                | 0.08                | 0.11                | 0.05                | 0.04                | 0.09                | 0.02                |
| Sum   | 99.48               | 99.08               | 99.38               | 100.14              | 99.36               | 98.75               | 98.35               | 98.43               | 98.57               | 99.42               | 99.61               | 99.26               |
|       |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Si    | 2.983               | 2.997               | 2.998               | 2.988               | 2.984               | 2.993               | 2.987               | 2.971               | 2.980               | 2.989               | 3.006               | 2.974               |
| Ti    | 0.002               | 0.000               | 0.000               | 0.001               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.003               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.001               |
| Al    | 1.007               | 0.998               | 0.998               | 1.000               | 1.009               | 1.005               | 1.007               | 1.019               | 1.016               | 1.006               | 0.984               | 1.016               |
| Cr    | 0.002               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.001               | 0.003               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.000               |
| Mg    | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.001               | 0.001               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.000               |
| Fe2   | 0.000               | 0.000               | 0.002               | 0.000               | 0.002               | 0.000               | 0.004               | 0.001               | 0.000               | 0.003               | 0.000               | 0.000               |
| Mn    | 0.003               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.002               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.000               |
| Ca    | 0.005               | 0.003               | 0.002               | 0.002               | 0.006               | 0.004               | 0.002               | 0.002               | 0.009               | 0.000               | 0.005               | 0.006               |
| Na    | 1.000               | 1.010               | 1.006               | 1.031               | 1.012               | 1.003               | 1.015               | 1.024               | 1.014               | 1.015               | 1.007               | 1.040               |
| K     | 0.016               | 0.003               | 0.000               | 0.007               | 0.003               | 0.002               | 0.005               | 0.006               | 0.003               | 0.002               | 0.005               | 0.001               |
| Sum   | 5.018               | 5.011               | 5.006               | 5.029               | 5.018               | 5.007               | 5.019               | 5.030               | 5.021               | 5.016               | 5.007               | 5.038               |
|       |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Xan   | 0.01                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.01                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.01                | 0.00                | 0.00                | 0.01                |
| Xab   | 0.98                | 0.99                | 1.00                | 0.99                | 0.99                | 0.99                | 0.99                | 0.99                | 0.99                | 1.00                | 0.99                | 0.99                |
| Xor   | 0.02                | 0.00                | 0.00                | 0.01                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.01                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00                |
|       |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
|       | EC3<br>exspt<br>144 | EC3<br>exsgd<br>145 | EC3<br>exsgd<br>146 | EC3<br>exspt<br>147 | EC3<br>exspt<br>148 | EC7<br>exspt<br>369 | EC7<br>exspt<br>370 | EC7<br>exspt<br>371 | EC7<br>exspt<br>372 | EC7<br>exspt<br>379 | EC7<br>exspt<br>380 |                     |
| SiO2  | 68.54               | 66.80               | 66.91               | 66.59               | 67.79               | 68.01               | 67.57               | 66.97               | 68.23               | 67.13               | 67.51               |                     |
| TiO2  | 0.02                | 0.01                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.03                | 0.01                | 0.00                | 0.00                | 0.00                |                     |
| Al2O3 | 19.45               | 19.25               | 19.42               | 19.73               | 19.70               | 18.67               | 19.25               | 19.24               | 19.23               | 19.09               | 19.25               |                     |
| Cr2O3 | 0.06                | 0.02                | 0.00                | 0.00                | 0.06                | 0.00                | 0.00                | 0.02                | 0.01                | 0.00                | 0.00                |                     |
| MgO   | 0.01                | 0.00                | 0.01                | 0.01                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.01                | 0.00                | 0.00                | 0.04                |                     |
| FeO   | 0.07                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.06                | 0.00                | 0.00                | 0.00                |                     |
| MnO   | 0.06                | 0.00                | 0.13                | 0.10                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.03                | 0.00                | 0.00                | 0.00                |                     |
| CaO   | 0.04                | 0.06                | 0.08                | 0.04                | 0.06                | 0.03                | 0.01                | 0.18                | 0.07                | 0.05                | 0.15                |                     |
| Na2O  | 12.14               | 11.98               | 11.73               | 12.04               | 11.88               | 11.51               | 11.30               | 11.44               | 11.48               | 11.26               | 11.38               |                     |
| K2O   | 0.07                | 0.08                | 0.02                | 0.05                | 0.05                | 0.05                | 0.06                | 0.11                | 0.06                | 0.10                | 0.00                |                     |
| Sum   | 100.46              | 98.20               | 98.31               | 98.55               | 99.53               | 98.29               | 98.23               | 98.08               | 99.07               | 97.64               | 98.33               |                     |
|       |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Si    | 2.987               | 2.979               | 2.978               | 2.961               | 2.978               | 3.018               | 2.999               | 2.986               | 3.004               | 2.999               | 2.995               |                     |
| Ti    | 0.001               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.001               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.000               |                     |
| Al    | 0.999               | 1.012               | 1.019               | 1.034               | 1.020               | 0.977               | 1.007               | 1.011               | 0.998               | 1.005               | 1.007               |                     |
| Cr    | 0.002               | 0.001               | 0.000               | 0.000               | 0.002               | 0.000               | 0.000               | 0.001               | 0.000               | 0.000               | 0.000               |                     |
| Mg    | 0.000               | 0.000               | 0.001               | 0.001               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.001               | 0.000               | 0.000               | 0.002               |                     |
| Fe2   | 0.003               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.002               | 0.000               | 0.000               | 0.000               |                     |
| Mn    | 0.002               | 0.000               | 0.005               | 0.004               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.001               | 0.000               | 0.000               | 0.000               |                     |
| Ca    | 0.002               | 0.003               | 0.004               | 0.002               | 0.003               | 0.002               | 0.000               | 0.009               | 0.003               | 0.003               | 0.007               |                     |
| Na    | 1.026               | 1.036               | 1.013               | 1.038               | 1.012               | 0.991               | 0.972               | 0.989               | 0.980               | 0.976               | 0.979               |                     |
| K     | 0.004               | 0.004               | 0.001               | 0.003               | 0.003               | 0.003               | 0.004               | 0.006               | 0.003               | 0.006               | 0.000               |                     |
| Sum   | 5.026               | 5.035               | 5.020               | 5.042               | 5.018               | 4.990               | 4.984               | 5.006               | 4.988               | 4.989               | 4.991               |                     |
|       |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Xan   | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.01                | 0.00                | 0.00                | 0.01                |                     |
| Xab   | 0.99                | 0.99                | 1.00                | 1.00                | 0.99                | 1.00                | 1.00                | 0.99                | 0.99                | 0.99                | 0.99                |                     |
| Xor   | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.01                | 0.00                | 0.01                | 0.00                |                     |

|       | EC6<br>exspt<br>1 | EC6<br>exspt<br>15 | EC6<br>exspt<br>16 | EC6<br>exsgd<br>35 | EC6<br>exspt<br>49 | EC6<br>exspt<br>51 | EC6<br>exspt<br>52 | EC6<br>exspt<br>53 | EC6<br>matpt<br>57 | EC6<br>matpt<br>59 | EC6<br>matpt<br>61 | EC6<br>matpt<br>62 |
|-------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| SiO2  | 68.30             | 67.03              | 67.99              | 64.41              | 65.62              | 67.38              | 68.35              | 67.55              | 61.07              | 63.03              | 61.15              | 61.42              |
| TiO2  | 0.00              | 0.02               | 0.00               | 0.00               | 0.00               | 0.04               | 0.00               | 0.58               | 0.00               | 0.00               | 0.07               | 0.01               |
| Al2O3 | 19.35             | 18.99              | 19.58              | 22.19              | 20.47              | 19.24              | 19.36              | 19.56              | 23.23              | 22.51              | 23.49              | 23.79              |
| Cr2O3 | 0.02              | 0.05               | 0.00               | 0.00               | 0.00               | 0.08               | 0.00               | 0.00               | 0.00               | 0.09               | 0.00               | 0.00               |
| MgO   | 0.01              | 0.00               | 0.00               | 0.05               | 0.00               | 0.03               | 0.00               | 0.00               | 0.02               | 0.02               | 0.02               | 0.00               |
| FeO   | 0.00              | 0.02               | 0.00               | 0.41               | 0.10               | 0.20               | 0.03               | 0.15               | 0.15               | 0.28               | 0.00               | 0.20               |
| MnO   | 0.00              | 0.04               | 0.03               | 0.00               | 0.00               | 0.00               | 0.13               | 0.03               | 0.00               | 0.00               | 0.02               | 0.00               |
| CaO   | 0.04              | 0.05               | 0.15               | 0.77               | 1.16               | 0.06               | 0.03               | 0.06               | 4.76               | 3.94               | 5.23               | 5.25               |
| Na2O  | 11.78             | 12.07              | 11.77              | 9.51               | 11.35              | 12.00              | 12.32              | 11.91              | 9.19               | 8.69               | 9.00               | 9.22               |
| K2O   | 0.10              | 0.08               | 0.02               | 1.34               | 0.26               | 0.08               | 0.16               | 0.05               | 0.06               | 1.13               | 0.11               | 0.11               |
| Sum   | 99.62             | 98.35              | 99.54              | 98.68              | 98.97              | 99.11              | 100.37             | 99.90              | 98.48              | 99.69              | 99.08              | 100.00             |
| Si    | 2.996             | 2.986              | 2.985              | 2.873              | 2.918              | 2.980              | 2.986              | 2.963              | 2.754              | 2.807              | 2.743              | 2.734              |
| Ti    | 0.000             | 0.001              | 0.000              | 0.000              | 0.000              | 0.001              | 0.000              | 0.019              | 0.000              | 0.000              | 0.002              | 0.000              |
| Al    | 1.000             | 0.997              | 1.013              | 1.167              | 1.073              | 1.003              | 0.997              | 1.012              | 1.234              | 1.182              | 1.242              | 1.248              |
| Cr    | 0.001             | 0.002              | 0.000              | 0.000              | 0.000              | 0.003              | 0.000              | 0.000              | 0.000              | 0.003              | 0.000              | 0.000              |
| Mg    | 0.000             | 0.000              | 0.000              | 0.003              | 0.000              | 0.002              | 0.000              | 0.000              | 0.001              | 0.001              | 0.001              | 0.000              |
| Fe2   | 0.000             | 0.001              | 0.000              | 0.015              | 0.004              | 0.007              | 0.001              | 0.006              | 0.006              | 0.011              | 0.000              | 0.007              |
| Mn    | 0.000             | 0.002              | 0.001              | 0.000              | 0.000              | 0.000              | 0.005              | 0.001              | 0.000              | 0.000              | 0.001              | 0.000              |
| Ca    | 0.002             | 0.002              | 0.007              | 0.037              | 0.055              | 0.003              | 0.001              | 0.003              | 0.230              | 0.188              | 0.251              | 0.250              |
| Na    | 1.002             | 1.043              | 1.002              | 0.823              | 0.979              | 1.029              | 1.043              | 1.013              | 0.804              | 0.750              | 0.783              | 0.796              |
| K     | 0.006             | 0.004              | 0.001              | 0.076              | 0.015              | 0.004              | 0.009              | 0.003              | 0.004              | 0.064              | 0.006              | 0.006              |
| Sum   | 5.007             | 5.038              | 5.010              | 4.993              | 5.043              | 5.033              | 5.042              | 5.020              | 5.032              | 5.007              | 5.029              | 5.042              |
| Xan   | 0.00              | 0.00               | 0.01               | 0.04               | 0.05               | 0.00               | 0.00               | 0.00               | 0.22               | 0.19               | 0.24               | 0.24               |
| Xab   | 0.99              | 0.99               | 0.99               | 0.88               | 0.93               | 0.99               | 0.99               | 0.99               | 0.77               | 0.75               | 0.75               | 0.76               |
| Xor   | 0.01              | 0.00               | 0.00               | 0.08               | 0.01               | 0.00               | 0.01               | 0.00               | 0.00               | 0.06               | 0.01               | 0.01               |

|       | FC17<br>exspt<br>342 | FC17<br>exspt<br>343 | FC17<br>exsgd<br>345 | FC17<br>exsgd<br>346 | FC17<br>exspt<br>347 | FC17<br>exspt<br>348 | FC17<br>exspt<br>349 | FC17<br>exspt<br>350 | FC17<br>exspt<br>356 | FC69<br>exsfil<br>342 | FC69<br>matpt<br>359 |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| SiO2  | 68.36                | 68.80                | 68.67                | 68.11                | 67.97                | 68.21                | 68.67                | 68.87                | 67.54                | 66.62                 | 68.25                |
| TiO2  | 0.02                 | 0.02                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.04                 | 0.00                 | 0.04                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                 |
| Al2O3 | 19.36                | 19.40                | 19.75                | 19.50                | 19.59                | 19.62                | 19.33                | 19.33                | 19.69                | 19.37                 | 19.26                |
| Cr2O3 | 0.01                 | 0.00                 | 0.03                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.08                 | 0.00                 | 0.07                 | 0.02                 | 0.00                  | 0.00                 |
| MgO   | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.02                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.02                 |
| FeO   | 0.00                 | 0.11                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.03                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.22                  | 0.04                 |
| MnO   | 0.00                 | 0.02                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.06                 | 0.04                 | 0.03                 | 0.00                 | 0.01                  | 0.02                 |
| CaO   | 0.07                 | 0.12                 | 0.10                 | 0.17                 | 0.17                 | 0.05                 | 0.03                 | 0.07                 | 0.09                 | 0.12                  | 0.19                 |
| Na2O  | 11.74                | 11.92                | 11.51                | 11.51                | 11.55                | 11.68                | 11.67                | 11.77                | 11.47                | 11.92                 | 11.71                |
| K2O   | 0.02                 | 0.00                 | 0.09                 | 0.11                 | 0.04                 | 0.03                 | 0.07                 | 0.01                 | 0.03                 | 0.02                  | 0.04                 |
| Sum   | 99.58                | 100.38               | 100.15               | 99.40                | 99.38                | 99.75                | 99.84                | 100.16               | 98.84                | 98.29                 | 99.53                |
| Si    | 2.997                | 2.996                | 2.992                | 2.992                | 2.987                | 2.987                | 3.002                | 3.002                | 2.983                | 2.971                 | 2.996                |
| Ti    | 0.001                | 0.001                | 0.000                | 0.000                | 0.001                | 0.000                | 0.001                | 0.000                | 0.000                | 0.000                 | 0.000                |
| Al    | 1.001                | 0.996                | 1.014                | 1.010                | 1.015                | 1.013                | 0.996                | 0.993                | 1.02                 | 1.018                 | 0.997                |
| Cr    | 0.001                | 0.000                | 0.001                | 0.000                | 0.000                | 0.003                | 0.000                | 0.002                | 0.001                | 0.000                 | 0.000                |
| Mg    | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.001                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                 | 0.001                |
| Fe2   | 0.000                | 0.004                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.001                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.008                 | 0.001                |
| Mn    | 0.000                | 0.001                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.002                | 0.001                | 0.001                | 0.000                | 0.000                 | 0.001                |
| Ca    | 0.003                | 0.005                | 0.005                | 0.008                | 0.008                | 0.002                | 0.001                | 0.003                | 0.004                | 0.006                 | 0.009                |
| Na    | 0.998                | 1.006                | 0.972                | 0.980                | 0.984                | 0.992                | 0.989                | 0.995                | 0.982                | 1.030                 | 0.997                |
| K     | 0.001                | 0.000                | 0.005                | 0.006                | 0.002                | 0.002                | 0.004                | 0.001                | 0.002                | 0.001                 | 0.002                |
| Sum   | 5.001                | 5.009                | 4.989                | 4.996                | 4.998                | 5.002                | 4.995                | 4.998                | 4.996                | 5.035                 | 5.005                |
| Xan   | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.01                  | 0.01                 |
| Xab   | 1.00                 | 0.99                 | 0.99                 | 0.99                 | 0.99                 | 1.00                 | 0.99                 | 1.00                 | 0.99                 | 0.99                  | 0.99                 |
| Xor   | 0.00                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                 |

|       | FC62<br>exsgd<br>271 | FC62<br>matpt<br>283 | FC62<br>matpt<br>298 | FC62<br>matpt<br>311 | FC62<br>exsgd<br>322 | FC62<br>exsgd<br>323 | FC62<br>exspt<br>324 | FC62<br>exspt<br>325 | FC85<br>exspt<br>240 | FC85<br>exspt<br>241 | FC85<br>exspt<br>262 | FC85<br>exspt<br>263 |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| SiO2  | 68.37                | 64.71                | 61.75                | 68.08                | 68.72                | 68.07                | 68.22                | 68.06                | 68.18                | 68.04                | 68.50                | 67.88                |
| TiO2  | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.02                 | 0.00                 | 0.00                 |
| Al2O3 | 19.49                | 21.66                | 23.29                | 19.20                | 19.43                | 18.99                | 19.25                | 18.95                | 19.48                | 19.07                | 19.10                | 19.53                |
| Cr2O3 | 0.04                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.05                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.04                 | 0.07                 | 0.11                 |
| MgO   | 0.00                 | 0.04                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.03                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.02                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                 |
| FeO   | 0.02                 | 0.06                 | 0.12                 | 0.06                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.02                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.22                 |
| MnO   | 0.00                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.03                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 |
| CaO   | 0.08                 | 1.91                 | 4.63                 | 0.02                 | 0.13                 | 0.01                 | 0.04                 | 0.00                 | 0.13                 | 0.08                 | 0.09                 | 0.06                 |
| Na2O  | 11.58                | 9.41                 | 8.77                 | 11.34                | 11.41                | 11.46                | 11.51                | 11.26                | 11.34                | 11.68                | 11.56                | 11.24                |
| K2O   | 0.02                 | 0.84                 | 0.18                 | 0.13                 | 0.03                 | 0.06                 | 0.03                 | 0.03                 | 0.06                 | 0.12                 | 0.06                 | 0.08                 |
| Sum   | 99.60                | 98.64                | 98.75                | 98.90                | 99.75                | 98.62                | 99.07                | 98.33                | 99.22                | 99.07                | 99.38                | 99.11                |
| Si    | 2.996                | 2.883                | 2.770                | 3.003                | 3.003                | 3.010                | 3.003                | 3.015                | 2.997                | 3.001                | 3.008                | 2.990                |
| Ti    | 0.000                | 0.001                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.001                | 0.000                | 0.000                |
| Al    | 1.006                | 1.138                | 1.231                | 0.998                | 1.001                | 0.990                | 0.999                | 0.989                | 1.009                | 0.992                | 0.988                | 1.014                |
| Cr    | 0.001                | 0.000                | 0.000                | 0.002                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.001                | 0.002                | 0.004                |
| Mg    | 0.000                | 0.002                | 0.000                | 0.001                | 0.002                | 0.000                | 0.001                | 0.001                | 0.000                | 0.001                | 0.000                | 0.000                |
| Fe2   | 0.001                | 0.002                | 0.004                | 0.002                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.001                | 0.000                | 0.000                | 0.008                |
| Mn    | 0.000                | 0.000                | 0.001                | 0.000                | 0.000                | 0.001                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                |
| Ca    | 0.004                | 0.091                | 0.223                | 0.001                | 0.006                | 0.000                | 0.002                | 0.000                | 0.006                | 0.004                | 0.004                | 0.003                |
| Na    | 0.984                | 0.813                | 0.763                | 0.970                | 0.967                | 0.983                | 0.983                | 0.967                | 0.967                | 0.999                | 0.985                | 0.960                |
| K     | 0.001                | 0.048                | 0.011                | 0.007                | 0.002                | 0.003                | 0.002                | 0.002                | 0.004                | 0.007                | 0.004                | 0.004                |
| Sum   | 4.993                | 4.978                | 5.002                | 4.985                | 4.981                | 4.988                | 4.990                | 4.975                | 4.984                | 5.005                | 4.991                | 4.983                |
| Xan   | 0.00                 | 0.10                 | 0.22                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 |
| Xab   | 1.00                 | 0.85                 | 0.77                 | 0.99                 | 0.99                 | 1.00                 | 1.00                 | 1.00                 | 0.99                 | 0.99                 | 0.99                 | 0.99                 |
| Xor   | 0.00                 | 0.05                 | 0.01                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                 |

|       | FC92<br>matpt<br>182 | FC92<br>matpt<br>207 | FC92<br>matpt<br>209 | FC92<br>matpt<br>224 | FC92<br>matpt<br>263 | FC92<br>matpt<br>273 | FC88<br>exspt<br>433 | FC88<br>exspt<br>437 | FC88<br>exspt<br>441 | FC88<br>exsgd<br>442 | FC88<br>exsgd<br>443 | FC88<br>exsgd<br>444 |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| SiO2  | 68.22                | 68.17                | 68.04                | 62.48                | 67.32                | 67.48                | 67.60                | 66.86                | 67.76                | 67.34                | 67.69                | 67.72                |
| TiO2  | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.22                 | 0.00                 | 0.07                 | 0.02                 | 0.06                 | 0.14                 |
| Al2O3 | 19.30                | 19.27                | 18.98                | 22.89                | 19.49                | 19.81                | 19.79                | 20.42                | 19.65                | 19.33                | 19.47                | 19.71                |
| Cr2O3 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.03                 | 0.06                 | 0.06                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.04                 | 0.01                 |
| MgO   | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.03                 | 0.02                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.01                 | 0.03                 | 0.02                 | 0.00                 |
| FeO   | 0.17                 | 0.10                 | 0.13                 | 0.12                 | 0.04                 | 0.07                 | 0.10                 | 0.30                 | 0.07                 | 0.00                 | 0.04                 | 0.00                 |
| MnO   | 0.01                 | 0.00                 | 0.03                 | 0.12                 | 0.07                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.02                 | 0.06                 | 0.07                 |
| CaO   | 0.05                 | 0.10                 | 0.02                 | 4.15                 | 0.13                 | 0.05                 | 0.00                 | 1.13                 | 0.18                 | 0.20                 | 0.16                 | 0.09                 |
| Na2O  | 11.93                | 11.61                | 11.89                | 9.43                 | 11.17                | 11.72                | 11.35                | 10.95                | 11.54                | 11.32                | 11.29                | 11.70                |
| K2O   | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.09                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.03                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.16                 | 0.00                 |
| Sum   | 99.68                | 99.25                | 99.09                | 99.22                | 98.32                | 99.16                | 99.12                | 99.76                | 99.29                | 98.26                | 98.98                | 99.44                |
| Si    | 2.993                | 2.999                | 3.002                | 2.788                | 2.988                | 2.974                | 2.977                | 2.939                | 2.981                | 2.991                | 2.987                | 2.977                |
| Ti    | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.007                | 0.000                | 0.002                | 0.001                | 0.002                | 0.005                |
| Al    | 0.998                | 0.999                | 0.987                | 1.204                | 1.020                | 1.029                | 1.027                | 1.058                | 1.019                | 1.012                | 1.013                | 1.021                |
| Cr    | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.001                | 0.002                | 0.002                | 0.000                | 0.000                | 0.002                | 0.000                |
| Mg    | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.002                | 0.001                | 0.000                | 0.000                | 0.001                | 0.001                | 0.002                | 0.001                | 0.000                |
| Fe2   | 0.006                | 0.004                | 0.005                | 0.005                | 0.001                | 0.002                | 0.004                | 0.011                | 0.002                | 0.000                | 0.001                | 0.000                |
| Mn    | 0.000                | 0.000                | 0.001                | 0.005                | 0.003                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.001                | 0.002                | 0.003                |
| Ca    | 0.002                | 0.005                | 0.001                | 0.198                | 0.006                | 0.002                | 0.000                | 0.053                | 0.009                | 0.009                | 0.007                | 0.004                |
| Na    | 1.015                | 0.990                | 1.017                | 0.816                | 0.962                | 1.001                | 0.969                | 0.934                | 0.984                | 0.975                | 0.966                | 0.997                |
| K     | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.005                | 0.000                | 0.000                | 0.002                | 0.001                | 0.000                | 0.009                | 0.000                |
| Sum   | 5.015                | 4.997                | 5.013                | 5.017                | 4.986                | 5.011                | 4.986                | 4.999                | 4.999                | 4.990                | 4.991                | 5.007                |
| Xan   | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.20                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.05                 | 0.01                 | 0.01                 | 0.01                 | 0.00                 |
| Xab   | 1.00                 | 1.00                 | 1.00                 | 0.80                 | 0.99                 | 1.00                 | 1.00                 | 0.94                 | 0.99                 | 0.99                 | 0.98                 | 1.00                 |
| Xor   | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                 |

|       | FC88<br>exsgd<br>445 | FC88<br>exspt<br>447 | FC88<br>exspt<br>462 | FC88<br>exspt<br>467 | FC88<br>exsfil<br>475 | FC88<br>exspt<br>476 | FC88<br>exspt<br>478 | FC97<br>accol<br>33 | FC97<br>matgd<br>66 | FC97<br>matgd<br>67 | FC97<br>matpt<br>68 | FC97<br>matpt<br>76 | FC97<br>matpt<br>78 |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| SiO2  | 68.17                | 67.87                | 67.02                | 67.59                | 68.33                 | 67.37                | 68.24                | 66.17               | 65.43               | 63.68               | 62.86               | 63.81               | 63.60               |
| TiO2  | 0.07                 | 0.04                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                | 0.07                | 0.00                | 0.09                | 0.00                | 0.00                |
| Al2O3 | 19.42                | 19.82                | 19.48                | 20.09                | 19.52                 | 19.49                | 19.29                | 20.03               | 21.02               | 22.17               | 22.99               | 21.95               | 22.13               |
| Cr2O3 | 0.00                 | 0.02                 | 0.04                 | 0.00                 | 0.04                  | 0.00                 | 0.02                 | 0.06                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00                |
| MgO   | 0.00                 | 0.01                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.01                 | 0.00                 | 0.03                | 0.03                | 0.00                | 0.00                | 0.01                | 0.00                |
| FeO   | 0.00                 | 0.05                 | 0.05                 | 0.00                 | 0.05                  | 0.07                 | 0.00                 | 0.08                | 0.04                | 0.07                | 0.31                | 0.17                | 0.15                |
| MnO   | 0.08                 | 0.02                 | 0.04                 | 0.06                 | 0.00                  | 0.00                 | 0.05                 | 0.04                | 0.00                | 0.13                | 0.00                | 0.00                | 0.00                |
| CaO   | 0.23                 | 0.20                 | 0.19                 | 0.42                 | 0.10                  | 0.02                 | 0.26                 | 0.44                | 2.29                | 3.23                | 4.39                | 3.37                | 3.35                |
| Na2O  | 11.55                | 11.19                | 11.69                | 11.35                | 11.16                 | 11.28                | 11.61                | 11.56               | 10.39               | 9.67                | 9.47                | 9.69                | 9.80                |
| K2O   | 0.00                 | 0.03                 | 0.03                 | 0.04                 | 0.00                  | 0.00                 | 0.00                 | 0.07                | 0.07                | 0.11                | 0.08                | 0.10                | 0.06                |
| Sum   | 99.52                | 99.23                | 98.56                | 99.56                | 99.19                 | 98.24                | 99.46                | 98.46               | 99.33               | 99.06               | 100.19              | 99.09               | 99.10               |
|       |                      |                      |                      |                      |                       |                      |                      |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Si    | 2.992                | 2.983                | 2.976                | 2.967                | 3.001                 | 2.990                | 2.996                | 2.946               | 2.896               | 2.836               | 2.783               | 2.842               | 2.833               |
| Ti    | 0.002                | 0.001                | 0.000                | 0.000                | 0.000                 | 0.000                | 0.000                | 0.000               | 0.002               | 0.000               | 0.003               | 0.000               | 0.000               |
| Al    | 1.005                | 1.027                | 1.020                | 1.040                | 1.010                 | 1.020                | 0.999                | 1.051               | 1.096               | 1.164               | 1.199               | 1.152               | 1.162               |
| Cr    | 0.000                | 0.001                | 0.001                | 0.000                | 0.001                 | 0.000                | 0.001                | 0.002               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.000               |
| Mg    | 0.000                | 0.000                | 0.001                | 0.000                | 0.000                 | 0.001                | 0.000                | 0.002               | 0.002               | 0.000               | 0.000               | 0.001               | 0.000               |
| Fe2   | 0.000                | 0.002                | 0.002                | 0.000                | 0.002                 | 0.002                | 0.000                | 0.003               | 0.002               | 0.002               | 0.011               | 0.006               | 0.006               |
| Mn    | 0.003                | 0.001                | 0.002                | 0.002                | 0.000                 | 0.000                | 0.002                | 0.002               | 0.000               | 0.005               | 0.000               | 0.000               | 0.000               |
| Ca    | 0.011                | 0.009                | 0.009                | 0.020                | 0.005                 | 0.001                | 0.012                | 0.021               | 0.108               | 0.154               | 0.208               | 0.161               | 0.160               |
| Na    | 0.983                | 0.954                | 1.006                | 0.966                | 0.950                 | 0.971                | 0.989                | 0.998               | 0.891               | 0.835               | 0.813               | 0.836               | 0.846               |
| K     | 0.000                | 0.002                | 0.002                | 0.002                | 0.000                 | 0.000                | 0.000                | 0.004               | 0.004               | 0.006               | 0.005               | 0.006               | 0.003               |
| Sum   | 4.995                | 4.979                | 5.018                | 4.997                | 4.969                 | 4.985                | 4.998                | 5.028               | 5.001               | 5.003               | 5.023               | 5.003               | 5.011               |
|       |                      |                      |                      |                      |                       |                      |                      |                     |                     |                     |                     |                     |                     |
| Xan   | 0.01                 | 0.01                 | 0.01                 | 0.02                 | 0.00                  | 0.00                 | 0.01                 | 0.02                | 0.11                | 0.15                | 0.20                | 0.16                | 0.16                |
| Xab   | 0.99                 | 0.99                 | 0.99                 | 0.98                 | 1.00                  | 1.00                 | 0.99                 | 0.98                | 0.89                | 0.84                | 0.79                | 0.83                | 0.84                |
| Xor   | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                | 0.00                | 0.01                | 0.00                | 0.01                | 0.00                |

|       | FC99<br>matgd<br>1 | FC99<br>matgd<br>2 | FC99<br>matpt<br>9 |
|-------|--------------------|--------------------|--------------------|
| SiO2  | 68.71              | 68.61              | 69.32              |
| TiO2  | 0.00               | 0.07               | 0.00               |
| Al2O3 | 19.85              | 19.76              | 19.44              |
| Cr2O3 | 0.05               | 0.12               | 0.04               |
| MgO   | 0.00               | 0.03               | 0.03               |
| FeO   | 0.00               | 0.01               | 0.18               |
| MnO   | 0.00               | 0.00               | 0.00               |
| CaO   | 0.01               | 0.03               | 0.06               |
| Na2O  | 11.60              | 11.59              | 11.28              |
| K2O   | 0.02               | 0.08               | 0.19               |
| Sum   | 100.25             | 100.28             | 100.54             |

|     |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|
| Si  | 2.990 | 2.987 | 3.008 |
| Ti  | 0.000 | 0.002 | 0.000 |
| Al  | 1.018 | 1.014 | 0.994 |
| Cr  | 0.002 | 0.004 | 0.001 |
| Mg  | 0.000 | 0.002 | 0.002 |
| Fe2 | 0.000 | 0.000 | 0.007 |
| Mn  | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Ca  | 0.001 | 0.001 | 0.003 |
| Na  | 0.978 | 0.978 | 0.949 |
| K   | 0.001 | 0.004 | 0.010 |
| Sum | 4.990 | 4.993 | 4.974 |

|     |      |      |      |
|-----|------|------|------|
| Xan | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| Xab | 1.00 | 0.99 | 0.99 |
| Xor | 0.00 | 0.00 | 0.01 |

## Analyses des feldspaths potassiques

|       | EC27<br>mpost<br>295 | EC27<br>mpost<br>305 | EC27<br>mpost<br>312 | EC27<br>mpost<br>314 | EC6<br>exsfil<br>48 | FC62<br>mpost<br>274 | FC62<br>mpost<br>282 | FC62<br>mpost<br>287 | FC62<br>matpt<br>299 | FC88<br>exsfil<br>468 |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| SiO2  | 61.92                | 63.77                | 63.91                | 64.01                | 63.29               | 63.68                | 64.21                | 64.26                | 64.36                | 63.63                 |
| TiO2  | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                | 0.04                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                  |
| Al2O3 | 19.26                | 17.93                | 18.10                | 18.53                | 18.35               | 18.33                | 18.28                | 18.28                | 17.86                | 18.30                 |
| Cr2O3 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.14                | 0.08                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.03                 | 0.00                  |
| MgO   | 0.85                 | 0.00                 | 0.02                 | 0.00                 | 0.00                | 0.04                 | 0.02                 | 0.07                 | 0.03                 | 0.02                  |
| FeO   | 2.43                 | 0.21                 | 0.14                 | 0.08                 | 0.23                | 0.30                 | 0.00                 | 0.24                 | 0.16                 | 0.20                  |
| MnO   | 0.00                 | 0.09                 | 0.04                 | 0.00                 | 0.00                | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.04                 | 0.00                  |
| CaO   | 0.12                 | 0.00                 | 0.03                 | 0.00                 | 0.00                | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.04                  |
| Na2O  | 2.29                 | 0.75                 | 0.05                 | 0.06                 | 0.05                | 0.59                 | 0.01                 | 1.14                 | 0.86                 | 0.16                  |
| K2O   | 11.69                | 15.41                | 17.23                | 16.32                | 17.30               | 15.15                | 17.14                | 14.15                | 15.64                | 16.72                 |
| Sum   | 98.55                | 98.16                | 99.53                | 99.00                | 99.37               | 98.20                | 99.67                | 98.15                | 98.98                | 99.07                 |
| Si    | 2.897                | 3.000                | 2.988                | 2.989                | 2.970               | 2.989                | 2.991                | 3.001                | 3.005                | 2.983                 |
| Ti    | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000               | 0.001                | 0.000                | 0.001                | 0.000                | 0.000                 |
| Al    | 1.062                | 0.994                | 0.998                | 1.020                | 1.015               | 1.014                | 1.004                | 1.006                | 0.983                | 1.011                 |
| Cr    | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.005               | 0.003                | 0.000                | 0.000                | 0.001                | 0.000                 |
| Mg    | 0.059                | 0.000                | 0.002                | 0.000                | 0.000               | 0.003                | 0.001                | 0.005                | 0.002                | 0.001                 |
| Fe2   | 0.095                | 0.008                | 0.006                | 0.003                | 0.009               | 0.012                | 0.000                | 0.009                | 0.006                | 0.008                 |
| Mn    | 0.000                | 0.003                | 0.001                | 0.000                | 0.000               | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.001                | 0.000                 |
| Ca    | 0.006                | 0.000                | 0.001                | 0.000                | 0.000               | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.002                 |
| Na    | 0.207                | 0.068                | 0.005                | 0.005                | 0.005               | 0.054                | 0.001                | 0.103                | 0.078                | 0.014                 |
| K     | 0.698                | 0.925                | 1.028                | 0.972                | 1.036               | 0.907                | 1.019                | 0.843                | 0.931                | 1.000                 |
| Sum   | 5.024                | 4.999                | 5.029                | 4.990                | 5.040               | 4.982                | 5.016                | 4.968                | 5.008                | 5.019                 |
| Xan   | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  |
| Xab   | 0.23                 | 0.07                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                | 0.06                 | 0.00                 | 0.11                 | 0.08                 | 0.01                  |
| Xor   | 0.77                 | 0.93                 | 0.99                 | 0.99                 | 1.00                | 0.94                 | 1.00                 | 0.89                 | 0.92                 | 0.98                  |

|       | FC69<br>mpost<br>395 | FC69<br>mpost<br>322 | FC69<br>mpost<br>325 | FC69<br>mpost<br>327 | FC69<br>mpost<br>354 | FC69<br>mpost<br>367 | FC69<br>mpost<br>368 | FC69<br>mpost<br>386 | FC69<br>mpost<br>390 |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| SiO2  | 63.84                | 62.97                | 63.74                | 63.29                | 63.54                | 63.09                | 64.07                | 62.95                | 62.74                |
| TiO2  | 0.06                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.11                 | 0.00                 |
| Al2O3 | 18.09                | 17.99                | 18.13                | 18.21                | 18.20                | 18.00                | 18.04                | 18.27                | 18.06                |
| Cr2O3 | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.08                 | 0.06                 |
| MgO   | 0.00                 | 0.06                 | 0.09                 | 0.00                 | 0.03                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.03                 | 0.00                 |
| FeO   | 0.32                 | 0.00                 | 0.12                 | 0.16                 | 0.09                 | 0.17                 | 0.02                 | 0.18                 | 0.12                 |
| MnO   | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.12                 | 0.00                 |
| CaO   | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.04                 | 0.00                 | 0.00                 |
| Na2O  | 0.00                 | 0.01                 | 0.07                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.03                 | 0.08                 | 0.03                 |
| K2O   | 17.23                | 17.10                | 17.00                | 16.60                | 16.55                | 17.23                | 17.26                | 16.62                | 17.20                |
| Sum   | 99.56                | 98.13                | 99.15                | 98.27                | 98.43                | 98.50                | 99.48                | 98.45                | 98.22                |
| Si    | 2.986                | 2.985                | 2.987                | 2.987                | 2.991                | 2.984                | 2.995                | 2.972                | 2.977                |
| Ti    | 0.002                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.004                | 0.000                |
| Al    | 0.997                | 1.005                | 1.002                | 1.013                | 1.010                | 1.003                | 0.994                | 1.017                | 1.010                |
| Cr    | 0.001                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.003                | 0.002                |
| Mg    | 0.000                | 0.004                | 0.006                | 0.000                | 0.002                | 0.000                | 0.000                | 0.002                | 0.000                |
| Fe2   | 0.012                | 0.000                | 0.005                | 0.006                | 0.004                | 0.007                | 0.001                | 0.007                | 0.005                |
| Mn    | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.005                | 0.000                |
| Ca    | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.001                | 0.000                | 0.002                | 0.000                | 0.000                |
| Na    | 0.000                | 0.001                | 0.006                | 0.000                | 0.000                | 0.001                | 0.003                | 0.007                | 0.003                |
| K     | 1.028                | 1.034                | 1.016                | 1.000                | 0.994                | 1.040                | 1.030                | 1.001                | 1.041                |
| Sum   | 5.027                | 5.030                | 5.023                | 5.007                | 5.001                | 5.035                | 5.024                | 5.018                | 5.039                |
| Xan   | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 |
| Xab   | 0.00                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                 |
| Xor   | 1.00                 | 1.00                 | 0.99                 | 1.00                 | 1.00                 | 1.00                 | 1.00                 | 0.99                 | 1.00                 |

## Analyses des biotites

|       | EC21<br>msynS2<br>106 | EC21<br>mpost<br>109 | EC21<br>mpost<br>110 | EC21<br>mpost<br>111 | EC21<br>mpost<br>112 | EC21<br>mpost<br>113 | EC21<br>mallS2<br>114 | EC21<br>mpost<br>115 | EC21<br>msynS2<br>116 | EC21<br>msynS2<br>117 | EC21<br>msynS2<br>118 | EC21<br>exbord<br>121 | EC21<br>msynS1<br>127 |
|-------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| SiO2  | 40.99                 | 33.72                | 35.72                | 36.50                | 35.77                | 36.36                | 32.87                 | 33.91                | 36.19                 | 35.80                 | 36.61                 | 36.11                 | 42.54                 |
| TiO2  | 0.08                  | 0.01                 | 1.58                 | 0.90                 | 1.93                 | 1.76                 | 0.57                  | 1.45                 | 1.75                  | 1.65                  | 1.72                  | 1.70                  | 0.35                  |
| Al2O3 | 27.58                 | 21.31                | 18.92                | 20.05                | 18.25                | 19.35                | 21.70                 | 21.22                | 17.74                 | 18.88                 | 17.99                 | 16.92                 | 26.26                 |
| Cr2O3 | 0.08                  | 0.04                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.11                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                 | 0.00                  | 0.05                  | 0.02                  | 0.04                  | 0.05                  |
| MgO   | 5.11                  | 9.83                 | 10.11                | 9.98                 | 9.93                 | 10.11                | 8.99                  | 9.08                 | 10.38                 | 9.66                  | 10.36                 | 10.76                 | 3.92                  |
| FeO   | 9.93                  | 19.28                | 18.66                | 17.62                | 19.14                | 18.10                | 19.52                 | 19.73                | 18.33                 | 18.45                 | 18.80                 | 20.17                 | 8.20                  |
| MnO   | 0.05                  | 0.24                 | 0.16                 | 0.17                 | 0.24                 | 0.19                 | 0.27                  | 0.16                 | 0.16                  | 0.12                  | 0.22                  | 0.21                  | 0.11                  |
| CaO   | 0.04                  | 0.00                 | 0.03                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                 | 0.04                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 1.19                  |
| Na2O  | 0.35                  | 0.28                 | 0.22                 | 0.22                 | 0.20                 | 0.28                 | 0.27                  | 0.12                 | 0.24                  | 0.22                  | 0.28                  | 0.24                  | 1.23                  |
| K2O   | 9.13                  | 9.26                 | 8.99                 | 8.96                 | 8.79                 | 8.98                 | 9.00                  | 8.96                 | 8.34                  | 8.67                  | 8.60                  | 8.69                  | 8.09                  |
| H2O   | 4.17                  | 3.88                 | 3.92                 | 3.96                 | 3.91                 | 3.97                 | 3.84                  | 3.91                 | 3.89                  | 3.90                  | 3.94                  | 3.91                  | 4.15                  |
| Sum   | 97.49                 | 97.85                | 98.31                | 98.36                | 98.28                | 99.10                | 97.03                 | 98.53                | 97.07                 | 97.41                 | 98.53                 | 98.75                 | 96.10                 |
| Si    | 2.945                 | 2.606                | 2.728                | 2.760                | 2.739                | 2.741                | 2.566                 | 2.599                | 2.786                 | 2.750                 | 2.782                 | 2.766                 | 3.068                 |
| Ti    | 0.004                 | 0.000                | 0.091                | 0.051                | 0.111                | 0.100                | 0.034                 | 0.083                | 0.101                 | 0.095                 | 0.098                 | 0.098                 | 0.019                 |
| Al    | 2.336                 | 1.941                | 1.703                | 1.786                | 1.647                | 1.719                | 1.996                 | 1.917                | 1.610                 | 1.709                 | 1.612                 | 1.528                 | 2.232                 |
| Cr    | 0.004                 | 0.002                | 0.000                | 0.000                | 0.007                | 0.000                | 0.000                 | 0.000                | 0.000                 | 0.003                 | 0.001                 | 0.002                 | 0.003                 |
| Mg    | 0.547                 | 1.132                | 1.151                | 1.125                | 1.134                | 1.136                | 1.046                 | 1.037                | 1.190                 | 1.106                 | 1.173                 | 1.229                 | 0.422                 |
| Fe2   | 0.597                 | 1.246                | 1.191                | 1.114                | 1.226                | 1.141                | 1.274                 | 1.265                | 1.180                 | 1.185                 | 1.195                 | 1.292                 | 0.495                 |
| Mn    | 0.003                 | 0.016                | 0.010                | 0.011                | 0.016                | 0.012                | 0.018                 | 0.010                | 0.010                 | 0.008                 | 0.014                 | 0.014                 | 0.007                 |
| Ca    | 0.003                 | 0.000                | 0.002                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                 | 0.000                | 0.004                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.092                 |
| Na    | 0.049                 | 0.042                | 0.033                | 0.033                | 0.030                | 0.041                | 0.041                 | 0.018                | 0.036                 | 0.033                 | 0.041                 | 0.035                 | 0.172                 |
| K     | 0.837                 | 0.913                | 0.876                | 0.864                | 0.859                | 0.863                | 0.896                 | 0.876                | 0.819                 | 0.849                 | 0.833                 | 0.849                 | 0.744                 |
| OH    | 2.000                 | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                 | 2.000                | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 |
| Sum   | 9.324                 | 9.900                | 9.784                | 9.744                | 9.768                | 9.752                | 9.871                 | 9.806                | 9.736                 | 9.740                 | 9.750                 | 9.814                 | 9.253                 |
| XFe   | 0.522                 | 0.524                | 0.509                | 0.498                | 0.520                | 0.501                | 0.549                 | 0.549                | 0.498                 | 0.517                 | 0.505                 | 0.512                 | 0.540                 |

|       | EC21<br>msynS2<br>128 | EC21<br>mpost<br>135 | EC21<br>mpost<br>136 | EC21<br>exbord<br>138 | EC21<br>exbord<br>139 | EC21<br>exbord<br>143 | EC21<br>exbord<br>144 | EC21<br>mpost<br>160 | EC21<br>mpost<br>161 | EC21<br>mallS2<br>163 | EC21<br>mpost<br>168 | EC21<br>mpost<br>169 |
|-------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| SiO2  | 33.78                 | 35.92                | 36.20                | 36.69                 | 35.65                 | 36.59                 | 36.92                 | 36.00                | 35.88                | 35.61                 | 36.09                | 35.94                |
| TiO2  | 0.51                  | 1.70                 | 2.01                 | 1.93                  | 1.37                  | 1.57                  | 1.83                  | 1.30                 | 1.30                 | 1.42                  | 1.26                 | 1.42                 |
| Al2O3 | 20.42                 | 19.26                | 19.07                | 17.41                 | 17.17                 | 17.66                 | 17.20                 | 16.28                | 16.66                | 17.03                 | 17.17                | 16.67                |
| Cr2O3 | 0.09                  | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                  | 0.02                  | 0.08                  | 0.11                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                 | 0.02                 |
| MgO   | 9.70                  | 9.81                 | 9.74                 | 11.18                 | 11.46                 | 10.93                 | 11.08                 | 12.00                | 12.10                | 12.34                 | 11.01                | 12.29                |
| FeO   | 18.95                 | 18.25                | 17.97                | 19.45                 | 20.67                 | 17.77                 | 19.61                 | 20.25                | 19.12                | 18.23                 | 20.98                | 19.03                |
| MnO   | 0.14                  | 0.19                 | 0.19                 | 0.09                  | 0.22                  | 0.16                  | 0.19                  | 0.31                 | 0.22                 | 0.25                  | 0.24                 | 0.20                 |
| CaO   | 0.00                  | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.05                 | 0.00                 |
| Na2O  | 0.25                  | 0.27                 | 0.22                 | 0.21                  | 0.22                  | 0.28                  | 0.24                  | 0.21                 | 0.28                 | 0.22                  | 0.27                 | 0.22                 |
| K2O   | 9.14                  | 9.28                 | 8.95                 | 8.68                  | 8.16                  | 9.01                  | 8.61                  | 8.79                 | 8.13                 | 8.46                  | 7.93                 | 8.22                 |
| H2O   | 3.84                  | 3.94                 | 3.94                 | 3.97                  | 3.91                  | 3.92                  | 3.97                  | 3.92                 | 3.89                 | 3.89                  | 3.92                 | 3.90                 |
| Sum   | 96.81                 | 98.63                | 98.30                | 99.60                 | 98.84                 | 97.90                 | 99.74                 | 99.16                | 97.60                | 97.45                 | 98.92                | 97.92                |
| Si    | 2.634                 | 2.731                | 2.750                | 2.768                 | 2.729                 | 2.793                 | 2.783                 | 2.755                | 2.763                | 2.740                 | 2.758                | 2.758                |
| Ti    | 0.030                 | 0.097                | 0.115                | 0.110                 | 0.079                 | 0.090                 | 0.104                 | 0.075                | 0.075                | 0.082                 | 0.072                | 0.082                |
| Al    | 1.877                 | 1.726                | 1.708                | 1.548                 | 1.549                 | 1.589                 | 1.528                 | 1.468                | 1.512                | 1.545                 | 1.547                | 1.508                |
| Cr    | 0.006                 | 0.000                | 0.000                | 0.000                 | 0.000                 | 0.001                 | 0.005                 | 0.007                | 0.000                | 0.000                 | 0.000                | 0.001                |
| Mg    | 1.128                 | 1.112                | 1.103                | 1.257                 | 1.308                 | 1.244                 | 1.245                 | 1.369                | 1.389                | 1.416                 | 1.254                | 1.405                |
| Fe2   | 1.236                 | 1.161                | 1.142                | 1.228                 | 1.323                 | 1.135                 | 1.237                 | 1.296                | 1.231                | 1.173                 | 1.341                | 1.221                |
| Mn    | 0.009                 | 0.012                | 0.013                | 0.006                 | 0.014                 | 0.010                 | 0.012                 | 0.020                | 0.015                | 0.016                 | 0.016                | 0.013                |
| Ca    | 0.000                 | 0.000                | 0.000                | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                | 0.000                | 0.000                 | 0.004                | 0.000                |
| Na    | 0.038                 | 0.040                | 0.032                | 0.031                 | 0.033                 | 0.041                 | 0.035                 | 0.031                | 0.042                | 0.032                 | 0.040                | 0.033                |
| K     | 0.909                 | 0.901                | 0.868                | 0.835                 | 0.797                 | 0.878                 | 0.828                 | 0.858                | 0.798                | 0.831                 | 0.773                | 0.804                |
| OH    | 2.000                 | 2.000                | 2.000                | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                | 2.000                | 2.000                 | 2.000                | 2.000                |
| Sum   | 9.868                 | 9.779                | 9.731                | 9.781                 | 9.832                 | 9.781                 | 9.778                 | 9.877                | 9.826                | 9.836                 | 9.804                | 9.825                |
| XFe   | 0.523                 | 0.511                | 0.509                | 0.494                 | 0.503                 | 0.477                 | 0.498                 | 0.486                | 0.470                | 0.453                 | 0.517                | 0.465                |

|       | EC25<br>mallS2<br>3 | EC25<br>mallS2<br>4 | EC25<br>mallS2<br>6 | EC25<br>mpost<br>7 | EC25<br>mallS2<br>11 | EC25<br>mallS2<br>12 | EC25<br>exbord<br>25 | EC25<br>exbord<br>26 | EC25<br>mpost<br>31 | EC25<br>mallS2<br>36 | EC25<br>mallS2<br>37 | EC25<br>mallS2<br>44 | EC25<br>exbord<br>50 |
|-------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| SiO2  | 36.08               | 35.21               | 35.73               | 35.78              | 35.89                | 35.40                | 36.75                | 36.06                | 36.22               | 35.19                | 35.22                | 34.18                | 35.40                |
| TiO2  | 0.83                | 1.10                | 1.10                | 0.91               | 1.37                 | 1.09                 | 1.34                 | 1.54                 | 1.32                | 1.35                 | 1.51                 | 1.50                 | 1.16                 |
| Al2O3 | 17.75               | 17.81               | 17.90               | 17.37              | 17.73                | 17.83                | 17.55                | 17.92                | 17.74               | 17.54                | 17.15                | 17.20                | 17.51                |
| Cr2O3 | 0.00                | 0.01                | 0.00                | 0.02               | 0.15                 | 0.00                 | 0.14                 | 0.00                 | 0.00                | 0.00                 | 0.08                 | 0.11                 | 0.00                 |
| MgO   | 9.70                | 9.75                | 9.47                | 9.27               | 9.67                 | 9.66                 | 9.54                 | 9.67                 | 9.35                | 10.00                | 9.59                 | 9.56                 | 10.08                |
| FeO   | 19.81               | 20.54               | 20.60               | 20.69              | 20.31                | 20.46                | 19.40                | 20.38                | 20.04               | 19.47                | 20.25                | 21.24                | 20.11                |
| MnO   | 0.08                | 0.11                | 0.05                | 0.07               | 0.12                 | 0.15                 | 0.03                 | 0.04                 | 0.21                | 0.08                 | 0.12                 | 0.05                 | 0.12                 |
| CaO   | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.05               | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.06                | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 |
| Na2O  | 0.04                | 0.06                | 0.07                | 0.07               | 0.08                 | 0.07                 | 0.04                 | 0.00                 | 0.15                | 0.11                 | 0.00                 | 0.08                 | 0.03                 |
| K2O   | 8.91                | 8.05                | 8.67                | 8.21               | 8.82                 | 8.51                 | 9.07                 | 9.49                 | 8.59                | 8.99                 | 8.95                 | 8.07                 | 9.22                 |
| H2O   | 3.86                | 3.83                | 3.86                | 3.82               | 3.88                 | 3.84                 | 3.89                 | 3.91                 | 3.88                | 3.83                 | 3.82                 | 3.77                 | 3.85                 |
| Sum   | 97.07               | 96.47               | 97.45               | 96.26              | 98.04                | 97.03                | 97.74                | 99.02                | 97.55               | 96.56                | 96.68                | 95.75                | 97.47                |
| Si    | 2.803               | 2.755               | 2.773               | 2.807              | 2.769                | 2.760                | 2.827                | 2.761                | 2.799               | 2.755                | 2.764                | 2.716                | 2.755                |
| Ti    | 0.049               | 0.064               | 0.064               | 0.054              | 0.079                | 0.064                | 0.077                | 0.089                | 0.076               | 0.079                | 0.089                | 0.090                | 0.068                |
| Al    | 1.625               | 1.643               | 1.637               | 1.606              | 1.612                | 1.638                | 1.592                | 1.617                | 1.616               | 1.618                | 1.586                | 1.611                | 1.606                |
| Cr    | 0.000               | 0.001               | 0.000               | 0.001              | 0.009                | 0.000                | 0.009                | 0.000                | 0.000               | 0.000                | 0.005                | 0.007                | 0.000                |
| Mg    | 1.123               | 1.138               | 1.095               | 1.084              | 1.112                | 1.123                | 1.094                | 1.103                | 1.077               | 1.167                | 1.122                | 1.132                | 1.170                |
| Fe2   | 1.287               | 1.344               | 1.337               | 1.358              | 1.311                | 1.334                | 1.248                | 1.305                | 1.295               | 1.275                | 1.329                | 1.411                | 1.309                |
| Mn    | 0.005               | 0.007               | 0.003               | 0.005              | 0.008                | 0.010                | 0.002                | 0.003                | 0.014               | 0.005                | 0.008                | 0.003                | 0.008                |
| Ca    | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.005              | 0.000                | 0.001                | 0.000                | 0.000                | 0.005               | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                |
| Na    | 0.005               | 0.009               | 0.011               | 0.011              | 0.012                | 0.011                | 0.006                | 0.000                | 0.022               | 0.017                | 0.000                | 0.012                | 0.005                |
| K     | 0.883               | 0.804               | 0.858               | 0.821              | 0.869                | 0.846                | 0.890                | 0.927                | 0.847               | 0.898                | 0.896                | 0.819                | 0.915                |
| OH    | 2.000               | 2.000               | 2.000               | 2.000              | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000               | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                |
| Sum   | 9.780               | 9.765               | 9.779               | 9.751              | 9.781                | 9.786                | 9.743                | 9.805                | 9.751               | 9.814                | 9.799                | 9.801                | 9.834                |
| XFe   | 0.534               | 0.542               | 0.550               | 0.556              | 0.541                | 0.543                | 0.533                | 0.542                | 0.546               | 0.522                | 0.542                | 0.555                | 0.528                |

|       | EC25<br>exbord<br>56 | EC25<br>mpost<br>93 | EC27<br>exsenc<br>286 | EC27<br>exsfil<br>292 | EC27<br>mpost<br>293 | EC27<br>mpost<br>294 | EC27<br>mallS2<br>298 | EC27<br>msynS1<br>300 | EC27<br>mallS2<br>313 | EC6<br>mpost<br>39 | EC6<br>exsfil<br>64 |
|-------|----------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|
| SiO2  | 36.08                | 34.96               | 34.16                 | 33.89                 | 34.79                | 34.04                | 33.32                 | 34.02                 | 33.97                 | 34.19              | 35.26               |
| TiO2  | 1.43                 | 1.03                | 1.43                  | 1.70                  | 1.37                 | 1.50                 | 1.89                  | 1.80                  | 1.70                  | 1.90               | 1.52                |
| Al2O3 | 17.58                | 17.85               | 18.31                 | 18.88                 | 18.83                | 18.57                | 18.95                 | 18.43                 | 18.88                 | 18.75              | 18.79               |
| Cr2O3 | 0.00                 | 0.03                | 0.00                  | 0.01                  | 0.05                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.01                  | 0.00                  | 0.00               | 0.01                |
| MgO   | 9.82                 | 9.71                | 7.85                  | 7.15                  | 7.62                 | 7.54                 | 7.16                  | 7.39                  | 7.67                  | 7.41               | 8.00                |
| FeO   | 20.04                | 21.04               | 23.17                 | 23.79                 | 22.83                | 22.50                | 23.44                 | 23.39                 | 23.83                 | 23.40              | 22.05               |
| MnO   | 0.00                 | 0.04                | 0.19                  | 0.06                  | 0.08                 | 0.17                 | 0.07                  | 0.22                  | 0.14                  | 0.14               | 0.36                |
| CaO   | 0.00                 | 0.00                | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                 | 0.08                 | 0.00                  | 0.07                  | 0.01                  | 0.00               | 0.00                |
| Na2O  | 0.04                 | 0.03                | 0.13                  | 0.06                  | 0.14                 | 0.10                 | 0.03                  | 0.12                  | 0.17                  | 0.14               | 0.05                |
| K2O   | 9.10                 | 8.92                | 8.51                  | 8.50                  | 8.95                 | 8.43                 | 8.42                  | 8.99                  | 8.93                  | 9.40               | 9.52                |
| H2O   | 3.88                 | 3.84                | 3.80                  | 3.81                  | 3.85                 | 3.78                 | 3.78                  | 3.81                  | 3.85                  | 3.85               | 3.89                |
| Sum   | 97.98                | 97.44               | 97.54                 | 97.85                 | 98.51                | 96.71                | 97.07                 | 98.24                 | 99.15                 | 99.17              | 99.44               |
| Si    | 2.782                | 2.730               | 2.691                 | 2.666                 | 2.707                | 2.695                | 2.642                 | 2.672                 | 2.646                 | 2.663              | 2.715               |
| Ti    | 0.083                | 0.060               | 0.084                 | 0.101                 | 0.080                | 0.090                | 0.113                 | 0.107                 | 0.099                 | 0.111              | 0.088               |
| Al    | 1.598                | 1.642               | 1.700                 | 1.751                 | 1.727                | 1.733                | 1.771                 | 1.706                 | 1.733                 | 1.721              | 1.706               |
| Cr    | 0.000                | 0.002               | 0.000                 | 0.001                 | 0.003                | 0.000                | 0.000                 | 0.001                 | 0.000                 | 0.000              | 0.000               |
| Mg    | 1.129                | 1.130               | 0.922                 | 0.838                 | 0.884                | 0.889                | 0.847                 | 0.865                 | 0.891                 | 0.860              | 0.918               |
| Fe2   | 1.292                | 1.374               | 1.527                 | 1.565                 | 1.486                | 1.490                | 1.555                 | 1.537                 | 1.552                 | 1.524              | 1.421               |
| Mn    | 0.000                | 0.003               | 0.013                 | 0.004                 | 0.005                | 0.011                | 0.005                 | 0.014                 | 0.010                 | 0.009              | 0.024               |
| Ca    | 0.000                | 0.000               | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                | 0.007                | 0.000                 | 0.006                 | 0.001                 | 0.000              | 0.000               |
| Na    | 0.006                | 0.005               | 0.019                 | 0.009                 | 0.021                | 0.016                | 0.004                 | 0.018                 | 0.026                 | 0.021              | 0.007               |
| K     | 0.896                | 0.889               | 0.855                 | 0.854                 | 0.889                | 0.851                | 0.852                 | 0.901                 | 0.887                 | 0.934              | 0.935               |
| OH    | 2.000                | 2.000               | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                | 2.000                | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000              | 2.000               |
| Sum   | 9.787                | 9.834               | 9.812                 | 9.789                 | 9.802                | 9.782                | 9.788                 | 9.827                 | 9.845                 | 9.843              | 9.814               |
| XFe   | 0.534                | 0.549               | 0.624                 | 0.651                 | 0.627                | 0.626                | 0.647                 | 0.640                 | 0.635                 | 0.639              | 0.607               |

|       | EC6<br>exsfil<br>65 | EC6<br>exbord<br>71 | EC6<br>mallS2<br>73 | EC6<br>mallS2<br>74 | EC6<br>mpost<br>80 | EC6<br>mpost<br>81 | EC6<br>mpost<br>82 | EC6<br>mpost<br>83 | FC62<br>mpost<br>276 | FC62<br>mpost<br>279 | FC62<br>mallS2<br>288 | FC62<br>mallS2<br>307 | FC62<br>exbord<br>313 |
|-------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| SiO2  | 35.39               | 35.49               | 33.95               | 33.86               | 34.49              | 33.92              | 33.75              | 34.75              | 34.49                | 35.19                | 36.24                 | 35.51                 | 35.53                 |
| TiO2  | 1.67                | 1.66                | 1.51                | 1.55                | 1.72               | 1.92               | 1.65               | 1.59               | 1.56                 | 1.48                 | 1.39                  | 1.50                  | 1.47                  |
| Al2O3 | 19.52               | 18.72               | 18.86               | 18.80               | 18.15              | 18.38              | 18.25              | 18.69              | 18.59                | 19.05                | 19.61                 | 19.82                 | 18.86                 |
| Cr2O3 | 0.05                | 0.00                | 0.00                | 0.01                | 0.00               | 0.02               | 0.00               | 0.00               | 0.00                 | 0.04                 | 0.05                  | 0.00                  | 0.10                  |
| MgO   | 7.72                | 7.78                | 7.61                | 7.75                | 7.72               | 7.42               | 7.46               | 7.29               | 9.06                 | 7.76                 | 7.95                  | 8.22                  | 8.68                  |
| FeO   | 22.01               | 23.61               | 23.30               | 23.53               | 21.89              | 22.20              | 22.34              | 22.46              | 23.19                | 22.54                | 19.46                 | 19.97                 | 20.75                 |
| MnO   | 0.16                | 0.32                | 0.15                | 0.26                | 0.12               | 0.11               | 0.09               | 0.14               | 0.05                 | 0.35                 | 0.28                  | 0.12                  | 0.25                  |
| CaO   | 0.03                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00               | 0.00               | 0.04               | 0.05               | 0.03                 | 0.01                 | 0.08                  | 0.11                  | 0.06                  |
| Na2O  | 0.03                | 0.06                | 0.14                | 0.09                | 0.04               | 0.00               | 0.06               | 0.12               | 0.07                 | 0.03                 | 0.04                  | 0.01                  | 0.09                  |
| K2O   | 9.23                | 8.94                | 9.18                | 8.82                | 9.24               | 9.21               | 9.11               | 9.01               | 8.48                 | 7.25                 | 7.44                  | 7.22                  | 8.39                  |
| H2O   | 3.92                | 3.92                | 3.83                | 3.82                | 3.80               | 3.78               | 3.76               | 3.83               | 3.88                 | 3.86                 | 3.88                  | 3.87                  | 3.89                  |
| Sum   | 99.71               | 100.50              | 98.53               | 98.49               | 97.16              | 96.95              | 96.51              | 97.93              | 99.41                | 97.55                | 96.42                 | 96.34                 | 98.05                 |
| Si    | 2.706               | 2.712               | 2.659               | 2.652               | 2.720              | 2.688              | 2.690              | 2.718              | 2.660                | 2.731                | 2.797                 | 2.749                 | 2.738                 |
| Ti    | 0.096               | 0.096               | 0.089               | 0.091               | 0.102              | 0.115              | 0.099              | 0.094              | 0.091                | 0.086                | 0.081                 | 0.088                 | 0.085                 |
| Al    | 1.759               | 1.686               | 1.741               | 1.735               | 1.687              | 1.716              | 1.714              | 1.723              | 1.689                | 1.743                | 1.784                 | 1.808                 | 1.713                 |
| Cr    | 0.003               | 0.000               | 0.000               | 0.001               | 0.000              | 0.001              | 0.000              | 0.000              | 0.000                | 0.003                | 0.003                 | 0.000                 | 0.006                 |
| Mg    | 0.880               | 0.886               | 0.889               | 0.905               | 0.907              | 0.876              | 0.886              | 0.850              | 1.041                | 0.899                | 0.914                 | 0.948                 | 0.997                 |
| Fe2   | 1.408               | 1.509               | 1.526               | 1.541               | 1.443              | 1.471              | 1.489              | 1.470              | 1.496                | 1.464                | 1.256                 | 1.292                 | 1.338                 |
| Mn    | 0.010               | 0.021               | 0.010               | 0.017               | 0.008              | 0.007              | 0.006              | 0.009              | 0.004                | 0.023                | 0.019                 | 0.008                 | 0.017                 |
| Ca    | 0.003               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.000              | 0.000              | 0.003              | 0.004              | 0.003                | 0.001                | 0.007                 | 0.009                 | 0.005                 |
| Na    | 0.004               | 0.009               | 0.021               | 0.014               | 0.007              | 0.000              | 0.010              | 0.019              | 0.010                | 0.004                | 0.006                 | 0.002                 | 0.013                 |
| K     | 0.901               | 0.871               | 0.917               | 0.882               | 0.929              | 0.931              | 0.926              | 0.899              | 0.834                | 0.718                | 0.733                 | 0.713                 | 0.825                 |
| OH    | 2.000               | 2.000               | 2.000               | 2.000               | 2.000              | 2.000              | 2.000              | 2.000              | 2.000                | 2.000                | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 |
| Sum   | 9.769               | 9.789               | 9.851               | 9.837               | 9.803              | 9.805              | 9.822              | 9.785              | 9.827                | 9.671                | 9.599                 | 9.617                 | 9.736                 |
| XFe   | 0.615               | 0.630               | 0.632               | 0.630               | 0.614              | 0.627              | 0.627              | 0.634              | 0.590                | 0.620                | 0.579                 | 0.577                 | 0.573                 |

|       | FC62<br>exbord<br>314 | FC62<br>msynS2<br>317 | FC62<br>msynS2<br>318 | FC62<br>msynS2<br>319 | FC69<br>mpost<br>317 | FC69<br>mpost<br>318 | FC69<br>exbord<br>319 | FC69<br>mallS2<br>324 | FC69<br>mallS2<br>326 | FC69<br>mallS2<br>329 | FC69<br>mallS2<br>330 | FC69<br>mallS2<br>331 |
|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| SiO2  | 35.52                 | 34.64                 | 35.21                 | 34.99                 | 34.65                | 34.83                | 35.05                 | 35.37                 | 34.76                 | 35.35                 | 35.08                 | 35.82                 |
| TiO2  | 1.39                  | 1.74                  | 1.48                  | 1.85                  | 1.56                 | 1.51                 | 1.29                  | 1.48                  | 1.50                  | 1.47                  | 1.60                  | 1.46                  |
| Al2O3 | 19.21                 | 18.81                 | 18.95                 | 19.23                 | 18.42                | 18.52                | 18.00                 | 17.91                 | 18.20                 | 18.25                 | 18.36                 | 18.34                 |
| Cr2O3 | 0.00                  | 0.04                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                 | 0.02                 | 0.07                  | 0.05                  | 0.00                  | 0.05                  | 0.00                  | 0.00                  |
| MgO   | 7.90                  | 7.43                  | 7.74                  | 7.53                  | 8.79                 | 8.87                 | 9.06                  | 8.82                  | 8.85                  | 9.02                  | 8.67                  | 9.20                  |
| FeO   | 18.96                 | 20.24                 | 21.13                 | 20.00                 | 20.89                | 20.05                | 20.34                 | 21.17                 | 20.46                 | 20.05                 | 19.93                 | 21.35                 |
| MnO   | 0.33                  | 0.21                  | 0.00                  | 0.20                  | 0.14                 | 0.36                 | 0.12                  | 0.29                  | 0.15                  | 0.19                  | 0.15                  | 0.19                  |
| CaO   | 0.12                  | 0.06                  | 0.00                  | 0.11                  | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  |
| Na2O  | 0.00                  | 0.06                  | 0.04                  | 0.05                  | 0.04                 | 0.09                 | 0.13                  | 0.04                  | 0.10                  | 0.05                  | 0.15                  | 0.13                  |
| K2O   | 7.70                  | 8.31                  | 8.56                  | 7.75                  | 9.26                 | 9.00                 | 9.04                  | 8.87                  | 9.07                  | 9.29                  | 8.34                  | 9.02                  |
| H2O   | 3.81                  | 3.78                  | 3.84                  | 3.81                  | 3.84                 | 3.83                 | 3.83                  | 3.85                  | 3.82                  | 3.86                  | 3.82                  | 3.92                  |
| Sum   | 94.92                 | 95.33                 | 96.96                 | 95.54                 | 97.59                | 97.07                | 96.93                 | 97.87                 | 96.90                 | 97.57                 | 96.11                 | 99.42                 |
| Si    | 2.790                 | 2.745                 | 2.749                 | 2.749                 | 2.706                | 2.721                | 2.745                 | 2.750                 | 2.726                 | 2.747                 | 2.752                 | 2.739                 |
| Ti    | 0.082                 | 0.104                 | 0.087                 | 0.109                 | 0.092                | 0.089                | 0.076                 | 0.087                 | 0.088                 | 0.086                 | 0.094                 | 0.084                 |
| Al    | 1.778                 | 1.757                 | 1.744                 | 1.781                 | 1.696                | 1.706                | 1.662                 | 1.641                 | 1.682                 | 1.671                 | 1.698                 | 1.653                 |
| Cr    | 0.000                 | 0.002                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                | 0.001                | 0.005                 | 0.003                 | 0.000                 | 0.003                 | 0.000                 | 0.000                 |
| Mg    | 0.925                 | 0.878                 | 0.902                 | 0.882                 | 1.024                | 1.033                | 1.057                 | 1.022                 | 1.035                 | 1.044                 | 1.014                 | 1.049                 |
| Fe2   | 1.246                 | 1.341                 | 1.380                 | 1.314                 | 1.364                | 1.310                | 1.332                 | 1.377                 | 1.342                 | 1.303                 | 1.308                 | 1.365                 |
| Mn    | 0.022                 | 0.014                 | 0.000                 | 0.013                 | 0.009                | 0.024                | 0.008                 | 0.019                 | 0.010                 | 0.012                 | 0.010                 | 0.012                 |
| Ca    | 0.010                 | 0.005                 | 0.000                 | 0.009                 | 0.000                | 0.000                | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 |
| Na    | 0.000                 | 0.010                 | 0.006                 | 0.008                 | 0.007                | 0.013                | 0.020                 | 0.007                 | 0.015                 | 0.008                 | 0.023                 | 0.019                 |
| K     | 0.771                 | 0.841                 | 0.853                 | 0.777                 | 0.923                | 0.897                | 0.903                 | 0.879                 | 0.908                 | 0.920                 | 0.834                 | 0.879                 |
| OH    | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                | 2.000                | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 |
| Sum   | 9.624                 | 9.697                 | 9.721                 | 9.644                 | 9.820                | 9.792                | 9.808                 | 9.785                 | 9.806                 | 9.795                 | 9.733                 | 9.800                 |
| XFe   | 0.574                 | 0.604                 | 0.605                 | 0.598                 | 0.571                | 0.559                | 0.558                 | 0.574                 | 0.565                 | 0.555                 | 0.563                 | 0.566                 |

|       | FC69<br>mpost<br>332 | FC69<br>mpost<br>333 | FC69<br>exbord<br>335 | FC69<br>mallS2<br>336 | FC69<br>exbord<br>345 | FC69<br>exbord<br>346 | FC69<br>mallS2<br>347 | FC69<br>mpost<br>351 | FC69<br>mpost<br>352 | FC69<br>mpost<br>353 | FC69<br>mallS2<br>358 | FC69<br>mpost<br>361 | FC69<br>mpost<br>362 |
|-------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| SiO2  | 34.71                | 34.95                | 34.74                 | 35.28                 | 34.54                 | 34.43                 | 35.06                 | 34.52                | 34.15                | 34.27                | 34.95                 | 34.70                | 35.08                |
| TiO2  | 1.41                 | 1.47                 | 1.32                  | 1.46                  | 1.57                  | 1.42                  | 1.71                  | 1.41                 | 1.49                 | 1.76                 | 1.43                  | 1.64                 | 1.45                 |
| Al2O3 | 18.33                | 18.45                | 18.29                 | 18.07                 | 18.09                 | 18.43                 | 18.40                 | 18.30                | 18.02                | 18.30                | 18.23                 | 18.65                | 18.77                |
| Cr2O3 | 0.00                 | 0.02                 | 0.11                  | 0.02                  | 0.08                  | 0.08                  | 0.00                  | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.07                  | 0.00                 | 0.00                 |
| MgO   | 9.15                 | 8.87                 | 8.77                  | 8.92                  | 9.28                  | 8.86                  | 9.03                  | 9.27                 | 9.06                 | 8.92                 | 9.13                  | 8.38                 | 8.75                 |
| FeO   | 19.74                | 21.44                | 20.51                 | 20.24                 | 20.04                 | 19.62                 | 20.20                 | 20.34                | 20.15                | 19.60                | 20.02                 | 20.09                | 20.47                |
| MnO   | 0.15                 | 0.29                 | 0.18                  | 0.26                  | 0.20                  | 0.00                  | 0.12                  | 0.23                 | 0.25                 | 0.18                 | 0.30                  | 0.22                 | 0.32                 |
| CaO   | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                 | 0.00                 |
| Na2O  | 0.13                 | 0.03                 | 0.12                  | 0.10                  | 0.10                  | 0.08                  | 0.05                  | 0.05                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.11                  | 0.04                 | 0.07                 |
| K2O   | 8.86                 | 9.11                 | 9.01                  | 9.00                  | 9.15                  | 9.04                  | 8.68                  | 8.85                 | 8.98                 | 8.96                 | 9.34                  | 9.20                 | 8.98                 |
| H2O   | 3.81                 | 3.87                 | 3.82                  | 3.84                  | 3.82                  | 3.79                  | 3.85                  | 3.82                 | 3.78                 | 3.79                 | 3.84                  | 3.82                 | 3.86                 |
| Sum   | 96.31                | 98.49                | 96.87                 | 97.18                 | 96.87                 | 95.77                 | 97.09                 | 96.78                | 95.89                | 95.79                | 97.41                 | 96.73                | 97.75                |
|       |                      |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                      |                      |                      |                       |                      |                      |
| Si    | 2.727                | 2.708                | 2.726                 | 2.752                 | 2.710                 | 2.722                 | 2.730                 | 2.708                | 2.708                | 2.710                | 2.726                 | 2.722                | 2.722                |
| Ti    | 0.083                | 0.086                | 0.078                 | 0.085                 | 0.093                 | 0.084                 | 0.100                 | 0.083                | 0.089                | 0.105                | 0.084                 | 0.097                | 0.085                |
| Al    | 1.698                | 1.684                | 1.692                 | 1.661                 | 1.673                 | 1.717                 | 1.688                 | 1.692                | 1.684                | 1.706                | 1.676                 | 1.724                | 1.717                |
| Cr    | 0.000                | 0.001                | 0.007                 | 0.001                 | 0.005                 | 0.005                 | 0.000                 | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.004                 | 0.000                | 0.000                |
| Mg    | 1.072                | 1.024                | 1.025                 | 1.037                 | 1.085                 | 1.045                 | 1.048                 | 1.084                | 1.071                | 1.051                | 1.061                 | 0.980                | 1.012                |
| Fe2   | 1.297                | 1.389                | 1.346                 | 1.321                 | 1.315                 | 1.297                 | 1.315                 | 1.334                | 1.336                | 1.296                | 1.306                 | 1.318                | 1.328                |
| Mn    | 0.010                | 0.019                | 0.012                 | 0.017                 | 0.013                 | 0.000                 | 0.008                 | 0.015                | 0.017                | 0.012                | 0.020                 | 0.014                | 0.021                |
| Ca    | 0.000                | 0.000                | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                 | 0.000                | 0.000                |
| Na    | 0.020                | 0.004                | 0.018                 | 0.016                 | 0.015                 | 0.013                 | 0.008                 | 0.007                | 0.001                | 0.000                | 0.017                 | 0.005                | 0.010                |
| K     | 0.888                | 0.901                | 0.902                 | 0.896                 | 0.916                 | 0.912                 | 0.863                 | 0.885                | 0.908                | 0.904                | 0.929                 | 0.921                | 0.889                |
| OH    | 2.000                | 2.000                | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                 | 2.000                | 2.000                |
| Sum   | 9.795                | 9.816                | 9.806                 | 9.787                 | 9.824                 | 9.795                 | 9.761                 | 9.809                | 9.815                | 9.784                | 9.823                 | 9.782                | 9.784                |
|       |                      |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                      |                      |                      |                       |                      |                      |
| XFe   | 0.547                | 0.576                | 0.568                 | 0.560                 | 0.548                 | 0.554                 | 0.557                 | 0.552                | 0.555                | 0.552                | 0.552                 | 0.574                | 0.568                |

|       | FC69<br>mpost<br>363 | FC69<br>mallS2<br>364 | FC69<br>mpost<br>365 | FC69<br>mpost<br>369 | FC69<br>mpost<br>370 | FC69<br>mpost<br>371 | FC69<br>mpost<br>372 | FC69<br>mpost<br>374 | FC69<br>mpost<br>375 | FC69<br>mpost<br>376 | FC69<br>msynS2<br>378 | FC69<br>msynS2<br>381 | FC69<br>mpost<br>392 |
|-------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| SiO2  | 35.03                | 34.69                 | 34.30                | 34.56                | 33.94                | 34.71                | 36.10                | 35.34                | 35.21                | 34.24                | 35.03                 | 34.95                 | 35.21                |
| TiO2  | 1.60                 | 1.63                  | 1.36                 | 1.67                 | 1.48                 | 1.62                 | 1.53                 | 1.88                 | 1.21                 | 1.23                 | 1.47                  | 1.74                  | 1.55                 |
| Al2O3 | 18.41                | 18.07                 | 17.98                | 17.63                | 18.20                | 18.32                | 18.03                | 18.42                | 18.57                | 18.45                | 18.23                 | 18.23                 | 18.32                |
| Cr2O3 | 0.05                 | 0.00                  | 0.04                 | 0.05                 | 0.00                 | 0.02                 | 0.09                 | 0.01                 | 0.11                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.02                  | 0.00                 |
| MgO   | 8.61                 | 8.73                  | 8.58                 | 8.86                 | 8.95                 | 8.47                 | 8.73                 | 8.09                 | 9.07                 | 9.02                 | 8.71                  | 8.51                  | 8.69                 |
| FeO   | 21.25                | 20.59                 | 19.97                | 20.20                | 20.63                | 20.27                | 20.40                | 20.65                | 19.89                | 21.03                | 20.30                 | 20.38                 | 20.20                |
| MnO   | 0.20                 | 0.18                  | 0.31                 | 0.29                 | 0.36                 | 0.27                 | 0.19                 | 0.22                 | 0.21                 | 0.42                 | 0.38                  | 0.24                  | 0.18                 |
| CaO   | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.05                 | 0.02                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                 |
| Na2O  | 0.08                 | 0.05                  | 0.06                 | 0.20                 | 0.17                 | 0.06                 | 0.11                 | 0.00                 | 0.08                 | 0.02                 | 0.10                  | 0.11                  | 0.03                 |
| K2O   | 9.05                 | 9.22                  | 9.26                 | 8.72                 | 8.78                 | 8.84                 | 8.85                 | 8.95                 | 9.09                 | 9.25                 | 8.92                  | 9.20                  | 9.04                 |
| H2O   | 3.86                 | 3.81                  | 3.76                 | 3.78                 | 3.78                 | 3.81                 | 3.88                 | 3.85                 | 3.85                 | 3.82                 | 3.83                  | 3.83                  | 3.84                 |
| Sum   | 98.12                | 96.96                 | 95.64                | 95.97                | 96.29                | 96.43                | 97.93                | 97.40                | 97.29                | 97.47                | 96.95                 | 97.20                 | 97.05                |
|       |                      |                       |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                       |                       |                      |
| Si    | 2.720                | 2.724                 | 2.730                | 2.735                | 2.687                | 2.731                | 2.787                | 2.751                | 2.739                | 2.685                | 2.741                 | 2.733                 | 2.748                |
| Ti    | 0.093                | 0.096                 | 0.082                | 0.100                | 0.088                | 0.096                | 0.089                | 0.110                | 0.071                | 0.072                | 0.086                 | 0.102                 | 0.091                |
| Al    | 1.684                | 1.672                 | 1.687                | 1.645                | 1.698                | 1.698                | 1.640                | 1.690                | 1.702                | 1.706                | 1.681                 | 1.680                 | 1.685                |
| Cr    | 0.003                | 0.000                 | 0.002                | 0.003                | 0.000                | 0.001                | 0.005                | 0.001                | 0.007                | 0.000                | 0.000                 | 0.001                 | 0.000                |
| Mg    | 0.996                | 1.022                 | 1.018                | 1.045                | 1.057                | 0.993                | 1.005                | 0.939                | 1.052                | 1.054                | 1.016                 | 0.992                 | 1.011                |
| Fe2   | 1.380                | 1.352                 | 1.329                | 1.337                | 1.366                | 1.333                | 1.317                | 1.344                | 1.294                | 1.380                | 1.329                 | 1.333                 | 1.319                |
| Mn    | 0.013                | 0.012                 | 0.021                | 0.019                | 0.024                | 0.018                | 0.013                | 0.014                | 0.014                | 0.028                | 0.025                 | 0.016                 | 0.012                |
| Ca    | 0.000                | 0.000                 | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.004                | 0.002                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                |
| Na    | 0.012                | 0.007                 | 0.009                | 0.031                | 0.026                | 0.010                | 0.016                | 0.000                | 0.012                | 0.004                | 0.015                 | 0.017                 | 0.005                |
| K     | 0.896                | 0.924                 | 0.940                | 0.881                | 0.887                | 0.888                | 0.872                | 0.889                | 0.902                | 0.925                | 0.890                 | 0.918                 | 0.901                |
| OH    | 2.000                | 2.000                 | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                |
| Sum   | 9.797                | 9.809                 | 9.819                | 9.797                | 9.832                | 9.772                | 9.745                | 9.738                | 9.792                | 9.854                | 9.785                 | 9.792                 | 9.771                |
|       |                      |                       |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                       |                       |                      |
| XFe   | 0.581                | 0.570                 | 0.566                | 0.561                | 0.564                | 0.573                | 0.567                | 0.589                | 0.552                | 0.567                | 0.567                 | 0.573                 | 0.566                |

|       | FC69<br>msynS2<br>396 | FC69<br>msynS2<br>397 | FC85<br>mpost<br>150 | FC85<br>mpost<br>154 | FC85<br>mpost<br>159 | FC85<br>mpost<br>160 | FC85<br>msynS2<br>165 | FC85<br>msynS1<br>197 | FC85<br>mpost<br>202 | FC85<br>mpost<br>208 | FC85<br>mallS2<br>210 | FC85<br>mpost<br>215 | FC85<br>mpost<br>216 |
|-------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| SiO2  | 35.26                 | 35.19                 | 35.09                | 34.24                | 35.25                | 35.23                | 35.64                 | 35.29                 | 34.86                | 35.36                | 34.79                 | 35.13                | 35.89                |
| TiO2  | 1.54                  | 1.39                  | 1.54                 | 1.88                 | 1.64                 | 1.58                 | 1.63                  | 1.89                  | 1.74                 | 1.62                 | 1.49                  | 1.72                 | 1.78                 |
| Al2O3 | 17.92                 | 18.24                 | 19.00                | 18.95                | 18.97                | 19.52                | 19.93                 | 18.11                 | 18.63                | 18.55                | 19.81                 | 18.93                | 18.63                |
| Cr2O3 | 0.05                  | 0.04                  | 0.00                 | 0.01                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.11                  | 0.00                  | 0.07                 | 0.02                 | 0.13                  | 0.00                 | 0.00                 |
| MgO   | 8.70                  | 8.94                  | 7.74                 | 7.50                 | 7.77                 | 7.85                 | 7.79                  | 7.89                  | 7.91                 | 7.72                 | 7.39                  | 7.63                 | 7.68                 |
| FeO   | 20.43                 | 20.21                 | 20.23                | 21.92                | 19.68                | 20.00                | 19.34                 | 22.23                 | 22.43                | 21.81                | 19.72                 | 20.55                | 20.47                |
| MnO   | 0.09                  | 0.43                  | 0.22                 | 0.31                 | 0.16                 | 0.13                 | 0.15                  | 0.00                  | 0.31                 | 0.18                 | 0.19                  | 0.16                 | 0.10                 |
| CaO   | 0.00                  | 0.00                  | 0.09                 | 0.00                 | 0.04                 | 0.06                 | 0.09                  | 0.00                  | 0.06                 | 0.00                 | 0.12                  | 0.04                 | 0.03                 |
| Na2O  | 0.03                  | 0.14                  | 0.04                 | 0.03                 | 0.02                 | 0.05                 | 0.00                  | 0.05                  | 0.10                 | 0.02                 | 0.00                  | 0.02                 | 0.00                 |
| K2O   | 9.04                  | 8.90                  | 7.00                 | 7.56                 | 7.55                 | 7.32                 | 6.56                  | 9.31                  | 7.25                 | 8.05                 | 6.79                  | 7.36                 | 7.50                 |
| H2O   | 3.83                  | 3.84                  | 3.79                 | 3.80                 | 3.80                 | 3.83                 | 3.85                  | 3.86                  | 3.84                 | 3.84                 | 3.79                  | 3.81                 | 3.84                 |
| Sum   | 96.89                 | 97.33                 | 94.75                | 96.19                | 94.90                | 95.57                | 95.09                 | 98.64                 | 97.18                | 97.16                | 94.21                 | 95.34                | 95.91                |
| Si    | 2.760                 | 2.742                 | 2.770                | 2.701                | 2.778                | 2.755                | 2.775                 | 2.738                 | 2.721                | 2.758                | 2.750                 | 2.765                | 2.803                |
| Ti    | 0.091                 | 0.082                 | 0.091                | 0.112                | 0.097                | 0.093                | 0.095                 | 0.110                 | 0.102                | 0.095                | 0.088                 | 0.102                | 0.104                |
| Al    | 1.654                 | 1.675                 | 1.768                | 1.762                | 1.762                | 1.799                | 1.829                 | 1.656                 | 1.714                | 1.705                | 1.846                 | 1.756                | 1.715                |
| Cr    | 0.003                 | 0.002                 | 0.000                | 0.001                | 0.001                | 0.000                | 0.007                 | 0.000                 | 0.004                | 0.001                | 0.008                 | 0.000                | 0.000                |
| Mg    | 1.015                 | 1.039                 | 0.911                | 0.881                | 0.913                | 0.915                | 0.904                 | 0.912                 | 0.921                | 0.898                | 0.871                 | 0.895                | 0.894                |
| Fe2   | 1.337                 | 1.317                 | 1.335                | 1.446                | 1.297                | 1.308                | 1.259                 | 1.442                 | 1.464                | 1.423                | 1.304                 | 1.353                | 1.337                |
| Mn    | 0.006                 | 0.029                 | 0.015                | 0.021                | 0.011                | 0.008                | 0.010                 | 0.000                 | 0.020                | 0.012                | 0.013                 | 0.011                | 0.006                |
| Ca    | 0.000                 | 0.000                 | 0.008                | 0.000                | 0.004                | 0.005                | 0.008                 | 0.000                 | 0.005                | 0.000                | 0.010                 | 0.003                | 0.003                |
| Na    | 0.005                 | 0.020                 | 0.006                | 0.005                | 0.004                | 0.008                | 0.000                 | 0.007                 | 0.015                | 0.003                | 0.000                 | 0.004                | 0.000                |
| K     | 0.903                 | 0.884                 | 0.705                | 0.760                | 0.759                | 0.730                | 0.652                 | 0.922                 | 0.722                | 0.801                | 0.685                 | 0.739                | 0.747                |
| OH    | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                | 2.000                | 2.000                 | 2.000                | 2.000                |
| Sum   | 9.774                 | 9.790                 | 9.610                | 9.689                | 9.625                | 9.621                | 9.538                 | 9.788                 | 9.687                | 9.696                | 9.576                 | 9.627                | 9.609                |
| XFe   | 0.569                 | 0.559                 | 0.595                | 0.621                | 0.587                | 0.588                | 0.582                 | 0.613                 | 0.614                | 0.613                | 0.600                 | 0.602                | 0.599                |

|       | FC85<br>exsfil<br>245 | FC85<br>exsfil<br>247 | FC85<br>exsfil<br>248 | FC85<br>exsfil<br>257 | FC88<br>mpost<br>451 | FC88<br>mpost<br>452 | EC92<br>mallS2<br>176 | FC92<br>mpost<br>177 | FC92<br>mpost<br>180 | FC92<br>exbord<br>185 | FC92<br>exsbad<br>188 | FC92<br>exbord<br>192 |
|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| SiO2  | 34.99                 | 34.73                 | 35.52                 | 34.65                 | 34.59                | 33.33                | 35.06                 | 34.23                | 34.15                | 34.69                 | 34.73                 | 35.69                 |
| TiO2  | 1.71                  | 1.68                  | 2.14                  | 1.64                  | 1.60                 | 1.70                 | 1.25                  | 1.18                 | 1.40                 | 1.10                  | 1.31                  | 1.32                  |
| Al2O3 | 17.84                 | 18.98                 | 18.63                 | 18.25                 | 18.61                | 18.87                | 17.93                 | 18.13                | 18.56                | 18.70                 | 18.25                 | 18.47                 |
| Cr2O3 | 0.00                  | 0.11                  | 0.07                  | 0.05                  | 0.00                 | 0.00                 | 0.06                  | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.04                  | 0.02                  |
| MgO   | 8.05                  | 7.43                  | 7.32                  | 8.32                  | 7.62                 | 7.10                 | 7.74                  | 7.54                 | 7.29                 | 8.01                  | 7.43                  | 7.59                  |
| FeO   | 21.62                 | 20.44                 | 22.40                 | 20.77                 | 19.53                | 21.77                | 22.08                 | 23.37                | 24.32                | 22.46                 | 22.42                 | 22.52                 |
| MnO   | 0.17                  | 0.24                  | 0.11                  | 0.31                  | 0.00                 | 0.15                 | 0.38                  | 0.32                 | 0.26                 | 0.34                  | 0.35                  | 0.31                  |
| CaO   | 0.00                  | 0.05                  | 0.00                  | 0.08                  | 0.05                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  |
| Na2O  | 0.05                  | 0.05                  | 0.07                  | 0.08                  | 0.09                 | 0.09                 | 0.08                  | 0.03                 | 0.00                 | 0.07                  | 0.02                  | 0.16                  |
| K2O   | 9.19                  | 7.88                  | 8.66                  | 7.67                  | 8.25                 | 7.54                 | 9.18                  | 8.24                 | 7.75                 | 8.60                  | 8.71                  | 9.02                  |
| H2O   | 3.82                  | 3.79                  | 3.88                  | 3.79                  | 3.75                 | 3.71                 | 3.81                  | 3.78                 | 3.80                 | 3.83                  | 3.80                  | 3.88                  |
| Sum   | 97.43                 | 95.38                 | 98.80                 | 95.62                 | 94.09                | 94.26                | 97.58                 | 96.82                | 97.54                | 97.80                 | 97.06                 | 98.98                 |
| Si    | 2.745                 | 2.745                 | 2.740                 | 2.738                 | 2.765                | 2.688                | 2.754                 | 2.716                | 2.691                | 2.713                 | 2.740                 | 2.758                 |
| Ti    | 0.101                 | 0.100                 | 0.124                 | 0.098                 | 0.096                | 0.103                | 0.074                 | 0.070                | 0.083                | 0.064                 | 0.078                 | 0.076                 |
| Al    | 1.650                 | 1.768                 | 1.694                 | 1.700                 | 1.754                | 1.794                | 1.660                 | 1.695                | 1.724                | 1.724                 | 1.697                 | 1.682                 |
| Cr    | 0.000                 | 0.007                 | 0.004                 | 0.003                 | 0.000                | 0.000                | 0.004                 | 0.000                | 0.000                | 0.000                 | 0.003                 | 0.001                 |
| Mg    | 0.941                 | 0.875                 | 0.841                 | 0.981                 | 0.908                | 0.853                | 0.906                 | 0.892                | 0.856                | 0.934                 | 0.874                 | 0.874                 |
| Fe2   | 1.418                 | 1.351                 | 1.445                 | 1.373                 | 1.306                | 1.468                | 1.450                 | 1.551                | 1.603                | 1.469                 | 1.479                 | 1.455                 |
| Mn    | 0.011                 | 0.016                 | 0.007                 | 0.021                 | 0.000                | 0.010                | 0.025                 | 0.022                | 0.017                | 0.023                 | 0.023                 | 0.021                 |
| Ca    | 0.000                 | 0.005                 | 0.000                 | 0.007                 | 0.005                | 0.000                | 0.000                 | 0.000                | 0.000                | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 |
| Na    | 0.007                 | 0.007                 | 0.011                 | 0.011                 | 0.014                | 0.015                | 0.012                 | 0.005                | 0.000                | 0.010                 | 0.003                 | 0.023                 |
| K     | 0.920                 | 0.794                 | 0.852                 | 0.774                 | 0.841                | 0.775                | 0.920                 | 0.835                | 0.779                | 0.857                 | 0.877                 | 0.890                 |
| OH    | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                | 2.000                | 2.000                 | 2.000                | 2.000                | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 |
| Sum   | 9.793                 | 9.668                 | 9.718                 | 9.705                 | 9.689                | 9.707                | 9.806                 | 9.785                | 9.753                | 9.794                 | 9.773                 | 9.780                 |
| XFe   | 0.601                 | 0.607                 | 0.632                 | 0.583                 | 0.590                | 0.632                | 0.615                 | 0.635                | 0.652                | 0.611                 | 0.629                 | 0.625                 |

|       | FC92<br>mpost<br>196 | FC92<br>msynS2<br>197 | FC92<br>msynS2<br>203 | FC92<br>mallS2<br>206 | FC92<br>exbord<br>213 | FC92<br>mallS2<br>214 | FC92<br>mallS2<br>221 | FC92<br>mallS2<br>222 | FC92<br>mpost<br>225 | FC92<br>mpost<br>226 | FC92<br>exbord<br>228 | FC92<br>mpost<br>234 | FC92<br>mallS2<br>235 |
|-------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| SiO2  | 35.59                | 35.25                 | 35.74                 | 35.04                 | 35.17                 | 33.54                 | 33.83                 | 33.67                 | 34.76                | 34.85                | 34.37                 | 34.35                | 34.43                 |
| TiO2  | 1.29                 | 2.27                  | 1.63                  | 1.22                  | 1.63                  | 1.56                  | 1.62                  | 1.56                  | 1.45                 | 1.97                 | 1.23                  | 1.17                 | 1.34                  |
| Al2O3 | 18.24                | 19.19                 | 18.06                 | 18.16                 | 18.07                 | 18.08                 | 17.84                 | 18.13                 | 17.69                | 18.10                | 18.90                 | 17.70                | 17.72                 |
| Cr2O3 | 0.06                 | 0.00                  | 0.04                  | 0.01                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.05                  | 0.00                  | 0.12                 | 0.01                 | 0.00                  | 0.07                 | 0.00                  |
| MgO   | 7.61                 | 6.83                  | 7.83                  | 7.54                  | 7.45                  | 7.51                  | 7.24                  | 7.37                  | 7.52                 | 7.51                 | 7.64                  | 7.45                 | 7.43                  |
| FeO   | 22.40                | 22.23                 | 21.72                 | 22.47                 | 22.79                 | 22.83                 | 22.36                 | 22.72                 | 22.98                | 22.74                | 21.67                 | 21.76                | 22.03                 |
| MnO   | 0.36                 | 0.16                  | 0.33                  | 0.28                  | 0.12                  | 0.38                  | 0.22                  | 0.28                  | 0.45                 | 0.14                 | 0.19                  | 0.37                 | 0.21                  |
| CaO   | 0.10                 | 0.03                  | 0.00                  | 0.02                  | 0.01                  | 0.00                  | 0.04                  | 0.06                  | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.03                 | 0.00                  |
| Na2O  | 0.04                 | 0.04                  | 0.07                  | 0.12                  | 0.09                  | 0.06                  | 0.05                  | 0.08                  | 0.11                 | 0.05                 | 0.10                  | 0.09                 | 0.04                  |
| K2O   | 9.07                 | 7.62                  | 8.91                  | 8.81                  | 9.32                  | 7.93                  | 8.99                  | 9.22                  | 8.58                 | 8.78                 | 8.81                  | 8.48                 | 8.55                  |
| H2O   | 3.86                 | 3.86                  | 3.86                  | 3.81                  | 3.84                  | 3.73                  | 3.74                  | 3.76                  | 3.80                 | 3.83                 | 3.80                  | 3.73                 | 3.74                  |
| Sum   | 98.62                | 97.48                 | 98.19                 | 97.49                 | 98.49                 | 95.63                 | 95.96                 | 96.85                 | 97.47                | 97.98                | 96.72                 | 95.20                | 95.51                 |
| Si    | 2.762                | 2.737                 | 2.773                 | 2.752                 | 2.743                 | 2.691                 | 2.712                 | 2.684                 | 2.741                | 2.725                | 2.712                 | 2.758                | 2.757                 |
| Ti    | 0.075                | 0.132                 | 0.095                 | 0.072                 | 0.096                 | 0.094                 | 0.098                 | 0.094                 | 0.086                | 0.116                | 0.073                 | 0.071                | 0.081                 |
| Al    | 1.668                | 1.756                 | 1.652                 | 1.681                 | 1.661                 | 1.710                 | 1.686                 | 1.704                 | 1.644                | 1.669                | 1.758                 | 1.676                | 1.672                 |
| Cr    | 0.004                | 0.000                 | 0.002                 | 0.001                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.003                 | 0.000                 | 0.008                | 0.001                | 0.000                 | 0.004                | 0.000                 |
| Mg    | 0.881                | 0.790                 | 0.905                 | 0.883                 | 0.866                 | 0.898                 | 0.865                 | 0.876                 | 0.883                | 0.876                | 0.899                 | 0.891                | 0.887                 |
| Fe2   | 1.453                | 1.444                 | 1.410                 | 1.476                 | 1.486                 | 1.531                 | 1.499                 | 1.514                 | 1.515                | 1.487                | 1.430                 | 1.462                | 1.475                 |
| Mn    | 0.024                | 0.011                 | 0.022                 | 0.018                 | 0.008                 | 0.026                 | 0.015                 | 0.019                 | 0.030                | 0.009                | 0.013                 | 0.025                | 0.014                 |
| Ca    | 0.008                | 0.002                 | 0.000                 | 0.002                 | 0.001                 | 0.000                 | 0.003                 | 0.005                 | 0.000                | 0.000                | 0.000                 | 0.002                | 0.000                 |
| Na    | 0.006                | 0.006                 | 0.010                 | 0.018                 | 0.014                 | 0.009                 | 0.009                 | 0.013                 | 0.017                | 0.007                | 0.016                 | 0.014                | 0.007                 |
| K     | 0.898                | 0.755                 | 0.882                 | 0.883                 | 0.927                 | 0.811                 | 0.920                 | 0.938                 | 0.863                | 0.876                | 0.887                 | 0.869                | 0.874                 |
| OH    | 2.000                | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                | 2.000                | 2.000                 | 2.000                | 2.000                 |
| Sum   | 9.779                | 9.633                 | 9.751                 | 9.786                 | 9.802                 | 9.771                 | 9.810                 | 9.846                 | 9.787                | 9.766                | 9.788                 | 9.772                | 9.767                 |
| XFe   | 0.623                | 0.646                 | 0.609                 | 0.626                 | 0.632                 | 0.630                 | 0.634                 | 0.634                 | 0.632                | 0.629                | 0.614                 | 0.621                | 0.625                 |

|       | FC92<br>mallS2<br>236 | FC92<br>mallS2<br>237 | FC92<br>exsfil<br>241 | FC92<br>exsfil<br>244 | FC92<br>mpost<br>258 | FC92<br>mpost<br>266 | FC92<br>mallS2<br>278 | FC92<br>mallS2<br>279 |
|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| SiO2  | 36.17                 | 34.09                 | 34.01                 | 34.07                 | 34.76                | 34.20                | 34.06                 | 34.73                 |
| TiO2  | 1.14                  | 1.18                  | 1.07                  | 1.41                  | 1.50                 | 1.57                 | 1.66                  | 1.66                  |
| Al2O3 | 19.54                 | 18.08                 | 18.41                 | 17.74                 | 18.45                | 18.61                | 17.94                 | 18.09                 |
| Cr2O3 | 0.00                  | 0.00                  | 0.05                  | 0.06                  | 0.16                 | 0.04                 | 0.04                  | 0.00                  |
| MgO   | 6.96                  | 7.50                  | 7.66                  | 7.19                  | 7.54                 | 7.81                 | 7.99                  | 7.72                  |
| FeO   | 20.55                 | 22.32                 | 23.53                 | 23.72                 | 21.10                | 22.22                | 21.95                 | 21.65                 |
| MnO   | 0.13                  | 0.50                  | 0.21                  | 0.27                  | 0.35                 | 0.34                 | 0.36                  | 0.33                  |
| CaO   | 0.00                  | 0.01                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                  |
| Na2O  | 0.11                  | 0.08                  | 0.03                  | 0.05                  | 0.06                 | 0.04                 | 0.03                  | 0.07                  |
| K2O   | 8.23                  | 8.86                  | 8.13                  | 8.81                  | 9.01                 | 8.93                 | 8.23                  | 8.83                  |
| H2O   | 3.86                  | 3.76                  | 3.78                  | 3.76                  | 3.80                 | 3.81                 | 3.76                  | 3.80                  |
| Sum   | 96.69                 | 96.37                 | 96.89                 | 97.09                 | 96.73                | 97.58                | 96.02                 | 96.88                 |
| Si    | 2.809                 | 2.719                 | 2.697                 | 2.712                 | 2.739                | 2.688                | 2.711                 | 2.738                 |
| Ti    | 0.067                 | 0.071                 | 0.064                 | 0.085                 | 0.089                | 0.093                | 0.099                 | 0.099                 |
| Al    | 1.789                 | 1.700                 | 1.720                 | 1.665                 | 1.714                | 1.724                | 1.682                 | 1.681                 |
| Cr    | 0.000                 | 0.000                 | 0.003                 | 0.004                 | 0.010                | 0.002                | 0.003                 | 0.000                 |
| Mg    | 0.806                 | 0.891                 | 0.906                 | 0.853                 | 0.885                | 0.915                | 0.947                 | 0.908                 |
| Fe2   | 1.335                 | 1.489                 | 1.560                 | 1.580                 | 1.391                | 1.460                | 1.461                 | 1.427                 |
| Mn    | 0.009                 | 0.034                 | 0.014                 | 0.018                 | 0.023                | 0.023                | 0.024                 | 0.022                 |
| Ca    | 0.000                 | 0.001                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                | 0.000                | 0.000                 | 0.000                 |
| Na    | 0.016                 | 0.012                 | 0.005                 | 0.008                 | 0.009                | 0.007                | 0.005                 | 0.010                 |
| K     | 0.816                 | 0.901                 | 0.822                 | 0.895                 | 0.906                | 0.895                | 0.836                 | 0.888                 |
| OH    | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                | 2.000                | 2.000                 | 2.000                 |
| Sum   | 9.646                 | 9.817                 | 9.791                 | 9.820                 | 9.767                | 9.807                | 9.768                 | 9.772                 |
| XFe   | 0.624                 | 0.626                 | 0.633                 | 0.649                 | 0.611                | 0.615                | 0.607                 | 0.611                 |

## *Biotites chloritiques*

|       | FC62<br>mpost<br>277 | FC62<br>mpost<br>278 | FC62<br>mpost<br>301 | FC62<br>mpost<br>303 | FC62<br>exbord<br>312 | FC92<br>exbord<br>184 |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| SiO2  | 31.68                | 32.37                | 35.97                | 35.44                | 34.71                 | 30.64                 |
| TiO2  | 1.19                 | 1.23                 | 1.34                 | 1.35                 | 0.67                  | 1.27                  |
| Al2O3 | 19.03                | 18.53                | 19.57                | 19.59                | 23.14                 | 16.27                 |
| Cr2O3 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.11                 | 0.07                  | 0.00                  |
| MgO   | 10.05                | 8.40                 | 8.13                 | 8.36                 | 5.80                  | 6.51                  |
| FeO   | 23.90                | 25.63                | 19.94                | 19.45                | 21.48                 | 29.08                 |
| MnO   | 0.35                 | 0.11                 | 0.11                 | 0.16                 | 0.13                  | 0.38                  |
| CaO   | 0.04                 | 0.02                 | 0.21                 | 0.26                 | 0.21                  | 0.00                  |
| Na2O  | 0.00                 | 0.04                 | 0.10                 | 0.05                 | 0.10                  | 0.08                  |
| K2O   | 5.13                 | 6.14                 | 5.81                 | 5.71                 | 3.26                  | 6.90                  |
| H2O   | 3.74                 | 3.74                 | 3.85                 | 3.83                 | 3.83                  | 3.56                  |
| Sum   | 95.12                | 96.21                | 95.03                | 94.34                | 93.41                 | 94.69                 |
| Si    | 2.536                | 2.592                | 2.797                | 2.774                | 2.716                 | 2.577                 |
| Ti    | 0.072                | 0.074                | 0.079                | 0.080                | 0.039                 | 0.080                 |
| Al    | 1.796                | 1.749                | 1.794                | 1.808                | 2.135                 | 1.613                 |
| Cr    | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.007                | 0.005                 | 0.000                 |
| Mg    | 1.199                | 1.002                | 0.942                | 0.976                | 0.676                 | 0.816                 |
| Fe2   | 1.601                | 1.716                | 1.297                | 1.273                | 1.406                 | 2.046                 |
| Mn    | 0.023                | 0.008                | 0.007                | 0.011                | 0.009                 | 0.027                 |
| Ca    | 0.004                | 0.002                | 0.018                | 0.022                | 0.018                 | 0.000                 |
| Na    | 0.001                | 0.006                | 0.014                | 0.008                | 0.016                 | 0.013                 |
| K     | 0.524                | 0.628                | 0.576                | 0.570                | 0.326                 | 0.741                 |
| OH    | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                 | 2.000                 |
| Sum   | 9.756                | 9.776                | 9.523                | 9.528                | 9.345                 | 9.913                 |
| XFe   | 0.572                | 0.631                | 0.579                | 0.566                | 0.675                 | 0.715                 |

## Analyses des micas blancs

|       | EC21<br>mpost<br>101 | EC21<br>mpost<br>102 | EC21<br>msynS2<br>103 | EC21<br>msynS2<br>105 | EC21<br>msynS2<br>123 | EC21<br>msynS1<br>125 | EC21<br>msynS2<br>129 | EC21<br>mallS2<br>130 | EC21<br>mpost<br>131 | EC21<br>msynS2<br>133 | EC21<br>msynS2<br>134 | EC21<br>exsfil<br>156 | EC25<br>exbord<br>87 |
|-------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| SiO2  | 48.35                | 46.68                | 49.35                 | 44.60                 | 45.64                 | 47.15                 | 48.76                 | 44.53                 | 46.02                | 49.21                 | 49.78                 | 45.60                 | 47.01                |
| TiO2  | 0.00                 | 0.17                 | 0.04                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.01                  | 0.06                  | 0.56                  | 0.09                 | 0.28                  | 0.12                  | 0.00                  | 0.00                 |
| Al2O3 | 30.68                | 32.37                | 28.28                 | 30.15                 | 28.64                 | 28.59                 | 28.01                 | 27.27                 | 32.10                | 29.64                 | 29.37                 | 36.50                 | 30.43                |
| Cr2O3 | 0.00                 | 0.06                 | 0.08                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.03                  | 0.00                  | 0.00                 | 0.01                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.06                 |
| MgO   | 1.96                 | 1.37                 | 2.63                  | 3.07                  | 2.90                  | 2.92                  | 2.63                  | 4.65                  | 1.58                 | 2.27                  | 2.35                  | 0.42                  | 1.85                 |
| FeO   | 1.58                 | 2.26                 | 3.60                  | 4.68                  | 5.48                  | 3.51                  | 2.40                  | 6.71                  | 2.78                 | 2.09                  | 1.60                  | 0.73                  | 2.12                 |
| MnO   | 0.00                 | 0.11                 | 0.00                  | 0.00                  | 0.07                  | 0.01                  | 0.03                  | 0.04                  | 0.00                 | 0.00                  | 0.01                  | 0.03                  | 0.00                 |
| CaO   | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.04                  | 0.27                  | 0.00                  | 0.01                  | 0.02                  | 0.02                 | 0.00                  | 0.00                  | 0.02                  | 0.00                 |
| Na2O  | 0.44                 | 0.77                 | 0.56                  | 0.47                  | 0.92                  | 0.30                  | 0.39                  | 0.43                  | 0.74                 | 0.35                  | 0.39                  | 0.05                  | 0.18                 |
| K2O   | 9.66                 | 9.27                 | 9.19                  | 9.08                  | 9.22                  | 9.83                  | 9.64                  | 9.74                  | 10.09                | 9.80                  | 9.45                  | 10.50                 | 10.43                |
| H2O   | 4.41                 | 4.40                 | 4.42                  | 4.28                  | 4.30                  | 4.32                  | 4.35                  | 4.28                  | 4.38                 | 4.44                  | 4.44                  | 4.46                  | 4.34                 |
| Sum   | 97.08                | 97.45                | 98.15                 | 96.39                 | 97.43                 | 96.64                 | 96.32                 | 98.23                 | 97.78                | 98.10                 | 97.50                 | 98.30                 | 96.41                |
| Si    | 3.288                | 3.178                | 3.347                 | 3.119                 | 3.179                 | 3.268                 | 3.359                 | 3.113                 | 3.149                | 3.321                 | 3.361                 | 3.063                 | 3.247                |
| Ti    | 0.000                | 0.008                | 0.002                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.001                 | 0.003                 | 0.029                 | 0.004                | 0.014                 | 0.006                 | 0.000                 | 0.000                |
| Al    | 2.459                | 2.597                | 2.260                 | 2.485                 | 2.351                 | 2.336                 | 2.274                 | 2.247                 | 2.589                | 2.358                 | 2.337                 | 2.890                 | 2.478                |
| Cr    | 0.000                | 0.003                | 0.004                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.002                 | 0.000                 | 0.000                | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.003                |
| Mg    | 0.199                | 0.139                | 0.266                 | 0.320                 | 0.302                 | 0.301                 | 0.270                 | 0.485                 | 0.161                | 0.228                 | 0.236                 | 0.042                 | 0.190                |
| Fe2   | 0.090                | 0.129                | 0.204                 | 0.274                 | 0.319                 | 0.203                 | 0.138                 | 0.392                 | 0.159                | 0.118                 | 0.091                 | 0.041                 | 0.122                |
| Mn    | 0.000                | 0.006                | 0.000                 | 0.000                 | 0.004                 | 0.001                 | 0.002                 | 0.002                 | 0.000                | 0.000                 | 0.000                 | 0.001                 | 0.000                |
| Ca    | 0.000                | 0.000                | 0.000                 | 0.003                 | 0.020                 | 0.000                 | 0.001                 | 0.002                 | 0.001                | 0.000                 | 0.000                 | 0.002                 | 0.000                |
| Na    | 0.058                | 0.102                | 0.074                 | 0.064                 | 0.124                 | 0.040                 | 0.052                 | 0.058                 | 0.098                | 0.046                 | 0.051                 | 0.006                 | 0.024                |
| K     | 0.838                | 0.805                | 0.795                 | 0.810                 | 0.819                 | 0.869                 | 0.847                 | 0.869                 | 0.881                | 0.844                 | 0.814                 | 0.900                 | 0.919                |
| OH    | 2.000                | 2.000                | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                |
| Sum   | 8.931                | 8.967                | 8.953                 | 9.075                 | 9.117                 | 9.019                 | 8.949                 | 9.197                 | 9.042                | 8.930                 | 8.897                 | 8.945                 | 8.984                |
| XNa   | 0.065                | 0.112                | 0.085                 | 0.073                 | 0.131                 | 0.044                 | 0.058                 | 0.062                 | 0.100                | 0.052                 | 0.059                 | 0.007                 | 0.025                |

|       | EC25<br>msynS2<br>5 | EC25<br>msynS2<br>8 | EC25<br>msynS2<br>9 | EC25<br>msynS2<br>10 | EC25<br>msynS1<br>13 | EC25<br>msynS2<br>14 | EC25<br>msynS2<br>15 | EC25<br>msynS1<br>17 | EC25<br>msynS1<br>18 | EC25<br>msynS1<br>20 | EC25<br>msynS2<br>22 | EC25<br>mpost<br>23 | EC25<br>exbord<br>30 |
|-------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| SiO2  | 48.50               | 47.04               | 46.12               | 47.54                | 45.98                | 44.28                | 45.72                | 48.44                | 47.38                | 46.13                | 47.13                | 47.52               | 45.29                |
| TiO2  | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.09                 | 0.00                 | 0.05                 | 0.00                 | 0.00                | 0.00                 |
| Al2O3 | 30.03               | 32.46               | 33.28               | 29.50                | 32.74                | 29.60                | 31.14                | 29.89                | 30.45                | 33.99                | 30.87                | 31.24               | 34.22                |
| Cr2O3 | 0.00                | 0.14                | 0.01                | 0.04                 | 0.02                 | 0.00                 | 0.16                 | 0.06                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.11                | 0.00                 |
| MgO   | 2.02                | 1.46                | 1.16                | 2.41                 | 1.29                 | 3.33                 | 2.21                 | 2.16                 | 1.93                 | 1.03                 | 1.86                 | 1.88                | 0.92                 |
| FeO   | 2.02                | 2.20                | 2.08                | 2.80                 | 2.24                 | 5.42                 | 2.85                 | 2.27                 | 2.33                 | 1.80                 | 1.83                 | 2.93                | 1.96                 |
| MnO   | 0.06                | 0.00                | 0.00                | 0.00                 | 0.00                 | 0.07                 | 0.05                 | 0.13                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.13                 | 0.08                | 0.03                 |
| CaO   | 0.00                | 0.06                | 0.00                | 0.03                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                | 0.00                 |
| Na2O  | 0.13                | 0.43                | 0.60                | 0.30                 | 0.60                 | 0.16                 | 0.26                 | 0.17                 | 0.36                 | 0.34                 | 0.23                 | 0.46                | 0.52                 |
| K2O   | 10.19               | 9.77                | 9.83                | 9.88                 | 9.90                 | 9.26                 | 10.35                | 10.57                | 10.09                | 10.11                | 10.06                | 10.03               | 10.74                |
| H2O   | 4.40                | 4.42                | 4.40                | 4.35                 | 4.37                 | 4.26                 | 4.34                 | 4.41                 | 4.36                 | 4.42                 | 4.36                 | 4.43                | 4.40                 |
| Sum   | 97.34               | 97.98               | 97.48               | 96.84                | 97.14                | 96.38                | 97.09                | 98.20                | 96.91                | 97.88                | 96.49                | 98.68               | 98.08                |
| Si    | 3.304               | 3.187               | 3.143               | 3.272                | 3.150                | 3.112                | 3.158                | 3.288                | 3.253                | 3.127                | 3.242                | 3.216               | 3.085                |
| Ti    | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.004                | 0.000                | 0.003                | 0.000                | 0.000               | 0.000                |
| Al    | 2.412               | 2.592               | 2.673               | 2.393                | 2.644                | 2.452                | 2.535                | 2.391                | 2.464                | 2.716                | 2.503                | 2.491               | 2.747                |
| Cr    | 0.000               | 0.007               | 0.001               | 0.002                | 0.001                | 0.000                | 0.009                | 0.003                | 0.000                | 0.000                | 0.001                | 0.006               | 0.000                |
| Mg    | 0.205               | 0.147               | 0.118               | 0.247                | 0.132                | 0.349                | 0.228                | 0.219                | 0.198                | 0.104                | 0.191                | 0.189               | 0.094                |
| Fe2   | 0.115               | 0.125               | 0.118               | 0.161                | 0.129                | 0.319                | 0.164                | 0.129                | 0.134                | 0.102                | 0.105                | 0.166               | 0.112                |
| Mn    | 0.003               | 0.000               | 0.000               | 0.000                | 0.000                | 0.004                | 0.003                | 0.008                | 0.000                | 0.000                | 0.008                | 0.005               | 0.002                |
| Ca    | 0.000               | 0.005               | 0.000               | 0.002                | 0.000                | 0.000                | 0.001                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000               | 0.000                |
| Na    | 0.017               | 0.056               | 0.080               | 0.040                | 0.079                | 0.022                | 0.034                | 0.023                | 0.048                | 0.045                | 0.031                | 0.060               | 0.069                |
| K     | 0.886               | 0.844               | 0.854               | 0.868                | 0.866                | 0.830                | 0.912                | 0.915                | 0.883                | 0.874                | 0.883                | 0.866               | 0.933                |
| OH    | 2.000               | 2.000               | 2.000               | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000               | 2.000                |
| Sum   | 8.941               | 8.964               | 8.987               | 8.984                | 9.000                | 9.088                | 9.044                | 8.979                | 8.980                | 8.972                | 8.963                | 8.999               | 9.042                |
| XNa   | 0.019               | 0.062               | 0.085               | 0.044                | 0.084                | 0.026                | 0.036                | 0.024                | 0.051                | 0.049                | 0.034                | 0.065               | 0.069                |

|       | EC25<br>msynS1<br>34 | EC25<br>msynS1<br>35 | EC25<br>msynS1<br>38 | EC25<br>msynS1<br>39 | EC25<br>msynS1<br>41 | EC25<br>msynS2<br>42 | EC25<br>msynS1<br>43 | EC25<br>mpost<br>45  | EC25<br>mpost<br>46  | EC25<br>exbord<br>48 | EC25<br>exbord<br>49 | EC25<br>exbord<br>51 | EC25<br>exbord<br>52 |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| SiO2  | 45.49                | 47.92                | 47.60                | 46.52                | 47.14                | 46.47                | 47.85                | 47.25                | 47.70                | 46.21                | 46.95                | 46.84                | 46.99                |
| TiO2  | 0.06                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.04                 | 0.10                 | 0.10                 | 0.00                 | 0.02                 | 0.00                 | 0.08                 | 0.09                 | 0.13                 | 0.00                 |
| Al2O3 | 33.11                | 30.31                | 30.31                | 31.02                | 30.99                | 31.23                | 29.75                | 30.10                | 30.00                | 31.78                | 31.30                | 30.37                | 30.44                |
| Cr2O3 | 0.00                 | 0.01                 | 0.02                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.04                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.02                 | 0.05                 | 0.00                 | 0.00                 |
| MgO   | 1.24                 | 2.07                 | 1.96                 | 1.76                 | 1.73                 | 1.77                 | 2.32                 | 1.96                 | 2.01                 | 1.82                 | 1.69                 | 1.85                 | 1.85                 |
| FeO   | 1.66                 | 2.05                 | 2.25                 | 2.65                 | 2.03                 | 2.28                 | 2.30                 | 2.61                 | 2.51                 | 2.66                 | 3.07                 | 2.29                 | 2.45                 |
| MnO   | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.08                 | 0.06                 | 0.07                 | 0.00                 | 0.07                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.06                 | 0.00                 |
| CaO   | 0.00                 | 0.00                 | 0.03                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.05                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 |
| Na2O  | 0.57                 | 0.26                 | 0.39                 | 0.40                 | 0.20                 | 0.25                 | 0.25                 | 0.45                 | 0.31                 | 0.56                 | 0.45                 | 0.53                 | 0.37                 |
| K2O   | 10.22                | 10.16                | 10.28                | 10.16                | 10.29                | 10.64                | 10.56                | 9.98                 | 10.56                | 9.86                 | 10.23                | 10.06                | 10.40                |
| H2O   | 4.35                 | 4.38                 | 4.37                 | 4.35                 | 4.37                 | 4.36                 | 4.38                 | 4.35                 | 4.37                 | 4.37                 | 4.40                 | 4.34                 | 4.35                 |
| Sum   | 96.71                | 97.17                | 97.21                | 96.89                | 96.92                | 97.19                | 97.52                | 96.71                | 97.55                | 97.36                | 98.23                | 96.47                | 96.85                |
| Si    | 3.129                | 3.275                | 3.261                | 3.206                | 3.234                | 3.195                | 3.274                | 3.256                | 3.266                | 3.167                | 3.198                | 3.236                | 3.238                |
| Ti    | 0.003                | 0.000                | 0.000                | 0.002                | 0.005                | 0.005                | 0.000                | 0.001                | 0.000                | 0.004                | 0.005                | 0.007                | 0.000                |
| Al    | 2.684                | 2.441                | 2.447                | 2.519                | 2.506                | 2.531                | 2.399                | 2.444                | 2.422                | 2.567                | 2.513                | 2.473                | 2.473                |
| Cr    | 0.000                | 0.001                | 0.001                | 0.000                | 0.000                | 0.002                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.001                | 0.003                | 0.000                | 0.000                |
| Mg    | 0.128                | 0.211                | 0.200                | 0.180                | 0.177                | 0.182                | 0.237                | 0.201                | 0.205                | 0.186                | 0.171                | 0.190                | 0.190                |
| Fe2   | 0.096                | 0.117                | 0.129                | 0.153                | 0.117                | 0.131                | 0.131                | 0.150                | 0.144                | 0.153                | 0.175                | 0.133                | 0.141                |
| Mn    | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.005                | 0.004                | 0.004                | 0.000                | 0.004                | 0.000                | 0.000                | 0.004                | 0.000                |
| Ca    | 0.000                | 0.000                | 0.002                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.004                | 0.000                | 0.001                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                |
| Na    | 0.076                | 0.034                | 0.052                | 0.054                | 0.027                | 0.033                | 0.033                | 0.060                | 0.041                | 0.075                | 0.060                | 0.071                | 0.049                |
| K     | 0.897                | 0.886                | 0.899                | 0.893                | 0.900                | 0.933                | 0.922                | 0.877                | 0.923                | 0.862                | 0.889                | 0.887                | 0.915                |
| OH    | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                |
| Sum   | 9.013                | 8.965                | 8.991                | 9.006                | 8.971                | 9.016                | 9.004                | 8.990                | 9.005                | 9.014                | 9.014                | 9.000                | 9.007                |
| XNa   | 0.079                | 0.037                | 0.055                | 0.057                | 0.029                | 0.034                | 0.035                | 0.064                | 0.042                | 0.080                | 0.063                | 0.074                | 0.051                |
|       | EC25<br>exbord<br>59 | EC25<br>exbord<br>60 | EC25<br>exbord<br>61 | EC25<br>exbord<br>68 | EC25<br>exbord<br>69 | EC25<br>exbord<br>70 | EC25<br>exbord<br>71 | EC25<br>msynS1<br>72 | EC25<br>msynS1<br>74 | EC25<br>exbord<br>79 | EC25<br>exbord<br>80 | EC25<br>exbord<br>81 | EC25<br>exbord<br>82 |
| SiO2  | 46.74                | 47.44                | 47.68                | 46.58                | 46.27                | 47.58                | 48.38                | 46.54                | 44.83                | 47.12                | 46.92                | 48.53                | 47.56                |
| TiO2  | 0.14                 | 0.16                 | 0.05                 | 0.14                 | 0.16                 | 0.00                 | 0.19                 | 0.22                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 |
| Al2O3 | 30.68                | 30.35                | 30.41                | 29.70                | 31.40                | 29.70                | 29.63                | 29.97                | 32.91                | 29.82                | 30.36                | 30.01                | 30.50                |
| Cr2O3 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.08                 | 0.09                 | 0.04                 | 0.00                 | 0.10                 | 0.07                 | 0.00                 | 0.04                 | 0.00                 | 0.00                 |
| MgO   | 1.72                 | 1.85                 | 2.01                 | 2.11                 | 1.65                 | 2.14                 | 2.08                 | 2.02                 | 1.14                 | 2.05                 | 1.93                 | 2.12                 | 1.92                 |
| FeO   | 2.69                 | 2.55                 | 1.99                 | 2.71                 | 2.07                 | 2.75                 | 2.43                 | 2.46                 | 1.83                 | 2.42                 | 2.51                 | 2.47                 | 1.80                 |
| MnO   | 0.03                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.08                 | 0.09                 | 0.00                 | 0.04                 | 0.00                 | 0.00                 |
| CaO   | 0.05                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.02                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.04                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 |
| Na2O  | 0.45                 | 0.40                 | 0.31                 | 0.38                 | 0.72                 | 0.38                 | 0.26                 | 0.37                 | 0.41                 | 0.28                 | 0.39                 | 0.41                 | 0.12                 |
| K2O   | 9.60                 | 10.39                | 10.72                | 10.78                | 10.23                | 10.40                | 10.54                | 10.22                | 10.24                | 10.26                | 9.90                 | 9.88                 | 10.18                |
| H2O   | 4.34                 | 4.38                 | 4.38                 | 4.32                 | 4.35                 | 4.36                 | 4.40                 | 4.32                 | 4.31                 | 4.33                 | 4.34                 | 4.41                 | 4.36                 |
| Sum   | 96.45                | 97.50                | 97.54                | 96.82                | 96.95                | 97.37                | 97.92                | 96.32                | 95.83                | 96.27                | 96.41                | 97.83                | 96.44                |
| Si    | 3.226                | 3.248                | 3.258                | 3.230                | 3.184                | 3.267                | 3.294                | 3.229                | 3.118                | 3.263                | 3.241                | 3.294                | 3.269                |
| Ti    | 0.008                | 0.008                | 0.002                | 0.007                | 0.008                | 0.000                | 0.010                | 0.011                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                |
| Al    | 2.495                | 2.449                | 2.449                | 2.427                | 2.547                | 2.404                | 2.378                | 2.450                | 2.698                | 2.434                | 2.472                | 2.402                | 2.471                |
| Cr    | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.004                | 0.005                | 0.002                | 0.000                | 0.005                | 0.004                | 0.000                | 0.002                | 0.000                | 0.000                |
| Mg    | 0.177                | 0.188                | 0.205                | 0.218                | 0.170                | 0.219                | 0.212                | 0.209                | 0.118                | 0.211                | 0.199                | 0.214                | 0.197                |
| Fe2   | 0.155                | 0.146                | 0.113                | 0.157                | 0.119                | 0.158                | 0.138                | 0.143                | 0.106                | 0.140                | 0.145                | 0.140                | 0.103                |
| Mn    | 0.002                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.005                | 0.005                | 0.000                | 0.002                | 0.000                | 0.000                |
| Ca    | 0.004                | 0.000                | 0.000                | 0.002                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.003                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                |
| Na    | 0.060                | 0.053                | 0.041                | 0.051                | 0.096                | 0.051                | 0.035                | 0.050                | 0.055                | 0.038                | 0.052                | 0.054                | 0.017                |
| K     | 0.846                | 0.907                | 0.934                | 0.954                | 0.899                | 0.911                | 0.916                | 0.905                | 0.908                | 0.906                | 0.872                | 0.856                | 0.892                |
| OH    | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                |
| Sum   | 8.972                | 8.999                | 9.002                | 9.050                | 9.029                | 9.012                | 8.982                | 9.010                | 9.013                | 8.992                | 8.985                | 8.960                | 8.950                |
| XNa   | 0.066                | 0.055                | 0.042                | 0.051                | 0.097                | 0.053                | 0.037                | 0.053                | 0.057                | 0.040                | 0.056                | 0.059                | 0.018                |

|       | EC25<br>exbord<br>59 | EC25<br>exbord<br>60 | EC25<br>exbord<br>61 | EC25<br>exbord<br>68 | EC25<br>exbord<br>69 | EC25<br>exbord<br>70 | EC25<br>exbord<br>71 | EC25<br>msynS1<br>72 | EC25<br>msynS1<br>74 | EC25<br>exbord<br>79 | EC25<br>exbord<br>80 | EC25<br>exbord<br>81 | EC25<br>exbord<br>82 |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| SiO2  | 46.74                | 47.44                | 47.68                | 46.58                | 46.27                | 47.58                | 48.38                | 46.54                | 44.83                | 47.12                | 46.92                | 48.53                | 47.56                |
| TiO2  | 0.14                 | 0.16                 | 0.05                 | 0.14                 | 0.16                 | 0.00                 | 0.19                 | 0.22                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 |
| Al2O3 | 30.68                | 30.35                | 30.41                | 29.70                | 31.40                | 29.70                | 29.63                | 29.97                | 32.91                | 29.82                | 30.36                | 30.01                | 30.50                |
| Cr2O3 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.08                 | 0.09                 | 0.04                 | 0.00                 | 0.10                 | 0.07                 | 0.00                 | 0.04                 | 0.00                 | 0.00                 |
| MgO   | 1.72                 | 1.85                 | 2.01                 | 2.11                 | 1.65                 | 2.14                 | 2.08                 | 2.02                 | 1.14                 | 2.05                 | 1.93                 | 2.12                 | 1.92                 |
| FeO   | 2.69                 | 2.55                 | 1.99                 | 2.71                 | 2.07                 | 2.75                 | 2.43                 | 2.46                 | 1.83                 | 2.42                 | 2.51                 | 2.47                 | 1.80                 |
| MnO   | 0.03                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.08                 | 0.09                 | 0.00                 | 0.04                 | 0.00                 | 0.00                 |
| CaO   | 0.05                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.02                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.04                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 |
| Na2O  | 0.45                 | 0.40                 | 0.31                 | 0.38                 | 0.72                 | 0.38                 | 0.26                 | 0.37                 | 0.41                 | 0.28                 | 0.39                 | 0.41                 | 0.12                 |
| K2O   | 9.60                 | 10.39                | 10.72                | 10.78                | 10.23                | 10.40                | 10.54                | 10.22                | 10.24                | 10.26                | 9.90                 | 9.88                 | 10.18                |
| H2O   | 4.34                 | 4.38                 | 4.38                 | 4.32                 | 4.35                 | 4.36                 | 4.40                 | 4.32                 | 4.31                 | 4.33                 | 4.34                 | 4.41                 | 4.36                 |
| Sum   | 96.45                | 97.50                | 97.54                | 96.82                | 96.95                | 97.37                | 97.92                | 96.32                | 95.83                | 96.27                | 96.41                | 97.83                | 96.44                |
| Si    | 3.226                | 3.248                | 3.258                | 3.230                | 3.184                | 3.267                | 3.294                | 3.229                | 3.118                | 3.263                | 3.241                | 3.294                | 3.269                |
| Ti    | 0.008                | 0.008                | 0.002                | 0.007                | 0.008                | 0.000                | 0.010                | 0.011                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                |
| Al    | 2.495                | 2.449                | 2.449                | 2.427                | 2.547                | 2.404                | 2.378                | 2.450                | 2.698                | 2.434                | 2.472                | 2.402                | 2.471                |
| Cr    | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.004                | 0.005                | 0.002                | 0.000                | 0.005                | 0.004                | 0.000                | 0.002                | 0.000                | 0.000                |
| Mg    | 0.177                | 0.188                | 0.205                | 0.218                | 0.170                | 0.219                | 0.212                | 0.209                | 0.118                | 0.211                | 0.199                | 0.214                | 0.197                |
| Fe2   | 0.155                | 0.146                | 0.113                | 0.157                | 0.119                | 0.158                | 0.138                | 0.143                | 0.106                | 0.140                | 0.145                | 0.140                | 0.103                |
| Mn    | 0.002                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.005                | 0.005                | 0.000                | 0.002                | 0.000                | 0.000                |
| Ca    | 0.004                | 0.000                | 0.000                | 0.002                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.003                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                |
| Na    | 0.060                | 0.053                | 0.041                | 0.051                | 0.096                | 0.051                | 0.035                | 0.050                | 0.055                | 0.038                | 0.052                | 0.054                | 0.017                |
| K     | 0.846                | 0.907                | 0.934                | 0.954                | 0.899                | 0.911                | 0.916                | 0.905                | 0.908                | 0.906                | 0.872                | 0.856                | 0.892                |
| OH    | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                |
| Sum   | 8.972                | 8.999                | 9.002                | 9.050                | 9.029                | 9.012                | 8.982                | 9.010                | 9.013                | 8.992                | 8.985                | 8.960                | 8.950                |
| XNa   | 0.066                | 0.055                | 0.042                | 0.051                | 0.097                | 0.053                | 0.037                | 0.053                | 0.057                | 0.040                | 0.056                | 0.059                | 0.018                |

|       | EC25<br>msynS2<br>89 | EC25<br>msynS2<br>90 | EC25<br>msynS2<br>91 | EC25<br>msynS2<br>92 | EC25<br>msynS1<br>94 | EC25<br>msynS1<br>95 | EC25<br>msynS2<br>96 | EC25<br>msynS1m<br>97 | EC25<br>synS1<br>32 | EC25<br>msynS1<br>33 | EC25<br>exbord<br>53 | EC25<br>exbord<br>55 | EC25<br>exsfil<br>86 |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| SiO2  | 46.52                | 47.21                | 47.00                | 47.44                | 47.89                | 46.60                | 46.13                | 45.33                 | 47.88               | 47.17                | 47.27                | 46.79                | 46.84                |
| TiO2  | 0.00                 | 0.07                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.11                 | 0.00                  | 0.14                | 0.13                 | 0.01                 | 0.03                 | 0.00                 |
| Al2O3 | 30.68                | 30.15                | 29.97                | 30.40                | 29.56                | 29.51                | 29.96                | 31.20                 | 30.81               | 29.12                | 30.49                | 30.44                | 29.39                |
| Cr2O3 | 0.09                 | 0.06                 | 0.00                 | 0.05                 | 0.07                 | 0.02                 | 0.00                 | 0.09                  | 0.00                | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 |
| MgO   | 1.82                 | 1.90                 | 1.77                 | 2.04                 | 2.08                 | 2.19                 | 2.07                 | 1.93                  | 1.81                | 2.26                 | 1.95                 | 1.79                 | 1.93                 |
| FeO   | 2.78                 | 2.89                 | 2.36                 | 2.89                 | 2.48                 | 2.65                 | 2.61                 | 2.65                  | 2.84                | 3.31                 | 2.68                 | 2.33                 | 2.72                 |
| MnO   | 0.04                 | 0.04                 | 0.00                 | 0.03                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.04                | 0.03                 | 0.16                 | 0.05                 | 0.00                 |
| CaO   | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.01                  | 0.02                | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.04                 |
| Na2O  | 0.51                 | 0.50                 | 0.43                 | 0.42                 | 0.22                 | 0.34                 | 0.26                 | 0.35                  | 0.48                | 0.35                 | 0.55                 | 0.43                 | 0.40                 |
| K2O   | 9.67                 | 10.00                | 9.72                 | 10.05                | 10.19                | 9.77                 | 10.30                | 10.10                 | 9.93                | 10.02                | 10.17                | 10.04                | 10.29                |
| H2O   | 4.33                 | 4.36                 | 4.31                 | 4.38                 | 4.36                 | 4.29                 | 4.29                 | 4.30                  | 4.42                | 4.33                 | 4.38                 | 4.33                 | 4.30                 |
| Sum   | 96.45                | 97.17                | 95.55                | 97.70                | 96.85                | 95.37                | 95.73                | 95.95                 | 98.36               | 96.73                | 97.67                | 96.23                | 95.92                |
| Si    | 3.216                | 3.245                | 3.267                | 3.242                | 3.292                | 3.256                | 3.222                | 3.160                 | 3.244               | 3.265                | 3.234                | 3.238                | 3.265                |
| Ti    | 0.000                | 0.004                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.006                | 0.000                 | 0.007               | 0.007                | 0.001                | 0.002                | 0.000                |
| Al    | 2.500                | 2.442                | 2.456                | 2.449                | 2.395                | 2.430                | 2.467                | 2.563                 | 2.460               | 2.375                | 2.459                | 2.484                | 2.415                |
| Cr    | 0.005                | 0.003                | 0.000                | 0.002                | 0.004                | 0.001                | 0.000                | 0.005                 | 0.000               | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                |
| Mg    | 0.188                | 0.195                | 0.184                | 0.207                | 0.213                | 0.228                | 0.216                | 0.201                 | 0.183               | 0.233                | 0.199                | 0.185                | 0.201                |
| Fe2   | 0.161                | 0.166                | 0.137                | 0.165                | 0.143                | 0.155                | 0.153                | 0.154                 | 0.161               | 0.192                | 0.153                | 0.135                | 0.159                |
| Mn    | 0.002                | 0.002                | 0.000                | 0.002                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                 | 0.002               | 0.002                | 0.010                | 0.003                | 0.000                |
| Ca    | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.001                 | 0.001               | 0.001                | 0.000                | 0.000                | 0.003                |
| Na    | 0.069                | 0.066                | 0.057                | 0.056                | 0.029                | 0.047                | 0.035                | 0.047                 | 0.063               | 0.048                | 0.072                | 0.057                | 0.055                |
| K     | 0.852                | 0.877                | 0.862                | 0.876                | 0.894                | 0.870                | 0.918                | 0.899                 | 0.859               | 0.885                | 0.888                | 0.887                | 0.915                |
| OH    | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                 | 2.000               | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                |
| Sum   | 8.993                | 9.000                | 8.964                | 8.999                | 8.970                | 8.987                | 9.015                | 9.029                 | 8.980               | 9.007                | 9.016                | 8.990                | 9.012                |
| XNa   | 0.075                | 0.070                | 0.062                | 0.060                | 0.031                | 0.051                | 0.036                | 0.050                 | 0.068               | 0.051                | 0.075                | 0.061                | 0.056                |

|       | EC27<br>msynS1<br>299 | EC27<br>msynS1<br>301 | EC27<br>msynS1<br>302 | EC27<br>msynS1<br>303 | EC27<br>msynS1<br>304 | EC27<br>msynS2<br>308 | EC27<br>mpost<br>309 | EC27<br>mpost<br>310 | EC27<br>msynS2<br>311 | EC3<br>msynS1<br>90 | EC3<br>msynS2<br>91 | EC3<br>exbord<br>93 |
|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| SiO2  | 45.09                 | 45.33                 | 44.56                 | 46.67                 | 46.76                 | 44.88                 | 45.55                | 46.23                | 45.34                 | 47.16               | 47.42               | 47.33               |
| TiO2  | 0.13                  | 0.19                  | 0.15                  | 0.27                  | 0.27                  | 0.27                  | 0.08                 | 0.08                 | 0.42                  | 0.17                | 0.08                | 0.27                |
| Al2O3 | 32.68                 | 33.51                 | 32.97                 | 31.78                 | 32.38                 | 34.36                 | 32.92                | 33.78                | 34.74                 | 32.25               | 31.48               | 31.39               |
| Cr2O3 | 0.00                  | 0.00                  | 0.09                  | 0.00                  | 0.06                  | 0.00                  | 0.00                 | 0.02                 | 0.00                  | 0.00                | 0.00                | 0.12                |
| MgO   | 1.11                  | 1.10                  | 1.34                  | 1.50                  | 1.42                  | 0.86                  | 1.15                 | 1.09                 | 0.82                  | 1.46                | 1.58                | 1.55                |
| FeO   | 1.95                  | 2.29                  | 2.18                  | 2.50                  | 2.78                  | 2.08                  | 1.72                 | 2.00                 | 1.92                  | 2.22                | 2.33                | 2.62                |
| MnO   | 0.00                  | 0.08                  | 0.00                  | 0.03                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                 | 0.04                 | 0.00                  | 0.06                | 0.00                | 0.07                |
| CaO   | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                 | 0.00                 | 0.01                  | 0.00                | 0.00                | 0.00                |
| Na2O  | 0.31                  | 0.61                  | 0.41                  | 0.41                  | 0.44                  | 0.66                  | 0.41                 | 0.57                 | 0.58                  | 0.45                | 0.46                | 0.41                |
| K2O   | 10.79                 | 10.23                 | 10.06                 | 10.46                 | 10.40                 | 10.15                 | 10.99                | 10.11                | 10.14                 | 10.55               | 10.41               | 10.22               |
| H2O   | 4.32                  | 4.38                  | 4.31                  | 4.39                  | 4.43                  | 4.39                  | 4.36                 | 4.43                 | 4.43                  | 4.43                | 4.41                | 4.42                |
| Sum   | 96.39                 | 97.72                 | 96.08                 | 98.01                 | 98.94                 | 97.65                 | 97.18                | 98.34                | 98.40                 | 98.75               | 98.17               | 98.42               |
| Si    | 3.127                 | 3.099                 | 3.095                 | 3.182                 | 3.161                 | 3.065                 | 3.132                | 3.126                | 3.067                 | 3.186               | 3.220               | 3.210               |
| Ti    | 0.007                 | 0.010                 | 0.008                 | 0.014                 | 0.014                 | 0.014                 | 0.004                | 0.004                | 0.021                 | 0.009               | 0.004               | 0.014               |
| Al    | 2.671                 | 2.700                 | 2.699                 | 2.553                 | 2.580                 | 2.766                 | 2.668                | 2.693                | 2.770                 | 2.568               | 2.520               | 2.509               |
| Cr    | 0.000                 | 0.000                 | 0.005                 | 0.000                 | 0.003                 | 0.000                 | 0.000                | 0.001                | 0.000                 | 0.000               | 0.000               | 0.007               |
| Mg    | 0.115                 | 0.112                 | 0.139                 | 0.153                 | 0.143                 | 0.088                 | 0.118                | 0.110                | 0.083                 | 0.147               | 0.160               | 0.157               |
| Fe2   | 6.113                 | 6.131                 | 6.127                 | 6.143                 | 6.157                 | 6.119                 | 6.099                | 6.113                | 6.109                 | 6.125               | 6.132               | 6.149               |
| Mn    | 0.000                 | 0.005                 | 0.000                 | 0.002                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                | 0.002                | 0.000                 | 0.004               | 0.000               | 0.004               |
| Ca    | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                | 0.000                | 0.001                 | 0.000               | 0.000               | 0.000               |
| Na    | 0.042                 | 0.080                 | 0.055                 | 0.054                 | 0.058                 | 0.087                 | 0.055                | 0.075                | 0.077                 | 0.059               | 0.060               | 0.054               |
| K     | 0.955                 | 0.892                 | 0.892                 | 0.910                 | 0.896                 | 0.885                 | 0.964                | 0.873                | 0.875                 | 0.909               | 0.902               | 0.884               |
| OH    | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                | 2.000                | 2.000                 | 2.000               | 2.000               | 2.000               |
| Sum   | 9.029                 | 9.028                 | 9.018                 | 9.009                 | 9.012                 | 9.024                 | 9.039                | 8.996                | 9.003                 | 9.006               | 8.998               | 8.987               |
| XNa   | 0.042                 | 0.082                 | 0.058                 | 0.056                 | 0.061                 | 0.089                 | 0.054                | 0.079                | 0.081                 | 0.061               | 0.063               | 0.058               |

|       | EC3<br>exsfil<br>112 | EC3<br>exsfil<br>113 | EC3<br>exbord<br>114 | EC3<br>exbord<br>115 | EC3<br>exbord<br>130 | EC3<br>exbord<br>131 | EC3<br>msynS1<br>132 | EC3<br>msynS2<br>133 | EC3<br>exbord<br>134 | EC3<br>exbord<br>136 | EC3<br>exbord<br>137 | EC3<br>exsfil<br>143 |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| SiO2  | 46.03                | 47.28                | 46.88                | 44.49                | 47.74                | 47.84                | 46.42                | 47.04                | 46.44                | 47.22                | 46.72                | 46.47                |
| TiO2  | 0.27                 | 0.23                 | 0.09                 | 0.36                 | 0.12                 | 0.31                 | 0.13                 | 0.48                 | 0.21                 | 0.22                 | 0.20                 | 0.00                 |
| Al2O3 | 31.22                | 31.45                | 31.17                | 32.65                | 31.09                | 31.03                | 32.78                | 30.04                | 31.93                | 30.74                | 31.16                | 31.21                |
| Cr2O3 | 0.00                 | 0.04                 | 0.02                 | 0.02                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.20                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 |
| MgO   | 1.48                 | 1.46                 | 1.54                 | 1.15                 | 1.65                 | 1.57                 | 1.19                 | 1.72                 | 1.31                 | 1.56                 | 1.40                 | 1.52                 |
| FeO   | 2.37                 | 2.54                 | 2.36                 | 2.60                 | 2.08                 | 2.58                 | 2.01                 | 2.67                 | 2.53                 | 2.98                 | 2.41                 | 2.35                 |
| MnO   | 0.00                 | 0.00                 | 0.04                 | 0.07                 | 0.01                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.12                 | 0.00                 | 0.12                 | 0.00                 | 0.12                 |
| CaO   | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.02                 | 0.00                 | 0.03                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 |
| Na2O  | 0.68                 | 0.72                 | 0.36                 | 0.54                 | 0.42                 | 0.56                 | 0.40                 | 0.46                 | 0.59                 | 0.48                 | 0.48                 | 0.42                 |
| K2O   | 9.76                 | 9.80                 | 10.84                | 9.90                 | 10.69                | 10.34                | 10.51                | 9.87                 | 9.97                 | 10.48                | 10.27                | 10.44                |
| H2O   | 4.32                 | 4.41                 | 4.37                 | 4.31                 | 4.41                 | 4.43                 | 4.40                 | 4.35                 | 4.38                 | 4.39                 | 4.36                 | 4.34                 |
| Sum   | 96.12                | 97.95                | 97.66                | 96.11                | 98.21                | 98.69                | 98.03                | 96.79                | 97.37                | 98.19                | 96.98                | 96.88                |
| Si    | 3.190                | 3.214                | 3.211                | 3.096                | 3.240                | 3.235                | 3.156                | 3.242                | 3.179                | 3.222                | 3.213                | 3.204                |
| Ti    | 0.014                | 0.012                | 0.005                | 0.019                | 0.006                | 0.016                | 0.007                | 0.025                | 0.011                | 0.011                | 0.010                | 0.000                |
| Al    | 2.550                | 2.520                | 2.516                | 2.678                | 2.487                | 2.473                | 2.627                | 2.440                | 2.577                | 2.473                | 2.526                | 2.537                |
| Cr    | 0.000                | 0.002                | 0.001                | 0.001                | 0.000                | 0.000                | 0.011                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                |
| Mg    | 0.153                | 0.148                | 0.157                | 0.119                | 0.167                | 0.158                | 0.121                | 0.177                | 0.134                | 0.159                | 0.143                | 0.156                |
| Fe2   | 0.137                | 0.144                | 0.135                | 0.152                | 0.118                | 0.146                | 0.114                | 0.154                | 0.145                | 0.170                | 0.139                | 0.135                |
| Mn    | 0.000                | 0.000                | 0.002                | 0.004                | 0.000                | 0.001                | 0.000                | 0.007                | 0.000                | 0.007                | 0.000                | 0.007                |
| Ca    | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.001                | 0.000                | 0.002                | 0.001                | 0.000                | 0.000                | 0.000                |
| Na    | 0.091                | 0.095                | 0.048                | 0.073                | 0.055                | 0.073                | 0.052                | 0.061                | 0.079                | 0.064                | 0.064                | 0.056                |
| K     | 0.863                | 0.850                | 0.947                | 0.879                | 0.926                | 0.892                | 0.912                | 0.868                | 0.871                | 0.912                | 0.901                | 0.919                |
| OH    | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                |
| Sum   | 8.998                | 8.986                | 9.023                | 9.021                | 9.000                | 8.995                | 9.000                | 8.977                | 8.996                | 9.019                | 8.996                | 9.015                |
| XNa   | 0.095                | 0.101                | 0.048                | 0.077                | 0.056                | 0.076                | 0.054                | 0.066                | 0.083                | 0.066                | 0.066                | 0.057                |

|       | EC6<br>exsfil<br>5 | EC6<br>exsfil<br>6 | EC6<br>exsfil<br>7 | EC6<br>exsfil<br>8 | EC6<br>exsbag<br>29 | EC6<br>exsfil<br>37 | EC6<br>mpost<br>43 | EC6<br>msynS2<br>56 | EC6<br>exsbag<br>70 | EC6<br>msynS2<br>72 | EC6<br>msynS2<br>77 | EC6<br>msynS2<br>78 | EC6<br>mpost<br>79 |
|-------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| SiO2  | 46.30              | 46.01              | 46.59              | 46.97              | 54.18               | 47.33               | 45.12              | 45.87               | 49.55               | 46.33               | 45.50               | 47.26               | 46.73              |
| TiO2  | 0.29               | 0.34               | 0.31               | 0.22               | 0.28                | 0.30                | 0.30               | 0.27                | 0.34                | 0.37                | 0.36                | 0.23                | 0.38               |
| Al2O3 | 31.93              | 35.33              | 32.72              | 32.21              | 24.81               | 32.65               | 31.20              | 34.72               | 31.72               | 31.57               | 34.45               | 31.47               | 32.61              |
| Cr2O3 | 0.00               | 0.14               | 0.00               | 0.00               | 0.00                | 0.00                | 0.01               | 0.00                | 0.01                | 0.00                | 0.12                | 0.00                | 0.00               |
| MgO   | 1.51               | 0.70               | 1.35               | 1.33               | 0.91                | 1.21                | 2.26               | 0.96                | 1.39                | 1.40                | 0.87                | 1.61                | 1.27               |
| FeO   | 2.53               | 1.21               | 2.57               | 2.30               | 2.12                | 2.94                | 2.50               | 2.22                | 2.21                | 2.74                | 2.21                | 2.37                | 2.67               |
| MnO   | 0.04               | 0.02               | 0.00               | 0.00               | 0.04                | 0.00                | 0.03               | 0.03                | 0.05                | 0.00                | 0.08                | 0.03                | 0.01               |
| CaO   | 0.02               | 0.06               | 0.00               | 0.00               | 0.00                | 0.01                | 0.00               | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00               |
| Na2O  | 0.58               | 0.88               | 0.65               | 0.79               | 0.43                | 0.69                | 0.77               | 0.77                | 0.37                | 0.53                | 0.65                | 0.45                | 0.55               |
| K2O   | 9.62               | 9.97               | 10.19              | 9.97               | 8.71                | 10.15               | 9.90               | 10.20               | 10.66               | 9.48                | 10.13               | 9.93                | 10.11              |
| H2O   | 4.37               | 4.48               | 4.43               | 4.42               | 4.41                | 4.47                | 4.31               | 4.47                | 4.54                | 4.36                | 4.44                | 4.40                | 4.43               |
| Sum   | 97.18              | 99.12              | 98.82              | 98.20              | 95.89               | 99.75               | 96.42              | 99.51               | 100.84              | 96.79               | 98.79               | 97.74               | 98.76              |

|     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Si  | 3.171 | 3.077 | 3.148 | 3.184 | 3.684 | 3.170 | 3.133 | 3.075 | 3.267 | 3.186 | 3.073 | 3.215 | 3.157 |
| Ti  | 0.015 | 0.017 | 0.016 | 0.011 | 0.014 | 0.015 | 0.016 | 0.014 | 0.017 | 0.019 | 0.018 | 0.012 | 0.019 |
| Al  | 2.578 | 2.785 | 2.606 | 2.574 | 1.989 | 2.577 | 2.553 | 2.743 | 2.465 | 2.558 | 2.742 | 2.523 | 2.597 |
| Cr  | 0.000 | 0.007 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.000 | 0.001 | 0.000 | 0.007 | 0.000 | 0.000 |
| Mg  | 0.154 | 0.070 | 0.136 | 0.135 | 0.093 | 0.121 | 0.234 | 0.096 | 0.136 | 0.144 | 0.087 | 0.164 | 0.128 |
| Fe2 | 0.145 | 0.068 | 0.145 | 0.131 | 0.120 | 0.165 | 0.145 | 0.124 | 0.122 | 0.158 | 0.125 | 0.135 | 0.151 |
| Mn  | 0.002 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.002 | 0.000 | 0.002 | 0.002 | 0.003 | 0.000 | 0.004 | 0.002 | 0.001 |
| Ca  | 0.001 | 0.004 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Na  | 0.077 | 0.114 | 0.085 | 0.104 | 0.057 | 0.089 | 0.104 | 0.100 | 0.047 | 0.071 | 0.085 | 0.059 | 0.072 |
| K   | 0.841 | 0.850 | 0.879 | 0.862 | 0.756 | 0.867 | 0.877 | 0.872 | 0.896 | 0.832 | 0.873 | 0.862 | 0.872 |
| OH  | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 |
| Sum | 8.983 | 8.993 | 9.015 | 9.001 | 8.714 | 9.005 | 9.065 | 9.026 | 8.955 | 8.968 | 9.013 | 8.971 | 8.997 |

|     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| XNa | 0.084 | 0.118 | 0.088 | 0.108 | 0.070 | 0.093 | 0.106 | 0.103 | 0.050 | 0.079 | 0.088 | 0.064 | 0.076 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

|       | EC6<br>msynS2<br>84 | EC6<br>mpost<br>86 | EC6<br>exsbag<br>88 | EC6<br>mpost<br>89 | EC7<br>exsfil<br>374 | EC7<br>exsfil<br>375 | EC7<br>exsfil<br>377 | EC7<br>exsfil<br>378 | FC17<br>exsbag<br>327 | FC17<br>exsbag<br>328 | FC17<br>exsfil<br>330 | FC17<br>exsfil<br>331 |
|-------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| SiO2  | 46.01               | 45.96              | 46.69               | 46.40              | 45.97                | 46.09                | 45.95                | 45.91                | 47.35                 | 47.53                 | 47.33                 | 47.01                 |
| TiO2  | 0.26                | 0.32               | 0.25                | 0.33               | 0.09                 | 0.05                 | 0.06                 | 0.09                 | 0.30                  | 0.32                  | 0.32                  | 0.26                  |
| Al2O3 | 33.09               | 31.70              | 32.21               | 33.32              | 32.60                | 33.19                | 33.94                | 33.74                | 32.41                 | 33.20                 | 32.49                 | 32.98                 |
| Cr2O3 | 0.06                | 0.19               | 0.00                | 0.00               | 0.00                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.14                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.04                  |
| MgO   | 1.11                | 1.37               | 1.29                | 1.22               | 1.07                 | 0.80                 | 0.82                 | 0.85                 | 1.36                  | 1.25                  | 1.24                  | 1.35                  |
| FeO   | 2.20                | 2.82               | 2.71                | 2.39               | 1.43                 | 1.26                 | 1.00                 | 1.08                 | 2.16                  | 2.24                  | 2.34                  | 2.35                  |
| MnO   | 0.00                | 0.07               | 0.02                | 0.00               | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  |
| CaO   | 0.00                | 0.00               | 0.05                | 0.00               | 0.00                 | 0.00                 | 0.03                 | 0.00                 | 0.01                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  |
| Na2O  | 0.64                | 0.48               | 0.56                | 0.62               | 0.41                 | 0.39                 | 0.49                 | 0.39                 | 0.55                  | 0.80                  | 0.87                  | 0.89                  |
| K2O   | 10.45               | 10.57              | 10.39               | 10.40              | 10.23                | 9.82                 | 10.43                | 10.62                | 10.30                 | 9.55                  | 9.77                  | 10.04                 |
| H2O   | 4.41                | 4.37               | 4.42                | 4.45               | 4.34                 | 4.35                 | 4.39                 | 4.38                 | 4.45                  | 4.49                  | 4.45                  | 4.47                  |
| Sum   | 98.23               | 97.85              | 98.58               | 99.12              | 96.16                | 95.97                | 97.12                | 97.06                | 99.03                 | 99.37                 | 98.81                 | 99.41                 |

|     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Si  | 3.128 | 3.153 | 3.168 | 3.126 | 3.172 | 3.172 | 3.135 | 3.138 | 3.184 | 3.172 | 3.185 | 3.153 |
| Ti  | 0.014 | 0.016 | 0.013 | 0.017 | 0.005 | 0.003 | 0.003 | 0.005 | 0.015 | 0.016 | 0.016 | 0.013 |
| Al  | 2.652 | 2.563 | 2.576 | 2.646 | 2.651 | 2.692 | 2.729 | 2.718 | 2.569 | 2.611 | 2.577 | 2.607 |
| Cr  | 0.003 | 0.010 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.000 | 0.008 | 0.000 | 0.000 | 0.002 |
| Mg  | 0.113 | 0.140 | 0.130 | 0.122 | 0.110 | 0.082 | 0.083 | 0.087 | 0.136 | 0.125 | 0.124 | 0.135 |
| Fe2 | 0.125 | 0.162 | 0.154 | 0.134 | 0.083 | 0.073 | 0.057 | 0.062 | 0.121 | 0.125 | 0.132 | 0.132 |
| Mn  | 0.000 | 0.004 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Ca  | 0.000 | 0.000 | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.002 | 0.000 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Na  | 0.084 | 0.064 | 0.074 | 0.082 | 0.055 | 0.053 | 0.065 | 0.052 | 0.072 | 0.103 | 0.114 | 0.116 |
| K   | 0.907 | 0.926 | 0.899 | 0.894 | 0.900 | 0.862 | 0.908 | 0.926 | 0.884 | 0.813 | 0.839 | 0.859 |
| OH  | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 |
| Sum | 9.026 | 9.039 | 9.018 | 9.022 | 8.976 | 8.937 | 8.983 | 8.987 | 8.990 | 8.964 | 8.987 | 9.017 |

|     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| XNa | 0.085 | 0.065 | 0.076 | 0.084 | 0.057 | 0.057 | 0.066 | 0.053 | 0.075 | 0.113 | 0.119 | 0.119 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

|       | FC17<br>exsfil<br>333 | FC17<br>exsfil<br>334 | FC17<br>exsbag<br>336 | FC17<br>exsbag<br>337 | FC17<br>msynS2<br>340 | FC17<br>msynS2<br>352 | FC17<br>msynS1<br>354 | FC17<br>msynS2<br>355 |  | FC62<br>exbord<br>272 | FC62<br>exbord<br>273 | FC62<br>expost<br>275 | FC62<br>exbord<br>290 |
|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| SiO2  | 46.70                 | 47.01                 | 47.78                 | 47.28                 | 46.46                 | 46.82                 | 47.24                 | 48.21                 |  | 46.16                 | 46.47                 | 47.50                 | 45.24                 |
| TiO2  | 0.25                  | 0.29                  | 0.18                  | 0.28                  | 0.26                  | 0.29                  | 0.25                  | 0.05                  |  | 0.34                  | 0.23                  | 0.08                  | 0.29                  |
| Al2O3 | 33.64                 | 32.65                 | 31.95                 | 33.23                 | 32.05                 | 32.38                 | 31.49                 | 30.99                 |  | 34.93                 | 33.03                 | 34.24                 | 33.63                 |
| Cr2O3 | 0.10                  | 0.00                  | 0.09                  | 0.03                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.16                  |  | 0.00                  | 0.00                  | 0.03                  | 0.00                  |
| MgO   | 1.03                  | 1.23                  | 1.52                  | 1.16                  | 1.32                  | 1.31                  | 1.61                  | 1.60                  |  | 0.81                  | 1.17                  | 0.93                  | 0.88                  |
| FeO   | 2.67                  | 2.57                  | 1.88                  | 1.85                  | 1.89                  | 2.48                  | 2.13                  | 2.57                  |  | 1.23                  | 2.89                  | 1.60                  | 1.95                  |
| MnO   | 0.15                  | 0.02                  | 0.00                  | 0.02                  | 0.07                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  |  | 0.06                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  |
| CaO   | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  |  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.02                  |
| Na2O  | 0.69                  | 0.79                  | 0.52                  | 0.59                  | 0.72                  | 0.72                  | 0.48                  | 0.50                  |  | 0.43                  | 0.65                  | 0.19                  | 0.84                  |
| K2O   | 9.75                  | 9.90                  | 10.00                 | 10.20                 | 9.72                  | 9.49                  | 10.17                 | 10.09                 |  | 10.06                 | 9.73                  | 10.06                 | 10.16                 |
| H2O   | 4.47                  | 4.45                  | 4.44                  | 4.47                  | 4.37                  | 4.41                  | 4.40                  | 4.44                  |  | 4.46                  | 4.43                  | 4.49                  | 4.37                  |
| Sum   | 99.47                 | 98.90                 | 98.38                 | 99.10                 | 96.85                 | 97.91                 | 97.78                 | 98.60                 |  | 98.48                 | 98.60                 | 99.12                 | 97.39                 |
| Si    | 3.129                 | 3.168                 | 3.221                 | 3.169                 | 3.184                 | 3.177                 | 3.214                 | 3.255                 |  | 3.101                 | 3.142                 | 3.166                 | 3.098                 |
| Ti    | 0.013                 | 0.015                 | 0.009                 | 0.014                 | 0.014                 | 0.015                 | 0.013                 | 0.002                 |  | 0.017                 | 0.012                 | 0.004                 | 0.015                 |
| Al    | 2.657                 | 2.593                 | 2.539                 | 2.625                 | 2.590                 | 2.590                 | 2.525                 | 2.466                 |  | 2.767                 | 2.633                 | 2.690                 | 2.715                 |
| Cr    | 0.005                 | 0.000                 | 0.005                 | 0.001                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.009                 |  | 0.000                 | 0.000                 | 0.001                 | 0.000                 |
| Mg    | 0.103                 | 0.123                 | 0.153                 | 0.116                 | 0.135                 | 0.133                 | 0.163                 | 0.161                 |  | 0.081                 | 0.118                 | 0.093                 | 0.090                 |
| Fe2   | 0.149                 | 0.145                 | 0.106                 | 0.104                 | 0.108                 | 0.141                 | 0.121                 | 0.145                 |  | 0.069                 | 0.164                 | 0.089                 | 0.112                 |
| Mn    | 0.009                 | 0.001                 | 0.000                 | 0.001                 | 0.004                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 |  | 0.003                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 |
| Ca    | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 |  | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.001                 |
| Na    | 0.090                 | 0.103                 | 0.068                 | 0.076                 | 0.096                 | 0.095                 | 0.063                 | 0.066                 |  | 0.056                 | 0.085                 | 0.024                 | 0.112                 |
| K     | 0.833                 | 0.851                 | 0.860                 | 0.872                 | 0.850                 | 0.822                 | 0.883                 | 0.869                 |  | 0.862                 | 0.839                 | 0.856                 | 0.888                 |
| OH    | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 |  | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 |
| Sum   | 8.989                 | 8.998                 | 8.962                 | 8.978                 | 8.980                 | 8.972                 | 8.983                 | 8.973                 |  | 8.957                 | 8.992                 | 8.924                 | 9.030                 |
| XNa   | 0.098                 | 0.108                 | 0.073                 | 0.081                 | 0.101                 | 0.104                 | 0.067                 | 0.071                 |  | 0.061                 | 0.092                 | 0.027                 | 0.112                 |

|       | FC62<br>exbord<br>291 | FC62<br>exbord<br>292 | FC69<br>exbord<br>320 | FC69<br>exbord<br>321 | FC69<br>exbord<br>337 | FC69<br>exbord<br>350 | FC69<br>msynS2<br>382 | FC69<br>msynS2<br>383 | FC69<br>msynS2<br>398 |  | FC85<br>mpost<br>151 | FC85<br>mat<br>152 | FC85<br>mpost<br>157 |
|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--|----------------------|--------------------|----------------------|
| SiO2  | 47.31                 | 46.01                 | 47.03                 | 47.47                 | 47.88                 | 46.33                 | 45.48                 | 45.35                 | 46.64                 |  | 45.86                | 47.22              | 45.42                |
| TiO2  | 0.22                  | 0.31                  | 0.26                  | 0.31                  | 0.14                  | 0.25                  | 0.42                  | 0.22                  | 0.16                  |  | 0.24                 | 0.17               | 0.34                 |
| Al2O3 | 32.06                 | 34.03                 | 31.77                 | 30.43                 | 30.23                 | 31.25                 | 31.29                 | 33.54                 | 31.80                 |  | 34.39                | 31.17              | 33.81                |
| Cr2O3 | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.06                  | 0.02                  | 0.05                  | 0.00                  | 0.04                  | 0.07                  |  | 0.00                 | 0.04               | 0.00                 |
| MgO   | 1.41                  | 0.92                  | 1.54                  | 1.78                  | 1.88                  | 1.59                  | 2.42                  | 1.21                  | 1.50                  |  | 0.75                 | 1.41               | 0.91                 |
| FeO   | 1.56                  | 1.39                  | 2.32                  | 2.35                  | 2.52                  | 2.80                  | 2.70                  | 1.54                  | 2.41                  |  | 2.57                 | 3.20               | 2.36                 |
| MnO   | 0.00                  | 0.09                  | 0.01                  | 0.13                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.02                  | 0.00                  | 0.07                  |  | 0.22                 | 0.08               | 0.00                 |
| CaO   | 0.00                  | 0.03                  | 0.00                  | 0.01                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.01                  | 0.00                  | 0.00                  |  | 0.00                 | 0.00               | 0.00                 |
| Na2O  | 0.24                  | 0.31                  | 0.43                  | 0.30                  | 0.41                  | 0.45                  | 0.43                  | 0.47                  | 0.45                  |  | 0.87                 | 0.64               | 0.93                 |
| K2O   | 10.58                 | 9.97                  | 9.52                  | 10.45                 | 10.00                 | 9.74                  | 9.61                  | 10.60                 | 9.47                  |  | 9.91                 | 9.70               | 9.99                 |
| H2O   | 4.41                  | 4.41                  | 4.39                  | 4.38                  | 4.39                  | 4.35                  | 4.34                  | 4.38                  | 4.37                  |  | 4.45                 | 4.40               | 4.40                 |
| Sum   | 97.79                 | 97.46                 | 97.27                 | 97.67                 | 97.45                 | 96.81                 | 96.72                 | 97.35                 | 96.94                 |  | 99.27                | 98.05              | 98.16                |
| Si    | 3.212                 | 3.125                 | 3.206                 | 3.244                 | 3.269                 | 3.191                 | 3.139                 | 3.105                 | 3.194                 |  | 3.085                | 3.216              | 3.089                |
| Ti    | 0.011                 | 0.016                 | 0.013                 | 0.016                 | 0.007                 | 0.013                 | 0.022                 | 0.011                 | 0.008                 |  | 0.012                | 0.009              | 0.017                |
| Al    | 2.566                 | 2.724                 | 2.553                 | 2.451                 | 2.433                 | 2.537                 | 2.546                 | 2.706                 | 2.567                 |  | 2.727                | 2.502              | 2.710                |
| Cr    | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.003                 | 0.001                 | 0.002                 | 0.000                 | 0.002                 | 0.004                 |  | 0.000                | 0.002              | 0.000                |
| Mg    | 0.143                 | 0.093                 | 0.156                 | 0.181                 | 0.191                 | 0.163                 | 0.249                 | 0.123                 | 0.153                 |  | 0.075                | 0.143              | 0.092                |
| Fe2   | 0.089                 | 0.079                 | 0.132                 | 0.134                 | 0.144                 | 0.161                 | 0.156                 | 0.088                 | 0.138                 |  | 0.145                | 0.182              | 0.134                |
| Mn    | 0.000                 | 0.005                 | 0.000                 | 0.008                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.001                 | 0.000                 | 0.004                 |  | 0.012                | 0.005              | 0.000                |
| Ca    | 0.000                 | 0.002                 | 0.000                 | 0.001                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.001                 | 0.000                 | 0.000                 |  | 0.000                | 0.000              | 0.000                |
| Na    | 0.032                 | 0.041                 | 0.057                 | 0.040                 | 0.054                 | 0.060                 | 0.057                 | 0.062                 | 0.060                 |  | 0.114                | 0.085              | 0.123                |
| K     | 0.916                 | 0.864                 | 0.828                 | 0.912                 | 0.871                 | 0.856                 | 0.846                 | 0.926                 | 0.827                 |  | 0.850                | 0.843              | 0.867                |
| OH    | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 |  | 2.000                | 2.000              | 2.000                |
| Sum   | 8.968                 | 8.949                 | 8.947                 | 8.989                 | 8.969                 | 8.984                 | 9.017                 | 9.024                 | 8.956                 |  | 9.021                | 8.987              | 9.033                |
| XNa   | 0.033                 | 0.045                 | 0.065                 | 0.042                 | 0.058                 | 0.066                 | 0.063                 | 0.063                 | 0.067                 |  | 0.118                | 0.091              | 0.124                |

|       | FC85<br>mpost<br>158  | FC85<br>msynS2<br>162 | FC85<br>mpost<br>167  | FC85<br>msynS1<br>170 | FC85<br>msynS1<br>172 | FC85<br>msynS2<br>176 | FC85<br>mpost<br>177 | FC85<br>msynS1<br>181 | FC85<br>msynS1<br>183 | FC85<br>msynS1<br>186 | FC85<br>msynS1<br>187 | FC85<br>msynS2<br>191 | FC85<br>msynS2<br>193 |
|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| SiO2  | 46.66                 | 46.05                 | 46.57                 | 47.47                 | 46.92                 | 45.43                 | 45.85                | 45.34                 | 46.66                 | 47.24                 | 46.18                 | 45.83                 | 45.51                 |
| TiO2  | 0.26                  | 0.29                  | 0.25                  | 0.35                  | 0.24                  | 0.25                  | 0.24                 | 0.21                  | 0.30                  | 0.23                  | 0.24                  | 0.39                  | 0.28                  |
| Al2O3 | 31.21                 | 32.60                 | 33.12                 | 30.70                 | 31.07                 | 34.20                 | 33.37                | 34.30                 | 31.10                 | 31.04                 | 32.77                 | 31.88                 | 32.92                 |
| Cr2O3 | 0.05                  | 0.04                  | 0.00                  | 0.09                  | 0.08                  | 0.07                  | 0.00                 | 0.03                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.10                  | 0.11                  | 0.05                  |
| MgO   | 1.31                  | 1.13                  | 1.01                  | 1.73                  | 1.55                  | 0.84                  | 0.96                 | 0.76                  | 1.40                  | 1.65                  | 1.13                  | 1.21                  | 1.03                  |
| FeO   | 3.45                  | 2.60                  | 2.55                  | 2.90                  | 2.87                  | 2.34                  | 2.19                 | 2.16                  | 2.66                  | 2.62                  | 2.21                  | 3.20                  | 2.91                  |
| MnO   | 0.00                  | 0.01                  | 0.00                  | 0.06                  | 0.05                  | 0.05                  | 0.00                 | 0.03                  | 0.06                  | 0.03                  | 0.03                  | 0.12                  | 0.00                  |
| CaO   | 0.02                  | 0.02                  | 0.01                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  |
| Na2O  | 0.65                  | 0.59                  | 0.82                  | 0.34                  | 0.34                  | 0.41                  | 0.77                 | 0.91                  | 0.50                  | 0.46                  | 0.35                  | 0.63                  | 0.72                  |
| K2O   | 10.07                 | 10.48                 | 10.39                 | 10.31                 | 10.07                 | 10.62                 | 9.82                 | 9.56                  | 10.43                 | 10.40                 | 10.40                 | 9.73                  | 9.96                  |
| H2O   | 4.38                  | 4.39                  | 4.44                  | 4.41                  | 4.38                  | 4.42                  | 4.39                 | 4.40                  | 4.36                  | 4.40                  | 4.39                  | 4.36                  | 4.38                  |
| Sum   | 98.05                 | 98.20                 | 99.18                 | 98.37                 | 97.56                 | 98.63                 | 97.59                | 97.70                 | 97.47                 | 98.06                 | 97.81                 | 97.47                 | 97.77                 |
| Si    | 3.191                 | 3.139                 | 3.140                 | 3.227                 | 3.211                 | 3.081                 | 3.126                | 3.086                 | 3.203                 | 3.218                 | 3.149                 | 3.148                 | 3.115                 |
| Ti    | 0.013                 | 0.015                 | 0.013                 | 0.018                 | 0.013                 | 0.013                 | 0.013                | 0.011                 | 0.015                 | 0.012                 | 0.013                 | 0.020                 | 0.015                 |
| Al    | 2.516                 | 2.620                 | 2.632                 | 2.460                 | 2.506                 | 2.734                 | 2.682                | 2.752                 | 2.516                 | 2.493                 | 2.634                 | 2.581                 | 2.656                 |
| Cr    | 0.003                 | 0.002                 | 0.000                 | 0.005                 | 0.004                 | 0.004                 | 0.000                | 0.002                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.005                 | 0.006                 | 0.003                 |
| Mg    | 0.133                 | 0.115                 | 0.102                 | 0.175                 | 0.158                 | 0.085                 | 0.097                | 0.077                 | 0.143                 | 0.168                 | 0.115                 | 0.124                 | 0.105                 |
| Fe2   | 0.198                 | 0.148                 | 0.144                 | 0.165                 | 0.164                 | 0.133                 | 0.125                | 0.123                 | 0.153                 | 0.149                 | 0.126                 | 0.184                 | 0.167                 |
| Mn    | 0.000                 | 0.001                 | 0.000                 | 0.004                 | 0.003                 | 0.003                 | 0.000                | 0.002                 | 0.004                 | 0.002                 | 0.002                 | 0.007                 | 0.000                 |
| Ca    | 0.001                 | 0.002                 | 0.001                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 |
| Na    | 0.086                 | 0.078                 | 0.108                 | 0.045                 | 0.045                 | 0.054                 | 0.101                | 0.120                 | 0.067                 | 0.061                 | 0.046                 | 0.084                 | 0.095                 |
| K     | 0.879                 | 0.912                 | 0.894                 | 0.895                 | 0.879                 | 0.919                 | 0.854                | 0.830                 | 0.913                 | 0.904                 | 0.905                 | 0.853                 | 0.870                 |
| OH    | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 |
| Sum   | 9.019                 | 9.030                 | 9.032                 | 8.993                 | 8.983                 | 9.024                 | 8.998                | 9.002                 | 9.014                 | 9.006                 | 8.994                 | 9.007                 | 9.024                 |
| XNa   | 0.089                 | 0.079                 | 0.108                 | 0.048                 | 0.049                 | 0.056                 | 0.106                | 0.126                 | 0.068                 | 0.063                 | 0.048                 | 0.089                 | 0.099                 |
|       | FC85<br>msynS1<br>196 | FC85<br>mpost<br>198  | FC85<br>msynS1<br>199 | FC85<br>msynS1<br>200 | FC85<br>mpost<br>203  | FC85<br>mpost<br>206  | FC85<br>mpost<br>207 | FC85<br>mpost<br>213  | FC85<br>mpost<br>214  | FC85<br>mpost<br>218  | FC85<br>mallS2<br>219 | FC85<br>mallS2<br>220 | FC85<br>msynS2<br>221 |
| SiO2  | 47.86                 | 45.91                 | 45.71                 | 45.90                 | 45.64                 | 47.23                 | 46.22                | 47.01                 | 47.43                 | 46.13                 | 46.14                 | 46.03                 | 46.78                 |
| TiO2  | 0.22                  | 0.26                  | 0.18                  | 0.22                  | 0.23                  | 0.20                  | 0.25                 | 0.31                  | 1.08                  | 0.37                  | 0.25                  | 0.31                  | 0.23                  |
| Al2O3 | 30.90                 | 32.53                 | 33.17                 | 32.76                 | 33.62                 | 31.27                 | 33.03                | 31.47                 | 29.78                 | 32.40                 | 32.76                 | 32.55                 | 31.07                 |
| Cr2O3 | 0.00                  | 0.00                  | 0.05                  | 0.00                  | 0.05                  | 0.00                  | 0.00                 | 0.00                  | 0.02                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.04                  | 0.17                  |
| MgO   | 1.43                  | 1.15                  | 0.98                  | 1.03                  | 0.89                  | 1.46                  | 0.97                 | 1.38                  | 1.86                  | 1.07                  | 1.03                  | 1.22                  | 1.42                  |
| FeO   | 3.11                  | 2.74                  | 2.73                  | 2.11                  | 2.41                  | 3.05                  | 3.11                 | 2.92                  | 3.24                  | 3.04                  | 2.88                  | 3.12                  | 3.15                  |
| MnO   | 0.00                  | 0.05                  | 0.03                  | 0.12                  | 0.12                  | 0.00                  | 0.00                 | 0.04                  | 0.00                  | 0.10                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.12                  |
| CaO   | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  |
| Na2O  | 0.46                  | 0.73                  | 0.83                  | 0.65                  | 0.78                  | 0.62                  | 0.83                 | 0.74                  | 0.40                  | 0.80                  | 0.71                  | 0.65                  | 0.66                  |
| K2O   | 9.98                  | 10.46                 | 9.98                  | 9.81                  | 10.05                 | 10.18                 | 9.62                 | 10.02                 | 10.33                 | 10.00                 | 10.50                 | 10.17                 | 9.94                  |
| H2O   | 4.42                  | 4.39                  | 4.39                  | 4.37                  | 4.40                  | 4.41                  | 4.42                 | 4.41                  | 4.40                  | 4.40                  | 4.41                  | 4.40                  | 4.38                  |
| Sum   | 98.38                 | 98.21                 | 98.06                 | 96.97                 | 98.21                 | 98.43                 | 98.45                | 98.30                 | 98.53                 | 98.31                 | 98.69                 | 98.49                 | 97.93                 |
| Si    | 3.245                 | 3.134                 | 3.117                 | 3.149                 | 3.104                 | 3.209                 | 3.135                | 3.197                 | 3.228                 | 3.142                 | 3.134                 | 3.132                 | 3.199                 |
| Ti    | 0.011                 | 0.013                 | 0.009                 | 0.011                 | 0.012                 | 0.010                 | 0.013                | 0.016                 | 0.055                 | 0.019                 | 0.013                 | 0.016                 | 0.012                 |
| Al    | 2.470                 | 2.617                 | 2.666                 | 2.649                 | 2.695                 | 2.505                 | 2.640                | 2.522                 | 2.389                 | 2.601                 | 2.624                 | 2.611                 | 2.504                 |
| Cr    | 0.000                 | 0.000                 | 0.003                 | 0.000                 | 0.003                 | 0.000                 | 0.000                | 0.000                 | 0.001                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.002                 | 0.009                 |
| Mg    | 0.144                 | 0.117                 | 0.100                 | 0.105                 | 0.090                 | 0.148                 | 0.098                | 0.140                 | 0.189                 | 0.109                 | 0.104                 | 0.124                 | 0.145                 |
| Fe2   | 0.176                 | 0.156                 | 0.156                 | 0.121                 | 0.137                 | 0.173                 | 0.176                | 0.166                 | 0.184                 | 0.173                 | 0.163                 | 0.177                 | 0.180                 |
| Mn    | 0.000                 | 0.003                 | 0.002                 | 0.007                 | 0.007                 | 0.000                 | 0.000                | 0.002                 | 0.000                 | 0.006                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.007                 |
| Ca    | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 |
| Na    | 0.060                 | 0.097                 | 0.109                 | 0.086                 | 0.103                 | 0.082                 | 0.110                | 0.098                 | 0.053                 | 0.106                 | 0.094                 | 0.085                 | 0.088                 |
| K     | 0.864                 | 0.911                 | 0.868                 | 0.859                 | 0.872                 | 0.882                 | 0.833                | 0.869                 | 0.897                 | 0.869                 | 0.910                 | 0.883                 | 0.867                 |
| OH    | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 |
| Sum   | 8.971                 | 9.048                 | 9.029                 | 8.988                 | 9.023                 | 9.010                 | 9.004                | 9.010                 | 8.996                 | 9.025                 | 9.043                 | 9.030                 | 9.010                 |
| XNa   | 0.065                 | 0.096                 | 0.112                 | 0.091                 | 0.105                 | 0.085                 | 0.116                | 0.101                 | 0.055                 | 0.109                 | 0.094                 | 0.088                 | 0.092                 |

|       | FC85<br>msynS1<br>223 | FC85<br>msynS1<br>227 | FC85<br>exbord<br>234 | FC85<br>mpost<br>235 | FC85<br>exsenc<br>238 | FC85<br>exsfil<br>246 | FC85<br>exsfil<br>250 | FC85<br>exsbag<br>251 | FC85<br>exsfil<br>260 |  | FC88<br>exsbag<br>411 | FC88<br>exsbag<br>412 | FC88<br>exbord<br>413 |
|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| SiO2  | 46.80                 | 45.66                 | 46.84                 | 47.22                | 46.40                 | 46.54                 | 46.50                 | 50.61                 | 45.99                 |  | 47.94                 | 47.49                 | 45.77                 |
| TiO2  | 0.28                  | 0.27                  | 0.36                  | 0.29                 | 0.27                  | 0.39                  | 0.35                  | 0.20                  | 0.42                  |  | 0.25                  | 0.22                  | 0.07                  |
| Al2O3 | 32.10                 | 33.59                 | 31.26                 | 31.35                | 32.82                 | 32.44                 | 32.37                 | 30.36                 | 31.53                 |  | 31.20                 | 31.27                 | 34.20                 |
| Cr2O3 | 0.12                  | 0.09                  | 0.00                  | 0.00                 | 0.00                  | 0.13                  | 0.00                  | 0.07                  | 0.00                  |  | 0.09                  | 0.05                  | 0.00                  |
| MgO   | 1.13                  | 1.01                  | 1.35                  | 1.39                 | 1.10                  | 1.00                  | 1.10                  | 1.25                  | 1.18                  |  | 1.45                  | 1.60                  | 0.82                  |
| FeO   | 2.01                  | 2.40                  | 2.92                  | 3.51                 | 2.75                  | 2.49                  | 3.08                  | 2.84                  | 3.05                  |  | 2.55                  | 2.37                  | 1.59                  |
| MnO   | 0.12                  | 0.04                  | 0.00                  | 0.04                 | 0.11                  | 0.13                  | 0.07                  | 0.00                  | 0.11                  |  | 0.00                  | 0.03                  | 0.00                  |
| CaO   | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.02                  | 0.00                  |  | 0.00                  | 0.00                  | 0.04                  |
| Na2O  | 0.37                  | 0.68                  | 0.64                  | 0.57                 | 0.70                  | 0.44                  | 0.76                  | 0.51                  | 0.36                  |  | 0.63                  | 0.36                  | 0.73                  |
| K2O   | 10.80                 | 10.09                 | 9.85                  | 10.05                | 10.24                 | 10.27                 | 10.21                 | 9.81                  | 10.30                 |  | 9.77                  | 10.05                 | 10.16                 |
| H2O   | 4.40                  | 4.41                  | 4.38                  | 4.42                 | 4.42                  | 4.41                  | 4.42                  | 4.53                  | 4.35                  |  | 4.43                  | 4.41                  | 4.41                  |
| Sum   | 98.13                 | 98.23                 | 97.61                 | 98.84                | 98.81                 | 98.25                 | 98.86                 | 100.21                | 97.29                 |  | 98.30                 | 97.84                 | 97.78                 |

|     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|-------|-------|-------|
| Si  | 3.185 | 3.103 | 3.203 | 3.200 | 3.141 | 3.163 | 3.152 | 3.348 | 3.168 |  | 3.242 | 3.229 | 3.110 |
| Ti  | 0.014 | 0.014 | 0.018 | 0.015 | 0.014 | 0.020 | 0.018 | 0.010 | 0.022 |  | 0.013 | 0.011 | 0.003 |
| Al  | 2.575 | 2.691 | 2.520 | 2.504 | 2.619 | 2.599 | 2.586 | 2.367 | 2.560 |  | 2.487 | 2.506 | 2.739 |
| Cr  | 0.006 | 0.005 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.007 | 0.000 | 0.004 | 0.000 |  | 0.005 | 0.003 | 0.000 |
| Mg  | 0.115 | 0.102 | 0.138 | 0.141 | 0.111 | 0.102 | 0.111 | 0.124 | 0.121 |  | 0.146 | 0.162 | 0.083 |
| Fe2 | 0.114 | 0.137 | 0.167 | 0.199 | 0.156 | 0.142 | 0.175 | 0.157 | 0.176 |  | 0.144 | 0.135 | 0.090 |
| Mn  | 0.007 | 0.002 | 0.000 | 0.002 | 0.006 | 0.008 | 0.004 | 0.000 | 0.006 |  | 0.000 | 0.002 | 0.000 |
| Ca  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.000 |  | 0.000 | 0.000 | 0.003 |
| Na  | 0.049 | 0.089 | 0.085 | 0.075 | 0.091 | 0.058 | 0.100 | 0.066 | 0.048 |  | 0.082 | 0.047 | 0.096 |
| K   | 0.938 | 0.875 | 0.859 | 0.869 | 0.884 | 0.891 | 0.883 | 0.828 | 0.905 |  | 0.843 | 0.871 | 0.881 |
| OH  | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 |  | 2.000 | 2.000 | 2.000 |
| Sum | 9.003 | 9.017 | 8.991 | 9.005 | 9.023 | 8.989 | 9.029 | 8.904 | 9.007 |  | 8.962 | 8.966 | 9.005 |

|     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|-------|-------|-------|
| XNa | 0.049 | 0.093 | 0.090 | 0.080 | 0.094 | 0.062 | 0.102 | 0.074 | 0.050 |  | 0.089 | 0.052 | 0.098 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|-------|-------|-------|

|       | FC88<br>mpost<br>414 | FC88<br>msynS1<br>416 | FC88<br>msynS1<br>417 | FC88<br>msynS1<br>418 | FC88<br>mpost<br>420 | FC88<br>mpost<br>423 | FC88<br>mpost<br>424 | FC88<br>mpost<br>425 | FC88<br>mpost<br>426 | FC88<br>msynS1<br>427 | FC88<br>exbord<br>428 | FC88<br>exsfil<br>449 | FC88<br>mpost<br>450 |
|-------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| SiO2  | 45.97                | 45.12                 | 46.26                 | 46.67                 | 45.96                | 45.96                | 46.68                | 45.09                | 45.32                | 45.72                 | 43.67                 | 47.66                 | 44.74                |
| TiO2  | 0.17                 | 0.05                  | 0.20                  | 0.17                  | 0.24                 | 0.24                 | 0.18                 | 0.35                 | 0.19                 | 0.18                  | 0.29                  | 0.18                  | 0.25                 |
| Al2O3 | 33.08                | 33.25                 | 32.72                 | 31.93                 | 33.83                | 33.83                | 34.00                | 35.08                | 34.08                | 33.92                 | 33.58                 | 30.73                 | 33.67                |
| Cr2O3 | 0.05                 | 0.00                  | 0.00                  | 0.06                  | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.06                 | 0.00                 | 0.03                  | 0.04                  | 0.03                  | 0.00                 |
| MgO   | 1.14                 | 1.09                  | 1.14                  | 1.28                  | 0.88                 | 0.88                 | 0.94                 | 0.80                 | 0.85                 | 0.94                  | 0.91                  | 1.69                  | 1.40                 |
| FeO   | 2.29                 | 1.82                  | 1.99                  | 2.05                  | 1.71                 | 1.71                 | 1.84                 | 2.00                 | 1.69                 | 1.55                  | 1.87                  | 2.69                  | 3.72                 |
| MnO   | 0.00                 | 0.05                  | 0.00                  | 0.04                  | 0.07                 | 0.07                 | 0.01                 | 0.06                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.13                  | 0.12                  | 0.00                 |
| CaO   | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.02                 | 0.00                 | 0.02                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.02                 |
| Na2O  | 0.56                 | 0.63                  | 0.68                  | 0.51                  | 1.04                 | 1.04                 | 0.87                 | 1.13                 | 1.13                 | 0.96                  | 0.45                  | 0.49                  | 0.52                 |
| K2O   | 9.33                 | 9.81                  | 9.95                  | 10.38                 | 9.30                 | 9.30                 | 9.41                 | 9.20                 | 9.22                 | 9.51                  | 10.21                 | 9.83                  | 9.59                 |
| H2O   | 4.38                 | 4.33                  | 4.39                  | 4.38                  | 4.41                 | 4.41                 | 4.45                 | 4.43                 | 4.38                 | 4.40                  | 4.28                  | 4.40                  | 4.39                 |
| Sum   | 96.97                | 96.16                 | 97.33                 | 97.46                 | 97.44                | 97.44                | 98.37                | 98.23                | 96.84                | 97.23                 | 95.44                 | 97.83                 | 98.30                |

|     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Si  | 3.144 | 3.118 | 3.160 | 3.191 | 3.124 | 3.124 | 3.140 | 3.048 | 3.100 | 3.115 | 3.056 | 3.245 | 3.052 |
| Ti  | 0.009 | 0.002 | 0.011 | 0.009 | 0.012 | 0.012 | 0.009 | 0.018 | 0.010 | 0.009 | 0.015 | 0.009 | 0.013 |
| Al  | 2.666 | 2.709 | 2.634 | 2.573 | 2.710 | 2.710 | 2.696 | 2.795 | 2.747 | 2.724 | 2.770 | 2.466 | 2.708 |
| Cr  | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.003 | 0.000 | 0.002 | 0.002 | 0.001 | 0.000 |
| Mg  | 0.116 | 0.112 | 0.116 | 0.131 | 0.090 | 0.090 | 0.094 | 0.081 | 0.086 | 0.095 | 0.095 | 0.172 | 0.142 |
| Fe2 | 0.131 | 0.105 | 0.114 | 0.117 | 0.097 | 0.097 | 0.103 | 0.113 | 0.097 | 0.089 | 0.110 | 0.153 | 0.212 |
| Mn  | 0.000 | 0.003 | 0.000 | 0.002 | 0.004 | 0.004 | 0.001 | 0.004 | 0.000 | 0.000 | 0.008 | 0.007 | 0.000 |
| Ca  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.002 | 0.000 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.002 |
| Na  | 0.075 | 0.085 | 0.090 | 0.067 | 0.137 | 0.137 | 0.114 | 0.148 | 0.149 | 0.127 | 0.061 | 0.065 | 0.068 |
| K   | 0.814 | 0.865 | 0.867 | 0.905 | 0.806 | 0.806 | 0.807 | 0.794 | 0.805 | 0.827 | 0.911 | 0.854 | 0.834 |
| OH  | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 |
| Sum | 8.957 | 9.000 | 8.991 | 8.998 | 8.980 | 8.980 | 8.964 | 9.005 | 8.994 | 8.989 | 9.028 | 8.972 | 9.032 |

|     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| XNa | 0.084 | 0.089 | 0.094 | 0.069 | 0.145 | 0.145 | 0.123 | 0.157 | 0.157 | 0.133 | 0.063 | 0.071 | 0.076 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

|       | FC88<br>mpost<br>454 | FC88<br>mpost<br>455 | FC88<br>mpost<br>456 | FC88<br>mpost<br>457 | FC88<br>mpost<br>458 | FC88<br>exsbord<br>460 | FC88<br>mpost<br>463 | FC88<br>msynS1<br>465 | FC88<br>exsfil<br>469 | FC88<br>exsfil<br>470 | FC88<br>exsfil<br>471 | FC88<br>exsfil<br>473 | FC88<br>exsfil<br>479 |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| SiO2  | 46.96                | 45.43                | 46.40                | 44.90                | 46.39                | 47.04                  | 45.54                | 44.95                 | 46.18                 | 46.06                 | 45.63                 | 47.28                 | 47.70                 |
| TiO2  | 0.22                 | 0.23                 | 0.25                 | 0.11                 | 0.20                 | 0.16                   | 0.00                 | 0.29                  | 0.23                  | 0.26                  | 0.25                  | 0.31                  | 0.25                  |
| Al2O3 | 33.15                | 34.03                | 33.85                | 34.10                | 34.12                | 32.99                  | 33.72                | 33.66                 | 32.23                 | 33.69                 | 31.54                 | 30.59                 | 31.21                 |
| Cr2O3 | 0.08                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.03                 | 0.06                   | 0.00                 | 0.11                  | 0.00                  | 0.04                  | 0.00                  | 0.09                  | 0.06                  |
| MgO   | 1.14                 | 0.78                 | 0.92                 | 0.81                 | 0.85                 | 1.22                   | 0.81                 | 0.97                  | 1.35                  | 0.95                  | 1.19                  | 1.63                  | 1.67                  |
| FeO   | 1.89                 | 2.05                 | 1.97                 | 1.70                 | 1.85                 | 2.03                   | 1.62                 | 2.33                  | 2.47                  | 1.87                  | 2.12                  | 2.77                  | 2.66                  |
| MnO   | 0.00                 | 0.00                 | 0.03                 | 0.12                 | 0.00                 | 0.07                   | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.01                  | 0.00                  |
| CaO   | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.02                   | 0.07                 | 0.00                  | 0.00                  | 0.03                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  |
| Na2O  | 0.84                 | 0.67                 | 1.10                 | 0.69                 | 1.03                 | 0.45                   | 0.81                 | 0.86                  | 0.49                  | 0.78                  | 0.54                  | 0.64                  | 0.48                  |
| K2O   | 10.14                | 10.05                | 9.44                 | 10.09                | 9.45                 | 10.34                  | 10.04                | 9.88                  | 9.56                  | 9.97                  | 10.00                 | 9.86                  | 10.03                 |
| H2O   | 4.45                 | 4.39                 | 4.44                 | 4.36                 | 4.45                 | 4.45                   | 4.37                 | 4.37                  | 4.37                  | 4.42                  | 4.30                  | 4.38                  | 4.43                  |
| Sum   | 98.86                | 97.64                | 98.40                | 96.88                | 98.38                | 98.82                  | 96.99                | 97.43                 | 96.89                 | 98.06                 | 95.57                 | 97.56                 | 98.50                 |
| Si    | 3.159                | 3.098                | 3.128                | 3.085                | 3.125                | 3.168                  | 3.121                | 3.080                 | 3.168                 | 3.123                 | 3.180                 | 3.233                 | 3.227                 |
| Ti    | 0.011                | 0.012                | 0.013                | 0.006                | 0.010                | 0.008                  | 0.000                | 0.015                 | 0.012                 | 0.014                 | 0.013                 | 0.016                 | 0.013                 |
| Al    | 2.629                | 2.735                | 2.690                | 2.762                | 2.709                | 2.618                  | 2.724                | 2.719                 | 2.606                 | 2.692                 | 2.590                 | 2.465                 | 2.488                 |
| Cr    | 0.004                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.002                | 0.003                  | 0.000                | 0.006                 | 0.000                 | 0.002                 | 0.000                 | 0.005                 | 0.003                 |
| Mg    | 0.114                | 0.079                | 0.093                | 0.083                | 0.085                | 0.122                  | 0.082                | 0.099                 | 0.138                 | 0.096                 | 0.124                 | 0.167                 | 0.169                 |
| Fe2   | 0.106                | 0.117                | 0.111                | 0.097                | 0.104                | 0.114                  | 0.093                | 0.133                 | 0.142                 | 0.106                 | 0.124                 | 0.158                 | 0.151                 |
| Mn    | 0.000                | 0.000                | 0.001                | 0.007                | 0.000                | 0.004                  | 0.000                | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 |
| Ca    | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.002                  | 0.005                | 0.000                 | 0.000                 | 0.002                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 |
| Na    | 0.109                | 0.089                | 0.143                | 0.092                | 0.134                | 0.059                  | 0.108                | 0.114                 | 0.065                 | 0.102                 | 0.073                 | 0.085                 | 0.063                 |
| K     | 0.870                | 0.874                | 0.812                | 0.884                | 0.812                | 0.888                  | 0.877                | 0.864                 | 0.836                 | 0.862                 | 0.889                 | 0.860                 | 0.865                 |
| OH    | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                  | 2.000                | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                 |
| Sum   | 9.003                | 9.004                | 8.991                | 9.017                | 8.982                | 8.987                  | 9.010                | 9.031                 | 8.968                 | 8.999                 | 8.993                 | 8.989                 | 8.979                 |
| XNa   | 0.111                | 0.092                | 0.150                | 0.095                | 0.142                | 0.062                  | 0.110                | 0.117                 | 0.072                 | 0.106                 | 0.076                 | 0.090                 | 0.068                 |

|       | FC92<br>msynS2<br>173 | FC92<br>msynS2<br>174 | FC92<br>mpost<br>178 | FC92<br>mpost<br>179 | FC92<br>msynS2<br>183 | FC92<br>exsbord<br>186 | FC92<br>exsba<br>187 | FC92<br>exsba<br>189 | FC92<br>exsba<br>190 | FC92<br>exsbord<br>193 | FC92<br>mpost<br>194 | FC92<br>mpost<br>195 | FC92<br>msynS1<br>198 |
|-------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| SiO2  | 46.28                 | 44.60                 | 45.68                | 46.35                | 46.04                 | 46.74                  | 48.10                | 47.19                | 46.59                | 46.65                  | 46.58                | 45.49                | 45.36                 |
| TiO2  | 0.10                  | 0.00                  | 0.00                 | 0.00                 | 0.03                  | 0.00                   | 0.00                 | 0.00                 | 0.11                 | 0.00                   | 0.08                 | 0.07                 | 0.00                  |
| Al2O3 | 32.97                 | 34.51                 | 32.32                | 31.74                | 32.53                 | 31.43                  | 29.51                | 30.83                | 31.94                | 29.91                  | 31.64                | 33.91                | 34.55                 |
| Cr2O3 | 0.00                  | 0.01                  | 0.00                 | 0.16                 | 0.12                  | 0.10                   | 0.00                 | 0.08                 | 0.11                 | 0.00                   | 0.00                 | 0.09                 | 0.03                  |
| MgO   | 1.06                  | 0.68                  | 1.33                 | 1.30                 | 1.15                  | 1.41                   | 1.96                 | 1.68                 | 1.26                 | 1.62                   | 1.29                 | 0.92                 | 0.75                  |
| FeO   | 2.00                  | 1.49                  | 2.66                 | 2.51                 | 2.47                  | 2.75                   | 3.21                 | 2.04                 | 2.30                 | 2.68                   | 2.84                 | 2.19                 | 2.03                  |
| MnO   | 0.00                  | 0.00                  | 0.10                 | 0.00                 | 0.05                  | 0.03                   | 0.00                 | 0.12                 | 0.00                 | 0.12                   | 0.00                 | 0.01                 | 0.01                  |
| CaO   | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                   | 0.00                 | 0.05                 | 0.00                 | 0.00                   | 0.01                 | 0.00                 | 0.02                  |
| Na2O  | 0.75                  | 0.56                  | 0.70                 | 0.62                 | 0.70                  | 0.46                   | 0.43                 | 0.27                 | 0.62                 | 0.39                   | 0.64                 | 0.67                 | 0.98                  |
| K2O   | 9.81                  | 10.25                 | 9.76                 | 9.69                 | 9.85                  | 10.04                  | 9.84                 | 10.31                | 10.34                | 9.58                   | 9.90                 | 9.90                 | 9.73                  |
| H2O   | 4.39                  | 4.35                  | 4.35                 | 4.35                 | 4.37                  | 4.37                   | 4.38                 | 4.36                 | 4.38                 | 4.29                   | 4.37                 | 4.39                 | 4.41                  |
| Sum   | 97.37                 | 96.45                 | 96.89                | 96.72                | 97.31                 | 97.32                  | 97.42                | 96.92                | 97.66                | 95.24                  | 97.36                | 97.64                | 97.87                 |
| Si    | 3.157                 | 3.074                 | 3.146                | 3.190                | 3.154                 | 3.204                  | 3.293                | 3.241                | 3.184                | 3.260                  | 3.193                | 3.102                | 3.083                 |
| Ti    | 0.005                 | 0.000                 | 0.000                | 0.000                | 0.001                 | 0.000                  | 0.000                | 0.000                | 0.006                | 0.000                  | 0.004                | 0.003                | 0.000                 |
| Al    | 2.651                 | 2.804                 | 2.624                | 2.575                | 2.627                 | 2.540                  | 2.382                | 2.495                | 2.573                | 2.463                  | 2.556                | 2.725                | 2.768                 |
| Cr    | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                | 0.009                | 0.006                 | 0.006                  | 0.000                | 0.004                | 0.006                | 0.000                  | 0.000                | 0.005                | 0.002                 |
| Mg    | 0.108                 | 0.070                 | 0.136                | 0.134                | 0.118                 | 0.144                  | 0.200                | 0.172                | 0.129                | 0.168                  | 0.132                | 0.094                | 0.076                 |
| Fe2   | 0.114                 | 0.086                 | 0.153                | 0.144                | 0.141                 | 0.158                  | 0.184                | 0.117                | 0.132                | 0.157                  | 0.163                | 0.125                | 0.115                 |
| Mn    | 0.000                 | 0.000                 | 0.006                | 0.000                | 0.003                 | 0.002                  | 0.000                | 0.007                | 0.000                | 0.007                  | 0.000                | 0.001                | 0.001                 |
| Ca    | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                | 0.000                | 0.000                 | 0.000                  | 0.000                | 0.004                | 0.000                | 0.000                  | 0.001                | 0.000                | 0.001                 |
| Na    | 0.099                 | 0.075                 | 0.094                | 0.083                | 0.093                 | 0.061                  | 0.056                | 0.036                | 0.082                | 0.053                  | 0.085                | 0.089                | 0.129                 |
| K     | 0.854                 | 0.902                 | 0.857                | 0.851                | 0.861                 | 0.878                  | 0.859                | 0.903                | 0.901                | 0.854                  | 0.866                | 0.862                | 0.844                 |
| OH    | 2.000                 | 2.000                 | 2.000                | 2.000                | 2.000                 | 2.000                  | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                  | 2.000                | 2.000                | 2.000                 |
| Sum   | 8.989                 | 9.012                 | 9.017                | 8.985                | 9.005                 | 8.992                  | 8.974                | 8.979                | 9.012                | 8.962                  | 9.000                | 9.005                | 9.019                 |
| XNa   | 0.104                 | 0.077                 | 0.099                | 0.089                | 0.097                 | 0.065                  | 0.062                | 0.038                | 0.083                | 0.059                  | 0.090                | 0.093                | 0.133                 |

|       | FC92<br>msynS1<br>200 | FC97<br>incl<br>29 | FC97<br>incl<br>30 | FC97<br>acco1<br>32 | FC97<br>mpost<br>38 | FC97<br>msynS2<br>40 | FC97<br>mpost<br>44 | FC97<br>mpost<br>45 | FC97<br>msynS2<br>48 | FC97<br>msynS2<br>54 | FC97<br>msynS1<br>55 | FC97<br>mpost<br>58 | FC97<br>msynS1<br>60 |
|-------|-----------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| SiO2  | 46.58                 | 46.77              | 45.40              | 44.14               | 45.42               | 46.05                | 44.53               | 44.47               | 44.17                | 45.89                | 43.40                | 45.44               | 44.11                |
| TiO2  | 0.05                  | 0.21               | 0.12               | 0.29                | 0.28                | 0.23                 | 0.14                | 0.21                | 0.23                 | 0.29                 | 0.26                 | 0.09                | 0.29                 |
| Al2O3 | 30.85                 | 34.79              | 34.71              | 33.36               | 34.44               | 33.94                | 34.25               | 34.05               | 33.83                | 33.07                | 32.31                | 34.50               | 34.46                |
| Cr2O3 | 0.04                  | 0.01               | 0.00               | 0.00                | 0.00                | 0.07                 | 0.14                | 0.03                | 0.00                 | 0.07                 | 0.09                 | 0.11                | 0.00                 |
| MgO   | 1.54                  | 0.60               | 0.61               | 0.83                | 0.60                | 0.62                 | 0.71                | 0.71                | 0.75                 | 0.92                 | 1.71                 | 0.62                | 0.65                 |
| FeO   | 3.19                  | 1.77               | 1.68               | 2.46                | 1.99                | 2.05                 | 2.19                | 2.05                | 2.06                 | 2.40                 | 6.53                 | 2.04                | 2.18                 |
| MnO   | 0.18                  | 0.00               | 0.00               | 0.00                | 0.02                | 0.00                 | 0.05                | 0.08                | 0.04                 | 0.00                 | 0.04                 | 0.03                | 0.00                 |
| CaO   | 0.00                  | 0.05               | 0.00               | 0.00                | 0.00                | 0.00                 | 0.00                | 0.00                | 0.00                 | 0.00                 | 0.04                 | 0.00                | 0.00                 |
| Na2O  | 0.49                  | 1.04               | 1.20               | 0.69                | 1.12                | 1.12                 | 1.13                | 1.07                | 0.73                 | 0.77                 | 0.44                 | 1.13                | 1.01                 |
| K2O   | 9.77                  | 9.41               | 9.39               | 10.19               | 9.40                | 9.22                 | 9.28                | 9.32                | 9.77                 | 10.05                | 8.75                 | 9.61                | 10.02                |
| H2O   | 4.35                  | 4.49               | 4.41               | 4.31                | 4.41                | 4.41                 | 4.36                | 4.34                | 4.31                 | 4.39                 | 4.32                 | 4.41                | 4.35                 |
| Sum   | 97.05                 | 99.13              | 97.51              | 96.27               | 97.66               | 97.70                | 96.78               | 96.33               | 95.88                | 97.86                | 97.89                | 97.99               | 97.06                |
| Si    | 3.209                 | 3.121              | 3.086              | 3.070               | 3.088               | 3.124                | 3.062               | 3.071               | 3.069                | 3.129                | 3.011                | 3.085               | 3.038                |
| Ti    | 0.002                 | 0.010              | 0.006              | 0.015               | 0.014               | 0.012                | 0.008               | 0.011               | 0.012                | 0.015                | 0.014                | 0.005               | 0.015                |
| Al    | 2.505                 | 2.737              | 2.781              | 2.735               | 2.760               | 2.714                | 2.777               | 2.771               | 2.771                | 2.658                | 2.643                | 2.761               | 2.797                |
| Cr    | 0.002                 | 0.000              | 0.000              | 0.000               | 0.000               | 0.004                | 0.007               | 0.002               | 0.000                | 0.004                | 0.005                | 0.006               | 0.000                |
| Mg    | 0.158                 | 0.060              | 0.062              | 0.086               | 0.061               | 0.063                | 0.073               | 0.073               | 0.077                | 0.093                | 0.177                | 0.063               | 0.067                |
| Fe2   | 0.184                 | 0.099              | 0.095              | 0.143               | 0.113               | 0.116                | 0.126               | 0.118               | 0.120                | 0.137                | 0.379                | 0.116               | 0.125                |
| Mn    | 0.011                 | 0.000              | 0.000              | 0.000               | 0.001               | 0.000                | 0.003               | 0.005               | 0.002                | 0.000                | 0.002                | 0.002               | 0.000                |
| Ca    | 0.000                 | 0.004              | 0.000              | 0.000               | 0.000               | 0.000                | 0.000               | 0.000               | 0.000                | 0.000                | 0.003                | 0.000               | 0.000                |
| Na    | 0.066                 | 0.134              | 0.158              | 0.093               | 0.148               | 0.147                | 0.150               | 0.144               | 0.098                | 0.102                | 0.060                | 0.149               | 0.134                |
| K     | 0.859                 | 0.801              | 0.814              | 0.905               | 0.815               | 0.798                | 0.815               | 0.821               | 0.866                | 0.875                | 0.774                | 0.833               | 0.880                |
| OH    | 2.000                 | 2.000              | 2.000              | 2.000               | 2.000               | 2.000                | 2.000               | 2.000               | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000               | 2.000                |
| Sum   | 8.997                 | 8.967              | 9.003              | 9.046               | 9.000               | 8.978                | 9.021               | 9.014               | 9.015                | 9.013                | 9.068                | 9.018               | 9.056                |
| XNa   | 0.07                  | 0.144              | 0.163              | 0.093               | 0.153               | 0.155                | 0.156               | 0.149               | 0.102                | 0.104                | 0.072                | 0.152               | 0.133                |

|       | FC97<br>msynS2<br>64 | FC97<br>msynS1<br>65 | FC97<br>msynS2<br>69 | FC97<br>msynS1<br>73 | FC97<br>msynS1<br>74 | FC99<br>msynS1<br>3 | FC99<br>msynS1<br>4 | FC99<br>msynS1<br>8 | FC99<br>msynS1<br>10 | FC99<br>mpost<br>11 | FC99<br>mpost<br>21 |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| SiO2  | 46.00                | 46.63                | 46.48                | 45.19                | 45.51                | 47.51               | 47.00               | 48.14               | 46.90                | 49.13               | 47.67               |
| TiO2  | 0.28                 | 0.34                 | 0.29                 | 0.28                 | 0.23                 | 0.40                | 0.42                | 0.27                | 0.33                 | 0.14                | 0.31                |
| Al2O3 | 34.35                | 33.62                | 33.41                | 34.18                | 34.81                | 29.13               | 27.88               | 28.08               | 29.42                | 26.34               | 27.39               |
| Cr2O3 | 0.12                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.07                 | 0.00                 | 0.11                | 0.00                | 0.06                | 0.00                 | 0.10                | 0.00                |
| MgO   | 0.81                 | 0.96                 | 0.97                 | 0.56                 | 0.83                 | 1.18                | 1.39                | 1.44                | 1.20                 | 1.68                | 1.40                |
| FeO   | 1.84                 | 2.29                 | 2.44                 | 2.03                 | 2.06                 | 5.36                | 5.03                | 5.27                | 5.64                 | 6.31                | 6.25                |
| MnO   | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.10                | 0.00                | 0.09                | 0.03                 | 0.05                | 0.01                |
| CaO   | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.05                | 0.04                | 0.08                | 0.00                 | 0.00                | 0.00                |
| Na2O  | 1.03                 | 0.61                 | 0.63                 | 1.08                 | 0.93                 | 0.13                | 0.11                | 0.09                | 0.14                 | 0.02                | 0.10                |
| K2O   | 9.85                 | 10.24                | 10.00                | 9.63                 | 9.71                 | 11.16               | 10.31               | 11.17               | 11.05                | 11.15               | 11.13               |
| H2O   | 4.45                 | 4.46                 | 4.44                 | 4.39                 | 4.44                 | 4.38                | 4.27                | 4.37                | 4.36                 | 4.36                | 4.32                |
| Sum   | 98.73                | 99.16                | 98.66                | 97.41                | 98.51                | 99.51               | 96.46               | 99.06               | 99.07                | 99.31               | 98.59               |
| Si    | 3.098                | 3.133                | 3.138                | 3.087                | 3.072                | 3.248               | 3.294               | 3.302               | 3.224                | 3.375               | 3.303               |
| Ti    | 0.014                | 0.017                | 0.015                | 0.014                | 0.012                | 0.021               | 0.022               | 0.014               | 0.017                | 0.007               | 0.016               |
| Al    | 2.727                | 2.662                | 2.658                | 2.752                | 2.769                | 2.348               | 2.304               | 2.271               | 2.384                | 2.133               | 2.237               |
| Cr    | 0.006                | 0.000                | 0.000                | 0.004                | 0.000                | 0.006               | 0.000               | 0.003               | 0.000                | 0.006               | 0.000               |
| Mg    | 0.081                | 0.097                | 0.097                | 0.058                | 0.083                | 0.120               | 0.146               | 0.147               | 0.123                | 0.172               | 0.145               |
| Fe2   | 0.104                | 0.129                | 0.138                | 0.116                | 0.116                | 0.306               | 0.295               | 0.302               | 0.324                | 0.363               | 0.362               |
| Mn    | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.006               | 0.000               | 0.005               | 0.002                | 0.003               | 0.000               |
| Ca    | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.004               | 0.003               | 0.006               | 0.000                | 0.000               | 0.000               |
| Na    | 0.135                | 0.080                | 0.083                | 0.143                | 0.122                | 0.017               | 0.015               | 0.012               | 0.018                | 0.003               | 0.014               |
| K     | 0.847                | 0.878                | 0.862                | 0.839                | 0.836                | 0.973               | 0.922               | 0.978               | 0.969                | 0.977               | 0.984               |
| OH    | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000                | 2.000               | 2.000               | 2.000               | 2.000                | 2.000               | 2.000               |
| Sum   | 9.012                | 8.997                | 8.990                | 9.012                | 9.011                | 9.049               | 9.001               | 9.041               | 9.061                | 9.039               | 9.061               |
| XNa   | 0.137                | 0.083                | 0.087                | 0.145                | 0.127                | 0.018               | 0.016               | 0.012               | 0.018                | 0.003               | 0.014               |

## Analyses des chlortites

|       | EC21<br>exbord<br>119 | EC21<br>exbord<br>120 | EC21<br>exbord<br>122 | EC21<br>mpost<br>142 | EC21<br>exbord<br>145 | EC21<br>mallS2<br>164 | EC27<br>exsfil<br>284 | EC27<br>exsfil<br>285 | EC27<br>exsenc<br>288 | EC27<br>exsenc<br>289 | EC27<br>exsenc<br>290 | EC27<br>msynS2<br>307 |
|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| SiO2  | 26.84                 | 28.19                 | 30.01                 | 28.07                | 28.70                 | 26.69                 | 23.31                 | 23.76                 | 22.28                 | 23.67                 | 23.89                 | 26.45                 |
| TiO2  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                 | 0.14                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.38                  | 0.14                  | 0.11                  | 0.08                  |
| Al2O3 | 18.02                 | 17.07                 | 15.42                 | 17.04                | 17.33                 | 17.99                 | 22.28                 | 21.38                 | 22.56                 | 22.35                 | 21.62                 | 24.57                 |
| Cr2O3 | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                  | 0.03                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  |
| MgO   | 14.27                 | 14.79                 | 15.16                 | 14.89                | 14.48                 | 14.51                 | 11.04                 | 11.36                 | 10.46                 | 11.10                 | 11.42                 | 9.11                  |
| FeO   | 27.00                 | 27.00                 | 26.60                 | 27.30                | 25.27                 | 26.85                 | 30.39                 | 29.79                 | 29.48                 | 29.81                 | 29.41                 | 26.67                 |
| MnO   | 0.23                  | 0.12                  | 0.34                  | 0.29                 | 0.13                  | 0.22                  | 0.28                  | 0.46                  | 0.22                  | 0.24                  | 0.50                  | 0.23                  |
| CaO   | 0.00                  | 0.08                  | 0.60                  | 0.13                 | 0.11                  | 0.01                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  |
| Na2O  | 0.00                  | 0.00                  | 0.04                  | 0.05                 | 0.01                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.07                  | 0.01                  | 0.05                  | 0.00                  | 0.06                  |
| K2O   | 0.00                  | 0.48                  | 0.00                  | 0.10                 | 1.14                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.02                  | 0.04                  | 1.34                  |
| H2O   | 11.09                 | 11.27                 | 11.39                 | 11.28                | 11.29                 | 11.08                 | 10.97                 | 10.92                 | 10.74                 | 11.02                 | 10.98                 | 11.42                 |
| Sum   | 97.46                 | 99.00                 | 99.56                 | 99.14                | 98.61                 | 97.35                 | 98.30                 | 97.74                 | 96.13                 | 98.41                 | 97.97                 | 99.94                 |
| Si    | 2.900                 | 2.997                 | 3.156                 | 2.982                | 3.045                 | 2.886                 | 2.546                 | 2.607                 | 2.486                 | 2.572                 | 2.608                 | 2.775                 |
| Ti    | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                | 0.011                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.032                 | 0.011                 | 0.009                 | 0.006                 |
| Al    | 2.295                 | 2.139                 | 1.912                 | 2.134                | 2.168                 | 2.293                 | 2.869                 | 2.764                 | 2.968                 | 2.864                 | 2.782                 | 3.038                 |
| Cr    | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                | 0.000                 | 0.000                 | 0.003                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 |
| Mg    | 2.298                 | 2.343                 | 2.377                 | 2.357                | 2.291                 | 2.339                 | 1.798                 | 1.857                 | 1.739                 | 1.799                 | 1.859                 | 1.425                 |
| Fe2   | 2.440                 | 2.401                 | 2.341                 | 2.426                | 2.243                 | 2.429                 | 2.777                 | 2.733                 | 2.751                 | 2.710                 | 2.685                 | 2.340                 |
| Mn    | 0.021                 | 0.011                 | 0.030                 | 0.026                | 0.012                 | 0.020                 | 0.026                 | 0.042                 | 0.021                 | 0.022                 | 0.046                 | 0.020                 |
| Ca    | 0.000                 | 0.009                 | 0.068                 | 0.015                | 0.012                 | 0.002                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 |
| Na    | 0.000                 | 0.001                 | 0.009                 | 0.010                | 0.003                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.015                 | 0.003                 | 0.010                 | 0.000                 | 0.013                 |
| K     | 0.000                 | 0.065                 | 0.000                 | 0.013                | 0.154                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.003                 | 0.005                 | 0.179                 |
| OH    | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 |
| Sum   | 17.953                | 17.966                | 17.892                | 17.963               | 17.939                | 17.968                | 18.018                | 18.019                | 18.000                | 17.991                | 17.994                | 17.796                |
| XFe   | 0.515                 | 0.506                 | 0.496                 | 0.507                | 0.495                 | 0.509                 | 0.607                 | 0.595                 | 0.613                 | 0.601                 | 0.591                 | 0.622                 |

|       | EC25<br>mallS2<br>2 | EC25<br>msynS1<br>16 | EC25<br>mpost<br>21 | EC25<br>exbord<br>27 | EC25<br>exbord<br>28 | EC25<br>exbord<br>29 | EC25<br>exbord<br>47 | EC25<br>exbord<br>57 | EC25<br>exbord<br>58 | EC25<br>exbord<br>63 | EC25<br>exbord<br>67 | EC25<br>exbord<br>83 |
|-------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| SiO2  | 23.82               | 25.45                | 28.63               | 25.08                | 24.88                | 24.74                | 24.50                | 24.21                | 25.26                | 24.67                | 25.40                | 24.60                |
| TiO2  | 0.00                | 0.00                 | 0.00                | 0.00                 | 0.11                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.03                 | 0.00                 |
| Al2O3 | 21.39               | 21.22                | 23.42               | 21.44                | 31.35                | 21.90                | 21.94                | 22.03                | 21.15                | 22.08                | 21.58                | 20.60                |
| Cr2O3 | 0.16                | 0.00                 | 0.00                | 0.00                 | 0.08                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 |
| MgO   | 13.26               | 13.92                | 11.52               | 14.42                | 2.05                 | 14.14                | 14.73                | 14.04                | 14.29                | 13.92                | 14.54                | 14.60                |
| FeO   | 26.12               | 25.83                | 22.85               | 26.00                | 26.37                | 26.65                | 27.35                | 26.32                | 26.97                | 26.92                | 26.99                | 26.44                |
| MnO   | 0.25                | 0.15                 | 0.16                | 0.39                 | 0.13                 | 0.23                 | 0.34                 | 0.18                 | 0.19                 | 0.08                 | 0.18                 | 0.25                 |
| CaO   | 0.03                | 0.00                 | 0.05                | 0.01                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.04                 | 0.08                 | 0.03                 | 0.00                 |
| Na2O  | 0.00                | 0.05                 | 0.06                | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.04                 | 0.00                 | 0.02                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.05                 |
| K2O   | 0.00                | 0.00                 | 0.87                | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 |
| H2O   | 10.91               | 11.21                | 11.62               | 11.27                | 11.19                | 11.28                | 11.38                | 11.17                | 11.30                | 11.28                | 11.42                | 11.11                |
| Sum   | 95.95               | 97.83                | 99.18               | 98.61                | 96.18                | 98.94                | 100.28               | 97.94                | 99.24                | 99.03                | 100.18               | 97.65                |
| Si    | 2.615               | 2.721                | 2.952               | 2.667                | 2.665                | 2.629                | 2.580                | 2.598                | 2.679                | 2.621                | 2.665                | 2.654                |
| Ti    | 0.000               | 0.000                | 0.000               | 0.000                | 0.009                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.002                | 0.000                |
| Al    | 2.769               | 2.674                | 2.848               | 2.688                | 3.959                | 2.742                | 2.724                | 2.786                | 2.644                | 2.764                | 2.669                | 2.620                |
| Cr    | 0.014               | 0.000                | 0.000               | 0.000                | 0.007                | 0.001                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                |
| Mg    | 2.170               | 2.219                | 1.771               | 2.286                | 0.327                | 2.240                | 2.312                | 2.246                | 2.260                | 2.204                | 2.274                | 2.349                |
| Fe2   | 2.399               | 2.310                | 1.971               | 2.313                | 2.363                | 2.368                | 2.409                | 2.362                | 2.392                | 2.392                | 2.368                | 2.385                |
| Mn    | 0.023               | 0.013                | 0.014               | 0.035                | 0.012                | 0.020                | 0.030                | 0.017                | 0.017                | 0.007                | 0.016                | 0.022                |
| Ca    | 0.004               | 0.000                | 0.005               | 0.002                | 0.002                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.005                | 0.009                | 0.003                | 0.000                |
| Na    | 0.000               | 0.010                | 0.012               | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.008                | 0.000                | 0.004                | 0.000                | 0.001                | 0.010                |
| K     | 0.000               | 0.000                | 0.114               | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                |
| OH    | 8.000               | 8.000                | 8.000               | 8.000                | 8.000                | 8.000                | 8.000                | 8.000                | 8.000                | 8.000                | 8.000                | 8.000                |
| Sum   | 17.994              | 17.947               | 17.687              | 17.990               | 17.343               | 18.000               | 18.063               | 18.009               | 18.001               | 17.997               | 17.999               | 18.041               |
| XFe   | 0.525               | 0.510                | 0.527               | 0.503                | 0.879                | 0.514                | 0.510                | 0.513                | 0.514                | 0.520                | 0.510                | 0.504                |

|       | EC3<br>msynS2<br>94 | EC3<br>mpost<br>100 | EC3<br>expost<br>110 | EC3<br>exsfil<br>142 | FC17<br>exsenc<br>326 | FC17<br>exsfil<br>329 | FC17<br>exsfil<br>332 | FC17<br>exsfil<br>335 | FC17<br>msynS2<br>341 | FC17<br>msynS1<br>351 | FC17<br>exbord<br>353 | FC17<br>exsenc<br>357 |                     |
|-------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|
| SiO2  | 24.77               | 24.47               | 23.61                | 23.44                | 24.38                 | 24.23                 | 24.59                 | 23.80                 | 24.05                 | 24.17                 | 24.43                 | 23.94                 |                     |
| TiO2  | 0.11                | 0.03                | 0.02                 | 0.10                 | 0.01                  | 0.06                  | 0.03                  | 0.00                  | 0.14                  | 0.09                  | 0.02                  | 0.08                  |                     |
| Al2O3 | 20.78               | 19.01               | 22.58                | 21.18                | 21.85                 | 21.92                 | 22.40                 | 22.62                 | 22.06                 | 21.82                 | 21.85                 | 21.88                 |                     |
| Cr2O3 | 0.11                | 0.00                | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                  | 0.03                  | 0.00                  | 0.08                  | 0.00                  | 0.06                  | 0.00                  |                     |
| MgO   | 10.22               | 4.91                | 11.77                | 10.46                | 11.92                 | 11.51                 | 11.26                 | 11.02                 | 11.56                 | 11.67                 | 12.00                 | 11.85                 |                     |
| FeO   | 32.03               | 39.07               | 30.30                | 30.39                | 30.06                 | 30.51                 | 29.89                 | 30.45                 | 30.12                 | 29.91                 | 30.58                 | 29.76                 |                     |
| MnO   | 0.29                | 0.00                | 0.25                 | 0.22                 | 0.33                  | 0.34                  | 0.25                  | 0.13                  | 0.10                  | 0.32                  | 0.30                  | 0.22                  |                     |
| CaO   | 0.00                | 0.04                | 0.00                 | 0.01                 | 0.03                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.05                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.04                  | 0.00                  |                     |
| Na2O  | 0.00                | 0.00                | 0.00                 | 0.00                 | 0.04                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.03                  | 0.00                  |                     |
| K2O   | 0.09                | 0.02                | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.03                  | 0.00                  | 0.02                  | 0.00                  | 0.00                  |                     |
| H2O   | 11.03               | 10.50               | 11.15                | 10.76                | 11.18                 | 11.15                 | 11.20                 | 11.10                 | 11.12                 | 11.11                 | 11.25                 | 11.08                 |                     |
| Sum   | 99.42               | 98.06               | 99.69                | 96.56                | 99.80                 | 99.72                 | 99.65                 | 99.20                 | 99.24                 | 99.12                 | 100.56                | 98.81                 |                     |
| Si    | 2.690               | 2.793               | 2.537                | 2.611                | 2.612                 | 2.604                 | 2.631                 | 2.569                 | 2.592                 | 2.608                 | 2.603                 | 2.590                 |                     |
| Ti    | 0.009               | 0.003               | 0.002                | 0.008                | 0.001                 | 0.005                 | 0.002                 | 0.000                 | 0.012                 | 0.007                 | 0.001                 | 0.006                 |                     |
| Al    | 2.660               | 2.558               | 2.860                | 2.781                | 2.760                 | 2.776                 | 2.825                 | 2.879                 | 2.802                 | 2.775                 | 2.745                 | 2.790                 |                     |
| Cr    | 0.009               | 0.000               | 0.000                | 0.000                | 0.000                 | 0.000                 | 0.002                 | 0.000                 | 0.006                 | 0.000                 | 0.005                 | 0.000                 |                     |
| Mg    | 1.655               | 0.835               | 1.885                | 1.737                | 1.903                 | 1.844                 | 1.796                 | 1.774                 | 1.857                 | 1.878                 | 1.906                 | 1.910                 |                     |
| Fe2   | 2.909               | 3.730               | 2.724                | 2.831                | 2.693                 | 2.742                 | 2.674                 | 2.749                 | 2.714                 | 2.699                 | 2.725                 | 2.692                 |                     |
| Mn    | 0.026               | 0.000               | 0.023                | 0.020                | 0.030                 | 0.031                 | 0.023                 | 0.012                 | 0.009                 | 0.030                 | 0.027                 | 0.021                 |                     |
| Ca    | 0.000               | 0.005               | 0.000                | 0.002                | 0.004                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.006                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.005                 | 0.000                 |                     |
| Na    | 0.000               | 0.000               | 0.000                | 0.000                | 0.008                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.006                 | 0.000                 |                     |
| K     | 0.012               | 0.003               | 0.000                | 0.000                | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.004                 | 0.000                 | 0.002                 | 0.000                 | 0.000                 |                     |
| OH    | 8.000               | 8.000               | 8.000                | 8.000                | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 |                     |
| Sum   | 17.972              | 17.927              | 18.031               | 17.990               | 18.012                | 18.003                | 17.953                | 17.993                | 17.992                | 17.999                | 18.023                | 18.009                |                     |
| XFe   | 0.637               | 0.817               | 0.591                | 0.620                | 0.586                 | 0.598                 | 0.598                 | 0.608                 | 0.594                 | 0.590                 | 0.588                 | 0.585                 |                     |
|       |                     |                     |                      |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                     |
|       | EC6<br>exsfil<br>2  | EC6<br>exsfil<br>4  | EC6<br>exsfil<br>9   | EC6<br>exsfil<br>10  | EC6<br>exsfil<br>11   | EC6<br>exsfil<br>12   | EC6<br>exsfil<br>21   | EC6<br>exsfil<br>24   | EC6<br>exsfil<br>25   | EC6<br>exsfil<br>27   | EC6<br>exbord<br>30   | EC6<br>exbord<br>31   | EC6<br>exbord<br>33 |
| SiO2  | 24.28               | 24.18               | 24.97                | 24.07                | 23.15                 | 23.60                 | 23.17                 | 23.62                 | 23.45                 | 23.73                 | 24.26                 | 24.17                 | 23.38               |
| TiO2  | 0.04                | 0.01                | 0.12                 | 0.10                 | 0.05                  | 0.08                  | 0.05                  | 0.02                  | 0.00                  | 0.10                  | 0.10                  | 0.07                  | 0.06                |
| Al2O3 | 21.94               | 22.59               | 21.78                | 21.53                | 22.19                 | 22.58                 | 22.46                 | 22.62                 | 22.93                 | 22.98                 | 21.61                 | 22.44                 | 20.89               |
| Cr2O3 | 0.01                | 0.00                | 0.00                 | 0.09                 | 0.03                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.01                  | 0.16                  | 0.00                  | 0.05                  | 0.03                  | 0.04                |
| MgO   | 12.50               | 12.34               | 12.45                | 12.38                | 11.96                 | 12.16                 | 10.97                 | 11.36                 | 10.84                 | 11.02                 | 11.27                 | 11.40                 | 10.06               |
| FeO   | 28.53               | 28.83               | 28.98                | 29.14                | 29.06                 | 28.70                 | 30.81                 | 30.56                 | 30.08                 | 30.06                 | 28.82                 | 31.06                 | 31.92               |
| MnO   | 0.47                | 0.46                | 0.31                 | 0.37                 | 0.37                  | 0.46                  | 0.45                  | 0.26                  | 0.35                  | 0.43                  | 0.37                  | 0.44                  | 0.32                |
| CaO   | 0.00                | 0.04                | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.05                  | 0.02                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.07                  | 0.08                  | 0.04                |
| Na2O  | 0.03                | 0.01                | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.03                  | 0.01                  | 0.00                  | 0.02                  | 0.00                  | 0.00                |
| K2O   | 0.00                | 0.00                | 0.06                 | 0.07                 | 0.00                  | 0.04                  | 0.05                  | 0.00                  | 0.08                  | 0.00                  | 0.08                  | 0.04                  | 0.04                |
| H2O   | 11.16               | 11.24               | 11.28                | 11.10                | 10.96                 | 11.11                 | 11.01                 | 11.13                 | 11.07                 | 11.14                 | 10.98                 | 11.26                 | 10.77               |
| Sum   | 98.96               | 99.70               | 99.97                | 98.86                | 97.77                 | 98.80                 | 98.99                 | 99.61                 | 98.97                 | 99.46                 | 97.64                 | 100.99                | 97.54               |
| Si    | 2.608               | 2.579               | 2.654                | 2.599                | 2.530                 | 2.545                 | 2.521                 | 2.543                 | 2.539                 | 2.552                 | 2.647                 | 2.571                 | 2.600               |
| Ti    | 0.003               | 0.001               | 0.010                | 0.008                | 0.004                 | 0.006                 | 0.004                 | 0.002                 | 0.000                 | 0.008                 | 0.009                 | 0.006                 | 0.005               |
| Al    | 2.778               | 2.840               | 2.727                | 2.740                | 2.859                 | 2.870                 | 2.880                 | 2.871                 | 2.926                 | 2.914                 | 2.779                 | 2.814                 | 2.738               |
| Cr    | 0.001               | 0.000               | 0.000                | 0.008                | 0.002                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.001                 | 0.014                 | 0.000                 | 0.004                 | 0.002                 | 0.004               |
| Mg    | 2.002               | 1.962               | 1.973                | 1.993                | 1.949                 | 1.955                 | 1.779                 | 1.824                 | 1.749                 | 1.767                 | 1.834                 | 1.808                 | 1.668               |
| Fe2   | 2.562               | 2.571               | 2.575                | 2.632                | 2.657                 | 2.588                 | 2.803                 | 2.752                 | 2.724                 | 2.703                 | 2.630                 | 2.763                 | 2.969               |
| Mn    | 0.043               | 0.041               | 0.028                | 0.034                | 0.034                 | 0.042                 | 0.042                 | 0.023                 | 0.032                 | 0.039                 | 0.034                 | 0.040                 | 0.030               |
| Ca    | 0.000               | 0.005               | 0.001                | 0.000                | 0.000                 | 0.006                 | 0.002                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.008                 | 0.009                 | 0.005               |
| Na    | 0.006               | 0.002               | 0.000                | 0.000                | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.006                 | 0.001                 | 0.000                 | 0.005                 | 0.000                 | 0.000               |
| K     | 0.000               | 0.000               | 0.009                | 0.010                | 0.000                 | 0.005                 | 0.008                 | 0.000                 | 0.011                 | 0.001                 | 0.011                 | 0.006                 | 0.005               |
| OH    | 8.000               | 8.000               | 8.000                | 8.000                | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000               |
| Sum   | 18.003              | 18.001              | 17.977               | 18.023               | 18.035                | 18.017                | 18.039                | 18.022                | 17.997                | 17.984                | 17.961                | 18.018                | 18.026              |
| XFe   | 0.561               | 0.567               | 0.566                | 0.569                | 0.577                 | 0.570                 | 0.612                 | 0.601                 | 0.609                 | 0.605                 | 0.589                 | 0.605                 | 0.640               |

|       | EC6<br>exsbag<br>36 | EC6<br>mpost<br>38 | EC6<br>exsfil<br>50 | EC6<br>exbord<br>54 | EC6<br>exbord<br>55 | EC6<br>matpvt<br>58 | EC6<br>exsfil<br>67 | EC6<br>exsfil<br>68 | EC6<br>msynS1<br>76 | EC6<br>msynS1<br>87 | EC7<br>exsenc<br>358 | EC7<br>exsenc<br>359 |
|-------|---------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| SiO2  | 23.82               | 23.39              | 23.97               | 24.70               | 24.06               | 23.28               | 23.04               | 23.81               | 24.20               | 23.93               | 24.32                | 24.05                |
| TiO2  | 0.07                | 0.06               | 0.00                | 0.14                | 0.08                | 0.12                | 0.05                | 0.06                | 0.09                | 0.05                | 0.00                 | 0.00                 |
| Al2O3 | 22.30               | 22.64              | 21.89               | 22.19               | 21.60               | 21.83               | 22.00               | 22.04               | 21.95               | 23.33               | 21.01                | 21.43                |
| Cr2O3 | 0.00                | 0.01               | 0.00                | 0.06                | 0.02                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.16                | 0.10                | 0.00                 | 0.15                 |
| MgO   | 11.03               | 11.15              | 11.34               | 11.53               | 11.55               | 11.06               | 11.55               | 11.45               | 11.30               | 11.02               | 11.98                | 12.19                |
| FeO   | 29.09               | 30.37              | 30.88               | 29.55               | 31.17               | 30.90               | 30.86               | 30.39               | 30.29               | 30.35               | 28.32                | 28.57                |
| MnO   | 0.19                | 0.54               | 0.16                | 0.36                | 0.26                | 0.45                | 0.24                | 0.49                | 0.42                | 0.47                | 0.40                 | 0.27                 |
| CaO   | 0.00                | 0.01               | 0.05                | 0.02                | 0.05                | 0.10                | 0.02                | 0.00                | 0.00                | 0.00                | 0.00                 | 0.00                 |
| Na2O  | 0.04                | 0.00               | 0.00                | 0.05                | 0.00                | 0.00                | 0.06                | 0.00                | 0.00                | 0.04                | 0.02                 | 0.03                 |
| K2O   | 0.05                | 0.00               | 0.00                | 0.28                | 0.00                | 0.01                | 0.00                | 0.00                | 0.04                | 0.11                | 0.00                 | 0.00                 |
| H2O   | 10.97               | 11.07              | 11.09               | 11.24               | 11.13               | 10.97               | 10.99               | 11.09               | 11.13               | 11.26               | 10.93                | 11.00                |
| Sum   | 97.58               | 99.24              | 99.37               | 100.12              | 99.91               | 98.72               | 98.82               | 99.34               | 99.57               | 100.64              | 96.99                | 97.69                |
| Si    | 2.602               | 2.530              | 2.590               | 2.632               | 2.591               | 2.543               | 2.513               | 2.572               | 2.605               | 2.546               | 2.666                | 2.620                |
| Ti    | 0.006               | 0.005              | 0.000               | 0.011               | 0.006               | 0.010               | 0.004               | 0.005               | 0.007               | 0.004               | 0.000                | 0.000                |
| Al    | 2.871               | 2.887              | 2.788               | 2.788               | 2.741               | 2.811               | 2.828               | 2.807               | 2.784               | 2.925               | 2.715                | 2.752                |
| Cr    | 0.000               | 0.001              | 0.000               | 0.005               | 0.002               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.013               | 0.008               | 0.000                | 0.013                |
| Mg    | 1.796               | 1.798              | 1.827               | 1.832               | 1.854               | 1.800               | 1.878               | 1.843               | 1.812               | 1.748               | 1.959                | 1.980                |
| Fe2   | 2.657               | 2.748              | 2.791               | 2.634               | 2.808               | 2.822               | 2.815               | 2.746               | 2.726               | 2.700               | 2.596                | 2.603                |
| Mn    | 0.018               | 0.050              | 0.014               | 0.032               | 0.023               | 0.042               | 0.022               | 0.045               | 0.038               | 0.042               | 0.038                | 0.025                |
| Ca    | 0.000               | 0.001              | 0.005               | 0.003               | 0.006               | 0.012               | 0.003               | 0.000               | 0.000               | 0.000               | 0.000                | 0.000                |
| Na    | 0.008               | 0.000              | 0.000               | 0.011               | 0.000               | 0.000               | 0.012               | 0.001               | 0.000               | 0.007               | 0.003                | 0.007                |
| K     | 0.008               | 0.000              | 0.001               | 0.037               | 0.000               | 0.002               | 0.000               | 0.001               | 0.005               | 0.014               | 0.001                | 0.000                |
| OH    | 8.000               | 8.000              | 8.000               | 8.000               | 8.000               | 8.000               | 8.000               | 8.000               | 8.000               | 8.000               | 8.000                | 8.000                |
| Sum   | 17.965              | 18.021             | 18.016              | 17.985              | 18.032              | 18.042              | 18.075              | 18.020              | 17.992              | 17.995              | 17.978               | 18.001               |
| XFe   | 0.597               | 0.604              | 0.604               | 0.590               | 0.602               | 0.611               | 0.600               | 0.598               | 0.601               | 0.607               | 0.570                | 0.568                |

|       | EC7<br>exsenc<br>360 | EC7<br>exsenc<br>361 | EC7<br>exsenc<br>362 | EC7<br>exsenc<br>363 | EC7<br>exsenc<br>364 | EC7<br>exsenc<br>365 | EC7<br>exsenc<br>366 | EC7<br>exsenc<br>367 | EC7<br>exsenc<br>368 | EC7<br>exsfil<br>373 | EC7<br>exsfil<br>376 |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| SiO2  | 23.66                | 24.56                | 24.81                | 24.85                | 24.41                | 23.98                | 23.82                | 24.40                | 23.84                | 24.26                | 24.25                |
| TiO2  | 0.07                 | 0.05                 | 0.02                 | 0.10                 | 0.08                 | 0.00                 | 0.12                 | 0.03                 | 0.13                 | 0.03                 | 0.04                 |
| Al2O3 | 21.15                | 20.81                | 21.04                | 21.22                | 20.66                | 20.92                | 21.99                | 21.17                | 22.00                | 22.10                | 21.35                |
| Cr2O3 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.09                 | 0.00                 | 0.05                 | 0.00                 | 0.00                 |
| MgO   | 11.94                | 12.00                | 12.31                | 11.93                | 11.62                | 11.07                | 11.70                | 12.44                | 11.78                | 12.92                | 12.57                |
| FeO   | 30.54                | 28.29                | 29.25                | 29.68                | 29.33                | 30.68                | 29.63                | 28.14                | 29.35                | 26.80                | 27.73                |
| MnO   | 0.35                 | 0.29                 | 0.30                 | 0.23                 | 0.32                 | 0.27                 | 0.51                 | 0.58                 | 0.43                 | 1.12                 | 0.97                 |
| CaO   | 0.08                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.06                 | 0.00                 | 0.02                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.03                 | 0.00                 |
| Na2O  | 0.03                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.02                 | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.01                 |
| K2O   | 0.00                 | 0.03                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.02                 | 0.03                 | 0.05                 | 0.00                 | 0.02                 | 0.02                 | 0.02                 |
| H2O   | 11.00                | 10.94                | 11.12                | 11.14                | 10.93                | 10.90                | 11.08                | 11.03                | 11.07                | 11.15                | 11.05                |
| Sum   | 98.81                | 96.96                | 98.86                | 99.16                | 97.45                | 97.85                | 99.01                | 97.79                | 98.66                | 98.44                | 97.99                |
| Si    | 2.576                | 2.691                | 2.673                | 2.673                | 2.676                | 2.636                | 2.575                | 2.652                | 2.581                | 2.607                | 2.631                |
| Ti    | 0.006                | 0.004                | 0.002                | 0.008                | 0.007                | 0.000                | 0.010                | 0.002                | 0.011                | 0.003                | 0.003                |
| Al    | 2.714                | 2.687                | 2.673                | 2.690                | 2.670                | 2.710                | 2.802                | 2.711                | 2.807                | 2.799                | 2.729                |
| Cr    | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.007                | 0.000                | 0.004                | 0.000                | 0.000                |
| Mg    | 1.938                | 1.959                | 1.978                | 1.912                | 1.899                | 1.814                | 1.886                | 2.016                | 1.901                | 2.069                | 2.032                |
| Fe2   | 2.782                | 2.592                | 2.636                | 2.670                | 2.689                | 2.821                | 2.678                | 2.557                | 2.658                | 2.408                | 2.515                |
| Mn    | 0.032                | 0.027                | 0.027                | 0.021                | 0.030                | 0.025                | 0.047                | 0.053                | 0.040                | 0.102                | 0.089                |
| Ca    | 0.009                | 0.000                | 0.001                | 0.000                | 0.007                | 0.000                | 0.002                | 0.000                | 0.000                | 0.003                | 0.000                |
| Na    | 0.007                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.003                | 0.000                | 0.002                | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.002                |
| K     | 0.000                | 0.003                | 0.000                | 0.000                | 0.003                | 0.005                | 0.006                | 0.000                | 0.002                | 0.002                | 0.002                |
| OH    | 8.000                | 8.000                | 8.000                | 8.000                | 8.000                | 8.000                | 8.000                | 8.000                | 8.000                | 8.000                | 8.000                |
| Sum   | 18.064               | 17.964               | 17.989               | 17.974               | 17.985               | 18.011               | 18.015               | 17.991               | 18.004               | 17.992               | 18.004               |
| XFe   | 0.589                | 0.569                | 0.571                | 0.583                | 0.586                | 0.609                | 0.587                | 0.559                | 0.583                | 0.538                | 0.553                |

|       | FC62<br>exbord<br>294 | FC62<br>exbord<br>295 | FC62<br>expost<br>296 | FC62<br>msynS2<br>316 | FC69<br>exs<br>316 | FC69<br>exsbaq<br>328 | FC69<br>exbord<br>334 | FC69<br>exsfil<br>338 | FC69<br>exsfil<br>339 | FC69<br>exsfil<br>340 | FC69<br>exsfil<br>343 | FC69<br>exsfil<br>344 |
|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| SiO2  | 24.73                 | 24.71                 | 24.78                 | 24.34                 | 23.79              | 24.90                 | 23.78                 | 24.62                 | 24.73                 | 23.59                 | 24.38                 | 23.71                 |
| TiO2  | 0.15                  | 0.09                  | 0.00                  | 0.05                  | 0.00               | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.06                  | 0.02                  | 0.00                  | 0.00                  |
| Al2O3 | 21.05                 | 21.62                 | 22.18                 | 21.40                 | 22.01              | 21.39                 | 21.60                 | 21.74                 | 22.09                 | 22.81                 | 21.52                 | 22.24                 |
| Cr2O3 | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.02               | 0.00                  | 0.00                  | 0.06                  | 0.00                  | 0.01                  | 0.04                  | 0.05                  |
| MgO   | 10.87                 | 11.53                 | 12.63                 | 12.08                 | 13.06              | 13.19                 | 13.08                 | 13.66                 | 12.98                 | 12.67                 | 12.97                 | 13.11                 |
| FeO   | 29.60                 | 28.49                 | 28.17                 | 28.86                 | 27.12              | 26.29                 | 27.29                 | 27.74                 | 27.22                 | 26.00                 | 26.28                 | 26.37                 |
| MnO   | 0.44                  | 0.60                  | 0.56                  | 0.44                  | 0.54               | 0.38                  | 0.46                  | 0.64                  | 0.45                  | 0.30                  | 0.54                  | 0.43                  |
| CaO   | 0.08                  | 0.01                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.07               | 0.00                  | 0.02                  | 0.00                  | 0.05                  | 0.01                  | 0.05                  | 0.05                  |
| Na2O  | 0.00                  | 0.06                  | 0.05                  | 0.08                  | 0.00               | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.04                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  |
| K2O   | 0.11                  | 0.00                  | 0.02                  | 0.00                  | 0.00               | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  |
| H2O   | 10.99                 | 11.07                 | 11.27                 | 11.06                 | 11.06              | 11.09                 | 11.00                 | 11.28                 | 11.23                 | 10.99                 | 11.01                 | 11.02                 |
| Sum   | 98.02                 | 98.19                 | 99.67                 | 98.31                 | 97.66              | 97.26                 | 97.22                 | 99.74                 | 98.84                 | 96.41                 | 96.80                 | 96.98                 |
| Si    | 2.697                 | 2.674                 | 2.634                 | 2.638                 | 2.578              | 2.689                 | 2.591                 | 2.614                 | 2.639                 | 2.571                 | 2.652                 | 2.577                 |
| Ti    | 0.012                 | 0.007                 | 0.000                 | 0.004                 | 0.000              | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.005                 | 0.002                 | 0.000                 | 0.000                 |
| Al    | 2.706                 | 2.758                 | 2.779                 | 2.734                 | 2.811              | 2.724                 | 2.775                 | 2.721                 | 2.779                 | 2.930                 | 2.760                 | 2.849                 |
| Cr    | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.002              | 0.000                 | 0.000                 | 0.005                 | 0.000                 | 0.001                 | 0.003                 | 0.005                 |
| Mg    | 1.767                 | 1.860                 | 2.002                 | 1.952                 | 2.110              | 2.125                 | 2.124                 | 2.162                 | 2.065                 | 2.058                 | 2.103                 | 2.124                 |
| Fe2   | 2.699                 | 2.578                 | 2.505                 | 2.615                 | 2.458              | 2.375                 | 2.487                 | 2.463                 | 2.429                 | 2.370                 | 2.392                 | 2.397                 |
| Mn    | 0.041                 | 0.055                 | 0.051                 | 0.040                 | 0.049              | 0.035                 | 0.042                 | 0.057                 | 0.041                 | 0.028                 | 0.050                 | 0.040                 |
| Ca    | 0.010                 | 0.002                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.008              | 0.000                 | 0.002                 | 0.000                 | 0.006                 | 0.002                 | 0.006                 | 0.005                 |
| Na    | 0.000                 | 0.012                 | 0.011                 | 0.016                 | 0.000              | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.007                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 |
| K     | 0.016                 | 0.000                 | 0.003                 | 0.000                 | 0.000              | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 |
| OH    | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000              | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 |
| Sum   | 17.946                | 17.946                | 17.984                | 18.000                | 8.016              | 17.948                | 18.022                | 18.023                | 17.971                | 17.962                | 17.966                | 17.996                |
| XFe   | 0.604                 | 0.581                 | 0.556                 | 0.573                 | 0.538              | 0.528                 | 0.539                 | 0.532                 | 0.541                 | 0.535                 | 0.532                 | 0.530                 |

|       | FC69<br>exbord<br>348 | FC69<br>exbord<br>349 | FC69<br>mallS2<br>356 | FC69<br>mallS2<br>357 | FC69<br>mallS2<br>360 | FC69<br>msynS2<br>389 | FC69<br>msynS2<br>403 | FC85<br>mpost<br>155 | FC85<br>msynS1<br>171 | FC85<br>msynS1<br>173 | FC85<br>msynS1<br>174 | FC85<br>msynS2<br>175 | FC85<br>msynS1<br>192 |
|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| SiO2  | 24.19                 | 24.11                 | 24.17                 | 24.09                 | 23.81                 | 25.94                 | 24.52                 | 26.38                | 23.71                 | 24.37                 | 24.42                 | 24.31                 | 23.72                 |
| TiO2  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.20                  | 0.00                  | 0.08                 | 0.08                  | 0.09                  | 0.10                  | 0.09                  | 0.07                  |
| Al2O3 | 21.84                 | 21.99                 | 21.53                 | 21.62                 | 22.46                 | 23.79                 | 22.40                 | 23.74                | 21.20                 | 21.12                 | 21.05                 | 21.50                 | 21.95                 |
| Cr2O3 | 0.00                  | 0.07                  | 0.01                  | 0.04                  | 0.02                  | 0.07                  | 0.00                  | 0.09                 | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.04                  | 0.00                  |
| MgO   | 12.83                 | 12.91                 | 13.26                 | 12.98                 | 11.40                 | 11.95                 | 13.35                 | 10.09                | 10.52                 | 11.49                 | 11.58                 | 11.77                 | 11.20                 |
| FeO   | 25.97                 | 26.35                 | 26.83                 | 27.52                 | 29.35                 | 26.03                 | 27.05                 | 28.93                | 29.55                 | 29.60                 | 30.30                 | 29.73                 | 30.70                 |
| MnO   | 0.56                  | 0.40                  | 0.54                  | 0.41                  | 0.48                  | 0.37                  | 0.38                  | 0.45                 | 0.34                  | 0.64                  | 0.30                  | 0.38                  | 0.56                  |
| CaO   | 0.00                  | 0.02                  | 0.04                  | 0.01                  | 0.04                  | 0.00                  | 0.03                  | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  |
| Na2O  | 0.00                  | 0.07                  | 0.00                  | 0.01                  | 0.06                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.08                 | 0.00                  | 0.00                  | 0.01                  | 0.02                  | 0.01                  |
| K2O   | 0.00                  | 0.02                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.08                  | 0.80                  | 0.00                  | 0.87                 | 0.00                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.05                  | 0.00                  |
| H2O   | 10.98                 | 11.03                 | 11.05                 | 11.06                 | 11.08                 | 11.53                 | 11.26                 | 11.57                | 10.76                 | 11.01                 | 11.05                 | 11.09                 | 11.06                 |
| Sum   | 96.37                 | 96.98                 | 97.41                 | 97.75                 | 98.77                 | 100.67                | 98.99                 | 102.30               | 96.16                 | 98.32                 | 98.81                 | 98.99                 | 99.26                 |
| Si    | 2.639                 | 2.618                 | 2.621                 | 2.611                 | 2.575                 | 2.696                 | 2.610                 | 2.731                | 2.641                 | 2.653                 | 2.648                 | 2.626                 | 2.570                 |
| Ti    | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.015                 | 0.000                 | 0.006                | 0.006                 | 0.007                 | 0.008                 | 0.008                 | 0.006                 |
| Al    | 2.808                 | 2.815                 | 2.751                 | 2.761                 | 2.863                 | 2.914                 | 2.810                 | 2.897                | 2.784                 | 2.709                 | 2.691                 | 2.738                 | 2.803                 |
| Cr    | 0.000                 | 0.006                 | 0.001                 | 0.004                 | 0.002                 | 0.006                 | 0.000                 | 0.008                | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.003                 | 0.000                 |
| Mg    | 2.087                 | 2.090                 | 2.143                 | 2.097                 | 1.838                 | 1.851                 | 2.119                 | 1.558                | 1.747                 | 1.864                 | 1.873                 | 1.896                 | 1.810                 |
| Fe2   | 2.370                 | 2.394                 | 2.433                 | 2.494                 | 2.655                 | 2.262                 | 2.408                 | 2.505                | 2.752                 | 2.694                 | 2.749                 | 2.686                 | 2.782                 |
| Mn    | 0.052                 | 0.037                 | 0.049                 | 0.038                 | 0.044                 | 0.033                 | 0.034                 | 0.040                | 0.032                 | 0.059                 | 0.028                 | 0.035                 | 0.051                 |
| Ca    | 0.000                 | 0.003                 | 0.004                 | 0.001                 | 0.005                 | 0.000                 | 0.003                 | 0.000                | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 |
| Na    | 0.000                 | 0.015                 | 0.000                 | 0.002                 | 0.012                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.017                | 0.000                 | 0.000                 | 0.001                 | 0.005                 | 0.001                 |
| K     | 0.000                 | 0.002                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.011                 | 0.106                 | 0.000                 | 0.115                | 0.000                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.006                 | 0.000                 |
| OH    | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 |
| Sum   | 17.956                | 17.980                | 18.003                | 18.008                | 18.004                | 17.882                | 17.984                | 17.876               | 17.961                | 17.986                | 17.999                | 18.002                | 18.024                |
| XFe   | 0.532                 | 0.534                 | 0.532                 | 0.543                 | 0.591                 | 0.550                 | 0.532                 | 0.617                | 0.612                 | 0.591                 | 0.595                 | 0.586                 | 0.606                 |

|       | FC85<br>msynS2 | FC85<br>msynS2 | FC85<br>mpost  | FC85<br>mpost | FC85<br>exbord | FC85<br>msynS1 | FC85<br>exsenc | FC88<br>exsfil | FC88<br>exsfil | FC88<br>exsfil | FC88<br>exbord | FC88<br>exsfil | FC88<br>exsfil |
|-------|----------------|----------------|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|       | 194            | 201            | 204            | 205           | 233            | 236            | 237            | 408            | 409            | 410            | 429            | 438            | 440            |
| SiO2  | 23.93          | 23.69          | 23.82          | 23.81         | 23.91          | 24.35          | 24.04          | 23.67          | 23.66          | 23.70          | 24.10          | 23.33          | 23.76          |
| TiO2  | 0.12           | 0.07           | 0.08           | 0.15          | 0.03           | 0.09           | 0.09           | 0.01           | 0.00           | 0.00           | 0.05           | 0.00           | 0.00           |
| Al2O3 | 21.67          | 21.96          | 21.51          | 21.85         | 22.61          | 21.99          | 21.73          | 21.56          | 21.31          | 22.62          | 21.28          | 22.49          | 22.45          |
| Cr2O3 | 0.01           | 0.10           | 0.01           | 0.00          | 0.00           | 0.02           | 0.00           | 0.04           | 0.00           | 0.00           | 0.03           | 0.08           | 0.00           |
| MgO   | 11.03          | 10.65          | 11.07          | 11.18         | 11.14          | 11.44          | 11.54          | 10.93          | 11.57          | 11.35          | 11.07          | 10.89          | 11.58          |
| FeO   | 30.03          | 30.16          | 29.37          | 29.76         | 30.68          | 29.87          | 30.07          | 27.47          | 28.84          | 28.55          | 29.70          | 28.45          | 29.42          |
| MnO   | 0.33           | 0.48           | 0.58           | 0.78          | 0.44           | 0.38           | 0.45           | 0.34           | 0.25           | 0.22           | 0.15           | 0.32           | 0.20           |
| CaO   | 0.02           | 0.06           | 0.00           | 0.05          | 0.00           | 0.00           | 0.06           | 0.00           | 0.05           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.03           |
| Na2O  | 0.00           | 0.01           | 0.00           | 0.00          | 0.07           | 0.02           | 0.02           | 0.06           | 0.01           | 0.03           | 0.00           | 0.06           | 0.02           |
| K2O   | 0.00           | 0.01           | 0.00           | 0.02          | 0.00           | 0.01           | 0.03           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.03           | 0.00           |
| H2O   | 10.98          | 10.96          | 10.90          | 11.02         | 11.17          | 11.14          | 11.08          | 10.71          | 10.84          | 10.99          | 10.90          | 10.86          | 11.07          |
| Sum   | 98.13          | 98.16          | 97.33          | 98.60         | 100.05         | 99.30          | 99.12          | 94.77          | 96.54          | 97.47          | 97.28          | 96.51          | 98.52          |
| Si    | 2.612          | 2.591          | 2.618          | 2.589         | 2.564          | 2.620          | 2.600          | 2.648          | 2.615          | 2.584          | 2.648          | 2.574          | 2.573          |
| Ti    | 0.010          | 0.006          | 0.006          | 0.012         | 0.002          | 0.007          | 0.007          | 0.001          | 0.000          | 0.000          | 0.004          | 0.000          | 0.000          |
| Al    | 2.789          | 2.831          | 2.788          | 2.800         | 2.858          | 2.789          | 2.769          | 2.843          | 2.777          | 2.907          | 2.757          | 2.925          | 2.865          |
| Cr    | 0.001          | 0.009          | 0.001          | 0.000         | 0.000          | 0.002          | 0.000          | 0.004          | 0.000          | 0.000          | 0.002          | 0.007          | 0.000          |
| Mg    | 1.796          | 1.737          | 1.814          | 1.812         | 1.780          | 1.834          | 1.860          | 1.823          | 1.907          | 1.844          | 1.814          | 1.791          | 1.869          |
| Fe2   | 2.742          | 2.758          | 2.700          | 2.707         | 2.752          | 2.688          | 2.719          | 2.571          | 2.666          | 2.604          | 2.730          | 2.625          | 2.664          |
| Mn    | 0.031          | 0.045          | 0.054          | 0.072         | 0.040          | 0.035          | 0.041          | 0.032          | 0.023          | 0.021          | 0.014          | 0.030          | 0.018          |
| Ca    | 0.002          | 0.007          | 0.000          | 0.006         | 0.000          | 0.000          | 0.007          | 0.000          | 0.006          | 0.000          | 0.000          | 0.000          | 0.004          |
| Na    | 0.000          | 0.003          | 0.000          | 0.000         | 0.014          | 0.004          | 0.005          | 0.012          | 0.003          | 0.006          | 0.000          | 0.013          | 0.003          |
| K     | 0.000          | 0.002          | 0.000          | 0.002         | 0.000          | 0.001          | 0.005          | 0.000          | 0.000          | 0.000          | 0.000          | 0.005          | 0.000          |
| OH    | 8.000          | 8.000          | 8.000          | 8.000         | 8.000          | 8.000          | 8.000          | 8.000          | 8.000          | 8.000          | 8.000          | 8.000          | 8.000          |
| Sum   | 17.983         | 17.986         | 17.981         | 18.000        | 18.011         | 17.980         | 18.013         | 17.934         | 17.998         | 17.966         | 17.968         | 17.969         | 17.996         |
| XFe   | 0.604          | 0.614          | 0.598          | 0.599         | 0.607          | 0.594          | 0.594          | 0.585          | 0.583          | 0.585          | 0.601          | 0.594          | 0.588          |
|       | FC88<br>exsfil | FC88<br>exbord | FC88<br>exbord | FC88<br>synS2 | FC88<br>exsfil | FC88<br>exsfil | FC88<br>exsfil | FC92<br>exbord | FC92<br>exbord | FC92<br>exsfil | FC92<br>exsfil | FC92<br>msynS1 | FC92<br>exbord |
|       | 448            | 459            | 461            | 464           | 466            | 472            | 474            | 191            | 227            | 246            | 250            | 254            | 259            |
| SiO2  | 23.81          | 24.27          | 24.13          | 24.01         | 23.59          | 24.53          | 24.21          | 23.60          | 23.36          | 23.84          | 23.44          | 25.68          | 22.70          |
| TiO2  | 0.00           | 0.04           | 0.00           | 0.15          | 0.04           | 0.00           | 0.05           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| Al2O3 | 21.34          | 22.07          | 22.39          | 20.99         | 22.11          | 21.63          | 21.63          | 22.63          | 21.49          | 21.57          | 21.84          | 23.77          | 22.10          |
| Cr2O3 | 0.00           | 0.04           | 0.00           | 0.00          | 0.02           | 0.07           | 0.00           | 0.04           | 0.02           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| MgO   | 10.93          | 10.97          | 10.72          | 8.92          | 11.58          | 10.84          | 11.11          | 10.75          | 10.94          | 11.28          | 10.73          | 11.05          | 10.73          |
| FeO   | 30.33          | 29.94          | 29.27          | 28.51         | 29.87          | 29.72          | 29.10          | 29.61          | 29.08          | 29.21          | 30.72          | 29.55          | 28.83          |
| MnO   | 0.25           | 0.34           | 0.22           | 0.20          | 0.32           | 0.25           | 0.24           | 0.58           | 0.66           | 0.69           | 0.78           | 0.53           | 0.63           |
| CaO   | 0.00           | 0.00           | 0.03           | 0.15          | 0.05           | 0.03           | 0.03           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.03           | 0.00           | 0.00           |
| Na2O  | 0.01           | 0.02           | 0.01           | 0.10          | 0.00           | 0.01           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.01           | 0.01           | 0.00           | 0.00           |
| K2O   | 0.03           | 0.00           | 0.00           | 0.09          | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.18           | 0.00           |
| H2O   | 10.89          | 11.07          | 11.00          | 10.53         | 11.03          | 11.01          | 10.94          | 11.00          | 10.78          | 10.92          | 10.94          | 11.56          | 10.71          |
| Sum   | 97.59          | 98.78          | 97.76          | 93.64         | 98.61          | 98.10          | 97.32          | 98.21          | 96.32          | 97.52          | 98.49          | 102.32         | 95.70          |
| Si    | 2.619          | 2.626          | 2.628          | 2.734         | 2.562          | 2.669          | 2.651          | 2.570          | 2.597          | 2.615          | 2.566          | 2.660          | 2.540          |
| Ti    | 0.000          | 0.003          | 0.000          | 0.013         | 0.003          | 0.000          | 0.004          | 0.000          | 0.000          | 0.000          | 0.000          | 0.000          | 0.000          |
| Al    | 2.768          | 2.815          | 2.874          | 2.816         | 2.830          | 2.774          | 2.791          | 2.905          | 2.816          | 2.788          | 2.818          | 2.903          | 2.915          |
| Cr    | 0.000          | 0.004          | 0.000          | 0.000         | 0.001          | 0.006          | 0.000          | 0.004          | 0.002          | 0.000          | 0.000          | 0.000          | 0.000          |
| Mg    | 1.792          | 1.770          | 1.740          | 1.514         | 1.875          | 1.758          | 1.813          | 1.746          | 1.814          | 1.844          | 1.752          | 1.706          | 1.790          |
| Fe2   | 2.791          | 2.710          | 2.667          | 2.715         | 2.713          | 2.705          | 2.665          | 2.697          | 2.704          | 2.679          | 2.813          | 2.561          | 2.697          |
| Mn    | 0.023          | 0.031          | 0.020          | 0.019         | 0.029          | 0.023          | 0.022          | 0.054          | 0.062          | 0.065          | 0.072          | 0.046          | 0.060          |
| Ca    | 0.000          | 0.000          | 0.003          | 0.018         | 0.006          | 0.003          | 0.003          | 0.000          | 0.000          | 0.000          | 0.004          | 0.000          | 0.000          |
| Na    | 0.003          | 0.005          | 0.002          | 0.021         | 0.000          | 0.003          | 0.001          | 0.000          | 0.000          | 0.003          | 0.002          | 0.000          | 0.000          |
| K     | 0.004          | 0.001          | 0.000          | 0.014         | 0.000          | 0.000          | 0.000          | 0.000          | 0.000          | 0.000          | 0.000          | 0.023          | 0.000          |
| OH    | 8.000          | 8.000          | 8.000          | 8.000         | 8.000          | 8.000          | 8.000          | 8.000          | 8.000          | 8.000          | 8.000          | 8.000          | 8.000          |
| Sum   | 18.000         | 17.964         | 17.936         | 17.863        | 18.020         | 17.942         | 17.950         | 17.975         | 17.994         | 17.993         | 18.026         | 17.900         | 18.002         |
| XFe   | 0.609          | 0.605          | 0.605          | 0.642         | 0.591          | 0.606          | 0.595          | 0.607          | 0.599          | 0.592          | 0.616          | 0.600          | 0.601          |

|       | FC92<br>msynS2<br>265 | FC92<br>mpost<br>268 | FC92<br>mpost<br>269 | FC92<br>mpost<br>270 | FC92<br>msynS2<br>274 | FC92<br>msynS2<br>282 | FC92<br>msynS2<br>283 | FC97<br>mpost<br>22 | FC97<br>accol<br>36 | FC97<br>post<br>42  | FC97<br>mpost<br>46 | FC97<br>msynS2<br>47 | FC97<br>post<br>51 |
|-------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
| SiO2  | 22.83                 | 23.22                | 23.53                | 23.49                | 23.34                 | 23.51                 | 23.43                 | 23.55               | 23.25               | 23.38               | 22.81               | 23.20                | 23.12              |
| TiO2  | 0.00                  | 0.01                 | 0.02                 | 0.00                 | 0.02                  | 0.00                  | 0.00                  | 0.05                | 0.03                | 0.04                | 0.07                | 0.06                 | 0.00               |
| Al2O3 | 22.26                 | 21.91                | 22.20                | 21.76                | 22.40                 | 22.04                 | 21.83                 | 21.83               | 21.91               | 21.76               | 22.32               | 22.26                | 21.43              |
| Cr2O3 | 0.00                  | 0.08                 | 0.02                 | 0.02                 | 0.00                  | 0.09                  | 0.00                  | 0.00                | 0.05                | 0.00                | 0.00                | 0.00                 | 0.00               |
| MgO   | 10.86                 | 10.91                | 10.85                | 11.07                | 10.68                 | 10.90                 | 11.14                 | 8.43                | 8.06                | 7.74                | 8.34                | 8.21                 | 7.87               |
| FeO   | 30.44                 | 28.84                | 29.20                | 28.67                | 28.87                 | 29.07                 | 28.54                 | 33.87               | 34.33               | 35.70               | 34.12               | 33.17                | 34.22              |
| MnO   | 0.73                  | 0.47                 | 0.60                 | 0.71                 | 0.48                  | 0.62                  | 0.64                  | 0.07                | 0.24                | 0.17                | 0.20                | 0.00                 | 0.09               |
| CaO   | 0.03                  | 0.00                 | 0.01                 | 0.00                 | 0.03                  | 0.00                  | 0.01                  | 0.10                | 0.02                | 0.06                | 0.01                | 0.00                 | 0.00               |
| Na2O  | 0.00                  | 0.02                 | 0.00                 | 0.03                 | 0.01                  | 0.00                  | 0.05                  | 0.06                | 0.00                | 0.03                | 0.00                | 0.04                 | 0.05               |
| K2O   | 0.00                  | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                 | 0.00                  | 0.00                  | 0.02                  | 0.02                | 0.07                | 0.04                | 0.04                | 0.27                 | 0.00               |
| H2O   | 10.90                 | 10.79                | 10.91                | 10.83                | 10.85                 | 10.89                 | 10.83                 | 10.86               | 10.81               | 10.86               | 10.81               | 10.79                | 10.67              |
| Sum   | 98.05                 | 96.26                | 97.33                | 96.58                | 96.68                 | 97.12                 | 96.49                 | 98.84               | 98.77               | 99.77               | 98.73               | 97.99                | 97.45              |
| Si    | 2.511                 | 2.578                | 2.584                | 2.598                | 2.577                 | 2.587                 | 2.592                 | 2.598               | 2.576               | 2.579               | 2.527               | 2.577                | 2.598              |
| Ti    | 0.000                 | 0.001                | 0.002                | 0.000                | 0.001                 | 0.000                 | 0.000                 | 0.005               | 0.003               | 0.003               | 0.006               | 0.005                | 0.000              |
| Al    | 2.885                 | 2.867                | 2.874                | 2.837                | 2.915                 | 2.860                 | 2.846                 | 2.838               | 2.862               | 2.829               | 2.915               | 2.915                | 2.838              |
| Cr    | 0.000                 | 0.007                | 0.001                | 0.002                | 0.000                 | 0.008                 | 0.000                 | 0.000               | 0.005               | 0.000               | 0.000               | 0.000                | 0.000              |
| Mg    | 1.780                 | 1.806                | 1.776                | 1.824                | 1.757                 | 1.789                 | 1.837                 | 1.386               | 1.332               | 1.272               | 1.377               | 1.359                | 1.318              |
| Fe2   | 2.799                 | 2.678                | 2.682                | 2.651                | 2.666                 | 2.676                 | 2.641                 | 3.125               | 3.181               | 3.293               | 3.162               | 3.081                | 3.215              |
| Mn    | 0.068                 | 0.045                | 0.056                | 0.066                | 0.045                 | 0.058                 | 0.060                 | 0.006               | 0.023               | 0.015               | 0.019               | 0.000                | 0.009              |
| Ca    | 0.004                 | 0.000                | 0.002                | 0.000                | 0.003                 | 0.000                 | 0.001                 | 0.012               | 0.002               | 0.007               | 0.002               | 0.000                | 0.000              |
| Na    | 0.000                 | 0.004                | 0.000                | 0.007                | 0.002                 | 0.000                 | 0.011                 | 0.014               | 0.000               | 0.006               | 0.000               | 0.008                | 0.010              |
| K     | 0.000                 | 0.000                | 0.000                | 0.000                | 0.000                 | 0.000                 | 0.002                 | 0.002               | 0.009               | 0.005               | 0.006               | 0.038                | 0.000              |
| OH    | 8.000                 | 8.000                | 8.000                | 8.000                | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000               | 8.000               | 8.000               | 8.000               | 8.000                | 8.000              |
| Sum   | 18.047                | 17.986               | 17.977               | 17.986               | 17.965                | 17.979                | 17.991                | 17.986              | 17.993              | 18.009              | 18.013              | 17.984               | 17.988             |
| XFe   | 0.611                 | 0.597                | 0.602                | 0.592                | 0.603                 | 0.599                 | 0.590                 | 0.693               | 0.705               | 0.721               | 0.697               | 0.694                | 0.709              |
|       |                       |                      |                      |                      |                       |                       |                       |                     |                     |                     |                     |                      |                    |
|       | FC97<br>post<br>52    | FC97<br>msynS1<br>59 | FC97<br>msynS1<br>71 | FC99<br>msynS1<br>5  | FC99<br>msynS1<br>6   | FC99<br>msynS1<br>7   | FC99<br>mbag<br>13    | FC99<br>mpost<br>15 | FC99<br>mpost<br>16 | FC99<br>mpost<br>17 | FC99<br>mpost<br>18 | FC99<br>mpost<br>19  |                    |
| SiO2  | 22.70                 | 22.56                | 23.61                | 24.77                | 24.27                 | 24.08                 | 30.17                 | 29.80               | 26.31               | 26.96               | 26.73               | 27.09                |                    |
| TiO2  | 0.00                  | 0.10                 | 0.05                 | 0.25                 | 0.40                  | 0.29                  | 0.32                  | 0.44                | 0.37                | 0.17                | 0.06                | 0.51                 |                    |
| Al2O3 | 21.79                 | 21.70                | 22.48                | 19.45                | 18.53                 | 19.24                 | 18.79                 | 22.30               | 20.67               | 21.39               | 21.01               | 19.84                |                    |
| Cr2O3 | 0.00                  | 0.25                 | 0.05                 | 0.00                 | 0.01                  | 0.07                  | 0.00                  | 0.01                | 0.02                | 0.00                | 0.02                | 0.00                 |                    |
| MgO   | 8.40                  | 8.47                 | 8.13                 | 4.22                 | 4.65                  | 4.69                  | 3.56                  | 3.61                | 4.22                | 4.44                | 4.68                | 5.39                 |                    |
| FeO   | 34.04                 | 32.83                | 32.47                | 39.29                | 37.92                 | 38.32                 | 32.34                 | 29.34               | 34.83               | 33.92               | 35.02               | 33.83                |                    |
| MnO   | 0.20                  | 0.09                 | 0.07                 | 0.10                 | 0.20                  | 0.04                  | 0.09                  | 0.06                | 0.14                | 0.11                | 0.00                | 0.12                 |                    |
| CaO   | 0.04                  | 0.00                 | 0.03                 | 0.03                 | 0.10                  | 0.08                  | 0.24                  | 0.00                | 0.03                | 0.03                | 0.01                | 0.13                 |                    |
| Na2O  | 0.00                  | 0.01                 | 0.00                 | 0.03                 | 0.00                  | 0.00                  | 0.02                  | 0.02                | 0.02                | 0.00                | 0.03                | 0.00                 |                    |
| K2O   | 0.00                  | 0.00                 | 0.23                 | 0.06                 | 0.19                  | 0.09                  | 0.31                  | 1.63                | 0.24                | 0.00                | 0.10                | 0.69                 |                    |
| H2O   | 10.71                 | 10.62                | 10.84                | 10.58                | 10.35                 | 10.44                 | 10.86                 | 11.19               | 10.74               | 10.88               | 10.88               | 10.87                |                    |
| Sum   | 97.88                 | 96.64                | 97.95                | 98.78                | 96.63                 | 97.34                 | 96.70                 | 98.39               | 97.58               | 97.92               | 98.55               | 98.48                |                    |
| Si    | 2.539                 | 2.545                | 2.611                | 2.805                | 2.809                 | 2.765                 | 3.328                 | 3.191               | 2.936               | 2.969               | 2.944               | 2.985                |                    |
| Ti    | 0.000                 | 0.009                | 0.004                | 0.021                | 0.035                 | 0.025                 | 0.027                 | 0.035               | 0.031               | 0.014               | 0.005               | 0.043                |                    |
| Al    | 2.874                 | 2.885                | 2.930                | 2.596                | 2.528                 | 2.605                 | 2.442                 | 2.816               | 2.718               | 2.777               | 2.728               | 2.577                |                    |
| Cr    | 0.000                 | 0.022                | 0.004                | 0.000                | 0.001                 | 0.007                 | 0.000                 | 0.001               | 0.002               | 0.000               | 0.001               | 0.000                |                    |
| Mg    | 1.401                 | 1.425                | 1.340                | 0.712                | 0.802                 | 0.802                 | 0.584                 | 0.576               | 0.702               | 0.729               | 0.769               | 0.886                |                    |
| Fe2   | 3.185                 | 3.097                | 3.002                | 3.720                | 3.670                 | 3.680                 | 2.983                 | 2.628               | 3.250               | 3.124               | 3.226               | 3.118                |                    |
| Mn    | 0.019                 | 0.009                | 0.007                | 0.009                | 0.020                 | 0.004                 | 0.008                 | 0.005               | 0.013               | 0.011               | 0.000               | 0.011                |                    |
| Ca    | 0.005                 | 0.000                | 0.003                | 0.004                | 0.013                 | 0.010                 | 0.028                 | 0.000               | 0.003               | 0.004               | 0.001               | 0.016                |                    |
| Na    | 0.000                 | 0.002                | 0.000                | 0.007                | 0.001                 | 0.000                 | 0.005                 | 0.005               | 0.004               | 0.000               | 0.007               | 0.000                |                    |
| K     | 0.000                 | 0.000                | 0.032                | 0.008                | 0.027                 | 0.013                 | 0.043                 | 0.222               | 0.034               | 0.000               | 0.015               | 0.097                |                    |
| OH    | 8.000                 | 8.000                | 8.000                | 8.000                | 8.000                 | 8.000                 | 8.000                 | 8.000               | 8.000               | 8.000               | 8.000               | 8.000                |                    |
| Sum   | 18.024                | 17.993               | 17.934               | 17.884               | 17.906                | 17.911                | 17.448                | 17.479              | 17.693              | 17.628              | 17.697              | 17.732               |                    |
| XFe   | 0.694                 | 0.685                | 0.691                | 0.839                | 0.821                 | 0.821                 | 0.836                 | 0.820               | 0.822               | 0.811               | 0.808               | 0.779                |                    |

## Analyses des grenats

|       | FC97<br>bord<br>23 | FC97<br>coeur<br>24 | FC97<br>mil<br>25 | FC97<br>mil<br>26 | FC97<br>mil<br>27 | FC97<br>bord<br>28 | FC97<br>coeur<br>34 | FC97<br>bord<br>35 | FC97<br>coeur<br>41 | FC97<br>bord<br>43 | FC97<br>bord<br>50 |
|-------|--------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| SiO2  | 36.33              | 35.32               | 35.43             | 34.89             | 35.28             | 35.59              | 35.81               | 35.77              | 35.91               | 36.94              | 35.21              |
| TiO2  | 0.04               | 0.13                | 0.03              | 0.08              | 0.13              | 0.08               | 0.09                | 0.01               | 0.09                | 0.03               | 0.12               |
| Al2O3 | 21.14              | 21.13               | 21.33             | 21.19             | 21.11             | 21.32              | 20.96               | 21.33              | 21.07               | 21.05              | 21.15              |
| Cr2O3 | 0.00               | 0.00                | 0.00              | 0.00              | 0.03              | 0.00               | 0.01                | 0.00               | 0.00                | 0.00               | 0.00               |
| Fe2O3 | 2.03               | 3.90                | 3.29              | 4.83              | 3.96              | 3.62               | 3.65                | 4.43               | 4.04                | 1.40               | 3.26               |
| MgO   | 0.86               | 0.55                | 0.48              | 0.60              | 0.65              | 0.90               | 0.45                | 0.76               | 0.63                | 0.74               | 0.73               |
| FeO   | 31.64              | 23.05               | 24.15             | 23.90             | 26.44             | 30.69              | 24.51               | 30.26              | 25.50               | 32.00              | 28.89              |
| MnO   | 3.30               | 9.00                | 8.52              | 8.55              | 5.57              | 2.10               | 9.02                | 1.71               | 7.79                | 2.12               | 4.45               |
| CaO   | 5.39               | 7.11                | 6.80              | 6.35              | 6.97              | 6.40               | 6.59                | 7.36               | 6.64                | 6.78               | 5.80               |
| Na2O  | 0.01               | 0.01                | 0.01              | 0.00              | 0.03              | 0.00               | 0.00                | 0.00               | 0.00                | 0.00               | 0.02               |
| K2O   | 0.00               | 0.02                | 0.00              | 0.01              | 0.00              | 0.00               | 0.00                | 0.00               | 0.00                | 0.02               | 0.00               |
| Sum   | 100.74             | 100.20              | 100.04            | 100.42            | 100.16            | 100.68             | 101.10              | 101.64             | 101.67              | 101.07             | 99.63              |

|     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Si  | 2.932 | 2.865 | 2.877 | 2.833 | 2.863 | 2.872 | 2.887 | 2.861 | 2.877 | 2.962 | 2.876 |
| Ti  | 0.002 | 0.008 | 0.002 | 0.005 | 0.008 | 0.005 | 0.006 | 0.001 | 0.006 | 0.002 | 0.007 |
| Al  | 2.011 | 2.020 | 2.042 | 2.028 | 2.019 | 2.028 | 1.992 | 2.011 | 1.990 | 1.989 | 2.036 |
| Cr  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.002 | 0.000 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Fe3 | 0.123 | 0.238 | 0.201 | 0.295 | 0.242 | 0.220 | 0.221 | 0.266 | 0.243 | 0.085 | 0.201 |
| Mg  | 0.103 | 0.066 | 0.058 | 0.073 | 0.079 | 0.108 | 0.055 | 0.091 | 0.075 | 0.088 | 0.088 |
| Fe2 | 2.135 | 1.563 | 1.640 | 1.623 | 1.795 | 2.071 | 1.653 | 2.024 | 1.709 | 2.146 | 1.973 |
| Mn  | 0.226 | 0.618 | 0.586 | 0.588 | 0.383 | 0.144 | 0.616 | 0.116 | 0.529 | 0.144 | 0.308 |
| Ca  | 0.466 | 0.618 | 0.592 | 0.553 | 0.606 | 0.553 | 0.570 | 0.631 | 0.570 | 0.582 | 0.507 |
| Na  | 0.002 | 0.002 | 0.001 | 0.000 | 0.004 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.003 |
| K   | 0.000 | 0.002 | 0.000 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.002 | 0.000 |
| Sum | 8.000 | 8.000 | 8.000 | 8.000 | 8.000 | 8.000 | 8.000 | 8.000 | 8.000 | 8.000 | 8.000 |

|      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| XFe  | 0.954 | 0.959 | 0.966 | 0.957 | 0.958 | 0.950 | 0.968 | 0.957 | 0.958 | 0.961 | 0.957 |
| Xalm | 0.73  | 0.55  | 0.57  | 0.57  | 0.63  | 0.72  | 0.57  | 0.71  | 0.59  | 0.73  | 0.69  |
| Xpyr | 0.04  | 0.02  | 0.02  | 0.03  | 0.03  | 0.04  | 0.02  | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.03  |
| Xgro | 0.16  | 0.22  | 0.21  | 0.19  | 0.21  | 0.19  | 0.20  | 0.22  | 0.20  | 0.20  | 0.18  |
| Xspe | 0.08  | 0.22  | 0.20  | 0.21  | 0.13  | 0.05  | 0.21  | 0.04  | 0.18  | 0.05  | 0.11  |

|       | FC92<br>mat<br>215 | FC92<br>mat<br>216 | FC92<br>mat<br>217 | FC92<br>mat<br>219 | FC92<br>mat<br>220 |
|-------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| SiO2  | 35.74              | 35.70              | 36.07              | 35.82              | 35.20              |
| TiO2  | 0.04               | 0.03               | 0.00               | 0.27               | 0.47               |
| Al2O3 | 20.55              | 20.98              | 20.68              | 20.99              | 20.33              |
| Cr2O3 | 0.03               | 0.06               | 0.04               | 0.13               | 0.09               |
| Fe2O3 | 2.24               | 2.57               | 1.21               | 2.15               | 2.45               |
| MgO   | 0.84               | 0.82               | 0.77               | 0.79               | 0.78               |
| FeO   | 23.73              | 24.13              | 23.50              | 24.06              | 22.08              |
| MnO   | 11.45              | 11.72              | 13.02              | 10.85              | 11.55              |
| CaO   | 4.64               | 4.02               | 3.95               | 5.01               | 5.73               |
| Na2O  | 0.00               | 0.02               | 0.00               | 0.04               | 0.00               |
| K2O   | 0.00               | 0.00               | 0.00               | 0.00               | 0.00               |
| Sum   | 99.27              | 100.04             | 99.25              | 100.11             | 98.68              |

|     |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| Si  | 2.933 | 2.911 | 2.961 | 2.911 | 2.904 |
| Ti  | 0.003 | 0.002 | 0.000 | 0.017 | 0.029 |
| Al  | 1.988 | 2.016 | 2.001 | 2.011 | 1.976 |
| Cr  | 0.002 | 0.004 | 0.003 | 0.008 | 0.006 |
| Fe3 | 0.139 | 0.157 | 0.075 | 0.132 | 0.152 |
| Mg  | 0.103 | 0.100 | 0.095 | 0.096 | 0.096 |
| Fe2 | 1.629 | 1.645 | 1.613 | 1.636 | 1.524 |
| Mn  | 0.796 | 0.809 | 0.906 | 0.747 | 0.807 |
| Ca  | 0.408 | 0.351 | 0.347 | 0.436 | 0.506 |
| Na  | 0.000 | 0.004 | 0.000 | 0.007 | 0.000 |
| K   | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Sum | 8.000 | 8.000 | 8.000 | 8.000 | 8.000 |

|      |       |       |       |       |       |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| XFe  | 0.941 | 0.943 | 0.945 | 0.945 | 0.941 |
| Xalm | 0.55  | 0.57  | 0.54  | 0.56  | 0.52  |
| Xpyr | 0.04  | 0.03  | 0.03  | 0.03  | 0.03  |
| Xgro | 0.14  | 0.12  | 0.12  | 0.15  | 0.17  |
| Xspe | 0.27  | 0.28  | 0.31  | 0.26  | 0.28  |

## Analyses des oxydes

### Analyses des magnétites

|       | EC21<br>exs | EC21<br>exs | EC21<br>exs |
|-------|-------------|-------------|-------------|
|       | 150         | 151         | 155         |
| SiO2  | 0.06        | 0.06        | 0.07        |
| TiO2  | 0.00        | 0.00        | 0.00        |
| Al2O3 | 0.55        | 0.00        | 0.00        |
| Cr2O3 | 0.00        | 0.00        | 0.00        |
| Fe2O3 | 59.37       | 59.41       | 60.06       |
| MgO   | 0.02        | 0.02        | 0.01        |
| FeO   | 27.10       | 26.73       | 27.03       |
| MnO   | 0.06        | 0.05        | 0.00        |
| CaO   | 0.03        | 0.00        | 0.03        |
| Na2O  | 0.00        | 0.01        | 0.01        |
| K2O   | 0.00        | 0.00        | 0.00        |
| Sum   | 87.18       | 86.29       | 87.21       |
| Si    | 0.003       | 0.003       | 0.003       |
| Ti    | 0.000       | 0.000       | 0.000       |
| Al    | 0.029       | 0.000       | 0.000       |
| Cr    | 0.000       | 0.000       | 0.000       |
| Fe3   | 1.967       | 1.995       | 1.996       |
| Mg    | 0.001       | 0.001       | 0.001       |
| Fe2   | 0.998       | 0.998       | 0.998       |
| Mn    | 0.002       | 0.002       | 0.000       |
| Ca    | 0.001       | 0.000       | 0.001       |
| Na    | 0.000       | 0.001       | 0.001       |
| K     | 0.000       | 0.000       | 0.000       |
| Sum   | 3.000       | 3.000       | 3.000       |
| Xmt   | 1.000       | 1.000       | 1.000       |
| Xulv  | 0.000       | 0.000       | 0.000       |
| Xgk   | 0.00        |             |             |
| Xpy   | 0.07        |             |             |

### Analyses des ilménites

|       | FC85<br>mallS2 | FC92<br>incga |
|-------|----------------|---------------|
|       | 231            | 218           |
| SiO2  | 0.06           | 0.05          |
| TiO2  | 52.35          | 52.95         |
| Al2O3 | 0.04           | 0.05          |
| Cr2O3 | 0.00           | 0.08          |
| Fe2O3 | 0.00           | 0.22          |
| MgO   | 0.00           | 0.25          |
| FeO   | 43.83          | 44.25         |
| MnO   | 3.25           | 2.84          |
| CaO   | 0.00           | 0.08          |
| Na2O  | 0.00           | 0.00          |
| K2O   | 0.00           | 0.00          |
| Sum   | 99.53          | 100.76        |
| Si    | 0.001          | 0.001         |
| Ti    | 0.998          | 0.995         |
| Al    | 0.001          | 0.001         |
| Cr    | 0.000          | 0.002         |
| Fe3   | 0.000          | 0.004         |
| Mg    | 0.000          | 0.009         |
| Fe2   | 0.929          | 0.925         |
| Mn    | 0.070          | 0.060         |
| Ca    | 0.000          | 0.002         |
| Na    | 0.000          | 0.000         |
| K     | 0.000          | 0.000         |
| Sum   | 2.000          | 2.000         |
| Xil   | 0.93           | 0.93          |
| Xhm   | 0.00           | 0.00          |

### analyses des rutiles

|       | EC6<br>mat | EC6<br>mat | FC62<br>msynS2 | FC85<br>allS2 | FC85<br>mpost | FC85<br>mallS2 |
|-------|------------|------------|----------------|---------------|---------------|----------------|
|       | 18         | 22         | 280            | 153           | 229           | 230            |
| SiO2  | 1.19       | 0.19       | 0.19           | 0.07          | 0.05          | 0.00           |
| TiO2  | 95.11      | 99.87      | 97.25          | 99.10         | 99.80         | 98.68          |
| Al2O3 | 0.74       | 0.36       | 0.39           | 0.04          | 0.03          | 0.00           |
| Cr2O3 | 0.00       | 0.00       | 0.00           | 0.00          | 0.04          | 0.00           |
| MgO   | 0.00       | 0.04       | 0.01           | 0.00          | 0.03          | 0.01           |
| FeO   | 1.51       | 0.73       | 0.95           | 0.09          | 0.22          | 0.12           |
| MnO   | 0.00       | 0.13       | 0.00           | 0.09          | 0.08          | 0.00           |
| CaO   | 0.13       | 0.01       | 0.00           | 0.04          | 0.07          | 0.04           |
| Na2O  | 0.04       | 0.00       | 0.00           | 0.00          | 0.00          | 0.00           |
| K2O   | 0.02       | 0.00       | 0.06           | 0.09          | 0.04          | 0.05           |
| Sum   | 98.74      | 101.33     | 98.85          | 99.51         | 100.36        | 98.91          |
| Si    | 0.016      | 0.003      | 0.003          | 0.001         | 0.001         | 0.000          |
| Ti    | 0.965      | 0.988      | 0.987          | 0.997         | 0.996         | 0.999          |
| Al    | 0.012      | 0.006      | 0.006          | 0.001         | 0.001         | 0.000          |
| Cr    | 0.000      | 0.000      | 0.000          | 0.000         | 0.000         | 0.000          |
| Mg    | 0.000      | 0.001      | 0.000          | 0.000         | 0.001         | 0.000          |
| Fe2   | 0.017      | 0.008      | 0.011          | 0.001         | 0.002         | 0.001          |
| Mn    | 0.000      | 0.001      | 0.000          | 0.001         | 0.001         | 0.000          |
| Ca    | 0.002      | 0.000      | 0.000          | 0.001         | 0.001         | 0.001          |
| Na    | 0.001      | 0.000      | 0.000          | 0.000         | 0.000         | 0.000          |
| K     | 0.000      | 0.000      | 0.001          | 0.001         | 0.001         | 0.001          |
| Sum   | 1.014      | 1.007      | 1.008          | 1.003         | 1.003         | 1.002          |
| XFe   | 1.000      | 0.909      | 0.987          | 1.000         | 0.820         | 0.909          |

## *Partie 2*

### A. Géothermométrie grenat-chlorite

lignes: grenats; colonne: chlorites

Températures déterminées d'après:

1ère ligne: Grambling, 1991, Contr. Mineral. Petrol., 105, p 617-628

2 ème ligne: Ghent et al, 1987, J. Metamorphic Geology, 5, p 239-254

#### Lame FC92 (pression: 5 Kbs)

|                     | FC92<br>exbord<br>191 | FC92<br>exbord<br>227 | FC92<br>exsfil<br>246 | FC92<br>exsfil<br>250 | FC92<br>msynS1<br>254 | FC92<br>exbord<br>259 | FC92<br>msynS2<br>265 | FC92<br>mpost<br>268 | FC92<br>mpost<br>269 | FC92<br>mpost<br>270 | FC92<br>msynS2<br>274 | FC92<br>msynS2<br>282 | FC92<br>msynS2<br>283 |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| FC92<br>215         | 447<br>437            | 438<br>429            | 432<br>423            | 456<br>446            | 440<br>431            | 441<br>431            | 451<br>441            | 437<br>428           | 441<br>432           | 432<br>423           | 442<br>433            | 439<br>430            | 429<br>421            |
| FC92<br>216         | 437<br>428            | 428<br>420            | 422<br>414            | 446<br>437            | 430<br>422            | 431<br>422            | 441<br>432            | 427<br>419           | 432<br>423           | 422<br>414           | 433<br>424            | 429<br>421            | 420<br>412            |
| <b>FC92<br/>217</b> | <b>429<br/>421</b>    | <b>421<br/>413</b>    | <b>415<br/>407</b>    | <b>439<br/>430</b>    | <b>422<br/>415</b>    | <b>423<br/>415</b>    | <b>434<br/>425</b>    | <b>419<br/>412</b>   | <b>424<br/>416</b>   | <b>415<br/>407</b>   | <b>425<br/>417</b>    | <b>422<br/>414</b>    | <b>412<br/>405</b>    |
| FC92<br>219         | 428<br>420            | 420<br>412            | 414<br>407            | 438<br>429            | 422<br>414            | 422<br>415            | 433<br>424            | 419<br>411           | 423<br>415           | 414<br>407           | 424<br>416            | 421<br>413            | 411<br>404            |
| <b>FC92<br/>220</b> | <b>446<br/>436</b>    | <b>437<br/>428</b>    | <b>431<br/>422</b>    | <b>455<br/>446</b>    | <b>439<br/>430</b>    | <b>440<br/>431</b>    | <b>450<br/>441</b>    | <b>436<br/>427</b>   | <b>440<br/>431</b>   | <b>431<br/>422</b>   | <b>441<br/>432</b>    | <b>438<br/>429</b>    | <b>428<br/>420</b>    |

#### Lame FC97 (pression: 5 kbs)

|                         | FC97<br>mpost<br>22 | FC97<br>accol<br>36 | FC97<br>post<br>42 | FC97<br>mpost<br>46 | FC97<br>msynS2<br>47 | FC97<br>post<br>51 | FC97<br>post<br>52 | FC97<br>msynS1<br>59 | FC97<br>msynS1<br>71 |
|-------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------|----------------------|--------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| <b>FC97<br/>bord 23</b> | <b>473<br/>464</b>  | <b>487<br/>478</b>  | <b>506<br/>500</b> | <b>477<br/>468</b>  | <b>474<br/>465</b>   | <b>492<br/>484</b> | <b>475<br/>466</b> | <b>464<br/>454</b>   | <b>471<br/>462</b>   |
| FC97<br>coeur 24        | 440<br>431          | 454<br>445          | 474<br>465         | 445<br>436          | 442<br>433           | 459<br>450         | 442<br>433         | 431<br>423           | 439<br>430           |
| FC97<br>mil 25          | 397<br>392          | 411<br>405          | 431<br>422         | 402<br>396          | 399<br>394           | 417<br>409         | 399<br>394         | 389<br>385           | 396<br>391           |
| FC97<br>mil 26          | 456<br>446          | 470<br>460          | 489<br>481         | 460<br>451          | 457<br>448           | 475<br>466         | 458<br>448         | 447<br>437           | 454<br>445           |
| FC97<br>mil 27          | 450<br>441          | 464<br>455          | 484<br>476         | 455<br>445          | 452<br>442           | 469<br>460         | 452<br>443         | 442<br>432           | 449<br>439           |
| <b>FC97<br/>bord 28</b> | <b>492<br/>484</b>  | <b>505<br/>500</b>  | <b>525<br/>523</b> | <b>496<br/>489</b>  | <b>493<br/>485</b>   | <b>511<br/>506</b> | <b>494<br/>486</b> | <b>483<br/>474</b>   | <b>490<br/>482</b>   |
| FC97<br>coeur 34        | 383<br>380          | 397<br>392          | 416<br>409         | 387<br>384          | 384<br>381           | 402<br>396         | 385<br>382         | 374<br>373           | 381<br>379           |
| FC97<br>bord 35         | 456<br>446          | 470<br>460          | 489<br>481         | 460<br>451          | 457<br>447           | 475<br>466         | 458<br>448         | 447<br>437           | 454<br>445           |
| FC97<br>coeur 41        | 450<br>440          | 464<br>454          | 483<br>475         | 454<br>445          | 451<br>442           | 469<br>460         | 452<br>442         | 441<br>432           | 448<br>439           |
| <b>FC97<br/>bord 43</b> | <b>433<br/>425</b>  | <b>447<br/>438</b>  | <b>467<br/>457</b> | <b>438<br/>429</b>  | <b>435<br/>426</b>   | <b>452<br/>443</b> | <b>435<br/>426</b> | <b>424<br/>416</b>   | <b>432<br/>423</b>   |
| <b>FC97<br/>bord 50</b> | <b>454<br/>444</b>  | <b>468<br/>458</b>  | <b>487<br/>479</b> | <b>458<br/>449</b>  | <b>455<br/>446</b>   | <b>473<br/>464</b> | <b>456<br/>446</b> | <b>445<br/>435</b>   | <b>452<br/>443</b>   |

## B. Géothermométrie grenat-biotite

lignes: grenats, colonnes: biotites

températures déterminées d'après Williams et Grambling, Am. Mineralogist, 1991, 75, p 886-908

### Lame FC92

pression 5.0 Kbars

|                 | FC92<br>mpost<br>177 | FC92<br>mpost<br>180 | FC92<br>exbord<br>185 | FC92<br>exsbg<br>188 | FC92<br>exbord<br>192 | FC92<br>mpost<br>196 | FC92<br>msynS2<br>197 | FC92<br>msynS2<br>203 | FC92<br>mallS2<br>206 | FC92<br>exbord<br>213 | FC92<br>mallS2<br>214 | FC92<br>mallS2<br>221 | FC92<br>mallS2<br>222 |
|-----------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| FC92 215        | 540                  | 560                  | 515                   | 533                  | 529                   | 527                  | 554                   | 513                   | 530                   | 537                   | 535                   | 540                   | 539                   |
| FC92 216        | 525                  | 544                  | 500                   | 518                  | 514                   | 512                  | 538                   | 498                   | 515                   | 521                   | 520                   | 524                   | 523                   |
| <b>FC92 217</b> | <b>522</b>           | <b>541</b>           | <b>498</b>            | <b>515</b>           | <b>511</b>            | <b>509</b>           | <b>535</b>            | <b>496</b>            | <b>512</b>            | <b>519</b>            | <b>517</b>            | <b>521</b>            | <b>521</b>            |
| FC92 219        | 522                  | 541                  | 498                   | 516                  | 512                   | 509                  | 535                   | 496                   | 513                   | 519                   | 517                   | 522                   | 521                   |
| FC92 220        | 554                  | 575                  | 528                   | 547                  | 543                   | 541                  | 568                   | 526                   | 544                   | 551                   | 549                   | 554                   | 553                   |

|                 | FC92<br>mpost<br>225 | FC92<br>mpost<br>226 | FC92<br>exbord<br>228 | FC92<br>mpost<br>234 | FC92<br>mallS2<br>235 | FC92<br>mallS2<br>236 | FC92<br>mallS2<br>237 | FC92<br>exsfil<br>241 | FC92<br>exsfil<br>244 | FC92<br>mpost<br>258 | FC92<br>mpost<br>266 | FC92<br>mallS2<br>278 | FC92<br>mallS2<br>279 |
|-----------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| FC92 215        | 537                  | 534                  | 518                   | 525                  | 529                   | 528                   | 530                   | 538                   | 557                   | 515                  | 518                  | 510                   | 515                   |
| FC92 216        | 521                  | 519                  | 503                   | 510                  | 514                   | 513                   | 515                   | 522                   | 541                   | 500                  | 504                  | 495                   | 500                   |
| <b>FC92 217</b> | <b>519</b>           | <b>516</b>           | <b>500</b>            | <b>508</b>           | <b>511</b>            | <b>510</b>            | <b>512</b>            | <b>520</b>            | <b>538</b>            | <b>498</b>           | <b>501</b>           | <b>493</b>            | <b>498</b>            |
| FC92 219        | 519                  | 516                  | 501                   | 508                  | 511                   | 510                   | 513                   | 520                   | 539                   | 498                  | 501                  | 493                   | 498                   |
| FC92 220        | 551                  | 548                  | 531                   | 539                  | 543                   | 542                   | 544                   | 552                   | 572                   | 528                  | 532                  | 524                   | 528                   |

## C. Géothermométrie grenat-ilménite

### Lame FC92

ligne: grenat      colonne: ilménite incluse à proximité de l'analyse 217 dans le grenat

Températures d'après Pownceby et al., 1987, Contr. Mineral. Petrol., 97, p 116-126

```
FC92
incga
218
FC92
mat    500
217
```

## D. Géothermobarométrie avec le programme THERMOCALC v2.3

THERMOCALC v2.3, © Roger Powell and Tim Holland running at 13.16 on Thu 29 Feb, 1996  
(thermodynamic dataset produced at 19.49 on Sat 11 Jun, 1994)

### Lame FC92

an independent set of reactions has been calculated  
Rock name : (for x(CO2) = 0.2 and x(H2O) = 0.8)

```
      alm      gr      py      an      mu      cel      phl      ann
a      0.153 0.00168 4.30e-5 0.359 0.608 0.0413 0.0209 0.108
sd(a)/a 0.19473 0.69874 0.83804 0.12311 0.10000 0.38079 0.43913 0.24705
```

```
      east     clin     daph     ames      q      H2O
a      0.0280 0.00675 0.0497 0.00596 1.00 0.800
sd(a)/a 0.41600 0.50546 0.35992 0.51093 0
```

reactions

- 1) 2gr + py + 3ames + 6q = 6an + 3clin
- 2) 2east + 6q = py + mu + cel
- 3) 3east + 6q = py + 2mu + phl
- 4) 2phl + 3ames + 6q = py + 2mu + 3clin

- 5) 3an + ann = alm + gr + mu  
 6) 2alm + 3ann + 3ames = 2py + 3east + 3daph  
 7) 3gr + 5east + 3daph + 11q = 9an + 5ann + 2clin + 4H2O

calculations

|   | P(T) | sd(P) | a      | sd(a) | b        | c      | ln_K    | sd(ln_K) |
|---|------|-------|--------|-------|----------|--------|---------|----------|
| 1 | 4.7  | 1.66  | 43.78  | 1.71  | -0.26615 | 10.534 | 17.066  | 2.802    |
| 2 | 4.7  | 2.79  | 48.27  | 5.05  | 0.01105  | -3.315 | -6.587  | 1.245    |
| 3 | 2.1  | 3.72  | 26.25  | 7.44  | 0.00910  | -3.313 | -4.193  | 1.579    |
| 4 | 2.9  | 4.30  | 66.89  | 1.71  | -0.05090 | -3.616 | -2.940  | 2.482    |
| 5 | 4.6  | 0.73  | -35.72 | 1.03  | 0.12172  | -7.414 | -3.468  | 0.857    |
| 6 | 3.3  | 13.79 | 126.33 | 9.23  | -0.04562 | -1.482 | -14.039 | 2.930    |
| 7 | 4.7  | 1.48  | 281.56 | 13.56 | -0.61969 | 18.094 | 15.712  | 3.696    |

Rock : average PT (for x(CO2) = 0.2 and x(H2O) = 0.8)

T = 506°C, sd = 12,  
 P = 5.2 kbars, sd = 0.8, cor = 0.332, f = 1.06

Lame A12 (analyses de Rakib (1996))

an independent set of reactions has been calculated  
 Rock name : (suggested P = 4.0 kbar) (for x(CO2) = 0.2 and x(H2O) = 0.8)

|         | alm     | py      | mu      | cel     | phl     | ann     | east    | clin    |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| a       | 0.166   | 3.78e-5 | 0.615   | 0.117   | 0.0242  | 0.133   | 0.0250  | 0.00246 |
| sd(a)/a | 0.18285 | 0.84060 | 0.15000 | 0.26020 | 0.42775 | 0.24233 | 0.42510 | 0.67341 |

|         | daph    | ames    | q    | H2O   |
|---------|---------|---------|------|-------|
| a       | 0.120   | 0.00116 | 1.00 | 0.800 |
| sd(a)/a | 0.25583 | 0.55983 | 0    |       |

- reactions
- 1) clin + ames + 4q = 3py + 8H2O
  - 2) 5py + 3daph = 5alm + 3clin
  - 3) mu + 3cel + 6clin = 7py + 4phl + 24H2O
  - 4) 9cel + 6ames = 7py + 5mu + 4phl + 24H2O
  - 5) 5mu + 6clin = 7py + cel + 4east + 24H2O
  - 6) mu + 3daph + 3q = 4alm + ann + 12H2O

calculations

|   | T(P) | sd(T) | a       | sd(a) | b        | c      | ln_K    | sd(ln_K) |
|---|------|-------|---------|-------|----------|--------|---------|----------|
| 1 | 507  | 30    | 549.51  | 1.58  | -0.55575 | -0.137 | -17.782 | 2.671    |
| 2 | 539  | 1093  | -227.51 | 5.94  | 0.02792  | 0.162  | 30.254  | 4.814    |
| 3 | 488  | 28    | 1489.33 | 5.30  | -1.63131 | 6.523  | -43.183 | 7.388    |
| 4 | 458  | 27    | 1438.50 | 8.98  | -1.76302 | 5.932  | -28.693 | 7.413    |
| 5 | 514  | 29    | 1577.40 | 10.99 | -1.62350 | 6.513  | -49.703 | 7.385    |
| 6 | 487  | 12    | 610.58  | 6.11  | -0.79436 | 2.102  | -2.373  | 1.106    |

Rock : average temperatures (for x(CO2) = 0.2 and x(H2O) = 0.8)

Single end-member diagnostic information

| lsq  | av  | sd | fit  |      |      |
|------|-----|----|------|------|------|
|      | 493 | 31 | 3.14 |      |      |
|      | T   | sd | fit  | e*   | hat  |
| alm  | 479 | 36 | 3.00 | -1.4 | 0.22 |
| py   | 493 | 32 | 3.14 | -0.1 | 0.11 |
| mu   | 491 | 31 | 3.09 | 0.8  | 0.01 |
| cel  | 496 | 21 | 2.10 | -5.0 | 0.00 |
| phl  | 494 | 31 | 3.13 | 0.6  | 0.03 |
| ann  | 495 | 26 | 2.62 | 3.2  | 0.00 |
| east | 493 | 31 | 3.14 | -0.2 | 0.01 |
| clin | 492 | 31 | 3.11 | 1.0  | 0.03 |
| daph | 501 | 36 | 3.09 | -0.8 | 0.18 |
| ames | 490 | 31 | 3.08 | 1.3  | 0.04 |
| q    | 493 | 31 | 3.14 | 0    | 0    |
| H2O  | 493 | 31 | 3.14 | -0.0 | 0.01 |

|      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| P    | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 6.0 |
| av T | 485 | 488 | 490 | 492 | 493 | 494 | 495 | 495 | 496 |
| sd   | 34  | 34  | 33  | 32  | 31  | 30  | 29  | 28  | 27  |
| f    | 3.7 | 3.6 | 3.4 | 3.3 | 3.1 | 3.0 | 2.9 | 2.7 | 2.6 |

Lame D1 (analyses de Rakib (1996))

an INCOMPLETE independent set of reactions has been calculated

Rock name : (for x(CO2) = 0.2 and x(H2O) = 0.8)

|         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|         | alm     | py      | mu      | cel     | phl     | ann     | east    | clin    |
| a       | 0.386   | 1.09e-4 | 0.758   | 0.0365  | 0.00626 | 0.134   | 0.0178  | 0.00492 |
| sd(a)/a | 0.15000 | 0.81617 | 0.15000 | 0.39254 | 1.59744 | 0.24075 | 0.45046 | 0.61989 |

|         |         |         |      |       |
|---------|---------|---------|------|-------|
|         | daph    | ames    | q    | H2O   |
| a       | 0.0748  | 0.00419 | 1.00 | 0.800 |
| sd(a)/a | 0.31675 | 0.52484 | 0    |       |

reactions

- 1) 3east + 6q = py + 2mu + phl
- 2) py + ann + ames = alm + east + clin
- 3) 2alm + 3ann + 3ames = 2py + 3east + 3daph
- 4) py + 2ann + 3ames + 6q = 2alm + 2mu + 3clin

calculations

|   | P(T) | sd(P) | a      | sd(a) | b        | c      | ln_K    | sd(ln_K) |
|---|------|-------|--------|-------|----------|--------|---------|----------|
| 1 | 5.0  | 4.81  | 26.25  | 7.44  | 0.00910  | -3.313 | -2.675  | 2.266    |
| 2 | 2.6  | 18.88 | -33.73 | 2.60  | -0.00590 | -0.440 | 6.318   | 1.269    |
| 3 | 4.4  | 13.72 | 126.33 | 9.23  | -0.04562 | -1.482 | -13.768 | 2.913    |
| 4 | 5.8  | 3.87  | -27.66 | 2.09  | -0.02270 | -4.293 | 11.168  | 2.649    |

Rock : average PT (for x(CO2) = 0.2 and x(H2O) = 0.8)

T = 488°C, sd = 96,

P = 5.9 kbars, sd = 2.8, cor = -0.046, f = 0.47

Lame E14 (analyses de Rakib (1996))

an INCOMPLETE independent set of reactions has been calculated

Rock name : (suggested T = 475°C) (for x(CO2) = 0.2 and x(H2O) = 0.8)

|         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|         | alm     | gr      | py      | an      | mu      | cel     | phl     | ann     |
| a       | 0.291   | 0.00262 | 1.04e-4 | 0.261   | 0.718   | 0.0438  | 0.0219  | 0.106   |
| sd(a)/a | 0.15000 | 0.66883 | 0.81740 | 0.16370 | 0.10000 | 0.37505 | 0.43542 | 0.24947 |

|         |         |         |         |         |      |       |
|---------|---------|---------|---------|---------|------|-------|
|         | east    | clin    | daph    | ames    | q    | H2O   |
| a       | 0.0298  | 0.00488 | 0.0634  | 0.00460 | 1.00 | 0.800 |
| sd(a)/a | 0.41087 | 0.51910 | 0.32536 | 0.52137 | 0    |       |

reactions

- 1) 3an + 3east + 6q = gr + 2py + 3mu
- 2) 10ann + 15ames + 30q = 5alm + 10mu + 12clin + 3daph

calculations

|   | P(T) | sd(P) | a     | sd(a) | b        | c       | ln_K    | sd(ln_K) |
|---|------|-------|-------|-------|----------|---------|---------|----------|
| 1 | 5.6  | 1.52  | 37.81 | 7.53  | 0.11672  | -10.387 | -10.710 | 2.229    |
| 2 | 5.4  | 3.04  | 89.23 | 10.42 | -0.14142 | -21.629 | 21.529  | 10.426   |

Rock : average pressures (for x(CO2) = 0.2 and x(H2O) = 0.8)

|      |      |      |      |             |      |      |
|------|------|------|------|-------------|------|------|
| T°C  | 350  | 400  | 450  | <b>500</b>  | 550  | 600  |
| av P | 5.2  | 5.4  | 5.5  | <b>5.7</b>  | 5.8  | 5.9  |
| sd   | 1.20 | 1.27 | 1.34 | <b>1.42</b> | 1.50 | 1.57 |
| f    | 0.0  | 0.0  | 0.1  | 0.1         | 0.1  | 0.1  |

\*\*\*\*\*

an independent set of reactions has been calculated

Rock name : (suggested P = 4.0 kbar) (for x(CO2) = 0.2 and x(H2O) = 0.8)

|         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|         | alm     | gr      | py      | an      | mu      | cel     | phl     | ann     |
| a       | 0.291   | 0.00262 | 1.04e-4 | 0.261   | 0.718   | 0.0438  | 0.0219  | 0.106   |
| sd(a)/a | 0.15000 | 0.66883 | 0.81740 | 0.16370 | 0.10000 | 0.37505 | 0.43542 | 0.24947 |

|         |         |         |         |         |      |       |
|---------|---------|---------|---------|---------|------|-------|
|         | east    | clin    | daph    | ames    | q    | H2O   |
| a       | 0.0298  | 0.00488 | 0.0634  | 0.00460 | 1.00 | 0.800 |
| sd(a)/a | 0.41087 | 0.51910 | 0.32536 | 0.52137 | 0    |       |

reactions

- 1) clin + ames + 4q = 3py + 8H2O
- 2) 5py + 3daph = 5alm + 3clin
- 3) mu + 3cel + 6clin = 7py + 4phl + 24H2O
- 4) 9cel + 6ames = 7py + 5mu + 4phl + 24H2O
- 5) 5mu + 6clin = 7py + cel + 4east + 24H2O

6)  $\mu + 3\text{daph} + 3\text{q} = 4\text{alm} + \text{ann} + 12\text{H}_2\text{O}$   
 7)  $2\text{py} + 3\text{an} + 3\mu + 6\text{daph} = 10\text{alm} + \text{gr} + 3\text{east} + 24\text{H}_2\text{O}$

calculations

|   | T(P) | sd(T) | a       | sd(a) | b        | c      | ln_K    | sd(ln_K) |
|---|------|-------|---------|-------|----------|--------|---------|----------|
| 1 | 516  | 29    | 549.51  | 1.58  | -0.55575 | -0.137 | -16.815 | 2.562    |
| 2 | 499  | 1034  | -227.51 | 5.94  | 0.02792  | 0.162  | 32.003  | 4.544    |
| 3 | 506  | 26    | 1489.33 | 5.30  | -1.63131 | 6.523  | -37.842 | 6.842    |
| 4 | 483  | 27    | 1438.50 | 8.98  | -1.76302 | 5.932  | -20.708 | 7.568    |
| 5 | 520  | 27    | 1577.40 | 10.99 | -1.62350 | 6.513  | -47.810 | 6.753    |
| 6 | 518  | 12    | 610.58  | 6.11  | -0.79436 | 2.102  | 1.427   | 1.184    |
| 7 | 538  | 17    | 1111.92 | 14.77 | -1.46199 | -0.236 | 11.088  | 3.332    |

Rock : average temperatures (for  $x(\text{CO}_2) = 0.2$  and  $x(\text{H}_2\text{O}) = 0.8$ )

Single end-member diagnostic information

| lsq  | av  | sd | fit  | T   | sd | fit  | e*   | hat  |
|------|-----|----|------|-----|----|------|------|------|
|      | 511 | 20 | 2.03 |     |    |      |      |      |
| alm  | 502 | 21 | 1.88 | 502 | 21 | 1.88 | -1.3 | 0.12 |
| gr   | 518 | 17 | 1.68 | 518 | 17 | 1.68 | -2.6 | 0.05 |
| py   | 511 | 21 | 2.03 | 511 | 21 | 2.03 | -0.0 | 0.11 |
| an   | 516 | 18 | 1.77 | 516 | 18 | 1.77 | 1.9  | 0.02 |
| mu   | 512 | 20 | 2.03 | 512 | 20 | 2.03 | -0.1 | 0.01 |
| cel  | 511 | 17 | 1.77 | 511 | 17 | 1.77 | -2.6 | 0.00 |
| phl  | 512 | 20 | 2.03 | 512 | 20 | 2.03 | 0.2  | 0.05 |
| ann  | 512 | 17 | 1.79 | 512 | 17 | 1.79 | 1.9  | 0.00 |
| east | 511 | 20 | 2.03 | 511 | 20 | 2.03 | -0.0 | 0.02 |
| clin | 511 | 20 | 2.02 | 511 | 20 | 2.02 | 0.5  | 0.03 |
| daph | 510 | 24 | 2.03 | 510 | 24 | 2.03 | 0.1  | 0.23 |
| ames | 511 | 20 | 2.03 | 511 | 20 | 2.03 | 0.2  | 0.05 |
| q    | 511 | 20 | 2.03 | 511 | 20 | 2.03 | 0    | 0    |
| H2O  | 511 | 20 | 2.03 | 511 | 20 | 2.03 | -0.1 | 0.01 |

|      |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| P    | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | 5.5 | 6.0 |
| av T | 497 | 501 | 505 | 508 | 511 | 514 | 517 | 519 | 521 |
| sd   | 27  | 26  | 24  | 22  | 20  | 18  | 15  | 13  | 12  |
| f    | 3.0 | 2.8 | 2.5 | 2.3 | 2.0 | 1.8 | 1.6 | 1.3 | 1.2 |

Lame M9a (analyses de Rakib (1996))

an INCOMPLETE independent set of reactions has been calculated  
 Rock name : (suggested T = 475°C) (for  $x(\text{CO}_2) = 0.2$  and  $x(\text{H}_2\text{O}) = 0.8$ )

|         |         |         |         |         |       |        |        |       |
|---------|---------|---------|---------|---------|-------|--------|--------|-------|
| a       | alm     | gr      | py      | an      | mu    | cel    | phl    | ann   |
| sd(a)/a | 0.302   | 0.0114  | 8.03e-5 | 0.675   | 0.635 | 0.0797 | 0.0149 | 0.106 |
| a       | east    | clin    | daph    | ames    | q     | H2O    |        |       |
| sd(a)/a | 0.44826 | 0.53883 | 0.32679 | 0.64462 | 0     | 0.800  |        |       |

reactions

- 1)  $3\text{an} + \text{phl} = \text{gr} + \text{py} + \mu$
- 2)  $3\text{an} + \text{cel} + \text{east} = \text{gr} + \text{py} + 2\mu$
- 3)  $3\text{an} + 3\text{east} + 6\text{q} = \text{gr} + 2\text{py} + 3\mu$
- 4)  $10\text{ann} + 15\text{ames} + 30\text{q} = 5\text{alm} + 10\mu + 12\text{clin} + 3\text{daph}$
- 5)  $5\text{alm} + 5\text{gr} + 7\mu + 3\text{ames} = 15\text{an} + 2\text{cel} + 5\text{east} + 3\text{daph}$
- 6)  $15\text{an} + 15\text{east} + 6\text{daph} + 30\text{q} = 10\text{alm} + 5\text{gr} + 15\mu + 6\text{clin}$

calculations

|   | P(T) | sd(P) | a       | sd(a) | b        | c       | ln_K    | sd(ln_K) |
|---|------|-------|---------|-------|----------|---------|---------|----------|
| 1 | 5.1  | 0.98  | 11.56   | 0.84  | 0.10762  | -7.075  | -8.977  | 1.103    |
| 2 | 3.2  | 1.08  | -10.46  | 2.72  | 0.10567  | -7.072  | -7.437  | 1.153    |
| 3 | 4.6  | 1.51  | 37.81   | 7.53  | 0.11672  | -10.387 | -12.510 | 2.220    |
| 4 | 4.2  | 3.50  | 89.23   | 10.42 | -0.14142 | -21.629 | 17.327  | 12.052   |
| 5 | 4.1  | 0.88  | 254.41  | 14.36 | -0.62213 | 34.905  | 11.063  | 4.362    |
| 6 | 4.2  | 1.28  | -265.98 | 39.49 | 0.63945  | -51.613 | 0.461   | 8.478    |

Rock : average pressures (for  $x(\text{CO}_2) = 0.2$  and  $x(\text{H}_2\text{O}) = 0.8$ )

| lsq | av   | sd   | fit  |
|-----|------|------|------|
|     | 5.79 | 1.29 | 2.27 |

|      | P    | sd   | fit  | e*   | hat  |
|------|------|------|------|------|------|
| alm  | 5.66 | 1.37 | 2.25 | -0.4 | 0.05 |
| gr   | 6.97 | 1.90 | 2.14 | 1.1  | 0.62 |
| py   | 5.81 | 1.29 | 2.27 | 0.4  | 0.01 |
| an   | 5.91 | 1.37 | 2.26 | -0.3 | 0.05 |
| mu   | 5.96 | 1.29 | 2.21 | 0.7  | 0.02 |
| cel  | 5.56 | 0.77 | 1.35 | -4.1 | 0.01 |
| phl  | 5.74 | 1.27 | 2.23 | 0.9  | 0.01 |
| ann  | 5.33 | 1.36 | 2.14 | 1.3  | 0.15 |
| east | 5.81 | 1.29 | 2.27 | -0.2 | 0.01 |
| clin | 5.83 | 1.26 | 2.22 | 1.0  | 0.00 |
| daph | 5.81 | 1.28 | 2.25 | -0.4 | 0.00 |
| ames | 5.80 | 1.29 | 2.27 | -0.3 | 0.00 |
| q    | 5.79 | 1.29 | 2.27 | 0    | 0    |

|      |      |      |      |             |      |      |
|------|------|------|------|-------------|------|------|
| T°C  | 350  | 400  | 450  | <b>500</b>  | 550  | 600  |
| av P | 3.8  | 4.5  | 5.2  | <b>5.8</b>  | +    | +    |
| sd   | 1.45 | 1.39 | 1.34 | <b>1.29</b> | 1.26 | 1.23 |
| f    | 3.1  | 2.8  | 2.5  | 2.3         | 2.1  | 1.9  |

\*\*\*\*\*

an independent set of reactions has been calculated  
 Rock name : (suggested P = 4.0 kbar) (for x(CO2) = 0.2 and x(H2O) = 0.8)

|         | alm     | gr      | py      | an      | mu      | cel     | phl     | ann     |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| a       | 0.302   | 0.0114  | 8.03e-5 | 0.675   | 0.635   | 0.0797  | 0.0149  | 0.106   |
| sd(a)/a | 0.15000 | 0.54070 | 0.82402 | 0.05000 | 0.10000 | 0.30900 | 0.46242 | 0.27236 |

|         | east    | clin    | daph    | ames    | q    | H2O   |
|---------|---------|---------|---------|---------|------|-------|
| a       | 0.0255  | 0.00274 | 0.0686  | 0.00363 | 1.00 | 0.800 |
| sd(a)/a | 0.44826 | 0.53883 | 0.32679 | 0.64462 | 0    |       |

reactions

- 1) clin + ames + 4q = 3py + 8H2O
- 2) 5py + 3daph = 5alm + 3clin
- 3) mu + 3cel + 6clin = 7py + 4phl + 24H2O
- 4) 9cel + 6ames = 7py + 5mu + 4phl + 24H2O
- 5) 5mu + 6clin = 7py + cel + 4east + 24H2O
- 6) mu + 3daph + 3q = 4alm + ann + 12H2O
- 7) 2py + 3an + 3mu + 6daph = 10alm + gr + 3east + 24H2O

calculations

|   | T(P) | sd(T) | a       | sd(a) | b        | c      | ln_K    | sd(ln_K) |
|---|------|-------|---------|-------|----------|--------|---------|----------|
| 1 | 517  | 29    | 549.51  | 1.58  | -0.55575 | -0.137 | -16.771 | 2.612    |
| 2 | 510  | 1045  | -227.51 | 5.94  | 0.02792  | 0.162  | 31.505  | 4.595    |
| 3 | 501  | 27    | 1489.33 | 5.30  | -1.63131 | 6.523  | -39.390 | 6.934    |
| 4 | 458  | 28    | 1438.50 | 8.98  | -1.76302 | 5.932  | -28.626 | 7.727    |
| 5 | 528  | 27    | 1577.40 | 10.99 | -1.62350 | 6.513  | -45.548 | 6.881    |
| 6 | 518  | 12    | 610.58  | 6.11  | -0.79436 | 2.102  | 1.466   | 1.193    |
| 7 | 533  | 17    | 1111.92 | 14.77 | -1.46199 | -0.236 | 10.026  | 3.331    |

Rock : average temperatures (for x(CO2) = 0.2 and x(H2O) = 0.8)

Single end-member diagnostic information

| lsq  | av  | sd | fit  |      |      |  |
|------|-----|----|------|------|------|--|
|      | T   | sd | fit  | e*   | hat  |  |
| alm  | 504 | 26 | 2.43 | -1.5 | 0.10 |  |
| gr   | 518 | 25 | 2.49 | -1.6 | 0.08 |  |
| py   | 514 | 26 | 2.58 | 0.0  | 0.09 |  |
| an   | 515 | 25 | 2.56 | 0.4  | 0.01 |  |
| mu   | 513 | 25 | 2.57 | 0.3  | 0.02 |  |
| cel  | 512 | 17 | 1.81 | -4.5 | 0.00 |  |
| phl  | 516 | 25 | 2.54 | 1.1  | 0.05 |  |
| ann  | 517 | 22 | 2.24 | 2.6  | 0.01 |  |
| east | 514 | 25 | 2.58 | 0.0  | 0.01 |  |
| clin | 511 | 25 | 2.54 | 0.9  | 0.04 |  |
| daph | 514 | 30 | 2.58 | 0.0  | 0.23 |  |
| ames | 514 | 26 | 2.58 | -0.2 | 0.05 |  |
| q    | 514 | 25 | 2.58 | 0    | 0    |  |
| H2O  | 513 | 25 | 2.58 | -0.1 | 0.01 |  |

|      |     |     |     |     |     |     |            |     |     |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------------|-----|-----|
| P    | 2.0 | 2.5 | 3.0 | 3.5 | 4.0 | 4.5 | 5.0        | 5.5 | 6.0 |
| av T | 495 | 500 | 505 | 509 | 514 | 518 | <b>521</b> | 525 | 528 |
| sd   | 32  | 30  | 28  | 27  | 25  | 23  | <b>22</b>  | 21  | 21  |
| f    | 3.5 | 3.3 | 3.0 | 2.8 | 2.6 | 2.4 | 2.2        | 2.1 | 2.1 |

## *Annexe 2*

### *Méthodologie et procédure analytique utilisées pour l'étude des inclusions fluides*

Les inclusions fluides (IF) sont des microcavités dans les roches qui contiennent le ou les fluides ayant existé au cours de l'histoire de la roche. Leur étude fournira des indications sur la composition des paléofluides, les conditions pression-température auxquelles ils sont soumis au moment de leur piégeage ainsi que des renseignements sur l'état de perméabilité du milieu. Dans cette annexe sont présentés les principes de base qui ont servi à cette étude et les moyens analytiques qui ont été utilisés. Ces différentes notions seront introduites au cours d'un cheminement logique et rigoureux qui a été suivi au cours de cette étude.

#### **A. DÉFINITIONS ET PRINCIPE THÉORIQUE**

Dans la nature, les atomes et molécules peuvent exister sous trois formes: gaz ou vapeur (V) (absence de liaisons intermoléculaires), solide (S) (présence de liaisons intermoléculaires) et liquide (L) (système intermédiaire fluctuant). Les conditions de stabilité de ces trois phases dépendent de la nature du corps (X) et sont reliées à des grandeurs thermodynamiques telles la température (T), la pression (P) et le volume (V) par une relation appelée équation d'état qui définit l'état d'un fluide. Cette relation est déterminée par des mesures expérimentales (visualisation sous forme de diagramme ou de tables numériques) et peut être approchée analytiquement par des équations mathématiques. Ainsi il est possible de visualiser dans l'espace (diagramme à trois dimensions) les relations existant entre P-T-V et l'état d'équilibre d'un corps de composition X (fig. 1). Pour un système simple à un constituant, la variance du système (nombre de grandeurs thermodynamiques à fixer afin que le système soit entièrement défini) est soit:

- bivariant: il n'y a qu'une phase stable et la connaissance de deux grandeurs est nécessaire pour définir le système. Graphiquement cet état se traduira par une surface (ou champ).
- monovariant: deux phases sont à l'équilibre et une seule grandeur permet de définir le système. Cela se représentera graphiquement par une courbe.
- invariant: les trois phases (L,V et S) sont à l'équilibre et les trois grandeurs thermodynamiques sont fixées. Graphiquement cela doit se représenter par un point.

Dans un système à plusieurs constituants, cas fréquent des systèmes naturels, la variance sera donnée par la relation:  $V=C+2-f$  (C étant le nombre de constituants et f le nombre de phases à l'équilibre).

Grâce à ces relations liant P-T-V et X nous voyons qu'il est possible d'accéder indirectement à différentes grandeurs thermodynamiques si l'on connaît l'une ou deux d'entre elles dans un domaine monovariant ou divariant. Les

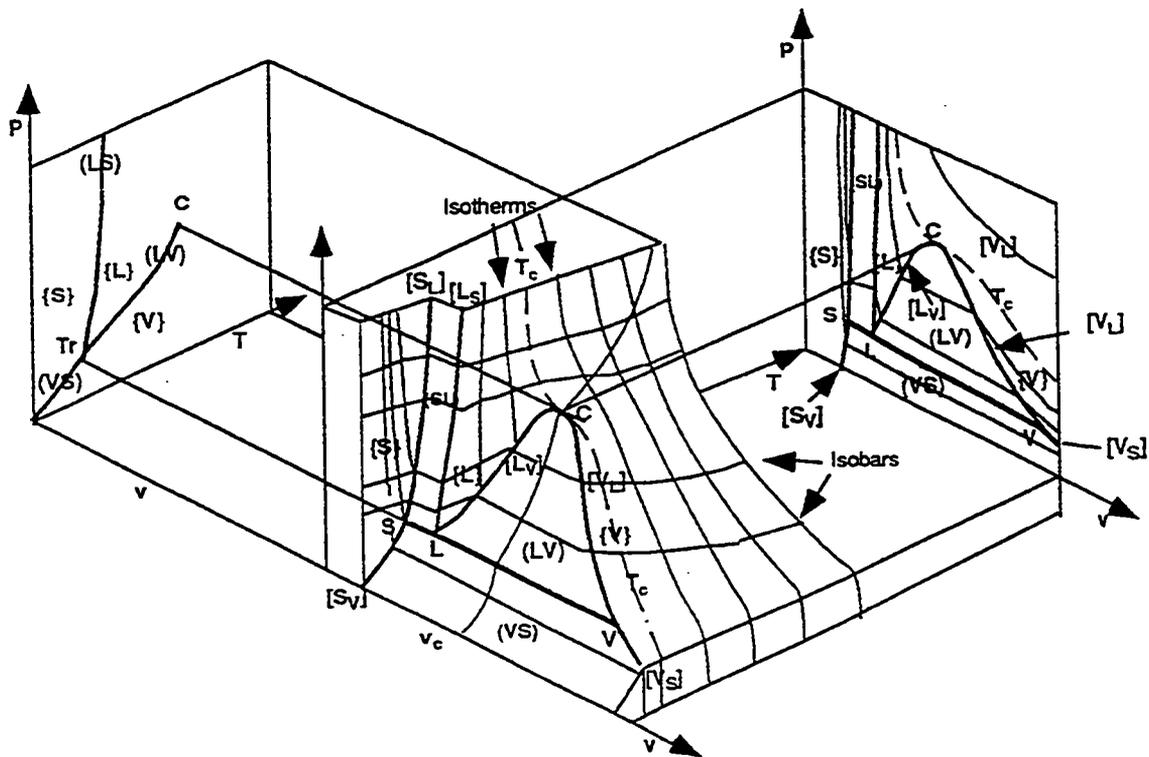


Figure 1 : diagramme de phase d'un système à un constituant présentant un volume molaire du solide plus faible que le volume molaire du liquide au point triple (ex: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S..., H<sub>2</sub>O non inclus). P: pression, T: température, V: volume molaire, C: point critique, T<sub>c</sub>: isotherme critique, V<sub>c</sub>: volume molaire au point critique. S, L et V représentent respectivement l'état solide, liquide et vapeur du fluide. Tr: triple point, point invariant où coexistent à l'équilibre L, V et S; (S<sub>V</sub>), (L<sub>S</sub>) et (L<sub>V</sub>) sont les champs univariants où coexistent les deux phases désignées par les deux lettres, la phase considérée est notée en majuscule: [S<sub>V</sub>] et [V<sub>S</sub>], [L<sub>S</sub>] et [S<sub>L</sub>], [L<sub>V</sub>] et [V<sub>L</sub>] le long des courbes univariantes. {S}, {L} et {V} représentent les champs bivariants où existent une seule phase à l'équilibre. Quelques isothermes et isobares sont dessinés le long des champs bivariants. Le bloc diagramme est projeté sur des plans P-V et P-T (diagramme d'après Dubessy, 1994).

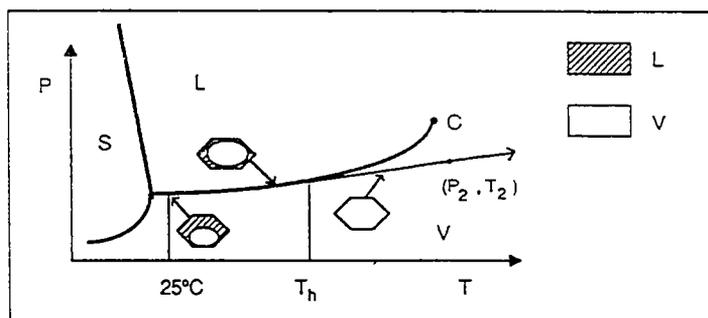
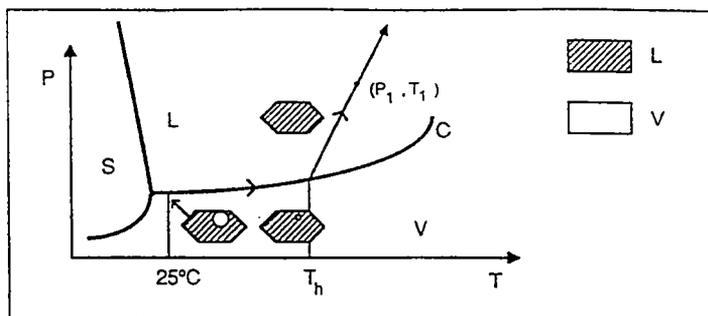


Figure 2: Cette figure illustre le principe de l'étude des inclusions fluides, en thermobarométrie, pour deux exemples de trajets P-T suivis par deux inclusions aqueuses piégées respectivement à des conditions (P<sub>1</sub>, T<sub>1</sub>) (A) et (P<sub>2</sub>, T<sub>2</sub>) (B) jusqu'à l'état actuel (25°C). Les principes de base de l'étude des IF sont le comportement isochorique des fluides (un fluide d'une composition X et d'un volume V va suivre un chemin PT et un seul bien défini par les lois de la thermodynamique) et la conservation de la composition et du volume de l'IF depuis son piégeage. Dans ce cas, lors du réchauffement de l'IF sur une platine microthermométrique, le chemin P-T est inversé (il correspond au sens des flèches sur la figure). La composition de l'IF, la mesure de sa température d'homogénéisation (Th) et de son mode (Liquide pour A et Vapeur pour B) permet de connaître le volume molaire, la pression interne dans l'IF et de calculer l'isochore suivie (chemin PT). Si le fluide est piégé dans un état à deux phases (non représenté sur la figure) les conditions P-T de piégeage sont directement déterminées. S'il est piégé dans le domaine à une phase (A et B), la connaissance d'un des paramètres (P ou T) permettra de déterminer le deuxième.

méthodes d'étude des IF s'attachent à déterminer V et X qui sont les quantités mesurables dans l'équation d'état reliant P,V,T et X (fig. 2). Si l'IF n'a pas varié de volume et de composition depuis sa formation, la connaissance de ces deux paramètres permettra de retrouver le chemin P-T suivi par l'IF au cours de l'évolution de la roche. La détermination des propriétés V-X se fait selon diverses méthodes dont les deux les plus fréquemment utilisées, et notamment au cours de cette étude, sont la microthermométrie et la spectrométrie à effet Raman. Suivant la composition de l'inclusion et les conditions P-T de son piégeage, les modalités permettant de déterminer le volume et la composition de l'IF seront très variables. Seules celles utilisées au cours de cette étude seront expliquées en détail. Lorsque les propriétés V-X de l'IF sont connues, on peut tracer des courbes de même densité (isochores) pour une composition donnée (isoplètes) dans un diagramme P-T grâce aux équations d'état. L'IF a été piégée le long de l'isochore et la connaissance de la pression ou de la température de piégeage par d'autres méthodes indépendantes permet de connaître les conditions P-T de piégeage de l'IF. Un cas particulier de piégeage d'un fluide en état d'immiscibilité permet d'accéder directement aux conditions de température et de pression de piégeage du fluide. Cette étude associée à une observation pétrographique détaillée, à l'étude des paragenèses métamorphiques et éventuellement à une étude isotopique peut permettre une reconstitution de l'histoire P-T-V-X des paléofluides qui ont circulé dans la roche étudiée.

Il est important de garder à l'esprit que les équations d'état, bases d'interprétation de tout résultat thermobarométrique, ne sont valables que lorsqu'elles correspondent aux résultats expérimentaux et ne peuvent être utilisées que dans le domaine d'application pour lequel elles ont été définies. Ainsi elles sont bien connues pour certains systèmes et certains intervalles et sont imprécises pour d'autres. Le principe fondamental sur lequel s'appuie l'étude des IF est de considérer la composition et le volume molaire de l'inclusion fluide constant depuis la formation de l'inclusion. La validité de ce principe doit être discuté et démontré avant toute étude physico-chimique des IF. Certaines modifications post-piégeage de volume molaire et de composition sont fréquentes dans les roches métamorphiques qui subissent des chemins PT complexes. L'étude de telles inclusions peut cependant apporter de nombreuses indications qualitatives sur les chemins PT suivis.

## **B. ASPECT PÉTROGRAPHIQUE**

Une étude d'IF commence par une étude pétrographique détaillée qui s'effectue au microscope optique sur des lames épaisses (150 à 200 microns) permettant d'avoir une vision tridimensionnelle sur la répartition des inclusions. L'étude pétrographique permet:

- de distinguer les différentes familles d'IF d'après plusieurs critères tels leur type (origine primaire ou secondaire), l'orientation des plans secondaires lorsque celle-ci est constante et leur composition majeure (description des phases à température ambiante). Pour chaque famille il est possible de décrire leur principales caractéristiques (orientation, pendage et longueur des plans d'IF; abondance et concentration des IF dans les minéraux ou dans les plans, taille et morphologie des IF).

- d'observer des textures particulières provenant de phénomène post piégeage (déformation, décrépitation, étranglement, texture de rééquilibration).
- d'établir une chronologie relative entre les différentes familles de fluides selon leur type, leurs relations entre elles et leur relations avec les structures de l'échantillon (joints de grains, microfractures,...).

La technique de cathodoluminescence d'un microscope électronique à balayage (SEM LC) est un bon complément à l'étude pétrographique mais n'a pas été utilisé au cours de cette étude. Elle permet une meilleure observation des réseaux de plans d'inclusions fluides (géométrie, intersection de plans) et de distinguer les diverses générations de quartz lors de la formation de la veine (Boiron et al., 1992). Par la suite une analyse systématique et statistique de l'orientation des plans secondaires d'IF doit être effectuée afin de relier les propriétés physico-chimiques des fluides aux événements tectoniques.

### **1. Détermination du type d'inclusion fluide**

- les inclusions sont primaires (fig. 3a) lorsque leur formation est contemporaine de la cristallisation du minéral hôte. Elles peuvent se former par nucléation sur des surfaces d'imperfection ou par des taux de croissance différentiels du minéral hôte. L'étude des IF primaires donnera des renseignements sur les fluides ayant circulé lors de la formation du cristal hôte.
- les inclusions peuvent avoir une origine secondaire, le plus fréquemment sous forme de plans de microfracturation (fig 3b). Les fluides ont circulé le long de microfractures et des inclusions restent piégées lors de la recristallisation du minéral hôte (phénomène de cicatrisation). Le temps de cicatrisation d'un microcrack dépend essentiellement de la température, mais aussi de la pression fluide, de la chimie du fluide et des dimensions de la microfracture. Sous les conditions métamorphiques d'au moins 200°C, et pour une  $P_f = P_c$ , la cicatrisation des microcracks est quasi-instantanée à l'échelle géologique (Brantley et al., 1990; Brantley, 1992). Ainsi les IF contenues dans les plans reflètent bien les caractéristiques physico-chimiques des fluides qui ont circulé dans la microfracture au moment de sa formation. On doit donc s'attendre à une homogénéité de composition et de densité dans les IF formant un seul plan, qui, si elle n'est pas vérifiée, indique probablement des modifications post-piégeage des inclusions ou de la microfracture, des piégeages de fluides en état d'immiscibilité ou des chutes de pression quasi-instantanée de pressions lithostatiques vers des pressions hydrostatiques. Les modalités de formation de ces microfractures seront abordées ultérieurement.
- les inclusions peuvent se localiser sous forme de plans (microfracturation) lors de la cristallisation du minéral hôte. Elles sont appelées pseudo-secondaires (fig. 3-c). Les mécanismes de leur formation sont identiques aux inclusions secondaires mais elles donnent des renseignements sur les conditions lors de la cristallisation du minéral.

La détermination exacte du type d'inclusion fluide est fondamentale pour avoir un repère temporel des fluides qui ont circulé dans la roche. Il est souvent difficile de prouver l'origine primaire des inclusions et malgré les nombreux critères cités par Roedder (1984); nous ne retiendrons, pour notre cas, que ceux où il est clairement démontré une relation entre la répartition des IF et des zones de croissance du minéral.

## **2. La taille et la morphologie des Inclusions**

La taille et la morphologie des IF dépend de nombreux facteurs tel les propriétés de solubilité (du fluide et du minéral hôte), de la vitesse de formation de l'inclusion, de l'histoire thermique post-formation, de la déformation. La taille et la forme des inclusions varient souvent entre différentes familles, mais aussi au sein d'une même famille ou le long d'un même plan. Une attention particulière sera portée sur la reconnaissance de textures particulières qui indiquent des transformations de l'inclusion post piégeage tel l'étranglement ou les ré-équilibrations.

L'étranglement est un processus qui scinde une IF en plusieurs cavités par cicatrisation du minéral-hôte (fig. 4). Ce processus peut modifier les propriétés physico-chimiques originales de l'IF s'il se produit sur une IF qui se trouve déjà dans des conditions d'immiscibilité des fluides qu'elle contient. Dans ce cas, l'IF affectée par l'étranglement peut donner deux inclusions de compositions et densités totalement différentes de l'inclusion originale. On peut reconnaître ce processus par des caractéristiques morphologiques telles que des microcanaux aux extrémités des inclusions ou des formes souvent complexes avec des digitations.

Les processus de ré-équilibration peuvent modifier la densité, la composition et la forme de l'IF lorsque la roche est amenée sous des conditions P-T différentes de celles suivies par le fluide dans l'IF. En effet, la pression interne à l'intérieur de l'IF est fixée par les relations entre P-T-V-X et peut donc différer des conditions de pression dans la roche. Il en résulte des phénomènes de surpression ou sous-pression dans l'IF par rapport à la matrice, entraînant des modifications de l'IF post-piégeage, et caractérisés par des textures particulières. On distingue deux comportements principaux selon que l'on a fracturation ou non de l'IF.

- Un comportement fragile: Par exemple, la décrépitation est un phénomène qui résulte d'une surpression interne qui devient supérieure à la résistance du minéral hôte. Cette différence de pression est de 850 bars dans le quartz (Leroy, 1979; Bodnar et al., 1989) et provoque une fracturation du minéral hôte et une perte partielle ou totale du fluide contenu dans l'inclusion. Les inclusions décrépitées sont très foncées et possèdent souvent autour d'elles des halos de micro-inclusions (fig 5a). Des textures très similaires, appelées halos d'implosion, s'observent lorsque l'IF est en sous-pression par rapport à la matrice (fig. 5b). Les IF implosées semblent plus anguleuses et il existe une zone sans micro-inclusions entre l'IF et le halo d'implosion.
- Un comportement sans fracturation caractérisé par un changement de forme et/ou changement de densité. Les mécanismes responsables de ces modifications sont actuellement encore débattus (voir les différents

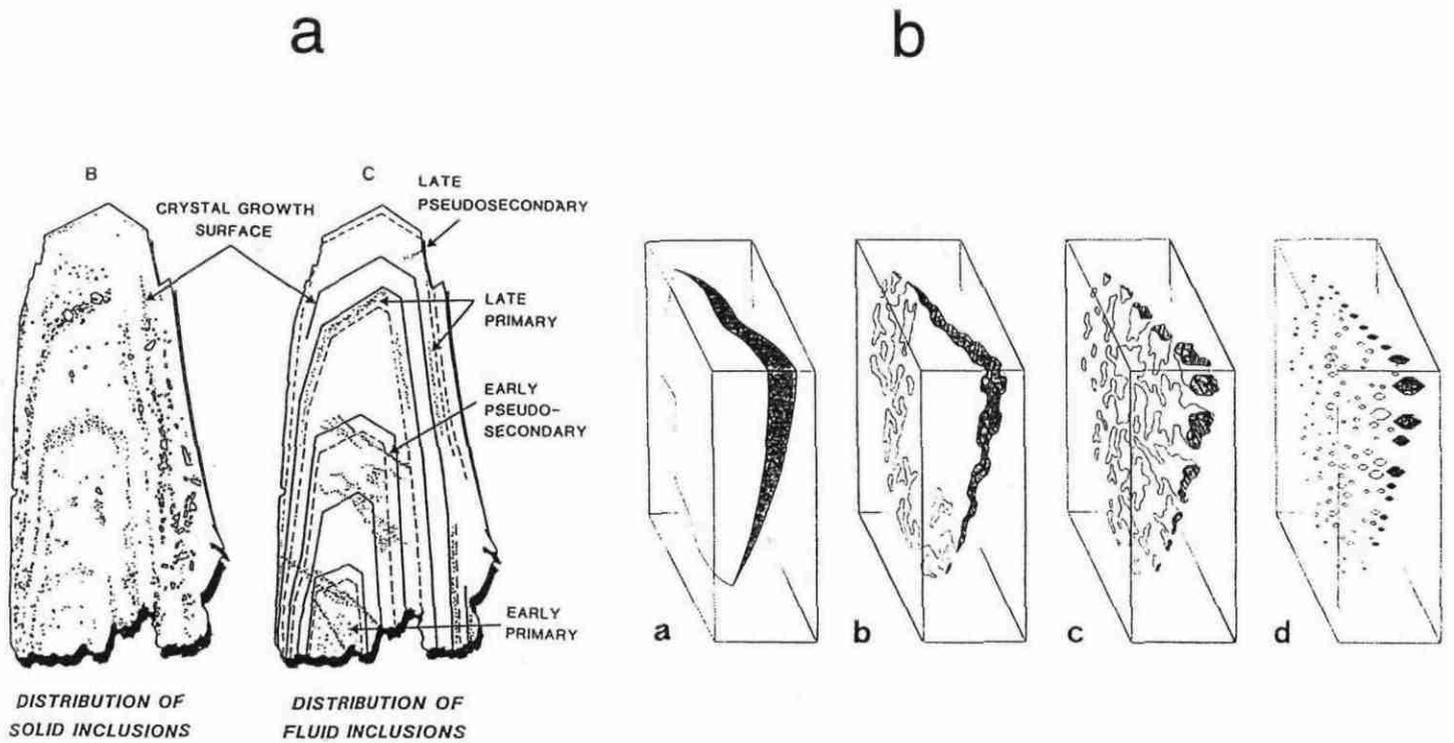


Figure 3: Les différents types d'IF. a: exemple d'IF primaires ou pseudo-secondaires et de leur répartition au sein d'un cristal. Leur relation spatiale avec les zones de croissance permet de définir une chronologie relative de formation des IF (d'après Diamond, 1990). b: mécanisme de formation de plan d'IF secondaire par fracturation-cristallisation (d'après Rodder, 1962).

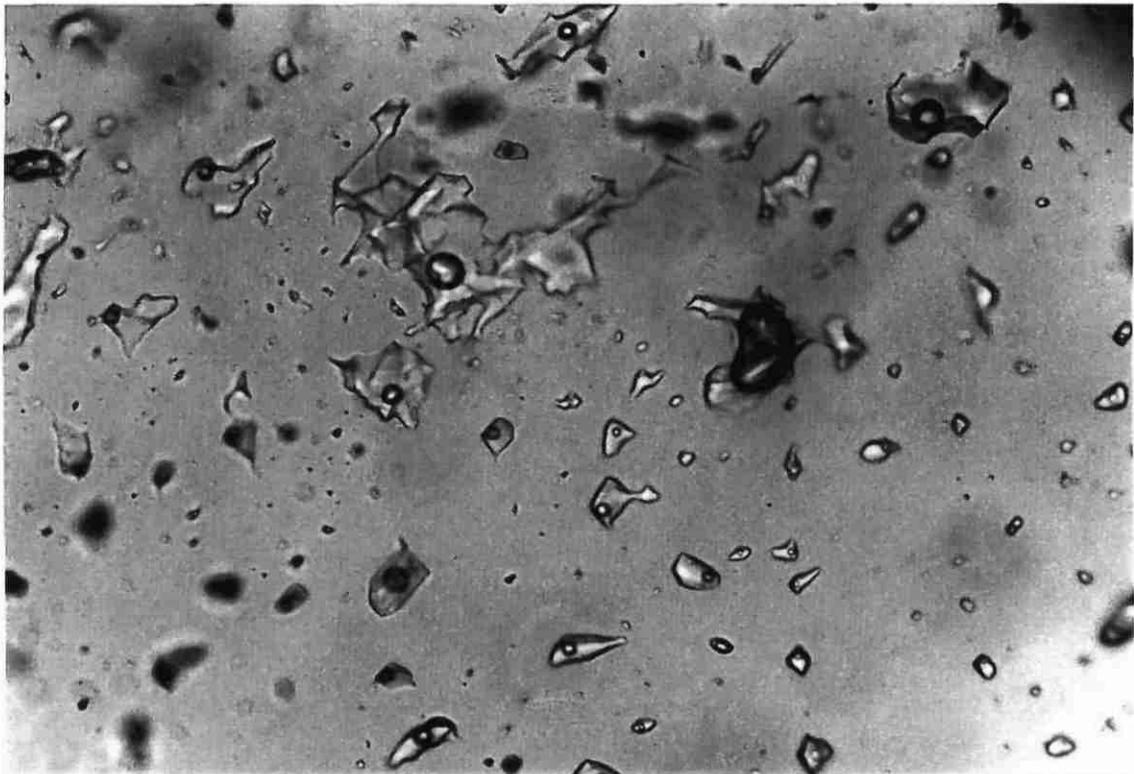


Figure 4: Exemple d'IF affectée par un début de processus d'étranglement. L'IF est étranglée en son centre alors qu'elle se trouve dans des conditions à deux phases. Ce phénomène peut évoluer par la division de l'IF en son milieu donnant deux IF de composition et densité différentes de l'IF originale

mécanismes énoncés dans les expériences de Pêcher et Boullier, 1984; Gratier et Jennaton, 1984; Boullier et al., 1989; Sterner et Bodnar, 1989, Bakker et Jansen, 1991; Cordier et al., 1994). Un exemple de ces textures est donné dans la figure 5c où l'on observe des IF de forme annulaire due à une ré-équilibration sous une pression de confinement supérieure à celle présente lors de la formation des IF.

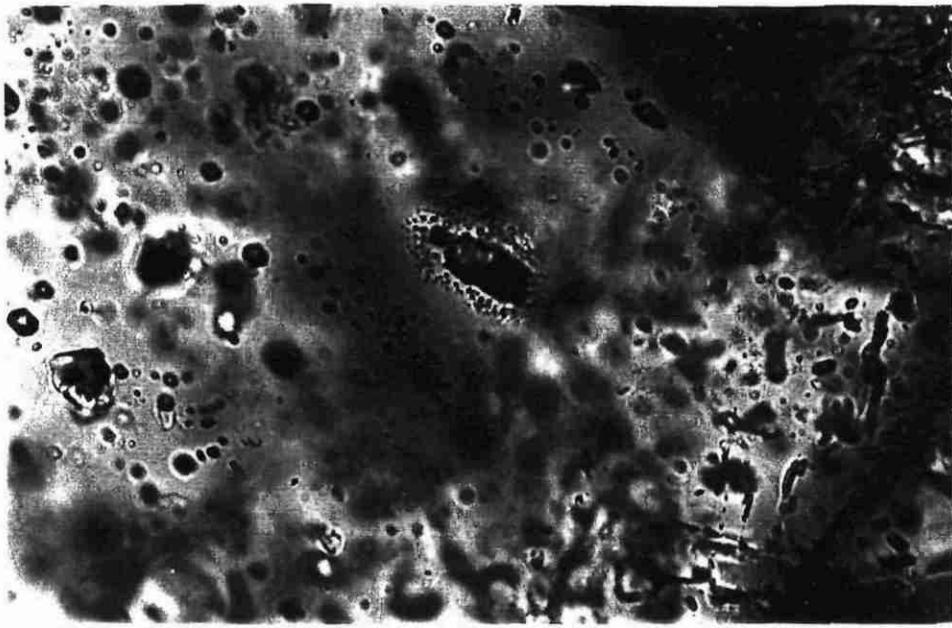
Ces textures sont importantes à déceler puisqu'elles indiquent des transformations des propriétés physico-chimiques des fluides contenus dans l'inclusion. De plus elles peuvent renseigner sur le trajets P-T suivi par la roche après le piégeage des IF (Boullier et al., 1991; Vityk et al., 1995).

### **3. La géométrie des plans d'inclusions fluides et la concentration des inclusions dans le plan**

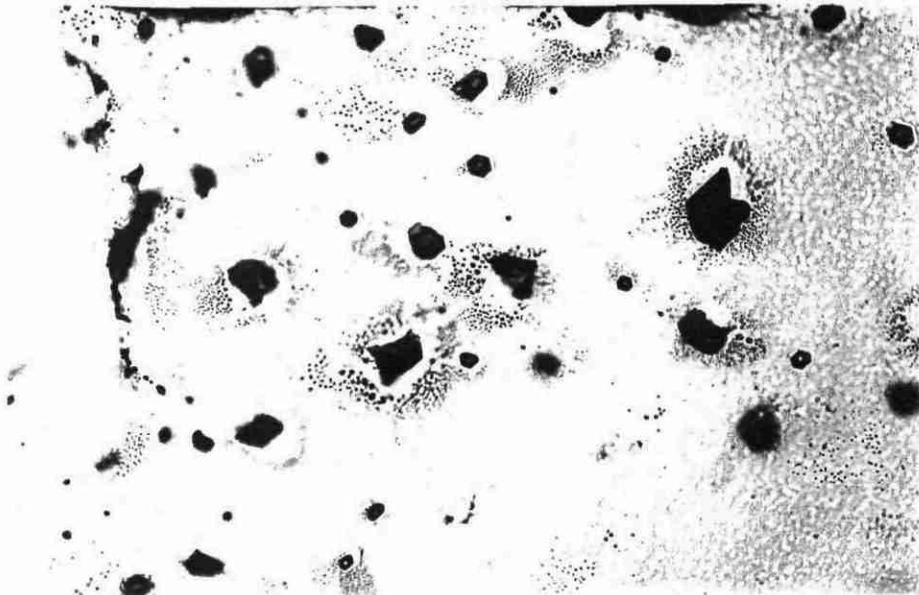
Les plans d'inclusions fluides sont des microfractures qui peuvent se former par expansion thermique, par contrainte tectonique ou par la combinaison des deux (Vollbrecht et al., 1991). Dans le premier cas l'orientation est aléatoire mais elle peut aussi être contrôlée par l'orientation cristallographique des minéraux (dans le cas du quartz la fracturation par expansion thermique se fait préférentiellement parallèlement à l'axe <C> (Mainprice et al., 1993)). Le deuxième cas a été mis en évidence par les travaux détaillés de Tuttle (1949) qui observe une orientation de plans d'IF constante à l'échelle régionale indépendamment de la structure cristallographique des grains de quartz et des différentes lithologies observées. L'auteur propose une relation entre l'orientation des plans d'IF avec les contraintes régionales, les plans pouvant se former perpendiculairement à la direction d'extension ou parallèlement à la direction de cisaillement. Par la suite, de nombreuses études sur l'analyse des cracks indiquent que la plupart sont des microfractures de mode I (Brace et Bombolakis, 1963; Tapponier et Brace, 1976), ainsi l'orientation des plans d'IF doit être confondue avec le plan  $\sigma_1$ - $\sigma_2$ .

Dans le cas de formation de plans d'IF par contrainte tectonique, l'étude de la géométrie des plans au microscope optique, associé éventuellement à un analyseur d'image, permet donc d'acquérir de nombreux renseignements. En effet, la détermination de l'orientation confirmée par l'étude de la fracturation mésoscopique et macroscopique permet de déterminer les contraintes régionales au moment de leur formation (Lespinasse et Pêcher, 1986; Kowallis et al., 1987). Cette méthode combinée à l'étude physico-chimique des fluides permet d'obtenir des renseignements sur l'évolution des propriétés physico-chimiques des fluides (composition, condition P-T de formation, ect...) lors des différents événements tectoniques (Pêcher et al., 1985; Cathelineau et al., 1990). Dans les travaux les plus récents ces caractéristiques sont utilisées afin de résoudre des problèmes spécifiquement tectoniques tels les mécanismes d'évolution des zones de détachement lors d'extension post-orogénique (Selverstone et al., 1995). L'étude de ces plans renseigne également sur l'état (géométrie, connectivités des fractures) et l'évolution de la perméabilité de fracture du milieu rocheux au cours de la déformation, de l'évolution de la composition des fluides et des conditions pression-température de leur circulation (Lespinasse, 1990; Lespinasse et Cathelineau, 1990).

a



b



c

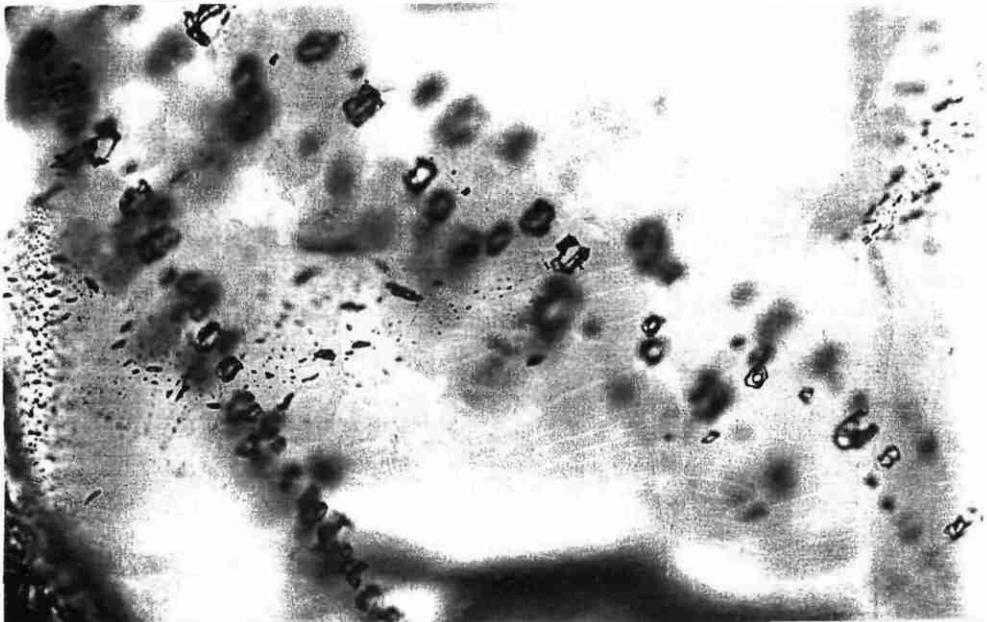


Figure 5 : Différents types de textures particulières de ré-équilibrage avec ou sans fracturation. a: Halo d'explosion (décrépitation) dû à une surpression dans l'IF par rapport à la pression de confinement ( $P_c$ ) (éch. provenant de Zabargad). (larg. photo: 0.2 mm) b: Halo d'implosion dû à une sous-pression dans l'IF par rapport à la  $P_c$  (éch. provenant du Népal). (larg. photo 0.5 mm) c: Forme annulaire des IF interprétée comme une ré-équilibrage à plus haute pression de confinement (éch. provenant du Népal) (larg. photo: 1 mm) (photos d'A.M. Boullier).

#### **4. La composition des inclusions fluides à température ambiante**

Un premier aperçu sur la composition des inclusions fluides peut se faire au microscope, à température ambiante, sachant que la majorité des fluides terrestres sont composés essentiellement de H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub>, puis dans une moindre mesure de NaCl (et autres chlorures), CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>. Si une seule phase est présente dans l'inclusion, seule la microthermométrie pourra nous renseigner sur sa nature. Si deux phases coexistent la plus externe est une phase liquide aqueuse ou volatile selon l'aspect translucide ou sombre, la plus interne pouvant être soit de la vapeur d'eau, soit une phase volatile (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ou N<sub>2</sub> ou l'association de deux d'entre eux ou des trois). L'observation de trois phases non solides dans une inclusion témoigne de la présence d'une phase liquide aqueuse et de deux phases essentiellement carboniques (CO<sub>2</sub> liquide et vapeur). L'observation de solide peut apporter des informations complémentaires sur la détermination du système auquel appartient l'inclusion fluide. La connaissance rapide de la composition des inclusions soit à température ambiante, soit à la lumière des premières observations en microthermométrie, permet de déterminer dans quel système l'on se trouve et à quel changement de phase, parfois peu visible, s'attendre lors de la microthermométrie.

#### **5. Détermination d'une chronologie relative entre les différentes familles d'IF**

Une fois chaque famille bien différenciée il convient d'essayer d'établir une chronologie relative entre les différentes familles afin de connaître l'évolution de la composition et de la densité des fluides dans le temps.

Dans le cas d'exsudats de quartz les IF clairement identifiées comme primaires, sont considérées comme les plus précoces, leur formation étant liée à la cristallisation de l'exsudat. Il est parfois possible d'établir une chronologie des inclusions primaires lorsque les zones de croissance des minéraux sont bien visibles ou quand les mécanismes de croissance de la veine ou l'ordre de cristallisation des différents minéraux est bien connu. Ces mécanismes peuvent être déduits d'observations texturales détaillées au microscope optique ou grâce à des techniques comme la SEM LC qui permet de distinguer les différentes générations de quartz.

Les IF secondaires dans le quartz sont forcément postérieures à la cristallisation de l'exsudat de quartz. Une chronologie relative entre les différentes familles de plans d'IF peut s'établir d'après des critères d'intersections entre elles ou selon leur relations avec les microstructures (limites de grains, microfractures...) ou macrostructures (déformations fragiles et ductiles chronologiquement bien définies par ailleurs). Entre des plans d'IF de même relation avec les microstructures, plusieurs critères permettent d'établir une chronologie entre les plans d'IF de familles différentes (Roedder, 1984; p344). Le plus utilisé au cours de cette étude est celui où deux plans d'IF de tailles et de compositions différentes se recoupent, le plan le plus précoce est alors remplacé par le fluide le plus tardif au niveau de l'intersection. Parfois il est possible d'observer des plans décalés par d'autres plans plus tardifs. L'utilisation de la LC SEM permet une meilleure observation des réseaux de microfractures et ainsi de mieux déterminer la chronologie relative des plans d'inclusions fluides.

## **6. Analyse tridimensionnelle du réseau de microfracturations (des plans d'IF)**

Une dernière étape avant d'entreprendre l'étude physico-chimique des IF proprement dite consiste à caractériser les réseaux de microfractures. Cette étude présente une grande importance pour les raisons que nous avons évoquées précédemment dans le paragraphe "géométrie des plans d'IF". Elle s'effectue sur des lames épaisses provenant d'échantillons orientés et bien localisés dans la région étudiée. La lame est tout d'abord cartographiée à l'aide d'un lecteur de microfilm ordinaire afin que toute observation ou mesure ultérieure puisse être localisée précisément. Par la suite elle est placée sous un microscope optique normal, relié à un logiciel d'analyseur d'images mis au point au CRPG Nancy (Lapique et al., 1988; Champenois, 1989). Les plans d'inclusions fluides ont été distingués selon leur remplissage (nature et textures des inclusions fluides), leur typologie (caractère transgranulaire ou intergranulaire) et leur géométrie (direction, pendage, longueur, épaisseur). Chaque plan est défini par trois points: Deux points représentent sa direction par rapport à une droite de référence (qui dans notre étude correspond à la linéation d'étirement pour simplifier), le troisième point correspond à la largeur du plan (l) projetée dans le plan de la lame mince. Ainsi connaissant l'épaisseur de la lame (e) on peut déterminer le pendage du plan  $\alpha$  tel que  $\alpha = \arctg(e/l)$ . Les orientations des différentes catégories de plans d'IF par rapport à la schistosité et la linéation d'étirement ont été reportées sur un diagramme de Schimdt (hémisphère inférieur) avec un contourage de densité de 1%, 2%, 3% et 4%, grâce au logiciel Stéréonet 4.15 de Allmendinger. Pour l'interprétation des résultats, il convient de rappeler les précautions à prendre dans les matériels intraschisteux dont les directions de microfractures diffèrent souvent des directions de contraintes connus régionalement probablement à cause des réorientations locales de contraintes du à l'hétérogénéité du matériel.

### ***C Aspect analytique***

L'étude physico-chimique des fluides contenus dans les inclusions fait appel à de nombreuses méthodes et moyens analytiques dont deux ont été utilisés au cours de cette étude: la microthermométrie et la spectroscopie Raman.

#### **1. La microthermométrie**

Cette méthode consiste à observer des changements de phases et à déterminer la température à laquelle ils se produisent, en refroidissant ou en réchauffant l'échantillon à étudier. Cette étude a été effectuée au CRPG-CNRS de Nancy sur une platine USGS-Fluid Inc. (description dans Roedder, 1984). Le principe consiste à faire circuler un gaz à une température souhaitée autour d'une lame épaisse pouvant être observée simultanément au microscope. Pour le refroidissement l'azote gazeux est refroidi par de l'azote liquide (jusqu'à  $-196^{\circ}\text{C}$  au maximum), et la température peut être contrôlée lors du réchauffement grâce à une résistance électrique reliée au système. Pour le chauffage à  $T > 30^{\circ}\text{C}$ , l'air est réchauffé par la résistance. La

connaissance de la température est possible grâce à la présence d'un voltmètre calibré en thermomètre relié à l'échantillon par un thermocouple. Afin d'avoir une bonne précision sur les températures observées, il convient de minimiser les gradients thermiques entre la température lue et la température réelle présente dans l'inclusion étudiée, ainsi que d'effectuer une bonne calibration avant toute manipulation. La calibration s'effectue à partir d'échantillons standards par des transitions de phases correspondant à des points invariants bien déterminés dans des inclusions fluides synthétiques (Syn Flinc, Pearisburg, USA). Selon le constructeur une bonne calibration d'une USGS est stable durant six mois en l'absence d'incidents particuliers (coupures d'électricité, ...) cependant, au cours de cette étude, les standards ont été vérifiés avant et après toute série de manipulations afin de détecter les éventuelles dérives électroniques. La précision de l'appareil annoncée par le constructeur est de 0,1°C à -56,6 et de 1°C à 374,1°C.

Les mesures de changement de phase s'effectuent durant le chauffage pour éviter les problèmes de métastabilité lors du refroidissement. Les échantillons sont d'abord refroidis (jusqu'à -190°C) et réchauffés rapidement pour observer les principaux changements de phase que les IF présentent. A basse température les mesures les plus fréquentes sont: la température de fusion de la phase carbonique ( $T_{fCO_2}$ ), la température de l'eutectique de la solution aqueuse ( $T_e$ ), la température de fusion de la glace ( $T_{fG} \leq 0,0^\circ\text{C}$ ), température de fusion des clathrates, hydrates de gaz ( $T_{fcl}$ ), la température de fusion d'hydrate de sels ( $T_{fH}$  pour hydrohalite) et la température d'homogénéisation de la phase carbonique ( $T_{hCO_2}$ ). A haute température (jusqu'à 700°C) il est possible de mesurer la température de fusion du cube de sels ( $T_{fS}$ ), la température d'homogénéisation totale de l'inclusion ( $T_{htot}$ ) et la température de décrépitation ( $T_d$ ). Les mesures de haute température peuvent détruire les IF (par décrépitation) ou les vider de leur contenu partiellement. Pour cette raison, les analyses en spectrométrie Raman s'effectuent avant les mesures à haute température. Lorsque la température des changements de phase est approximativement déterminée, l'échantillon est refroidi 40°C en dessous de la température de changement de phase la plus basse et est réchauffé rapidement jusqu'à 10°C avant chaque transition, puis de plus en plus lentement jusqu'à une vitesse 1°C par minute juste avant le changement à observer. Pour la mesure de  $T_{fcl}$ , on procède à des paliers de 0,1°C (refroidissement tous les 0,1°C) jusqu'à ce que le clathrate ne se reforme plus. Chaque IF étudiée doit être exactement localisée dans la lame et ses caractéristiques pétrographiques (taille, morphologie,  $F_{car}$ ...) doivent être notées avec attention.

## **2. La spectroscopie Raman**

La microsonde à effet Raman permet de déterminer la composition et la concentration de certains constituants en utilisant le phénomène de changement de longueur d'onde caractéristique d'un milieu matériel qui accompagne la diffusion de la lumière. C'est une méthode non destructive et ponctuelle qui permet de connaître la composition de la phase volatile (détermination du CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S pour les plus fréquemment utilisées), et de nombreuses phases solides. Le principe et les applications diverses de la microsonde Raman dans l'étude des inclusions fluides sont décrites par Dhamelin court et al. (1979), Dubessy et al. (1983), Pasteris et al. (1988) et Dubessy et al. (1992a). Les analyses ont été effectuées sur la microsonde

Raman du centre BRGM-CRSCM à Orléans par Claire Bény. Les phases volatiles d'inclusions fluides présentant des mesures microthermométriques moyennes pour chaque groupe ont été analysées ainsi qu'un solide présent dans une inclusion. L'azote (N<sub>2</sub>) a été systématiquement mesuré par différence entre le signal recueilli lors de l'analyse de l'inclusion et le signal recueilli lors d'une analyse de la matrice correspondant à l'azote atmosphérique. Les données Raman sont représentées sous forme de diagramme triangulaire qui tient compte du CO<sub>2</sub> dissous dans l'eau qui peut être important contrairement aux autres volatils dont la solubilité dans l'eau est négligeable (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S...).

## **D. ASPECT THERMODYNAMIQUE**

### **1. Détermination des propriétés V-X dans les systèmes aqueux salins à constituants volatils**

Une grande majorité des IF étudiées au cours de cette étude appartiennent aux systèmes aqueux salins (H<sub>2</sub>O±NaCl) à constituants volatils (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>). L'étude de tels systèmes s'effectue en considérant deux sous-systèmes indépendants à température ambiante, un système aqueux et un système à un ou plusieurs constituants volatils. La densité et la composition totale de l'inclusion sont déterminées à partir des densité et composition de la phase volatile et aqueuse et de la fraction volumique de la bulle vapeur (F<sub>car</sub>). Dans le cas de systèmes aqueux, la densité de la phase aqueuse dépend de la salinité facilement déterminée grâce à la température de fusion de la glace ou de la halite dans les solutions saturées. De même, la densité d'inclusions à CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et/ou N<sub>2</sub> est obtenue en connaissant la température d'homogénéisation CO<sub>2</sub>L-CO<sub>2</sub>V pour le CO<sub>2</sub> pur (Angus et al., 1976; Parry, 1986), associée à la température de fusion du CO<sub>2</sub> ou les données Raman pour le système CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> (Darimont et Heyen, 1988; Van der Kerkhof, 1990), CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub> (Heyen et al., 1982; Van der Kerkhof, 1990) ou CH<sub>4</sub>-N<sub>2</sub> (Thiéry et al., 1994 pour les trois systèmes). Le calcul de densité est également possible dans le système ternaire CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-N<sub>2</sub> lorsque la température d'homogénéisation liquide-vapeur et la composition de la phase volatile sont connues (Thiéry et al., 1994). Cependant lorsque les deux sous-systèmes aqueux et volatils coexistent ensemble au sein d'une même inclusion il existe des interactions liées notamment à la formation de clathrates. Les clathrates sont des hydrates de gaz formés à partir de l'eau et des gaz (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>) en proportions variables. De plus ils excluent les sels de leur réseaux (Davidson, 1973) augmentant ainsi la salinité de la phase aqueuse résiduelle (Larson, 1955, p69-70). Les liquides aqueux et carbonique après la formation des clathrates ne reflète donc plus les compositions initiales et les mesures microthermométriques, en présence de clathrates, ne peuvent être utilisées pour déterminer la composition et la densité des phases aqueuses et volatiles de l'inclusion. Par contre les températures de fusion des clathrates (T<sub>fCl</sub>), et d'homogénéisation de la phase carbonique (ThCO<sub>2</sub>) en absence stable ou métastable de clathrates seront les mesures microthermométriques utilisées pour déduire les propriétés P-V-X des IF étudiées. Selon les systèmes auxquels appartiennent ces IF, leur composition et les conditions PT de leur piégeage plusieurs cas se distinguent:

# CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O SYSTEM: ISOPLETHIC SECTIONS

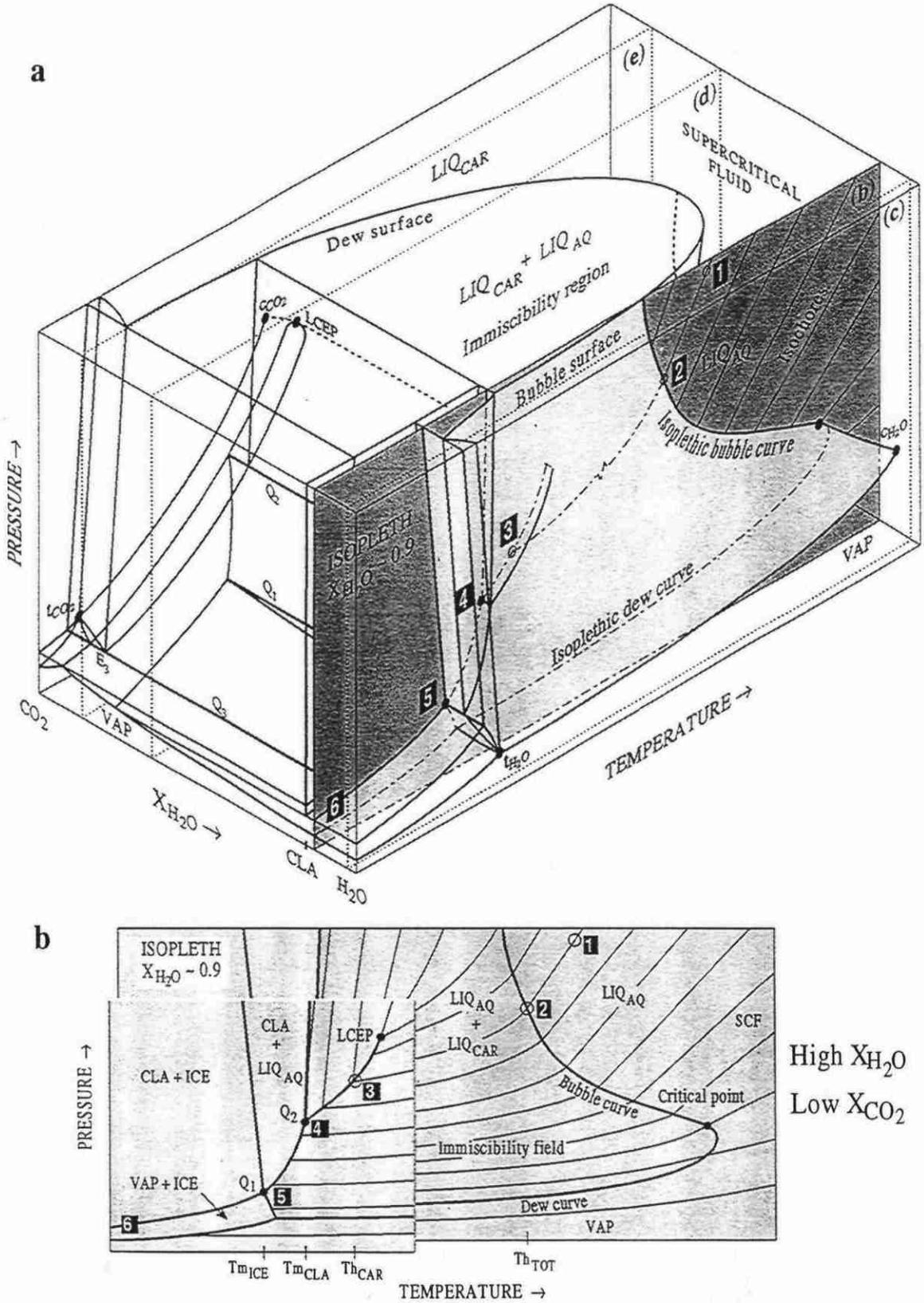


Fig. 6: (a) Schematic P-T-X model of phase relations in the system CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O (not to scale; cf. Fig. 1), showing an isopleth (shaded) for bulk X<sub>H<sub>2</sub>O</sub> ~ 0.9. Selected isochores are drawn for the one-phase field. The complete isochore for an inclusion trapped at point 1 is marked by path 1-6. (b) Schematic phase relations (heavy lines) for the isopleth in (a). Selected isochores (fine lines) are shown for the fluid fields. The relative size of the low P-low T area (box) is greatly exaggerated, as in (a). After Diamond, 1994.

## CO<sub>2</sub> - H<sub>2</sub>O SYSTEM: ISOPLETHIC SECTIONS

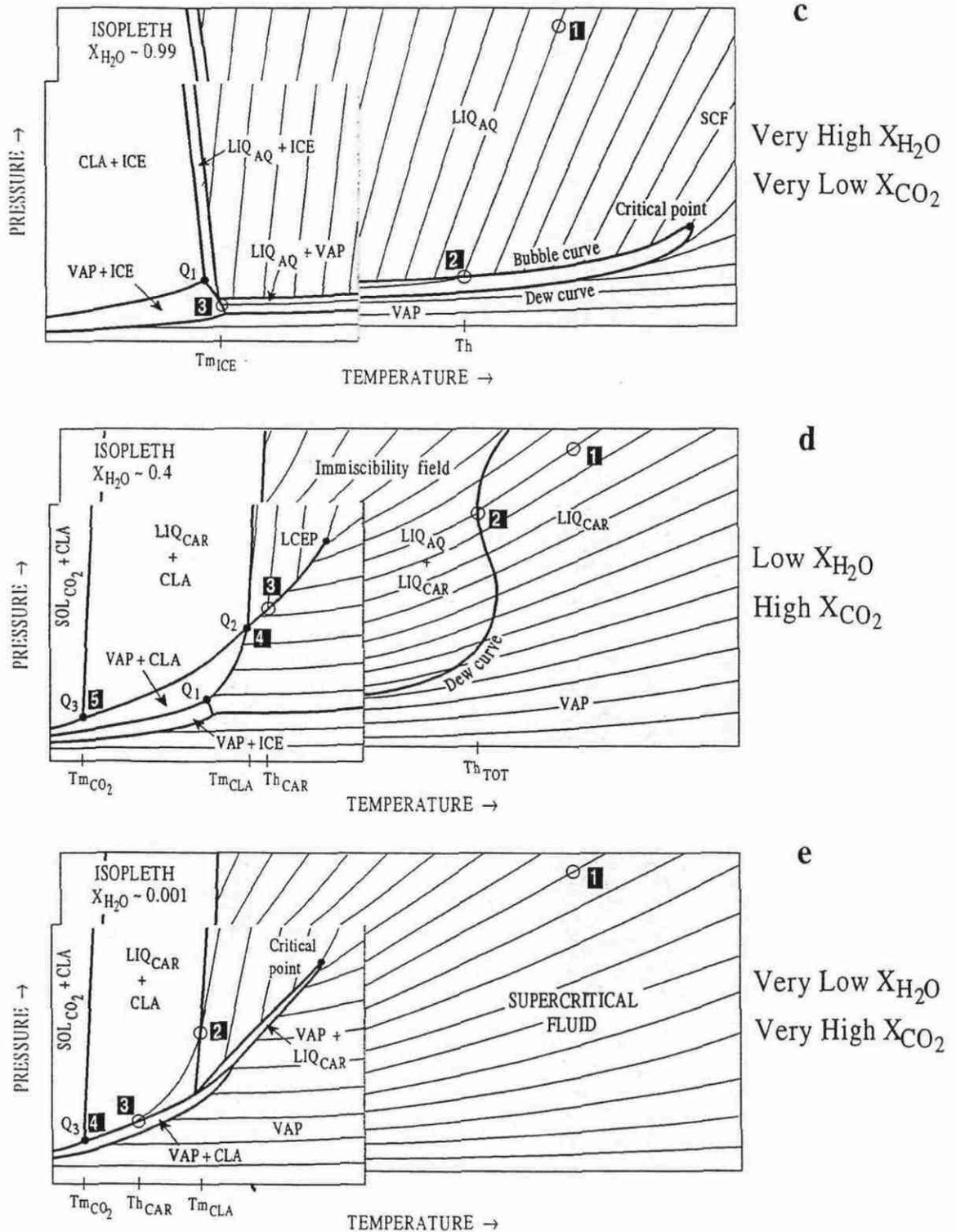


Fig. 6(c-e): Isopleths through the equilibrium P-T-X model of the CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O system in (a). The relative size of the low P - low T areas (boxes) is greatly exaggerated, as in (a). Schematic phase relations are shown in heavy lines, and selected isochores through fluid fields are shown in fine lines. The numbered paths are complete isochores for inclusions trapped at point 1 on each isopleth. (c) X<sub>H<sub>2</sub>O</sub> ~ 0.99 (d) X<sub>H<sub>2</sub>O</sub> ~ 0.4 (e) X<sub>H<sub>2</sub>O</sub> ~ 0.001.

## 1. 1. IF à phase volatile à CO<sub>2</sub> pur

Ce cas se caractérise par une TfCO<sub>2</sub> de -56.6°C car la présence de tout autre volatile abaisse cette température (Donnelly et Katz, 1954). La présence de CO<sub>2</sub> pur peut être également confirmée par la spectrométrie Raman.

### 1. 1. 1. le système CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O

Dans le système à CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O (voir fig.6), quelles que soit la composition de l'IF et ses conditions de piégeage (voir sections isoplèthes b, c, d et e et les différentes isochores sur chaque diagramme), la Tfcl se mesure toujours en présence d'au minimum deux autres phases. Ainsi la réaction est au minimum univariante et la connaissance d'un seul paramètre (Tfcl par microthermométrie) permettra de connaître la pression (Pfcl) à cette température (fig. 7).

- Cependant lorsque la ThCO<sub>2</sub> s'observe, la densité de la phase volatile sera toujours estimée à partir de cette valeur dans la pratique. Cette détermination se fait directement par la mesure de ThCO<sub>2</sub> en phase liquide ou vapeur lorsque Tfcl < ThCO<sub>2</sub>. Dans le cas où Tfcl > ThCO<sub>2</sub>, ThCO<sub>2</sub> n'indique plus directement la densité de la phase volatile puisqu'une quantité de CO<sub>2</sub> est incluse dans le clathrate. Il est cependant souvent possible d'homogénéiser le CO<sub>2</sub> en absence métastable de clathrates lorsque l'homogénéisation s'effectue avant la cristallisation des clathrates au refroidissement. Dans les deux cas, la densité de la phase volatile (dcCO<sub>2</sub>) peut donc toujours être déduite à partir de la ThCO<sub>2</sub> pour un système pur en consultant les données d'Angus et al (1976) (fig. 8) ou d'après les équations empiriques de Parry (1986) ci-dessous déterminées d'après les données d'Angus et al (1976) (1):

$(d_{CO_2}/dc_{CO_2}-1)=C_0(1-T/T_c)^{0,347+\sum D_i(1-T/T_c)^{(i+1)/3}$  lorsque l'homogénéisation a lieu en phase liquide  
et  $(d_{CO_2}/dc_{CO_2}-1)=D_0(1-T/T_c)^{0,347+\sum C_i(1-T/T_c)^{(i+1)/3}$  lorsque l'homogénéisation a lieu en phase vapeur

avec Tc et dcCO<sub>2</sub> étant respectivement la température critique et la densité correspondante du CO<sub>2</sub> pur (304,21K et 0,01059 mol.cm<sup>-3</sup>). Les coefficients Ci et Di sont:

$$C_0=1,9073793$$

$$C_1=0,38225012$$

$$C_2=0,42897885$$

$$D_0=-1,7988929$$

$$D_1=-0,71728276$$

$$D_2=1,7739244$$

- Dans le cas d'IF de très forte ou très faible densité où l'homogénéisation ne se produit ou ne s'observe jamais (dans figure 6, cas d'isochores très redressées pour des isoplètes à X<sub>H<sub>2</sub>O</sub> > composition des clathrates ou des isochores les plus faiblement pentées pour les moins denses), il est possible de connaître la densité de la phase volatile à partir de TfCl. Cependant, pour les densités très importante la réaction de dissociation du clathrate s'effectue selon une courbe quasi-verticale impliquant une forte variation de P pour une faible variation de température correspondant à une large erreur sur l'estimation de la densité de la phase volatile. Pour les densités très faible la connaissance de Tfcl permet de déterminer Pfcl

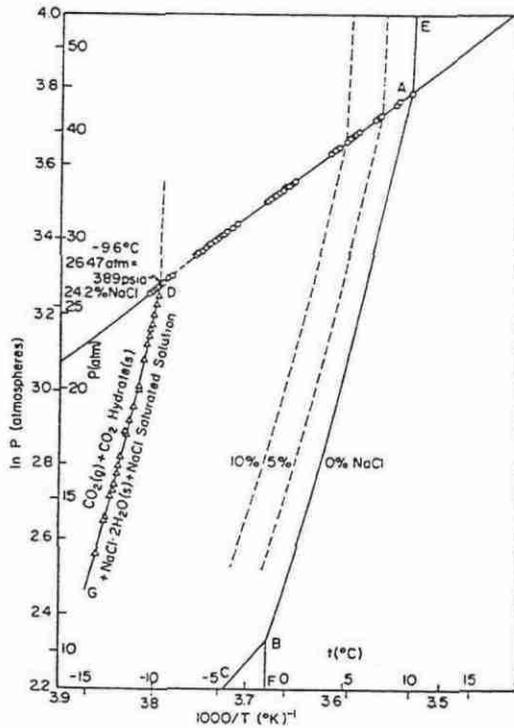


Figure 7: diagramme de phase expérimental dans le système CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-NaCl reliant la salinité, la température de fusion des clathrates en présence de CO<sub>2</sub> liquide, CO<sub>2</sub> vapeur et H<sub>2</sub>O, et la pression interne à l'intérieur de l'inclusion (d'après Bozzo et al, 1975).

Equation de Parry (1986) d'après les données de Angus et al. (1976)

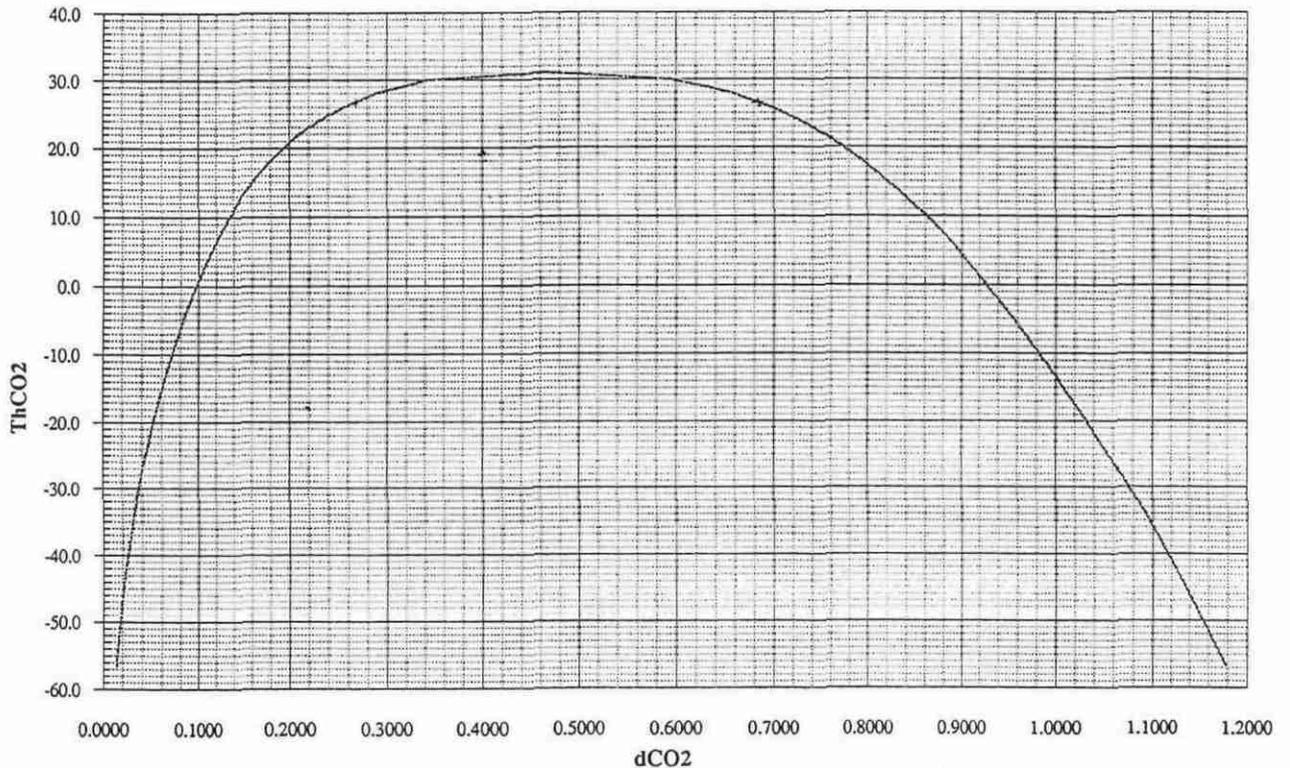


Figure 8: diagramme permettant de déterminer la densité d'une phase carbonique à CO<sub>2</sub> pur connaissant la température et le mode d'homogénéisation du CO<sub>2</sub> construit à partir des équations de Parry (1986) d'après les données expérimentales d'Angus et al (1976)



sur le diagramme de Bozzo et al. (1975) (fig. 7) et Collins (1979) sur la courbe  $X_{NaCl}=0$ . La phase aqueuse étant considérée incompressible cette  $P_{fcl}$  correspond à la pression interne dans la phase volatile. Ainsi, le report du point ( $T_{fcl}$ ,  $P_{fcl}$ ) sur le diagramme P-T du  $CO_2$  pur permet de déterminer la densité de la phase volatile (fig. 9).

### 1. 1. 2. le système à $CO_2-H_2O \pm NaCl$

Dans ce cas, la réaction de fusion du clathrate n'est univariante que lorsque la concentration en sels est connue et la  $T_{fcl}$  dépendra de cette concentration. Les données et équations permettant de calculer la salinité et donc la densité de la phase aqueuse seront différentes selon les cas:

- La température de fusion des clathrates ( $T_{fcl}$ ) se fait en présence de  $CO_2L-CO_2V$  ( $T_{fcl} < T_{hCO_2}$ ),  $T_{fcl}$  est un point invariant et sa mesure nous indique la salinité de la phase aqueuse d'après l'équation suivante (Bozzo et al., 1975; Collins, 1979) (diagramme en fig. 7):

$$wt\%NaCl = 15,52022 - 1,02342 T_{fcl} - 0,05286 T_{fcl}^2$$

- Si  $T_{fcl} > T_{hCO_2}$ , la salinité pourra être estimée grâce aux équations développées dans Diamond (1992).

eq.  $wt\%NaCl = 15,6151 - 0,03627x + 0,00164x^2 - 0,9491y - 0,00287xy - 0,02464y^2 - 0,00107xy^2 - 0,00222y^3$  lorsque l'homogénéisation a lieu en phase liquide

eq.  $wt\%NaCl = 15,5131 + 0,065705x - 0,00778x^2 - 1,05135y + 0,02687xy - 0,04717y^2 - 0,00138xy^2 - 0,00411y^3$  lorsque l'homogénéisation a lieu en phase vapeur.

avec  $x$  étant  $T_{hCO_2}$  en absence métastable de clathrates entre  $-20$  et  $+10^\circ C$ ,  $y$  étant  $T_{fcl}$  et eq.  $wt\% NaCl$  étant la concentration en sels entre  $0$  et  $21wt\%$ .

- Si  $T_{fcl}$  se fait en absence de phase carbonique liquide ou vapeur: dans ce cas, pour déterminer la densité de la phase carbonique il faut connaître la salinité de la phase aqueuse. Si la  $T_{fG}$  est mesurable il est possible d'estimer la salinité à partir de la température de fusion de la glace corrigée par la formule de Marckham et Kobe (1941):  $T_{fG} \text{ réelle} = T_{fG}$  en présence de clathrates  $+ 1,48$ . Si la  $T_{fG}$  n'est pas mesurable il faut avoir recours à d'autres méthodes afin d'obtenir la salinité. Par la suite, en connaissant la  $T_{fcl}$  et la salinité on en déduit la  $P_{fcl}$  sur les diagrammes PTX (Bozzo et al., 1975; Collins, 1979) (fig. 7). Puis on procède comme dans le cas du système  $CO_2-H_2O$ , en reportant le point ( $T_{fcl}$ ,  $P_{fcl}$ ) sur le diagramme du  $CO_2$  pur on détermine la densité de la phase volatile (fig.9).

Cependant la non-observation de  $T_{hCO_2}$  n'implique pas forcément l'absence de phase carbonique liquide autour de la phase vapeur qui peut être présente mais d'épaisseur inférieure à la résolution du microscope (Sterner, 1992). Dans ce cas il est possible d'estimer une densité maximale de la

phase volatile (dcar max) d'après la méthode développée dans Dubois et al., (1992) d'après l'équation

$$d_{car\ max} = d_{CO_2} - [r_b^3(d_{CO_2} - d_{vCO_2}) / (\partial R + r_b)^3]$$

où  $d_{vCO_2}$  est la densité de la phase vapeur à  $-56.6^\circ C$  ( $0.014\ g.cm^{-3}$ ; Angus et al., 1976),  $d_{CO_2}$  est la densité de la phase liquide à  $-56.6^\circ C$  ( $1.179\ g.cm^{-3}$ ; Angus et al., 1976),  $\partial R$  est l'épaisseur du ménisque (selon la résolution du microscope) et  $r_b$  est le rayon de la bulle vapeur.

### 1. 2. IF à phase volatile à CO<sub>2</sub> avec plusieurs composants (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S...)

L'addition de composants autre que le CO<sub>2</sub> entraîne une modification du champ de stabilité des clathrates. Ces conditions de stabilité varient en fonction de la composition de la phase volatile et de la pression interne à Tfcl, induisant une quasi-infinité de champs de stabilité des clathrates, ce qui exclue une approche purement expérimentale. Ainsi, l'établissement de diagramme quantitatifs permettant de calculer les propriétés VX pour des IF appartenant à ses systèmes complexes ne peut se faire qu'à partir de la modélisation thermodynamique des conditions de stabilité de ces clathrates. Ces modèles théoriques sont élaborés à partir d'une approche thermodynamique statistique et doivent être discutés d'après les données expérimentales sur IF synthétisées selon des conditions caractéristiques. Selon les conditions de piégeage des IF et leur composition plusieurs méthodes permettent de déterminer la salinité et la densité de la phase volatile. Pour les inclusions présentant une homogénéisation de la phase carbonique en absence stable ou métastable de clathrates, Diamond (1994b) propose une méthode permettant de calculer la salinité à partir de la Tfcl pour les IF appartenant à des systèmes complexes multivolatils et multi-electrolytes. La détermination de la densité de la phase carbonique s'effectue en considérant les systèmes volatils purs (sans phase aqueuse), d'après les données expérimentales ou équations d'état appropriées déjà énoncées précédemment. Pour les inclusions peu denses (ou Tfcl s'effectue en présence de vapeur et de liquide aqueux), Dubessy et al (1992b) propose un modèle qui permet de calculer le volume molaire de la phase vapeur et la salinité de la phase liquide connaissant la TfG, le remplissage vapeur, et la composition de la phase vapeur.

### 1. 3. Calcul des propriétés V-X globales de l'inclusion fluide

Les densité et composition des phases aqueuse et volatile déterminées au cours du paragraphe précédent à partir des données microthermométriques, du Raman et de l'analyse des diagrammes de phases (PVTX) permettent de calculer la densité totale de l'inclusion selon l'équation suivante:

$$d_{totale} = d_{car}.F_{car} + (1-F_{car}).d_{aq}$$

La densité totale de l'IF est considérée comme constante au cours des manipulations (microthermométrie), par contre les densités partielles (dcar et daq) et le degré de remplissage vapeur varient tout au long de la trajectoire P-

T suivie par l'IF. Ainsi, la détermination de la densité de la phase carbonique, aqueuse et du degré de remplissage de la phase vapeur doit théoriquement s'effectuer à la même température. Cette température est fixée par le dernier changement de phase observé ( $T_{HCO_2}$ , ou  $T_{fcl}$ ) et qui correspond à l'entrée de l'inclusion dans un champ à deux phases à l'équilibre. Ainsi, selon les cas, la densité de la phase carbonique sera calculée ou estimée soit à la température du dernier changement de phase soit à une température inférieure (estimation à partir de  $T_{HCO_2}$  en absence métastable de clathrates quand  $T_{HCO_2} < T_{fcl}$ ) d'après les méthodes décrites au paragraphe précédent. La solubilité de l'eau (environ  $10^{-3}$  moles) ou des sels dans la phase carbonique est très faible et peut être négligée dans le calcul de la densité de la phase carbonique.

La densité de la phase aqueuse dépend de la salinité et du  $CO_2$  dissous dans la solution aqueuse. Ce  $CO_2$  est souvent non-négligeable et dépend de la composition de la phase volatile et aqueuse, de la pression et la température. Son calcul s'effectuera donc à la température du dernier changement de phase. Par contre la salinité de la phase aqueuse est constante au cours des changements P-T ainsi sa détermination peut être faite à une autre température que celle correspondant au dernier changement de phase. Elle se fait, selon les cas, à  $T_{fG}$  ou  $T_{fcl}$ . Les quantités de  $N_2$ ,  $CH_4$  ou  $H_2S$  dissoutes dans la phase aqueuse sont négligeables et n'entrent pas dans les calculs de la densité totale.

Pour des raisons de meilleure observation et précision, le  $F_{car}$  a été estimé à température ambiante (très proche de la température du dernier changement de phase) avec un microscope à bonne optique plutôt que rapidement lors des changements de phase, sous la platine microthermométrie.

La connaissance de la densité de la phase aqueuse et volatile et du  $F_{car}$  permet de calculer la composition totale de l'IF d'après les équations énoncées par Ramboz et al. (1985):

$$n_{H_2O} = [(1 - F_{car}) / 18] \cdot daq$$

$$n_{NaCl} = [n_{H_2O} \cdot 18 \cdot wt\%NaCl] / [58,5 \cdot (100 - wt\%NaCl)]$$

$$n_i = \{ [F_{car} \cdot d_{car} / (44 - 28X_{CH_4} - 16X_{N_2})] \cdot X_i \} + n'_i$$

i désignant respectivement  $CO_2$ ,  $CH_4$  ou  $N_2$

$$X_i = n_i / [n_{H_2O} + n_{CO_2} + n_{CH_4} + n_{N_2}]$$

avec

daq: densité de la phase aqueuse

dcar: densité de la phase carbonique

n: nombre de moles du constituant considéré

$n'_i$ : nombre de moles du constituant i dissoutes dans l'eau

$x_i$ : fraction molaire du constituant i dans la phase carbonique

la quantité de  $CO_2$  dissoute dans l'eau est calculée d'après les formules d'Ellis et Golding (1963):  $n'_{CO_2} = x'_{CO_2} \cdot n_{H_2O}$

$n'_{CO_2}$  est la fraction molaire de  $CO_2$  dissous dans l'eau et se calcule par:

$$n'_{CO_2} = f_{CO_2} / K_{XNaCl}$$

$f_{CO_2}$  étant la fugacité du  $CO_2$  (bars) dans le mélange à T fixée, calculée à partir des fugacités du  $CO_2$  pur (King, 1969) et de la pression partielle du  $CO_2$  dans le mélange gazeux à T.  $K_{XNaCl}$  (en bars) est le coefficient de la loi de Henry pour le mélange  $H_2O-CO_2-XNaCl$  à température donnée. Ce coefficient est donné par Drummond (1981).

#### 1. 4. Détermination du remplissage vapeur

Il est effectué sur plusieurs IF de chaque type qui présentent des formes géométriques simples, à température ambiante (proche de la température d'homogénéisation de la phase carbonique) sous microscope à haute résolution. Les IF de forme ellipsoïdale contenant une vapeur sphérique ont été choisies et les deux diamètres principaux de l'ellipse (2a et 2b, a étant le plus grand axe, b le plus petit) et le diamètre (2r) de la sphère ont été mesurés avec un oculaire gradué. Le rapport des deux volumes  $(r/a)^3 / (b/a)^2$  donne une estimation relativement précise du degré de remplissage de la phase vapeur.

#### 1. 5. Choix de l'équation d'état

La connaissance de la composition et du volume molaire de l'IF permet de calculer l'isochore le long de laquelle elle a été piégée et qui peut être tracée dans un diagramme PT. Le principe est de considérer les systèmes fluides comme une interaction de molécules soumises à des forces attractives et répulsives. L'équation d'état de Van der Waals (1873) modifie donc l'équation d'état des gaz parfaits de la manière suivante:  $p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2}$

correspondant à la différence entre une force repulsive et une force attractive. Cependant cette équation ne prend pas en compte les moments électriques permanents et les formes des molécules qui diffèrent selon la nature du fluide. Elle a donc été modifiée par Redlich et Kwong, 1949 (MRK) soit

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{1}{\sqrt{T}} \frac{a}{v(v+b)}$$

Les équations d'état (EOS) empiriques utilisées dans l'étude des IF sont dérivées de l'EOS de Redlich et Kwong (1949) (MRK) et ne sont valables que dans les conditions PT où elles sont définies et ajustées sur des résultats expérimentaux. De nombreuses équations d'état existent pour des mêmes systèmes et leur choix se justifiera par un meilleur ajustage des courbes sur les courbes expérimentales. Elles sont toutes de la forme:

$$P = P_{\text{répulsive}} - P_{\text{attractive}} = \frac{a(T)}{V-b} - \frac{b}{\sqrt{T} V(V+b)}$$

où les paramètres a et b doivent être ajustés aux données expérimentales par une méthode de régression. Les principales équations d'état utilisées pour calculer les isochores dans l'étude des IF sont résumées dans Dubessy (1994). De nombreuses compilations ont été également effectuées par Van den Kerkhof (1988). Nous n'exposerons brièvement que celles utilisées au cours de cette étude.

### Système de mélanges de gaz

Holloway (1977) propose une équation pour les mélanges de gaz. Les coefficients  $a_{\text{mélange}}$  et  $b_{\text{mélange}}$  sont exprimés à partir des fractions molaires et des coefficients  $a$  et  $b$  des constituants purs:

$$a_{\text{mélange}} = \sum_i \sum_j x_i x_j a_{ij}$$

$$b_{\text{mélange}} = \sum_i x_i b_i \quad \text{Les coefficients } a_{ij} \text{ sont déterminés à partir de } a_{ij} = \sqrt{a_i a_j}$$

Cependant cette formulation ne tient pas compte des interactions entre les espèces et cette équation ne sera utilisée que dans le cas où il n'existe pas d'autres équations d'état plus précises comme pour le système  $\text{N}_2\text{-CH}_4\text{-H}_2\text{O}$ .

### Système $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-CH}_4$

Jacobs et Kerrick (1981) et Kerrick et Jacobs (1981) proposent une EOS

$$p = \frac{RT(1+y+y^2-y^3)}{V(1-y)^3} - \frac{c(T) + \frac{d(T)}{V} + \frac{e(T)}{V^2}}{V(V+b)\sqrt{T}}$$

avec  $y = b_{\text{mélange}}/4V$  et  $a(T,V) = c(T) + d(T)/V + e(T)/V^2$

$c(T)$ ,  $d(T)$  et  $e(T)$  sont des polynômes du second degré de  $T$   
 $c(T) = (c_1 + c_2 T + c_3 T^2)$

Cette équation a été utilisée pour  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  et des mélanges  $\text{H}_2\text{O-CO}_2$  et pour le constituant  $\text{CH}_4$  avec des implications sur les mélanges  $\text{H}_2\text{O-CO}_2\text{-CH}_4$ .

### Système $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$

Bowers et Helgeson (1983) proposent une équation pour ce système basée sur l'équation de type Redlick-Kwong et les expressions des coefficients  $a$  et  $b$  donnés par Holloway (1977). Le système est sub-divisé en deux sous-systèmes ( $\text{H}_2\text{O} + x\text{NaCl}$ ) et  $\text{CO}_2$ . À partir des équations de Guerig et al. (1979) sur des systèmes partiels  $(\text{H}_2\text{O} + x\text{NaCl}) + \text{CO}_2$ , ils ont généralisé les expressions de  $a_{\text{H}_2\text{O}}$  et  $b_{\text{H}_2\text{O}}$  en introduisant un terme salinité. Les propriétés physico-chimiques des fluides appartenant au système  $\text{H}_2\text{O-CO}_2\text{-NaCl}$  sont déduites à partir de cette équation car elle correspond le mieux aux données expérimentales effectuées par Gehrig (1980) et Sterner et Bodnar (1991). De même, cette équation a été utilisée pour des systèmes contenant moins de 10% de  $\text{N}_2$  ce dernier constituant se comportant comme le  $\text{CO}_2$  pour des faibles quantités (Holloway, 1981).

## PARTIE 2: DONNEES MICROTHERMOMETRIQUES

### Légende des abréviations:

- ac: aquo-carbonique
- aq: acqueuse
- Ab: albite
- Ap: apatite
- V: homogénéisation en phase vapeur
- L: homogénéisation en phase liquide
- C: homogénéisation en phase critique

#### *Taille des IF:*

- M: taille moyenne
- Gd: grande IF par rapport à la taille moyenne
- Pt: petite IF par rapport à la taille moyenne

#### *Visibilité des changements de phase:*

- TBV: très bien vu
- MV: mal vu
- TMV: très mal vu
- NV: non visible



|                                     |       |      | Lame EC15 |            |         |            |            |  |  |
|-------------------------------------|-------|------|-----------|------------|---------|------------|------------|--|--|
|                                     | TfCO2 | TfCl | ThCO2     | mode ThCO2 | Thtotal | mode Thtot | Tailles IF |  | Remarques                                      |
| <i>IF ac primaires dans abite</i>   |       |      |           |            |         |            |            |  |  |
| Ab A                                |       |      |           |            |         |            |            |  |  |
| 1                                   | -60.4 | 11.9 | NV        | V          | 330     | V          | M          |  | Td=332   |
| 2                                   | -60   | 11.9 | NV        | V          | 340     | V          | M          |  | Td=332   |
| 3                                   | -60   | 11.6 | NV        | V          |         |            | M          |  | IF limpide; Td=335: souvent ThT en fv          |
| 4                                   | -59.7 | 11.9 | NV        | V          |         |            | M          |  |  |
| Ab B                                |       |      |           |            |         |            |            |  |  |
| 1                                   | -60.3 | 11.6 | NV        | V          | 334     | C ou V     | M          |  |  |
| 2                                   | -59.7 | 11.6 | NV        | V          | 344.3   | V          | M          |  |  |
| 3                                   | -59.8 | 11.5 | NV        | V          | 353.2   | V          | M          |  |  |
| Ab C                                |       |      |           |            |         |            |            |  |  |
| 1                                   | -59.9 | 10.9 | vers13    | V          | 315     | V          | M          |  | décrépitation à partir de 230°C                |
| 2                                   | -59   | 8.7  | 14.4      | L          |         |            | M          |  |  |
| <i>IF ac primaires dans apatite</i> |       |      |           |            |         |            |            |  |  |
| Ap A                                |       |      |           |            |         |            |            |  |  |
| 1                                   | -56.7 | 9.5  | 26.6      | L          |         |            | Pt         |  |  |
| 2                                   | -56.7 | 9.5  | 26.4      | L          |         |            | Gd         |  |  |
| 3                                   | -56.6 | 9.7  | 26.3      | L          |         |            | Gd         |  |  |
| 4                                   | -56.7 | 9.3  | 25.8      | L          |         |            | M          |  |  |
| 5                                   | -56.7 | 9.7  | 25.4      | L          |         |            | M          |  |  |
| 6                                   | -57.4 | 9.8  | 21.4      | L          |         |            | M          |  |  |
| 7                                   | -57.4 | 9.7  | 21.3      | L          |         |            | Gd         |  |  |
| 8                                   | -56.8 | 9.7  | 27        | L          |         |            | Gd         |  |  |
| 9                                   | -56.7 | 9.7  | 25.6      | L          |         |            | Pt         |  |  |
| 10                                  | -56.8 | 9.7  | 25.7      | L          |         |            | Pt         |  |  |
| 11                                  | -56.7 | 9.7  | 26.2      | L          |         |            | M/Pt       |  |  |
| 12                                  | -56.8 | 9.8  | 25.4      | L          |         |            | Gd         |  |  |
| 13                                  | -56.8 | 9.7  | 25.4      | L          |         |            | Pt         |  |  |
| 14                                  | -56.8 | 9.7  | 25        | L          |         |            | Pt         |  |  |
| 15                                  | -56.7 | 9.7  | 26.4      | L          |         |            | M          |  |  |
| 16                                  | -56.7 | 9.7  | 25.7      | L          |         |            | M          |  |  |
| 17                                  | -56.7 | 9.7  | 25.3      | L          |         |            | Pt         |  |  |
| 18                                  | -56.6 | 9.8  | 26.4      | L          |         |            | Gd         |  | ThCO2 MV                                       |
| 19                                  | -56.6 | 9.7  | 26        | L          |         |            | M          |  |  |
| 20                                  | -56.6 | 9.7  | 26.8      | L          |         |            | M          |  |  |
| 21                                  | -56.6 | 9.6  | 27.3      | L          |         |            | M          |  |  |
| 22                                  | -56.6 | 9.7  | 26        | L          |         |            | M          |  |  |
| 23                                  | -56.6 | 9.7  | 25.6      | L          |         |            | M          |  |  |
| 24                                  | -56.6 | 9.7  | 26.3      | L          |         |            | Gd         |  |  |
| 25                                  | -56.6 | 9.7  | 26.3      | L          |         |            | Pt         |  |  |
| 26                                  | -56.6 | 9.7  | 26.2      | L          |         |            | M          |  |  |
| 27                                  | -56.6 | 9.7  | 26.2      | L          |         |            | M          |  |  |
| 28                                  | -56.6 | 9.7  | 26.6      | L          |         |            | Gd         |  |  |
| 29                                  | -56.6 | 9.8  | 26.2      | L          |         |            | M          |  |  |
| 30                                  | -56.6 | 9.7  | 25.3      | L          |         |            | M          |  |  |
| 31                                  | -56.6 | 9.8  | 26.4      | L          |         |            | M          |  |  |
| 32                                  | -56.8 | 9.8  | 26.8      | L          |         |            | Gd         |  |  |
| 33                                  | -56.5 | 9.8  | 25.6      | L          |         |            | M          |  |  |
| 34                                  | -56.6 | 9.7  | 26.2      | L          |         |            | M          |  |  |
| 35                                  | -56.5 | 9.8  | 26.4      | L          |         |            | M          |  |  |
| 36                                  | -56.6 | 9.8  | 26.5      | L          |         |            | M          |  |  |
| 37                                  | -56.6 | 9.8  | 27.1      | L          |         |            | M          |  |  |
| Ap B                                |       |      |           |            |         |            |            |  |  |
| 1                                   | -56.6 | 9.3  | 25        | L          |         |            | M          |  | TfclTMV; thT=275°C en fc ou fv                 |
| 2                                   | -56.6 | 9.6  | 25.3      | L          |         |            | M          |  | ThCO2TMV                                       |
| 3                                   | -56.7 | 9.7  | 25.2      | L          |         |            | M          |  | ThCO2MV  |
| 4                                   | -56.7 | 9.7  | 25.8      | L          |         |            | M          |  |  |
| 5                                   | -56.7 | 9.4  | 25.9      | L          |         |            | M          |  | ThCO2TBV                                       |
| 6                                   | -56.8 | 9.8  | 26.3      | L          |         |            | Gd         |  | bordure du cristal, Td à 244°C                 |
| 7                                   | -56.8 | 9.7  | 24        | L          |         |            | M          |  | ThCO2MV  |
| 8                                   | -56.9 | 9.3  | 28        | L          | 273.5   | fc         | M          |  | ThCO2MV, Td à 291°C                            |
| 9                                   | -56.8 | 9.3  | 27.4      | L          |         |            | M          |  | TfCl et ThCO2 MV, Td<250°C                     |
| 10                                  | -56.8 | 9.7  | 28.8      | L          |         |            | Pt         |  | Td<250°C par 2 autres IF                       |
| 11                                  | -56.8 | 9.6  | 26.6      | L          |         |            | M          |  |  |
| 12                                  | -56.8 | 9.7  | 26.5      | L          |         |            | Gd         |  | bordure du cristal                             |
| Ap C                                |       |      |           |            |         |            |            |  |  |
| 1                                   | -56.8 | 9.1  | 27.2      | L          |         |            | Gd         |  | bordure du cristal                             |
| 2                                   | -56.8 | 9.1  | 25.8      | L          |         |            | M          |  |  |
| 3                                   | -56.8 | 9.1  | 25.8      | L          |         |            | M          |  | Tfcl MV  |
| 4                                   | -56.8 | 9.2  | 26.6      | L          |         |            | M          |  | pour toute les IF de l'apatite C:              |
| 5                                   | -56.9 | 9.3  | 27.5      | L          |         |            | M          |  | nombreuses décrépitation à partir de           |
| 6                                   | -56.8 | 9.4  | 26        | L          | 267.6   | ?          | M          |  | 230°C  |
| Ap D                                |       |      |           |            |         |            |            |  |  |
| 1                                   | -56.6 | 9.6  | 23.4      | L          |         |            | Gd         |  | Td à 145°C                                     |
| 2                                   | -56.6 | 9.6  | 23.6      | L          |         |            | Gd         |  | prés. d'un sol. cubique, Td=145, ThT=263 en fc |

|  | TfCO2 | TfCl | ThCO2   | mode ThCO2 | Thtotal               | mode Thtot | Tailles IF | Remarques  |
|--|-------|------|---------|------------|-----------------------|------------|------------|--|
| 3  | -56.6 | 9.5  | 23.6    | L          |                       |            | Gd         |  |
| 4  | -56.5 | 9.5  | NV      | L          |                       |            | Gd         |  |
| 5  | -56.5 | 9.6  | 23.6    | L          |                       |            | Gd         | Td à 145°C   |
| 6  | -56.5 | 9.5  | 22.6    | L          |                       |            | Pt         | Td à 220,4°C   |
| 7  | -56.4 | 9.6  | 23.7    | L          |                       |            | Gd         | Tfcl MV, Td à 239°C                                      |
| 8  | -56.5 | 9.6  | 24.1    | L          | 270.7                 | fc         | Gd         | Tfcl MV;   |
| 9  | -56.5 | 9.5  | 28      | L          | 276                   | fc         | Gd         | Tfcl MV  |
| <b>IF ac famille 2 (Fcar=0,4)</b>  |       |      |         |            |                       |            |            |  |
| Plan A   |       |      |         |            |                       |            |            |  |
| 1  | -58.4 | 9.2  | NV      |            |                       |            | Pt         | 323°C en fl  |
| 2  | -58.2 | 8.9  | 15.8    | V          | 354.5                 | fc ou fv   | M          | Th tot min   |
| 3  | -58.3 | 9.2  | NV      |            |                       |            | M          |  |
| 4  | -58.6 | 9.2  | 11.5    | V          | 350                   | fc ou fv   | M          |  |
| 5  | -58.4 | 9.5  | NV      |            |                       |            | M          |  |
| 6  | -58.4 | 9.4  | NV      |            | 322.7                 | fl         | M          |  |
| 7  | -58.6 | 9.4  | 12.5    | V          | 320.9                 | fl         | M          |  |
| 8  | -58.6 | 9.5  | NV      |            | 314.5                 | fl         | Pt         |  |
| 9  | -58.6 | 9.4  | 11.5    | V          |                       |            | M          | Td à 161°C   |
| 10   | -58.7 | 9.2  | 11.2    | V          |                       |            | M          | Td à 261°C   |
| 11   | -58.6 | 9.4  | 12.1    | V          | 325                   | fl         | Gd         |  |
| 12   | -58.8 | 9.6  | NV      |            |                       |            | M          |  |
| 13   | -58.5 | 9.2  | NV      |            |                       |            | Pt         |  |
| 14   | -58.6 | 9.1  | NV      |            |                       |            | M          |  |
| 15   | -58.5 | 9.2  | NV      |            |                       |            | M          |  |
| 16   | -58.8 | NV   | NV      |            | 339                   | fl         | Pt         |  |
| 17   | -58.6 | 9.1  | vers 13 | V          | 329.6                 | fl         | Gd         |  |
| Plan B   |       |      |         |            |                       |            |            |  |
| 1  | -58.6 | 8.7  | 13.3    | L          | 353 en fv (pour deux) |            | M          |  |
| 2  | -58.7 | 8.5  | 13.3    | L          | 355 en fv             |            | M          |  |
| 3  | -58.6 | 8.7  | 13.3    | L          |                       |            | Gd         | Td ≤274°C  |
| 4  | -58.5 | 8.6  | 15.4    | L          |                       |            | M          | Td ≤274°C  |
| 5  | -57.8 | 8.8  | 15.2    | L          |                       |            | Gd         |  |
| 6  | -58.3 | 8.5  | NV      |            |                       |            | M          |  |
| 7  | -58.5 | 8.5  | NV      |            |                       |            |            | IF écartée plan  |
| 8  | -58.2 | 8.7  | 16      | L          |                       |            | M          |  |
| 9  | -58   | 8.8  | 16.1    | L          |                       |            | Gd         |  |
| 10   | -58.4 | 8.9  | 14.6    | L          |                       |            | Gd         | Td ≤274°C  |
| 11   | -58.2 | 8.8  | 15      | L          |                       |            | M          |  |
| 12   | -58.5 | 8.8  | 15.6    | V          |                       |            | Pt         | Td à 334°C   |
| 13   | -58.5 | 8.9  | NV      |            |                       |            | M          | de 12 à 14: celles qui ont homogénéisées en phase vapeur |
| 14   | -58.4 | 8.8  | 15.9    | V          |                       |            | M          |  |
| Toutes les IF ont décrépité avant Tht sauf celles du bas (353 en fv).  |       |      |         |            |                       |            |            |  |
| Celles qui homogénéisent leur phase carb. en phase vapeur ont décrépité à 334°C (c'était les eules à avoir 1 th CO2 en phase vapeur)       |       |      |         |            |                       |            |            |  |
| Pour plan B: variation indépendante de la taille ou forme de l'IF; densité hétérogène le long du plan; la plupart ont décrépité vers 274°C |       |      |         |            |                       |            |            |  |
| <b>IF ac famille 2 (Fcar=0,6)</b>  |       |      |         |            |                       |            |            |  |
| Plan A   |       |      |         |            |                       |            |            |  |
| 1  | -58.5 | 8.5  | 19.4    | L          |                       |            | Gd         |  |
| 2  | -58.5 | 8.5  | 19.8    | L          |                       |            | Pt         |  |
| 3  | -58.4 | 8.4  | 19.1    | L          |                       |            | Pt         |  |
| 4  | -58.4 | 8.6  | 19.5    | L          |                       |            | M          |  |
| 5  | -58.4 | 8.4  | 19.4    | L          |                       |            | Pt         |  |
| 6  | -58.8 | 9.3  | 14.2    | V          |                       |            | Gd         |  |
| 7  | -58.1 | 8.5  | 19.9    | L          |                       |            | Pt         |  |
| 8  | -58.4 | 8.5  | 19.4    | L          |                       |            | Pt         |  |
| 9  | -58.6 | 8.7  | 17.8    | L          |                       |            | Pt         |  |
| 10   | -58.7 | 8.7  | 17.8    | L          |                       |            | Pt         |  |
| 11   | -58.6 | 8.8  | 17.9    | L          |                       |            | Pt         |  |
| 12   | -58.3 | 8.7  | 17.8    | L          |                       |            | Pt         |  |
| 13   | -58.6 | 8.8  | NV      | L          |                       |            | M          |  |
| Plan B   |       |      |         |            |                       |            |            |  |
| 1  | -58   | 8.7  | 18.3    | L          | Td=216,6              |            | Gd         |  |
| 2  | -58   | 8.8  | 18.6    | L          | Td=290                |            | Gd         |  |
| 3  | -58   | 8.8  | 18.6    | L          | Td=349,2              |            | M          | 1 th Tot à 360°C   |
| 4  | -58   | 8.7  | 18.9    | L          |                       |            | Gd         |  |
| 5  | -58   | 9    | 19.4    | L          | Td=231                |            | Gd         | ThCO2 MV   |
| 6  | -58   | 8.9  | 19.7    | L          | Td=346                |            | Gd         |  |
| 7  | -58.1 | 8.6  | 17.7    | L          |                       |            | Gd         |  |
| 8  | -58.2 | 8.7  | 18.3    | L          | Td=294                |            | M          |  |
| 9  | -58.2 | 8.7  | 18      | L          | Td=233,9              |            | Gd         | présence d'un solide                                     |
| <b>IF ac famille 2 (Fcar=0,8)</b>  |       |      |         |            |                       |            |            |  |
| Plan A   |       |      |         |            |                       |            |            |  |
| 1  | -58   | 8.3  | 20.3    | L          |                       |            | Pt         | 323°C-> ThT en V   |
| 2  | -57.6 | 8.5  | 19.6    | L          |                       |            | Pt         |  |
| 3  | -57.6 | 8.5  | 19.6    | L          | 371                   | V          | M          |  |

|  | TfCO2 | TfCl | ThCO2 | mode ThCO2 | Thtotal | mode Thtot | Tailles IF | Remarques  |
|--|-------|------|-------|------------|---------|------------|------------|--|
| 4  | -57.6 | NV   | NV    | L          |         |            |            |  |
| 5  | -57.8 | 8.1  | 20.3  | L          |         |            | Gd         | ThT>310°C; difficile à voir car phase carb. est importante et Th se fait en phase V. |
| 6  | -57.8 | 8.5  | 19.9  | L          | 350     | V          | Pt         |  |
| 7  | -58   | 8.4  | 20.1  | L          |         |            | M          |  |
| 8  | -58   | 8.5  | 20.2  | L          | 370?    | V          | M          |  |
| 9  | -57.8 | 8.3  | 20    | L          |         |            | M          |  |
| 10   | -57.7 | 8.3  | 20.1  | L          | 325     | V          | Pt         |  |
| 11   | -57.8 | NV   | 20.4  | L          |         |            |            |  |
| Plan B   |       |      |       |            |         |            |            |  |
| 1  | -57.9 | 7.6  | 20.5  | L          |         |            | M          |  |
| 2  | -57.7 | 7.8  | 19.4  | L          |         |            | M          |  |
| 3  | -57.8 | 8.1  | 20.7  | L          |         |            | M          |  |
| 4  | -58   | 8.1  | 20.2  | L          |         |            | Pt         |  |
| 5  | -57.9 | 8    | 20.8  | L          |         |            | Pt         |  |
| 6  | -57.7 | 7.7  | 20.2  | L          |         |            | M          |  |
| 7  | -57.9 | 8    | 19.1  | L          | 380     | V          | M          |  |
| 8  | -57.9 | 8.1  | 20.4  | L          |         |            | M          |  |
| 9  | -57.6 | 8    | 19.2  | L          |         |            | M          | Tfcl MV  |
| 10   | -57.7 | NV   | 22.7  | L          |         |            | M          |  |
| 11   | -57.5 | 7.7  | 21.3  | L          |         |            | M          |  |
| 12   | -57.6 | 8    | 19.4  | L          |         |            | M          |  |
| 13   | -57.6 | 8.3  | 20.7  | L          | 292.4   | V          | Gd         |  |
| 14   | -57.8 | 8.1  | 19.2  | L          |         |            | M          |  |
| 15   | -57.8 | NV   | 19.1  | L          |         |            | M          |  |
| La numérotation des IF se fait du centre du plan (plus bas, intersection avec autre plan) vers l'extrémité (joint de grains) |       |      |       |            |         |            |            |  |
| Plan C   |       |      |       |            |         |            |            |  |
| 1  | -57.2 | 8.2  | 18.3  |            |         |            | M          |  |
| 2  | -57.2 | 8.3  | 18.1  |            |         |            | M          |  |
| 3  | -57.4 | 8.3  | 18.1  |            |         |            | Gd         |  |
| 4  | -57.5 | 7.9  | 20.7  |            | 302.3   | V          | M          |  |
| 5  | -57.4 | 8.3  | 20.6  |            | 300.5   | V          | M          |  |
| 6  | -57.3 | 8.4  | 19.6  |            |         |            | Gd         |  |
| 7  | -57.2 | 8.2  | 22.2  |            |         |            | Gd         |  |
| 8  | -57.2 | 8.2  | 18.4  |            |         |            | Pt         |  |
| 9  | -57.2 | 8.3  | 18.2  |            |         |            | Pt         |  |
| 10   | -57.3 | 8.1  | 20.9  |            |         |            | Gd         | présence d'un solide rond; Td à 325°C  |
| 11   | -57.2 | 8.2  | 20.5  |            |         |            | Gd         |  |
| 12   | -57.2 | 8.4  | 18.3  |            |         |            | Pt         |  |
| 13   | -57.2 | 7.9  | 19.5  |            |         |            | Pt         |  |
| 14   | -57.2 | 8.7  | 19.2  |            |         |            | M          |  |
| 15   | -57.3 | 7.8  | 18.8  |            |         |            | Pt         |  |
| 16   | -57.1 | 8.1  | 18.4  |            |         |            | Pt         |  |
| 17   | -57.4 | 8.7  | 18.9  |            |         |            | M          |  |
| 18   | -57.3 | 8.8  | 18.8  |            |         |            | M          |  |
| 19   | -57.6 | 8.8  | 18.7  |            | 347     | V          | M          |  |
| 20   | -57.5 | NV   | NV    |            |         |            | M          |  |
| 21   | -57.4 | 8.8  | 18.6  |            |         |            | M          |  |
| 22   | -57.3 | 8.9  | 18    |            | 320     | V          | M          |  |
| La numérotation des IF se fait de l'extrémité en haut (joint de grains) vers l'extrémité en bas (joint de grains)            |       |      |       |            |         |            |            |  |
| Pour chaque position, elle se fait de la surface de la lame vers l'intérieur   |       |      |       |            |         |            |            |  |
| IF ac plan très court (Fcar = 0,6)   |       |      |       |            |         |            |            |  |
| Plan A   |       |      |       |            |         |            |            |  |
| 1  | -58.8 | 8.5  | 14.3  | L          |         |            |            |  |
| 2  | -58.5 | 8.5  | 17.4  | L          |         |            |            |  |
| 3  | -58.9 | 8.6  | 15.3  | L          |         |            |            |  |
| 4  | -58.6 | NV   | 19.6  | V          |         |            |            | intersection de 2 plans<br>IF localisée au joint de grains                           |
| 5  | -58.2 | NV   | 20.8  | L          |         |            |            |  |
| 6  | -58.8 | 8.6  | 13.9  | L          |         |            |            | IF isolée proche de 6  |
| 7  | -58.5 | 8.5  | 13.2  | L          |         |            |            |  |
| Les numéros vont du joint de grain à l'extrémité du plan   |       |      |       |            |         |            |            |  |
| IF à + de 90% de CO2, Tfcl très difficile à voir   |       |      |       |            |         |            |            |  |
| Plan B   |       |      |       |            |         |            |            |  |
| 1  | -59.1 | NV   | 14.6  | L          |         |            | M          |  |
| 2  | -59.1 | 9    | NV    | L          |         |            | Gd         |  |
| 3  | -59   | NV   | 14.8  | L          |         |            | Gd         |  |
| 4  | NV    | 8.9  | 11.7  | L          |         |            | Pt         |  |
| 5  | -59   | 9.9  | 11.8  | L          |         |            | M          |  |
| 6  | -58.2 | NV   | 19.1  | L          |         |            | Gd         | Présence d'un solide<br>3 dernières mesures sont des                                 |
| 7  | -58.2 | NV   | 19    | L          |         |            | Pt         |  |
| 8  | -58.2 | NV   | 19.1  | L          |         |            | Pt         |  |
| Les numéros vont du joint de grain à l'extrémité du plan   |       |      |       |            |         |            |            |  |
| IF à + de 90% de CO2, Tfcl très difficile à voir   |       |      |       |            |         |            |            |  |
| Plan C   |       |      |       |            |         |            |            |  |
| 1  | -58.2 | 8.7  | 17.8  |            |         |            | Gd         |  |
| 2  | -58.2 | 8.7  | 17.9  |            |         |            | Gd         |  |
| 3  | -58.1 | 8.5  | 18.1  |            |         |            | Gd         |  |
| 4  | -58.2 | 8.6  | 17.2  |            |         |            | Pt         |  |

|  | TfCO2 | TfCl  | ThCO2      | mode ThCO2   | Thtotal   | mode Thtot | Tailles IF | Remarques                                      |
|--|-------|-------|------------|--------------|-----------|------------|------------|--|
| 5  | -58.2 | 8.5   | 17         |              |           |            | Pt         |  |
| 6  | -58.2 | 8.5   | 17.1       |              |           |            | Pt         |  |
| 7  | -58.2 | 8.8   | 18         |              |           |            | M          |  |
| 8  | -58.2 | 8.7   | 18.6       |              |           |            | M          |  |
| Les numéros vont du joint de grain à l'extrémité du plan Plan quasi-parallèle à la lame; IF à 3/4 de CO2                               |       |       |            |              |           |            |            |  |
| <i>IF ac famille 5 (Fcar=0,9)</i>  |       |       |            |              |           |            |            |  |
| Plan A   |       |       |            |              |           |            |            |  |
| 1  | -58   | NV    | 22         | V+L:V        |           |            | M          |  |
| 2  | -58   | NV    | NV         |              |           |            | Pt         |  |
| 3  | -58   | NV    | 21.3       | V+L:V        |           |            | M          |  |
| 4  | -58.1 | NV    | 22         | V+L:V        |           |            | M          |  |
| 5  | -58   | NV    | 21.6       | V+L:V        |           |            | M          |  |
| 6  | -58.1 | NV    | 21.3       | V+L:V        |           |            | Pt         |  |
| 7  | -57.9 | NV    | 22.1       | V+L:V        |           |            | M          |  |
| 8  | -57.9 | NV    | 21.1       | V+L:V        |           |            | Pt         | IF en dehors du plan différentes               |
| 9  | -57.9 | 8.6   | 21.1       | V+L:V        |           |            | M          | de grande taille                               |
| 10   | -57.9 | NV    | 21.8       | V+L:V        |           |            | M          | et en Forme de poisson                         |
| 11   | -58   | NV    | NV         |              |           |            | M          | donnant:                                       |
| 12   | -58   | NV    | NV         |              |           |            | M          | démixion:-130                                  |
| 13   | -57.9 | NV    | NV         |              |           |            | M          | homogenisation                                 |
| 14   | -57.9 | NV    | NV         |              |           |            | Pt         | à -125 en phase vapeur                         |
| 15   | -57.6 | NV    | NV         |              |           |            | Pt         | et TfCl: 8,4                                   |
| 16   | -58   | NV    | NV         |              |           |            | Pt         |  |
| 17   | -57.8 | NV    | NV         |              |           |            | Pt         |  |
| 18   | -57.9 | NV    | NV         |              |           |            | Pt         |  |
| 19   | -57.9 | NV    | NV         |              |           |            | Pt         |  |
| Plan B IF ne réagissent pas au refroidissement ni au chauffage   |       |       |            |              |           |            |            |  |
| Une seule IF, taille moyenne, forme carrée, réagit:  |       |       |            |              |           |            |            |  |
| démixion à -142  |       |       |            |              |           |            |            |  |
| homogénéisation à -125 en phase vapeur   |       |       |            |              |           |            |            |  |
|  | TfG   | Thtot | mode Thtot | T eutectique | Taille IF |            |            | Remarques                                      |
| <i>IF aq famille 3</i>   |       |       |            |              |           |            |            |  |
| Plan A   |       |       |            |              |           |            |            |  |
| 1  | -0.2  | 176.4 | fl         |              | Pt        |            |            | 207,8 en fL                                    |
| 2  | -0.1  | 334.4 | L          |              | M         |            |            | 334 en fL                                      |
| 3  | -0.2  |       |            |              | M         |            |            | Td=219°C                                       |
| 4  | -0.3  | 326.4 | L          |              | Pt        |            |            | 140,1°C en fl                                  |
| 5  | -0.2  | 279.2 | L          |              | M         |            |            |  |
| 6  | -0.1  |       |            |              | Pt        |            |            |  |
| 7  | -0.3  |       |            |              | Pt        |            |            |  |
| Les mesures sont numérotées du milieu du plan jusqu'à son extrémité en bas   |       |       |            |              |           |            |            |  |
| Plan B   |       |       |            |              |           |            |            |  |
| 1  | -2.2  |       |            |              | Gd        |            |            | On a observé plus de ThT que de TfG            |
| 2  | -2    |       |            |              | M         |            |            | ThT=246,2 fl, 275 fl, 242,1 fl, 210 fl, 202,5, |
| 3  | -2.2  | 203.6 | L          |              | Pt        |            |            | ThT=231,7, 208,4, 234,7, 215,2.                |
| 4  | -2.3  | 231.8 | L          |              | Gd        |            |            | TfG MV   |
| 5  | -2.2  |       |            |              | M         |            |            | TfG MV   |
| 6  | -2.2  |       |            |              | M         |            |            |  |
| Les mesures sont numérotées de l'extrémité d'en haut du plan jusqu'au milieu (intersection avec un autre plan d'IF d'aqueuses)         |       |       |            |              |           |            |            |  |
| Plan C   |       |       |            |              |           |            |            |  |
| 1  | -2.9  | 221.2 | L          | -23          | Gd        |            |            | présence de deux solides ronds, 214,7 en fl    |
| 2  | -3    | 223.4 | L          |              | Gd        |            |            | un solide rectangulaire, 243,2 en fl           |
| 3  | -3.1  | 228.8 | L          |              | M         |            |            |  |
| 4  | -2.8  | 224   | L          |              | Gd        |            |            |  |
| 5  | -3    | 223   | L          |              | Pt        |            |            |  |
| 6  | -2.9  |       |            |              | Gd        |            |            | Td à 210°C                                     |
| 7  | -2.7  |       |            |              | M         |            |            |  |
| 8  | -2.8  | 228.2 |            | -24          | Gd        |            |            | Présence d'un solide                           |
| 9  | -2.8  | 212.2 |            |              | Pt        |            |            |  |
| 10   | -3    | 294   |            |              | Pt        |            |            |  |
| 11   | -3.2  |       |            | -23          | Gd        |            |            |  |
| 12   | -2.8  |       |            |              | Gd        |            |            |  |
| 30 à 80°C d'écart sur les mesures sur même IF. Les mesures sont numérotées de l'extrémité d'en haut du plan jusqu'à l'extrémité en bas |       |       |            |              |           |            |            |  |
| Plan D   |       |       |            |              |           |            |            |  |
| 1  | -2.4  | 214.7 | L          |              | Gd        |            |            |  |
| 2  | -2.6  | 217.8 | L          |              | Gd        |            |            |  |
| 3  | -2.6  | 238.3 | L          |              | M         |            |            | 217,7 en L                                     |
| 4  | -3.2  | 248.9 | L          |              | Gd        |            |            |  |
| 5  | -2.9  | D     |            |              | Gd        |            |            | 214,2 en L                                     |
| 6  | -3    | 225.5 | L          |              | M         |            |            |  |
| 7  | -1.1  | 225.7 | L          |              | Pt        |            |            | 245 en L                                       |
| 8  | -2.6  | 223.4 | L          |              | Pt        |            |            | 313,1 en L                                     |
| 10   | -2.7  | 217.7 | L          |              | Pt        |            |            |  |
| 11   | -2.5  | 214.7 | L          |              | M         |            |            |  |
| Les mesures sont numérotées de l'extrémité d'en haut du plan jusqu'à l'extrémité en bas  |       |       |            |              |           |            |            |  |
| Le plan est perpendiculaire à l'exsudat  |       |       |            |              |           |            |            |  |

|   | TFG   | ThTot | mode ThTot | T eutectique | Taille IF |            | Remarques  |                    |
|---|-------|-------|------------|--------------|-----------|------------|--|--------------------|
| <b>IF aa famille 4c</b>   |       |       |            |              |           |            |  |                    |
| <b>Plan A</b>   |       |       |            |              |           |            |  |                    |
| 1   | -1.4  | 238   | fl         |              | Gd        |            | ThT mesuré après chauffage maximal                         |                    |
| 2   | -1.5  |       |            |              | M         |            |  |                    |
| 3   | -1.5  | 221   | fl         |              | M         |            | mesure après chauffage maximal: 242 fl                     |                    |
| 4   | -1.5  |       |            |              | M         |            | décrépité  |                    |
| 5   | -1.5  | 237.3 | fl         |              | Pt        |            | mesure après chauffage maximal                             |                    |
| 6   | -1.6  | 266   | fl (*2)    | -12          | Gd        |            |  |                    |
| 7   | -1.6  | 264.1 | fl (*2)    |              | Pt        |            |  |                    |
| 8   | -1.7  | 257   | fl         |              | Pt        |            |  |                    |
| 9   | -1.8  | 273   | fl         | -10          | Pt        |            |  |                    |
| 10  | -1.8  | 278.3 | fl         |              | M         |            | présence d'un solide                                       |                    |
| 11  | -1.7  | 237.8 | fl         |              | Pt        |            |  |                    |
| Les mesures d'IF sont effectuées du haut du plan jusqu'en bas                     |       |       |            |              |           |            |  |                    |
| Autre plan: ThT= 289 fl, 224,5 fl, 233,2 fl, 236,6 fl, 246 fl, 291 fl, 290,4 fl.  |       |       |            |              |           |            |  |                    |
| <b>Plan B</b>   |       |       |            |              |           |            |  |                    |
| 1   | -2.4  |       |            |              | M         |            | Autres ThT: 267,8 l, 269 l, 276 l.                         |                    |
| 2   | -2.6  |       |            |              | M         |            |  |                    |
| Les autres IF du plan sont trop petites pour être mesurées                        |       |       |            |              |           |            |  |                    |
| <b>Plan C</b>   |       |       |            |              |           |            |  |                    |
| 1   | -1.9  |       |            |              | Pt        |            | elles ont toutes décrépité car chauffage préalable à 290°C |                    |
| 2   | -2    |       |            |              | Pt        |            | Td<290°C   |                    |
| 3   | -1.7  |       |            |              | Pt        |            |  |                    |
| 4   | -2    |       |            | -19          | Gd        |            |  |                    |
| 5   | -2    |       |            |              | Pt        |            |  |                    |
| 6   | -2    |       |            |              | M         |            |  |                    |
| Les mesures d'IF sont effectuées du haut du plan jusqu'en bas                     |       |       |            |              |           |            |  |                    |
| <b>Plan D</b>   |       |       |            |              |           |            |  |                    |
| 1   | -3.8  |       |            |              | M         |            | 220,7 en fl  |                    |
| 2   | -2.8  |       |            |              | M         |            | 199 en fl  |                    |
| 3   | -2.9  |       |            |              | Pt        |            | 139,8 en fl  |                    |
| 4   | -2.8  |       |            |              | M         |            |  |                    |
| 5   | -2.9  |       |            |              | Pt        |            | 212 en fl  |                    |
| 6   | -2.8  |       |            | -17.5        | Gd        |            |  |                    |
| 7   | -3    |       |            | -28          | Gd        |            | granulitisation bien observée, Td= 237,2 °C                |                    |
| 8   | -3.2  |       |            | -26          | Pt        |            |  |                    |
| 9   | -3    |       |            | -28/-29      | Gd        |            | granulitisation bien observée, Td = 234,2°C                |                    |
| 10  | -3.2  |       |            |              | Pt        |            |  |                    |
| 11  | -3    |       |            |              | Pt        |            |  |                    |
| 12  | -3.5  |       |            |              | Pt        |            |  |                    |
| 13  | -3.2  |       |            |              | Pt        |            |  |                    |
| Les mesures d'IF sont effectuées du milieu du plan jusqu'en bas (joint de grains) |       |       |            |              |           |            |  |                    |
| Plan très penté mais oblique par rapport à l'exsudat (vers le nord)               |       |       |            |              |           |            |  |                    |
| Plan E: ThT=224,4 fl, 222,2 fl, 223,5 fl, 216,4 fl, 230,9 fl                      |       |       |            |              |           |            |  |                    |
| Plan F: ThT= 162,3 fl, 139,8 fl   |       |       |            |              |           |            |  |                    |
|   | TFCO2 | TFCl  | ThCO2      | mode ThCO2   | ThTotal   | mode ThTot | Tailles IF   | Remarques          |
| <b>IF ac primaires dans Albite</b>  |       |       |            |              |           |            |  |                    |
| <b>Lame EC4</b>   |       |       |            |              |           |            |  |                    |
| <b>Ab A</b>   |       |       |            |              |           |            |  |                    |
| 1   | -57.1 | NV    | 24.2       | L            |           |            |  |                    |
| 2   | -57   | NV    | 23.1       | L            |           |            |  |                    |
| 3   | -57   | 9.3   | 22.8       | L            |           |            |  |                    |
| 4   | -57   | 9.5   | 21.1       | L            |           |            |  |                    |
| 5   | -57   | 9.3   | 17.7       | L            |           |            |  |                    |
| 6   | -56.9 | 9.2   | 18.7       | L            |           |            |  |                    |
| 7   | -57   | 9.2   | 19.4       | L            |           |            |  |                    |
| 8   | -56.9 | NV    | NV         |              |           |            |  |                    |
| 9   | -57.1 | 9.4   | 22         | L            |           |            |  |                    |
| 10  | -57   | NV    | 21.9       | L            |           |            |  |                    |
| 11  | -57.1 | NV    | NV         |              |           |            |  |                    |
| 12  | -57   | NV    | NV         |              |           |            |  |                    |
| <b>IF ac famille 2 (Fcar=0,8)</b>   |       |       |            |              |           |            |  |                    |
| <b>Plan A</b>   |       |       |            |              |           |            |  |                    |
| 1   | -57.3 | NV    | 24.2       | L            |           |            |  | pas de ThT visible |
| 2   | -57.4 | NV    | 24.1       | L            |           |            |  |                    |
| 3   | -57.5 | NV    | NV         |              |           |            |  |                    |
| <b>Plan B</b>   |       |       |            |              |           |            |  |                    |
| 1   | -57.9 | 7.6   | 25.3       | C            |           |            |  |                    |
| 2   | -58   | 7.6   | 25.2       | C            |           |            |  |                    |
| 3   | -57.9 | 8.2   | 24.7       | L            |           |            |  |                    |
| 4   | -57.9 | 7.5   | 25.3       | L            |           |            |  |                    |
| 5   | -58.2 | 8     | 25.1       | L            |           |            |  |                    |
| <b>Plan C</b>   |       |       |            |              |           |            |  |                    |
| 1   | -57.6 |       |            |              |           |            |  |                    |
| 2   | -57.6 | 8.6   | 25.9       |              |           |            |  | pas de ThT visible |
| 3   | -57.4 | 8.6   | NV         |              |           |            |  |                    |
| 4   | -57.6 | 8.5   | NV         |              |           |            |  |                    |

|                                     |       |       |      |   |        |  |   |
|-------------------------------------|-------|-------|------|---|--------|--|---|
| Plan D                              |       |       |      |   |        |  |   |
| 1                                   | -57.5 | NV    | NV   |   |        |  |   |
| 2                                   | -57.5 | NV    | NV   |   |        |  |   |
| 3                                   | -57.4 | NV    | NV   |   |        |  |   |
| 4                                   | -57.4 | 7.2   | 25.6 | L |        |  | Tfc MV  |
| 5                                   | -57.4 | NV    | 25.8 |   |        |  |   |
| 6                                   | -57.4 | NV    | NV   |   |        |  |   |
| <i>IF ac plan court (Fcar=0,95)</i> |       |       |      |   |        |  |   |
| Plan A                              |       |       |      |   |        |  |   |
| 1                                   | -57.7 |       | 26   | L |        |  | ThCO2 peu visible   |
| Plan B                              |       |       |      |   |        |  |   |
| 1                                   | -57.8 | 8.2   | 25   | L |        |  |   |
| 2                                   | -57.8 | 8.5   | 24.3 | L |        |  | pas de ThT visible  |
| 3                                   | -57.8 | 7.8   | 24.9 | L |        |  |   |
| 4                                   | -57.7 | 8.3   | 24.9 | L |        |  |   |
| 5                                   | -57.6 | 7.8   | 23.6 | L |        |  |   |
| 6                                   | -57.8 | 7.8   | 23.8 | L |        |  |   |
| Plan C                              |       |       |      |   |        |  |   |
| 1                                   | -57.6 | 8.6   | 24.6 | L |        |  |   |
| Plan D                              |       |       |      |   |        |  |   |
| 1                                   | -57.8 | NV    | 26.1 | L |        |  |   |
| 2                                   | -57.7 | NV    | 26.2 | L |        |  |   |
| 3                                   | -57.6 | 7.8   | 24.7 | L |        |  |   |
| 4                                   | -57.7 | 8.2   | 24.6 | L |        |  | Tfc MV  |
| <i>IF ac famille 5</i>              |       |       |      |   |        |  |   |
| Plan A                              |       |       |      |   |        |  |   |
| 1                                   | -58.4 |       |      |   |        |  |   |
| 2                                   | -58.2 |       |      |   |        |  |   |
| 3                                   | -58   | 8.1   | 24.3 | L | 298 fv |  |   |
| Plan B                              |       |       |      |   |        |  |   |
| 1                                   | -57.4 | NV    | 27.3 | L |        |  | pas de ThT car pas de phase aqueuse                             |
| 2                                   | -57.6 | NV    | 26.7 | L |        |  | ThCO2 MV  |
| 3                                   | -57.6 |       | 27.6 | L |        |  | ThCO2 MV  |
| Plan C                              |       |       |      |   |        |  |   |
| 1                                   | -57.4 |       | 25.8 | L |        |  | pas de ThT car pas de phase aqueuse                             |
| <i>IF ac parallèles à S</i>         |       |       |      |   |        |  |   |
| Plan A                              |       |       |      |   |        |  |   |
| 1                                   | -57.9 | 7.9   | 24.2 | C |        |  |   |
| 2                                   | -57.8 | 7.8   | 24.8 | C |        |  | Dans d'autres IF on n'observe pas de phase aqueuse (pas de ThT) |
| 3                                   | -57.6 | 8     | 22.5 | L |        |  |   |
| 4                                   | -57.7 | NV    |      |   |        |  |   |
| 5                                   | -57.9 | 9     | 25.5 | C |        |  |   |
| 6                                   | -57.6 | NV    | 25.2 | V |        |  | Tfc MV  |
| <i>IF ac monophasées</i>            |       |       |      |   |        |  |   |
| Plan A                              |       |       |      |   |        |  |   |
| 1                                   | -58.2 | NV    | 24.8 | L |        |  | pas de ThT car pas de phase aqueuse                             |
| 2                                   | NV    | NV    | 24.5 | L |        |  |   |
| 3                                   | -58.2 | NV    | 24.9 | L |        |  |   |
| 4                                   | -58.1 | NV    | 23.4 | L |        |  |   |
| <i>IF ac isolées dans chlorites</i> |       |       |      |   |        |  |   |
| Plan A                              |       |       |      |   |        |  |   |
| 1                                   | -57.2 | 7.1   | 22.9 | ? |        |  | Tfc peu visible   |
| 2                                   | -57.5 | 7.4   | 15.9 | L |        |  | ThCO2 variable: métastabilité                                   |
| 3                                   | -57.3 | 7.1   | 26.8 | L |        |  |   |
| 4                                   | -57.8 | NV    | 22.4 | L |        |  |   |
| 5                                   | -57.7 | 5.4   | 23.9 | L |        |  |   |
| 6                                   | -57.8 | 6.1   | 24.7 | L |        |  |   |
| 7                                   | -58.4 | 5.6   | 24.8 | L |        |  |   |
| 8                                   | -57.8 | NV    | 25.6 | L |        |  |   |
| 9                                   | -57.9 | 5.3   | 24   | L |        |  |   |
| 10                                  | -57.9 | 5.4   | 23.5 | L |        |  |   |
| 11                                  | -57.8 | 5     | 24   | L |        |  |   |
| 12                                  | -57.8 | NV    | 24   | C |        |  |   |
| <i>IF ac isolées</i>                |       |       |      |   |        |  |   |
| Plan A                              |       |       |      |   |        |  |   |
| 1                                   | -57.4 | 8.5   | 25.7 | L |        |  | Fcar=0.75   |
| Plan B                              |       |       |      |   |        |  |   |
| 1                                   | -57.5 | 8.5   | 24.9 | L |        |  | pas de ThT car pas de phase aqueuse                             |
| 2                                   | -57.6 | NV    | 25.1 | L |        |  |   |
| 3                                   | -57.6 | 8     | 25.3 | L |        |  |   |
| 4                                   | -57.7 | NV    | 24.8 | L |        |  | IF en amas  |
| 5                                   | -57.7 | 8.1   | 25.4 | L |        |  | dans grain de quartz  |
| <i>IF aq famille 3</i>              |       |       |      |   |        |  |   |
| Plan A                              |       |       |      |   |        |  |   |
| 1                                   | -1.3  | 168.7 | L    |   |        |  |   |
| 2                                   | -1.2  | 173.2 | L    |   |        |  |   |
| 3                                   | -1.4  |       |      |   |        |  |   |
| 4                                   | -1.4  | 186.2 | L    |   |        |  |   |
| 5                                   | -1.6  |       |      |   |        |  |   |

|               | TfG  | Thtot  | mode Thtot | T eutectique | Taille IF |  |  | Remarques       |
|---------------|------|--------|------------|--------------|-----------|--|--|-----------------|
|               |      | 173.2  | L          |              |           |  |  |                 |
|               |      | 167.2  | L          |              |           |  |  |                 |
|               |      | 176.9  | L          |              |           |  |  |                 |
|               |      | 210    | L          |              |           |  |  |                 |
| <b>Plan B</b> |      |        |            |              |           |  |  |                 |
| 1             | -2.4 |        |            |              |           |  |  |                 |
| 2             | -2.5 | 186.5  | L          |              |           |  |  |                 |
| 3             | -2   | 189.2  | L          |              |           |  |  | TfG peu visible |
| 4             | -2.3 | 195.4  | L          |              |           |  |  |                 |
| 5             | -2   |        |            |              |           |  |  | TfG peu visible |
| <b>Plan C</b> |      |        |            |              |           |  |  |                 |
| 1             | -0.8 | 166.1  | L          |              |           |  |  |                 |
| 2             | -0.8 |        |            |              |           |  |  |                 |
| 3             | -0.8 |        |            |              |           |  |  |                 |
| 4             |      | 192    | L          |              |           |  |  |                 |
| 5             |      | 170    | L          |              |           |  |  |                 |
| 6             |      | 166.70 | L          |              |           |  |  |                 |
|               |      | 168.4  | L          |              |           |  |  |                 |
| <b>Plan D</b> |      |        |            |              |           |  |  |                 |
| 1             | -0.8 | 163    | L          |              |           |  |  |                 |
| 2             | -1   |        |            |              |           |  |  |                 |
| 3             | -0.8 | 172.7  | L          |              |           |  |  |                 |
| 4             | -2.6 | 192    | L          |              |           |  |  |                 |
| 5             | -0.7 |        |            |              |           |  |  |                 |
| 6             | -0.8 |        |            |              |           |  |  |                 |
|               |      | 164    | L          |              |           |  |  |                 |
|               |      | 140    | L          |              |           |  |  |                 |
|               |      | 192.2  | L          |              |           |  |  |                 |
|               |      | 187.3  | L          |              |           |  |  |                 |
|               |      | 173    | L          |              |           |  |  |                 |
|               |      | 187.1  | L          |              |           |  |  |                 |
|               |      | 187.5  | L          |              |           |  |  |                 |
|               |      | 164.1  | L          |              |           |  |  |                 |
| <b>Plan E</b> |      |        |            |              |           |  |  |                 |
| 1             | -0.7 | 157.6  | L          |              |           |  |  |                 |
| 2             | -0.8 | 157    | L          |              |           |  |  |                 |
| 3             | -0.8 | 177.2  | L          |              |           |  |  |                 |
| 4             | -0.8 | 157.5  | L          |              |           |  |  |                 |
| 5             | -0.8 |        |            |              |           |  |  |                 |
|               |      | 158    | L          |              |           |  |  |                 |
|               |      | 123    | L          |              |           |  |  |                 |
|               |      | 197.8  | L          |              |           |  |  |                 |
|               |      | 197.8  | L          |              |           |  |  |                 |
|               |      | 157.5  | L          |              |           |  |  |                 |
| <b>Plan F</b> |      |        |            |              |           |  |  |                 |
| 1             | -1.2 | 129    | L          |              |           |  |  |                 |
| 2             | -1.1 | 170    | L          |              |           |  |  |                 |
| 3             | -0.9 |        |            |              |           |  |  |                 |
| 4             | -0.9 |        |            |              |           |  |  |                 |
| 5             | -1.2 |        |            |              |           |  |  |                 |
| 6             | -1.3 | 194.5  | L          |              |           |  |  |                 |
|               |      | 145.8  | L          |              |           |  |  |                 |
|               |      | 194.5  | L          |              |           |  |  |                 |
|               |      | 173.3  | L          |              |           |  |  |                 |
|               |      | 186.1  | L          |              |           |  |  |                 |
|               |      | 157.7  | L          |              |           |  |  |                 |
|               |      | 200    | L          |              |           |  |  |                 |
| <b>Plan G</b> |      |        |            |              |           |  |  |                 |
| 1             | -1   | 236.3  | L          |              |           |  |  |                 |
| 2             | -0.8 |        |            |              |           |  |  |                 |
| 3             | -1.4 | 175    | L          |              |           |  |  |                 |
| 4             | -1.5 | 189.5  | L          |              |           |  |  |                 |
| 5             | -1.2 | 202.2  | L          |              |           |  |  |                 |
| 6             | -1   |        |            |              |           |  |  |                 |
|               |      | 220    | L          |              |           |  |  |                 |
|               |      | 182.2  | L          |              |           |  |  |                 |
|               |      | 145    | L          |              |           |  |  |                 |
|               |      | 129.8  | L          |              |           |  |  |                 |
|               |      | 140    | L          |              |           |  |  |                 |
|               |      | 122.8  | L          |              |           |  |  |                 |
|               |      | 179.6  | L          |              |           |  |  |                 |
| <b>Plan H</b> |      |        |            |              |           |  |  |                 |
| 1             | -3.8 |        |            |              |           |  |  |                 |
| 2             | -4.3 |        |            |              |           |  |  |                 |
| 3             | -4   |        |            |              |           |  |  |                 |
| 4             | -4   |        |            |              |           |  |  |                 |
| 5             | -3.9 |        |            |              |           |  |  |                 |

|                                   | TfG          | Thtot       | mode Thtot   | T eutectique      | Taille IF      |                   |                   |  | Remarques                   |
|-----------------------------------|--------------|-------------|--------------|-------------------|----------------|-------------------|-------------------|--|-----------------------------|
| <b>Plan I</b>                     |              |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 1                                 | -1           |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 2                                 | -1           |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 3                                 | -1           |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 4                                 | -1           |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 5                                 | -1.1         |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| <b>IF aq famille 4c</b>           |              |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| <b>Plan A</b>                     |              |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 1                                 | -2.8         |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 2                                 | -3           |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 3                                 | -2.4         |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 4                                 | -3           |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| <b>Plan B</b>                     |              |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 1                                 | -2.4         |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 2                                 | -3           |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 3                                 | -2.6         | 192.5       | L            |                   |                |                   |                   |  |                             |
|                                   |              | 180.5       | L            |                   |                |                   |                   |  |                             |
|                                   |              | 177.3       | L            |                   |                |                   |                   |  |                             |
|                                   |              | 206.5       | L            |                   |                |                   |                   |  |                             |
| <b>Plan C</b>                     |              |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 1                                 | -1.4         |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 2                                 | -1.4         |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 3                                 | -1.2         |             |              |                   |                |                   |                   |  | Plan IF moy penté, perp a S |
| 4                                 | -1.4         |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 5                                 | -1.3         |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 6                                 | -1           |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 7                                 | -0.8         |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| <b>Plan D</b>                     |              |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 1                                 | -1.9         |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 2                                 | -2           |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| <b>Plan E</b>                     |              |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 1                                 | -2.5         | 177.6       | L            |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 2                                 | -3           |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 3                                 | -3           |             |              |                   |                |                   |                   |  | autre plan perpendiculaire  |
| <b>Plan F</b>                     |              |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 1                                 | -1.3         |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 2                                 | -59.1        | 200.7       | L            |                   |                |                   |                   |  |                             |
| <b>Plan G</b>                     |              |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 1                                 | -2.5         |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 2                                 | -2           |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
|                                   | <b>TfCO2</b> | <b>TfCI</b> | <b>ThCO2</b> | <b>mode ThCO2</b> | <b>Thtotal</b> | <b>mode Thtot</b> | <b>Tailles IF</b> |  | <b>Remarques</b>            |
| <b>IF aq famille 2 (Fcar=0,4)</b> |              |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| <b>Lame EC 20</b>                 |              |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| <b>Plan A</b>                     |              |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 1                                 | -58.6        | 9.2         | 14           | V                 |                |                   |                   |  | ThCO2 min, MV               |
| 2                                 | NV           | 9.2         | NV           |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 3                                 | -58.5        | 9.2         | NV           |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 4                                 | NV           | 9           | NV           |                   |                |                   |                   |  | TfCO2 svt NV                |
| 5                                 | NV           | 9           | NV           |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 6                                 | NV           | 9.2         | NV           |                   |                |                   |                   |  |                             |
| <b>Plan B</b>                     |              |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 1                                 | -56.9        | 8.8         | NV           |                   |                |                   |                   |  | IF triphasées               |
| 2                                 | -57.1        | 8.8         | NV           |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 3                                 | -57.1        | 8.7         | NV           |                   |                |                   |                   |  |                             |
| <b>IF aq famille 2 (Fcar=0,8)</b> |              |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| <b>Plan A</b>                     |              |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 1                                 | -58.6        |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 2                                 | -58.8        |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| <b>IF ac monophasées</b>          |              |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| <b>Plan A</b>                     |              |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 1                                 | -58.2        | NV          | NV           | NV                |                |                   |                   |  |                             |
| 2                                 | -58.8        | 10.2        | NV           | NV                |                |                   |                   |  |                             |
| 3                                 | -58.8        | 10          | 16.9         | C                 |                |                   |                   |  |                             |
| 4                                 | -58.9        | 10          | 17.6         | C                 |                |                   |                   |  |                             |
| 5                                 | NV           | 9.8         | NV           | NV                |                |                   |                   |  |                             |
| 6                                 | -58.5        | 9.7         | 17.8         | C                 |                |                   |                   |  | TfCO2 MV                    |
| 7                                 | -58.8        | 10          | 17.8         | C                 |                |                   |                   |  |                             |
| 8                                 | NV           | 9.6         | NV           |                   |                |                   |                   |  |                             |
| <b>IF ac joints de grain</b>      |              |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| <b>Plan A</b>                     |              |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 1                                 | -58          | 8.9         | NV           |                   |                |                   |                   |  | TfCO2 MV                    |
| <b>IF ac en amas dans quartz</b>  |              |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| <b>Plan A</b>                     |              |             |              |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 1                                 | -59.2        | 10.9        | NV           |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 2                                 | -59.2        | NV          | NV           |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 3                                 | NV           | 11          | NV           |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 4                                 | -59          | 10.9        | 10           | V                 |                |                   |                   |  | ThCO2 MV                    |
| 5                                 | -59          | 11          | NV           |                   |                |                   |                   |  |                             |
| 6                                 | -59          | 9.6         | 7.5          |                   |                |                   |                   |  | ThCO2 min                   |

|                                   | TfCO2 | TfCl   | ThCO2      | mode ThCO2   | Thtotal   | mode Thtot | Tailles IF | Remarques           |
|-----------------------------------|-------|--------|------------|--------------|-----------|------------|------------|---------------------|
| 7                                 | -59   | 11     | NV         |              |           |            |            |                     |
| <i>IF ac isolées</i>              |       |        |            |              |           |            |            |                     |
| Plan A                            |       |        |            |              |           |            |            |                     |
| 1                                 | -58.7 |        | 19.5       | V            |           |            |            |                     |
| 2                                 | -58   | 8.5    | 16.1       | L            |           |            |            |                     |
| 3                                 | -58   | 8.5    | 17.8       | L            |           |            |            |                     |
|                                   |       |        |            |              |           |            |            |                     |
|                                   | TfG   | Thtot  | mode Thtot | T eutectique | Taille IF |            |            | Remarques           |
| <i>IF aq famille 3</i>            |       |        |            |              |           |            |            |                     |
| Plan A                            |       |        |            |              |           |            |            |                     |
| 1                                 | -3.6  | 178.8  | L          |              |           |            |            |                     |
| 2                                 | -3.5  | 152.8  | L          | -21 pas sur  |           |            |            |                     |
| 3                                 | -3.8  | 221.2  | L          |              |           |            |            |                     |
| 4                                 | -3.2  | 173    | L          |              |           |            |            |                     |
| 5                                 | -3.4  | 173    | L          |              |           |            |            |                     |
| Plan B                            |       |        |            |              |           |            |            |                     |
| 1                                 | -1.7  | 193    | L          |              |           |            |            |                     |
| 2                                 | -2    | 209.8  | L          |              |           |            |            |                     |
| 3                                 | -1.8  | 208.6  | L          |              |           |            |            |                     |
| 4                                 | -1.8  | 210    | L          |              |           |            |            |                     |
| 5                                 | -1.8  | 205.4  | L          |              |           |            |            |                     |
| 6                                 | -1.8  | 203.9  | L          |              |           |            |            |                     |
|                                   |       | 253.2  | L          |              |           |            |            |                     |
|                                   |       | 162.1  | L          |              |           |            |            |                     |
|                                   |       | 219.5  | L          |              |           |            |            |                     |
|                                   |       | 220    | L          |              |           |            |            |                     |
|                                   |       | 202    | L          |              |           |            |            |                     |
|                                   |       | 250    | L          |              |           |            |            |                     |
| Plan C                            |       |        |            |              |           |            |            |                     |
| 1                                 | -2    |        |            |              |           |            |            |                     |
| 2                                 | -2.4  | 212.4  | L          |              |           |            |            |                     |
| 3                                 | -1.7  | 177.6  | L          |              |           |            |            |                     |
| 4                                 | -1.9  |        |            |              |           |            |            |                     |
| 5                                 | -1.8  |        |            |              |           |            |            |                     |
| 6                                 |       | 194.80 | L          |              |           |            |            |                     |
| Plan D                            |       |        |            |              |           |            |            |                     |
| 1                                 | -1    |        |            |              |           |            |            |                     |
| 2                                 | -0.4  |        |            |              |           |            |            |                     |
| 3                                 | -0.5  |        |            |              |           |            |            |                     |
| 4                                 | -0.7  |        |            |              |           |            |            |                     |
| 5                                 | -0.7  |        |            |              |           |            |            |                     |
| 6                                 | -0.7  |        |            |              |           |            |            |                     |
| 7                                 | -0.6  |        |            |              |           |            |            |                     |
| Plan E                            |       |        |            |              |           |            |            |                     |
| 1                                 | -1.8  | 182.4  | L          |              |           |            |            |                     |
| 2                                 | -1.8  |        |            |              |           |            |            |                     |
| 3                                 | -1.4  | 185    | L          |              |           |            |            |                     |
| 4                                 | -1.4  | 183    | L          |              |           |            |            |                     |
| 5                                 | -1.5  |        |            |              |           |            |            |                     |
| 6                                 | -1.5  |        |            |              |           |            |            |                     |
| 7                                 | -1.6  |        |            |              |           |            |            |                     |
| 8                                 | -1.4  | 197.3  | L          |              |           |            |            |                     |
|                                   |       | 188    | L          |              |           |            |            |                     |
|                                   |       | 182.4  | L          |              |           |            |            |                     |
|                                   |       | 183    | L          |              |           |            |            |                     |
|                                   |       | 172.4  | L          |              |           |            |            |                     |
|                                   |       | 175.7  | L          |              |           |            |            |                     |
|                                   |       | 206.2  | L          |              |           |            |            |                     |
|                                   |       | 156.6  | L          |              |           |            |            |                     |
| Plan F                            |       |        |            |              |           |            |            |                     |
| 1                                 | -1.8  |        |            |              |           |            |            |                     |
| 2                                 | -1.8  | 100    | L          |              |           |            |            |                     |
| 3                                 | -1.7  | 120.2  | L          |              |           |            |            |                     |
| 4                                 | -1.8  | 178    | L          |              |           |            |            |                     |
| 5                                 | -1.7  | 152.8  | L          |              |           |            |            |                     |
| 6                                 |       | 117.6  | L          |              |           |            |            |                     |
|                                   |       |        | Lame EC 27 |              |           |            |            |                     |
|                                   |       |        |            |              |           |            |            |                     |
|                                   | TfCO2 | TfCl   | ThCO2      | mode ThCO2   | Thtotal   | mode Thtot | Tailles IF | Remarques           |
| <i>IF ac famille 2 (Fcar=0,9)</i> |       |        |            |              |           |            |            |                     |
| Plan A                            |       |        |            |              |           |            |            |                     |
| 1                                 | -58   | NV     | 21.9       | L            |           |            |            | pas de ThT observée |
| 2                                 | -58.2 | NV     | NV         | L            |           |            |            |                     |
| 3                                 | -58.1 | NV     | 22.4       | L            |           |            |            |                     |
| 4                                 | -58   | NV     | 21.5       | L            |           |            |            | ThCO2 mal observée  |
| 5                                 | -58.1 | NV     | 22.5       | L            |           |            |            | ThCO2 mal observée  |
|                                   |       |        |            |              |           |            |            |                     |



|                                  | TfCO2      | TfCI                 | ThCO2             | mode ThCO2          | Thtotal          | mode Thtot | Tailles IF | Remarques                           |
|----------------------------------|------------|----------------------|-------------------|---------------------|------------------|------------|------------|-------------------------------------|
| <b>IF ac parallèles à S</b>      |            |                      |                   |                     |                  |            |            |                                     |
| Plan A                           |            |                      |                   |                     |                  |            |            |                                     |
| 1                                | -57.5      | 7.1                  | 26.5              | L                   |                  |            |            |                                     |
| 2                                | -57.5      | NV                   | 26.6              | L                   |                  |            |            |                                     |
| 3                                | -57.4      | 7.4                  | 27.1              | L                   |                  |            |            |                                     |
| 4                                | -57.5      | NV                   | 27.2              | L                   |                  |            |            | pas de ThT car pas de phase aqueuse |
| 5                                | -58        | NV                   | NV                |                     |                  |            |            |                                     |
| 6                                | -57.7      | 8                    | 26.2              | L                   |                  |            |            |                                     |
| 7                                | -58.2      | 8.9                  | 22.8              | L                   |                  |            |            |                                     |
| 8                                | -57.8      | 7.9                  | 25.3              | L                   |                  |            |            |                                     |
| <b>IF ac monophasées en amas</b> |            |                      |                   |                     |                  |            |            |                                     |
| Plan A                           |            |                      |                   |                     |                  |            |            |                                     |
| 1                                | -57.7      | NV                   | NV                |                     |                  |            |            |                                     |
| 2                                | -57.7      | NV                   | NV                |                     |                  |            |            | pas de ThT car pas de phase aqueuse |
| 3                                | -57.4      | NV                   | NV                |                     |                  |            |            |                                     |
|                                  | <b>TfG</b> | <b>Thtot</b>         | <b>mode Thtot</b> | <b>T eutectique</b> | <b>Taille IF</b> |            |            | <b>Remarques</b>                    |
| <b>IF aq famille 3</b>           |            |                      |                   |                     |                  |            |            |                                     |
| Plan A                           |            |                      |                   |                     |                  |            |            |                                     |
| 1                                | -1         |                      |                   |                     |                  |            |            |                                     |
| 2                                | -1.2       | 122                  |                   |                     |                  |            |            |                                     |
| 3                                | -1.2       |                      |                   |                     |                  |            |            |                                     |
| 4                                | -1.1       | 183                  |                   |                     |                  |            |            |                                     |
| 5                                | -1.2       |                      |                   |                     |                  |            |            |                                     |
| 6                                | -1.1       | 189.5                |                   |                     |                  |            |            |                                     |
| 7                                | -1.1       | 178.6                |                   |                     |                  |            |            |                                     |
| 8                                |            | 184                  |                   |                     |                  |            |            |                                     |
| 9                                |            | 189.5                |                   |                     |                  |            |            |                                     |
| Plan B                           |            |                      |                   |                     |                  |            |            |                                     |
| 1                                | -2.7       | 215                  | L                 |                     |                  |            |            |                                     |
| 2                                | -1.5       |                      |                   |                     |                  |            |            |                                     |
| 3                                | -1.5       |                      |                   |                     |                  |            |            |                                     |
| 4                                | -1.5       |                      |                   |                     |                  |            |            |                                     |
| 5                                | -1.5       | 193                  | L                 |                     |                  |            |            |                                     |
| 6                                | -1.5       |                      |                   |                     |                  |            |            |                                     |
| 7                                |            | 210.5                | L                 |                     |                  |            |            |                                     |
| 8                                |            | 210.5                | L                 |                     |                  |            |            |                                     |
| 9                                |            | 210.5                | L                 |                     |                  |            |            |                                     |
| 10                               |            | 201.2                | L                 |                     |                  |            |            |                                     |
| 11                               |            | 193                  | L                 |                     |                  |            |            |                                     |
| 12                               |            | 199                  | L                 |                     |                  |            |            |                                     |
| 13                               |            | 194                  | L                 |                     |                  |            |            |                                     |
| 14                               |            | 214                  | L                 |                     |                  |            |            |                                     |
| 15                               |            | 210                  | L                 |                     |                  |            |            |                                     |
| 16                               |            | 210.9                | L                 |                     |                  |            |            |                                     |
|                                  |            |                      | <b>Lame EC 25</b> |                     |                  |            |            |                                     |
|                                  | <b>TfG</b> | <b>Thtot</b>         | <b>mode Thtot</b> | <b>T eutectique</b> | <b>Taille IF</b> |            |            | <b>Remarques</b>                    |
| <b>IF aq famille 3</b>           |            |                      |                   |                     |                  |            |            |                                     |
| Plan A                           |            |                      |                   |                     |                  |            |            |                                     |
| 1                                | -6.7       |                      |                   |                     |                  |            |            |                                     |
| 2                                | -7.7       |                      |                   |                     |                  |            |            |                                     |
| 3                                | -7.7       |                      |                   |                     |                  |            |            | IF contenant des cubes de sels      |
| Plan B                           |            |                      |                   |                     |                  |            |            |                                     |
| 1                                | -3.2       |                      |                   |                     |                  |            |            |                                     |
| 2                                | -6.6       | Td à 339°C avant ThT |                   |                     |                  |            |            | pas de ThT observé                  |
| 3                                | -6.6       |                      |                   |                     |                  |            |            |                                     |
| 4                                | -2.8       |                      |                   |                     |                  |            |            |                                     |
| Plan C                           |            |                      |                   |                     |                  |            |            |                                     |
| 1                                | -25        |                      |                   |                     |                  |            |            |                                     |





Passez un ordre permanent aux Éditions du BRGM - BP 6009 - 45060 Orléans Cedex.

- N° 1 — **Hydrogéologie de la craie du bassin de Paris.** Colloque régional, Rouen, 25-26 mai 1978. Communications. 1 vol., 627 p. complété par le Document n° 3 (1978). - 250 FF.
- N° 2 — J. BODELLE — **Les formations nummulitiques de l'Arc de Castellane.** 2 vol., 581 p., 27 pl., 1 carte h.-t. (1971). - 250 FF.
- N° 3 — **Hydrogéologie de la craie du bassin de Paris.** Colloque régional, Rouen, 25-26 mai 1978. Rapports généraux, débats. conclusions. 115 p. (complément du Document n° 1) (1979). - 200 FF.
- N° 5 — D. FAUCONNIER — **Les dinoflagellés de l'Albien et du Cénomanien inférieur du Bassin de Paris.** 1 vol., 146 p., 17 fig., 16 pl., 30 tabl. (1979). - 150 FF.
- N° 8 — **Connaître le sous-sol, un atout pour l'aménagement urbain.** Colloque national. Lyon, 13-15 mai 1979. 2 tomes. 1 093 p., nb. fig. (1979). - 400 FF.
- N° 10 — P. JEANROT — **De l'exploitation du rayonnement X en microscopie électronique à balayage.** 122 p., 53 fig. (1979). - 104 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 11 — J. PERSON — **Interventions réglementaires du géologue agréé en vue de la protection des eaux destinées à l'alimentation humaine.** 193 p. (1979). - 150 FF.
- N° 12 — **Utilisation de la géochimie majeure pour la cartographie des terrains cristallins. Possibilités de traitement automatique des analyses au BRGM.** 126 p., 61 fig. (1979). - 100 FF.
- N° 13 — M. VILLEY — **Simulation thermique de l'évolution des kérogènes.** 1 vol., 240 p., 86 fig., 19 tabl., 10 pl. (1980). - 100 FF.
- N° 14 — J.-Y. SCANVIC, G. WEECKSTEEN — **Carte des linéaments de la France à 1/1 000 000.** Une carte format 110 x 110 cm et une notice de 14 p. Disponible pliée et à plat (1980). - 115 FF.
- N° 16 — C. GOLOUBINOFF — **Le Permo-houillier du nord du Bassin de Saint-Affrique (Aveyron).** 139 p., 35 fig., 11 pl. photos (1979). - 150 FF.
- N° 18 — P. ROUBICHOU — **Les formations métamorphiques de la région de Leyme près de Saint-Céré (Massif central français).** 160 p., 53 fig., 12 pl. photos, 4 cartes h.-t., 1 carte h.-t. couleurs (1980). - 150 FF.
- N° 19 — B. LAMOUILLE — **Géologie structurale et pétrologie de la région d'Uzerche (Corrèze, Massif central français).** 233 p., 75 fig., 12 pl. photos, 4 cartes h.-t. dont 1 en couleurs (1980). - 150 FF.
- N° 20 — P. PICOT, M. FÉVRIER — **Étude minéralogique d'échantillons du golfe de Californie (Campagne CYAMEX),** 114 p., 29 pl. ph. dont 2 en coul. (1980). - 100 FF.
- N° 23 — J.-B. CHAUSSIER — **Préparation matérielle d'une mission de prospection minière en zone intertropicale à l'usage du géologue et du prospecteur minier.** 1 vol., 35 p. (1980). - 50 FF.
- N° 24 — **Géologie comparée des gisements de phosphates et de pétrole.** Colloque international à la mémoire de M. KIEKEN et J.P. RAGOT (Orléans, 6-7 novembre 1979). 268 p., 77 fig., 4 tabl., 2 pl., 1 dpl. (1980). - 200 FF.
- N° 25 — E. OUDIN avec la participation de C. FOUILLAC, L. LEBEL — **Études minéralogiques et géochimiques des dépôts sulfurés sous-marins actuels de la ride est-pacifique (21° N).** Campagne rise. 241 p., 25 fig., 23 pl. noir et blanc, 2 pl. couleur, 16 tabl. (1981). - 150 FF.
- N° 26 — D. BONIJOLY — **Étude structurale et minéralisations d'une plate-forme carbonatée : le Quercy.** 229 p., 9 ann., 4 pl. h.-t. photos (1981). - 150 FF.
- N° 27 — A. GÉRARD, D. WESTERCAMP, P. BOUYASSE, G. DUBREUIL, J. VARET — **Étude géophysique préliminaire à une évaluation du potentiel géothermique des Antilles françaises.** 42 p. (1981). - 50 FF.
- N° 28 — P. BLERY-OUSTRÈRE, M. BEURRIER, C. ALSAC — **Contribution à l'étude des nodules polymétalliques de la Zone Clarion, Clipperton.** 120 p. (1981). - 100 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 29 — **Connaître le sous-sol, un atout pour l'aménagement urbain.** Colloque national, Lyon, 13-15 mai 1979. Tome 3. Communications. 118 p. (1981). - 100 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 30 — Communication du séminaire national, "La gestion régionale des sédiments", Propriano (Corse), 27-29 mai 1981, organisé par le Ministère de l'Environnement et du Cadre de vie et le BRGM. 361 p., nbs fig. (1981). - 200 FF.
- N° 31 — D. MARITON — **Le bassin houiller du Bas-Dauphiné. Essai de synthèse géologique.** 46 p., 11 pl. h.-t., 8 annexes (1980). - 100 FF.
- N° 32 — (non publié).
- N° 33 — J.-P. SAUTY — **Du comportement thermique des réservoirs aquifères exploités pour le stockage d'eau chaude ou la géothermie basse enthalpie.** 221 p., 11 annexes (1982). - 200 FF.
- N° 34 — M. BONNET — **Méthodologie des modèles de simulation en hydrogéologie.** 438 p., nbs fig. (1982). - 300 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 35 — H. BELAYOUNI, D. FAUCONNIER, M. SLANSKY, J. TRICHET — **Étude du contenu organique des dépôts phosphatés du bassin de Gafsa (Tunisie).** 70 p., 17 fig., 2 pl. photos, 7 tabl. (1982). - 50 FF.
- N° 36 — J.-L. BLES — **Étude structurale des schistes et des filons de fluorine de l'Albigeois.** 58 p., 8 pl. h.-t., 1 fig. (1982). - 150 FF.
- N° 37 — A. PARFENOFF — **Un minerai traceur pour la prospection alluvionnaire : l'ilménite. Relations entre ilménites magnésiennes, basaltes alcalins, kimberlites et diamant.** 215 p., 29 fig., 51 tabl., 7 pl. ph. (1982). - 200 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 38 — C. GOUGOUSSIS — **Assainissement individuel et aptitude des sols à l'élimination et à l'épuration des effluents domestiques.** 354 p., 50 fig., 17 pl., 33 tabl. (1982). - 290 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 39 — **Programme de géologie profonde.** Colloque national. Paris, 15 juin 1982. Communications. 545 p., nbs fig. (1982). - 250 FF.
- N° 40 — **Programme de géologie profonde.** Colloque national. Paris, 15 juin 1982. Rapports généraux. 124 p. (1982). - 100 FF.
- N° 41 — P. DUTARTRE — **Étude de la fracturation du granite de la Margeride. Région de St-Alban-sur-Limagnole (Lozère).** 344 p., 4 dpl. h.-t., 91 fig., 10 annexes (1982). - 250 FF.

- N° 42 — B. CALINE — **Le secteur occidental de la Baie du Mont-St-Michel. Morphologie, sédimentologie et cartographie de l'Estran.** 250 p., 124 fig., 9 pl., 3 cartes h.-t. (1982). - 250 FF.
- N° 43 — **4e Conférence internationale sur la planification et la gestion des eaux.** Marseille, 10-12 mai 1982. Communications. 836 p. (1982). - 400 FF.
- N° 44 — N. DOERLER — **Influence du broyage sur les propriétés massiques et superficielles du quartz et de la biotite. Conséquences sur l'adsorption de tensio-actifs ioniques.** 268 p., 6 pl. ph., 58 fig., 34 tabl. (1982). - 200 FF.
- N° 45 — **Les milieux discontinus en hydrologie.** Colloque national en hommage à G. CASTANY. 448 p., 42 communications (1982). - 300 FF. - (ÉPUISE).
- N° 46 — D. BONIJOLY, G. DELPONT — **Étude du bassin des Causses et de la bordure cévenole par la télédétection et la géologie structurale.** 63 p., 25 fig., 2 tabl., 19 pl. (1982). - 100 FF.
- N° 47 — **Valorisation des ressources du sous-sol.** Recueil des communications présentées au séminaire. Bilan annuel de l'action concertée. Paris. 12-16 octobre 1981. 284 p., 23 communications (1982). - 100 FF.
- N° 48 — L. DESCOMBES — **Les gisements alluvionnaires de la Seine et de ses principaux affluents. Topographie et granulométrie d'après ces données d'exploitation.** 153 p., 51 fig., 6 tabl., 31 pl. en annexe (1982). - 100 FF.
- N° 49 — G. LABLANCHE — **Les calcaires lacustres paléogènes de la Champagne berrichonne. Étude cartographique, pétrographique, reconstitution du milieu de sédimentation.** 127 p., 28 fig., 10 pl. photo, 4 cartes en annexe (1982). - 100 FF.
- N° 50 — F. LEBERT — **Application des techniques de diagrapie dans le domaine de la prospection minière sur deux sites volcano-sédimentaires bretons : Bodennec et la Porte-aux-Moines.** 112 p., 63 fig., 14 tabl., 39 pl. ann. (1982). - 100 FF.
- N° 51 — P. GUENNOG, Y. THISSE — **Genèse de l'ouverture de la mer rouge et des minéralisations des fosses axiales.** 112 p., 49 fig., 4 pl. annexes (1982). - 100 FF.
- N° 52 — G. POUIT, M. BIGOT, J. DELFOUR, J.-P. MILESI, P. PICOT — **Les minéralisations actuelles et anciennes : l'exemple de la mer rouge.** 90 p. (1983). - 100 FF.
- N° 53 — R. FLEURY — **La formation de Saint-Cosme dans la Bresse du Nord. Ses relations avec les événements du Pléistocène bressan.** 150 p., 11 dpl. h.-t. (1983). - 200 FF.
- N° 54 — B. LEMIERE — **L'amas sulfuré de Chizeuil (Saône-et-Loire) : Étude géochimique de son environnement volcanosédimentaire dévonien supérieur et de son auréole d'altération hydrothermale.** 142 p., 64 fig., 33 tabl. (1982). - 150 FF.
- N° 55 — Y. MOELO — **Contribution à l'étude des conditions naturelles de formation des sulfures complexes d'antimoine et plomb (Sulfosels de Pb/Sb). Signification métallogénique.** 624 p., 27 pl. ph. (1983). - 400 FF.
- N° 56 — Y. ATLAN, C. FELLER — **Applications de la pédologie à la géotechnique routière. Exemple du Sénégal.** 88 p., 10 fig., 4 tabl. (1983). - 100 FF.
- N° 57 — D. THIERY, M. VANDENBEUSCH, P. VAUBOURG — **Interprétation des pompages d'essai en milieu fissuré aquifère.** 54 p., 8 pl. h.-t., 24 fig., 6 tabl. (1983). - 100 FF. - (ÉPUISE).
- N° 58 — C.-O. VALETTE — **Karsts et filons à fluorine dans le faisceau synclinal du Morvan. Le gisement d'Argentolle (Saône-et-Loire).** 299 p., 96 fig., 16 tabl., 4 pl. h.-t., 2 cartes h.-t. (1983). - 200 FF.
- N° 59 — C. DADOU — **Évaluation probabiliste de l'aléa sismique régional dans le Sud-Est de la France.** 246 p., 47 fig., 29 tabl. (1983). - 150 FF. - (ÉPUISE).
- N° 60 — C. BERGERON, H. DEHAYS, T. POINTET — **Remontées des nappes d'eau souterraine. Causes et effets.** 56 p., nombreuses illustrations (1983). - 100 FF. - (ÉPUISE).
- N° 61 — **Valorisation des ressources du sous-sol.** Sophia-Antipolis, 3, 4 et 5 novembre 1982. 440 p. - 100 FF. - (ÉPUISE).
- N° 62 — A. BOURG — **Modélisation du comportement des métaux traces à l'interface solide-liquide dans les systèmes aquatiques.** 171 p., 80 fig., 20 tabl. (1983). - 300 FF.
- N° 63 — P. BOUYASSE, S. ROBERT, P. GUENNOG, S. MONTI — **Bathymétrie détaillée (Seabeam), anomalies magnétiques dans les Antilles françaises.** 80 p., 5 pl. h.-t., 18 fig. (1983). - 100 FF.
- N° 64 — P. MARTEAU — **Le bassin permo-carbonifère d'Autun. Stratigraphie, sédimentologie et aspects structuraux.** 198 p., 2 pl. h.-t., 54 fig., 19 tabl., 4 pl. ph. (1983). - 150 FF.
- N° 65 — T. AUGÉ — **Étude minéralogique et pétrographique de roches basiques et ultrabasiqes du complexe ophiolitique du Nord Oman.** 300 p. (1983). - 150 FF.
- N° 66 — D. RABU, J.-J. CHAUVEL, J. CHANTRAINE — **Le domaine interne de la chaîne cadomienne dans le Massif armoricain. Étude lithostratigraphique, géochimique et structurale le long d'une transversale en baie de Saint-Brieuc et dans le pays de Lamballe (Côtes-d'Armor).** 56 p., 7 fig., 5 pl. h.-t. (1983). - 100 FF.
- N° 67 — J. CHANTRAINE *et al.* — **Inventaire lithologique et structural du Briovérien (Protérozoïque) de la Bretagne centrale et du bocage normand pour la recherche de guides métallogéniques.** 185 p., 16 ann. h.-t. (1983). - 300 FF.
- N° 68 — R. WYNS, J. LE METOUR — **Le Précambrien du massif vendéen. Étude détaillée de deux coupes de référence (coupe de l'Eure et coupe de la Divatte) et synthèse des données récentes.** 60 p., 2 pl. h.-t., 10 fig. (1983). - 100 FF.
- N° 69 — G. SUSTRAC — **La bibliothèque du géologue. Bibliographie fondamentale thématique et régionale en Sciences de la Terre.** 192 p. (1984). - 200 FF.
- N° 70 — C. VINCHON — **Sédimentogenèse et métallogenèse du Permien du dôme du Barrot (Alpes-Maritimes, France).** 444 p., 72 fig., 18 tabl., 18 pl. ph. (1984). - 300 FF.
- N° 71 — G. LABARRAQUE — **Étude d'un plasma à couplage inductif (i.c.p.), 27 mhz, et application à l'analyse multi-élémentaire par spectrométrie d'émission d'ultra-violet d'échantillons géologiques.** 194 p., 36 tabl. (1984). - 150 FF.
- N° 72 — M. LACAZE — **Diagraphie par gamma de capture : instrumentation et modélisation. Applications aux minerais de nickel.** 115 p. (1984). - 100 FF.

- N° 73 — J. DELFOUR, P. ISNARD, E. LECUYER, B. LEMIERE, F. LHOUE, B. MOINE, M. PIBOULE, P. PICOT, A. PLOQUIN, M. TEGYEVY — **Étude du gîte de pyrite de Chizeuil (Saône-et-Loire) et de son environnement volcano-sédimentaire dévonien et dinantien.** 37 p., 20 fig., 2 tabl., 5 ann. (1984). - 250 FF.
- N° 74 — V. MENICETTI avec la collaboration de A. GUILLEN — **Techniques inverses en gravimétrie et magnétisme. Application à la terminaison sud et de l'anomalie magnétique du bassin de Paris.** 120 p., 5 pl. h.-t. (1984). - 150 FF.
- N° 75 — B. PRADIER — **Transport et fixation de l'uranium dans le domaine supergène. Études de cas et applications en prospection géochimique.** 339 p., 102 fig., 46 tabl. (1984). - 300 FF.
- N° 76 — D. BONIJOLY, H. GERMAIN — **Histoire tectonique post-hercynienne du bassin d'Alès (Gard). Chronologie des déformations et contrôle structural des minéralisations barytiques.** 25 p., 13 fig., 7 pl. (1984). - 50 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 77 — H. BELAYOUNI — **Étude de la matière organique dans la série phosphatée du bassin de Gafsa-Metlaoui (Tunisie). Application à la compréhension des mécanismes de la phosphatogenèse.** 248 p. (1984). - 200 FF.
- N° 78 — **Journées d'étude sur le comportement des canalisations pour le transport des eaux géothermales.** Exposés et débats. Orléans, 20 et 21 mars 1984. 485 p. - 250 FF.
- N° 79 — **Valorisation des ressources du sous-sol.** Sophia-Antipolis, 8, 9, 10 novembre 1982. 376 p. (1984). - 100 FF.
- N° 80 — **Géologie profonde de la France. Colloque national. Première phase d'investigation : 1983-1984.** 232 p. - 100 FF.
- N° 81 — **Géologie profonde de la France. Colloque national. Première phase d'investigation : 1983-1984.** 11 fascicules. - 500 FF.
- N° 82 — P. TELEKI, C. WEBER — **Remote sensing for geological mapping. Télédétection appliquée à la cartographie.** 313 p. (1984). - 300 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 83 — J.-C. FLAGEOLLET — **Mouvements de terrain.** Colloque de Caen, 22-23-24 mars 1984, 670 p. (1984). - 290 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 84 — **Journées sur le granite.** Orléans-La Source, 26 juin 1984. Communications. 280 p. (1984). - 200 FF.
- N° 85 — M. RENARD — **Géochimie des carbonates pélagiques. Mise en évidence des fluctuations de la composition des eaux océaniques depuis 140 MA. Essai de chiostratigraphie.** 650 p., 190 fig. (1985). - 300 FF.
- N° 86 — C. ROQUIN — **Traitement des données en prospection géochimique : facteurs de variation de signal et sélection de la composante anomalie.** 316 p. (1985). - 300 FF.
- N° 87 — J.-M. LULIN — **Un nouveau gîte à Nb, Ta, U, T.R. d'origine magmatique en Afrique orientale : le complexe alcalin tectonisé de Meponda Précambrien de la province de Niassa (République populaire du Mozambique).** 370 p. (1985). - 400 FF.
- N° 88 — A. DEURBERGUE — **Transformations post-sédimentaires sur la bordure nord du Massif central. Le quartz carrié des environs de La Châtre : les altérites siliceuses du bassin de Cosne-d'Allier.** 184 p. (1985). - 200 FF.
- N° 89 — **La microsonde électronique BRGM/CNRS. Journée dédiée à Monsieur le professeur Raimond Castaing.** Comptes-rendus des exposés. 100 p. (1985). - 150 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 90 — A. COCHERIE — **Interaction manteau-croûte, son rôle dans la genèse d'associations plutoniques calco-alcalines, contraintes géochimiques (éléments en traces et isotopes du strontium et de l'oxygène).** 246 p. (1985). - 200 FF. (ÉPUISÉ).
- N° 91 — G. REVOIL — **Étude d'une méthode de préconcentration des éléments traces dans les eaux.** 162 p. (1985). - 100 FF. (ÉPUISÉ).
- N° 92 — D. WESTERCAMP. — **Géologie de l'archipel des Grenadines (Petites Antilles méridionales). Étude monographique.** 208 p. (1985). - 200 FF.
- N° 93 — Ph. BOUYSSSE *et al.* — **Géologie de la ride d'Aves et des pentes sous-marines du Nord des Petites Antilles. Esquisse bathymétrique à 1/1 000 000 de l'Est Caraïbe.** 146 p., 2 dépliant h.-t. (1985). - 200 FF.
- N° 94 — M. BERTRAND — **La Provence géologique. Excursion du centenaire de la découverte des nappes de charriage.** 100 p. (1985). - 100 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 95 — **Programme géologie profonde de la France. Deuxième phase d'investigation : 1984-1985.** 13 fascicules (1985). - 700 FF.
- N° 96 — C. KING — **Étude des sols et des formations superficielles par télédétection. Approche de leurs caractéristiques spectrales, spatiales et temporelles dans le visible et le proche infrarouge.** 200 p. (1985). - (ÉPUISÉ).
- N° 97 — G. FARJANEL — **La flore et le climat du Néogène et du Pléistocène de Bresse (France) d'après l'analyse pollinique. Implications chronostratigraphiques.** 200 p. (1985). - 200 FF.
- N° 98 — J.-L. HONEGGER — **Étude d'un échangeur à contact direct co-courant pour la valorisation thermodynamique de la géothermie moyenne enthalpie.** 186 p. (1985). - 200 FF.
- N° 99 — M. JEBRAK — **Contribution à l'histoire naturelle des filons (F, Ba) du domaine varisque.** 510 p. (1985). - 300 FF.
- N° 100 — **Programme géologie profonde de la France. Troisième phase d'investigations 1985-1986, GPF 3 - Forage Échassières n° 1. Rapport d'exécution et descriptions préliminaires. Thème 8 : Évolution géochimique et métallogénique d'un apex granitique.** 323 p. (1985). - 200 FF.
- N° 101 — **Géologie de la bordure méridionale du golfe tertiaire de Casamance (Sénégal, Guinée Bissau), par J.-P. PRIAN. Ostracodes tertiaires (Paléogène à Néogène) du bassin sénégal-guinéen, par G. CARBONNEL.** 243 p. (1986). - 350 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 102 — J.-L. BLES avec la collaboration de R. BLANCHIN, D. BONIJOLY, P. DUTARTRE, J.-L. FEYBESSE, Y. GROS, J. LANDRY et P. MARTIN — **Fracturation profonde des massifs rocheux granitiques.** 316 p. (1986). - 300 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 103 — J.-F. OUVRY — **Étude physique et rhéologique des argiles congelées. Application à l'argile profonde de Boom (Belgique).** 247 p. (1986). - 200 FF.
- N° 104 — R. GABLE — **Température, gradient et flux de chaleur terrestre. Mesures. Interprétation.** 188 p. (1986). - 250 FF. (ÉPUISÉ).
- N° 105 — **Programme géologie profonde de la France. Troisième phase d'investigations 1985-1986, GPF 3 - Forage de Chassole (Cézallier). Rapport d'exécution et descriptions préliminaires. Thème 10 : Géothermalisme actuel.** 486 p. (1986). - 350 FF.
- N° 106 — P. DEVISMES — **La détermination rapide des minéraux lourds des alluvions et des roches : utilisation pour l'inventaire minéralogique et la recherche minière** (1986). - 60 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 107 — P. ROSSI — **Organisation et genèse d'un grand batholite orogénique : le batholite calco-alcalin de la Corse** (1986). - 250 FF.

- N° 108 — J. TOURENQ — Étude sédimentologique des alluvions de la Loire et de l'Allier, des sources au confluent. Les minéraux lourds des roches des bassins versants (1986). - 100 FF.
- N° 109 — J.-F. SAUNIER — Un domaine cristallophyllien dans le Protérozoïque supérieur (Briovérien) de Bretagne centrale : le dôme de Plouguenast (Côtes-d'Armor) (1986). - 200 FF.
- N° 110 — Les couches riches en matière organique et leurs conditions de dépôt : Réunion du GRECO 52, CNRS. Tours. 14-15 novembre 1985. 286 p., 20 pl. photo (1986). - (ÉPUISE).
- N° 111 — R. DEGALLIER — Interprétation des variations naturelles du niveau des nappes souterraines. Applications aux données provenant du bassin versant de Korhogo (Côte-d'Ivoire). 44 p., nombreuses figures (1986). - (ÉPUISE).
- N° 112 — D. GARCIA — Étude isotopique et géochimique des eaux thermales des Vosges méridionales. Application géothermique. 180 p., nombreuses illustrations (1986). - (ÉPUISE).
- N° 113 — A. LALLEMAND-BARRES *et al.* — Teneurs en nitrate des nappes phréatiques de la France. État 1983. Carte à 1/1 500 000. 20 p. (1986). - (ÉPUISE).
- N° 114 — P. HUBERT — Textures et inclusions fluides des quartz aurifères. Application au gîte de Cros-Gallet (Haute-Vienne, France) et au prospect de Sanoukou (district de Keneleba, Mali). 350 p., 82 fig., 11 pl. photo, 2 cartes (1986). - 300 FF. - (ÉPUISE).
- N° 115 — A. BARRAT — Étude du rôle des eaux souterraines dans le mécanisme des éruptions phréatiques. Application à la Montagne Pelée de Martinique et à la Soufrière de Guadeloupe. 190 p., 26 fig. (1986). - 200 FF. - (ÉPUISE).
- N° 116 — P. RICHARD — Structure et évolution alpine des massifs paléozoïques du Labourd (Pays Basque français). 384 p., 2 dpl. (1986). - 350 FF.
- N° 117 — E. MARCOUX — Isotopes du plomb et paragenèses métalliques. Traceurs de l'histoire des gîtes minéraux. Illustration des concepts de source, d'héritage et de régionalisme dans les gîtes français. Applications en recherche minière. 388 p., 12 pl. photo (1986). - 350 FF. - (ÉPUISE).
- N° 118 — J.K. KANG et A. KOSAKEVITCH — Étude texturale des encroûtements ferro-manganésifères thalassiques et hydrothermaux de l'Est-Caraïbe. 203 p., 41 pl. photo (1986). - 350 FF.
- N° 119 — E. LALLIER-VERGES — Micronodules de manganèse et sédiments pélagiques dans l'Océan Pacifique. Caractérisation, formation, diagenèse. 425 p., 42 tabl., 18<sup>1</sup> pl. h.-t. (1986). - 450 FF. - (ÉPUISE).
- N° 120 — J.-L. LESCUYER et D. GIOT avec la participation de M. DONNOT et P. BEZIAT — Les minéralisations Pb-Zn de Montagne Noire et leurs relations avec leur encaissant Cambrien carbonaté sur quelques exemples du versant nord (La Rabasse, Brusque, Lardenas, Peux, Les Comtes) et du versant sud (Bidaut, Tête Rousse). 270 p., nombreuses figures, 3 dépliant (1987). - 200 FF.
- N° 121 — V. BORNE — Le bassin Paléogène de Challans-Noirmoutier (France). Thèse de doctorat d'Université de Nantes. 272 p., nombreuses photos, 6 planches photo, 9 dépliant (1987). - 300 FF.
- N° 122 — C. BEAUFRERE — Stabilité des carrières souterraines abandonnées de l'Entre-Deux-Mers (Gironde). Influence des facteurs géologiques et mécaniques. 439 p., 149 fig., 5 pl. photo coul., 12 pl. en pochette (1987). - 400 FF.
- N° 123 — Programme géologie profonde de la France. Troisième phase d'investigation : 1985-1986 - GPF 3. Thème 11. Subsidence et diagenèse (Ardèche). 1 vol., 143 p., 36 fig., 7 tabl., 5 pl. h.-t. (1987). - 150 FF. - (ÉPUISE).
- N° 124 — Programme géologie profonde de la France. Thème 8. Évolution d'un apex granitique. Forage d'Échassières. Données analytiques : 1985-1987, 1 vol., 437 p. (1988). - 400 FF. - (ÉPUISE).
- N° 125 — Programme géologie profonde de la France. Thème 10. Géothermalisme actuel. Forages de Chassole (Cézallier). Données analytiques : 1985-1987. 1 vol., 178 p. (1988). - 200 FF.
- N° 126 — HILAL AL AZRI — Typologie des gisements de chromite dans la partie sud de l'ophiolite du Nord-Oman. 1 vol., 159 p., 82 fig., 10 tabl., 7 pl. photo (1987). - 200 FF. - (ÉPUISE).
- N° 127 — F. BECHENNEC — Géologie des nappes Hawasina dans les parties orientale et centrale des montagnes d'Oman. 1 vol., 474 p., 135 fig., 17 annexes, 8 tabl., 36 photos, 2 pl. h.-t. (1988). - 450 FF.
- N° 128 — M. BEURRIER — Géologie de la nappe ophiolitique de Samail dans les parties orientale et centrale des montagnes d'Oman. 412 p., 206 fig., 68 tabl., 8 pl. ph., 7 pl. h.-t. (1988). - 400 FF.
- N° 129 — J. LE METOUR — Géologie de l'autochtone des montagnes d'Oman. La fenêtre du Saih Hatat. 1 vol., 425 p., 151 fig., 10 tabl., 3 pl. ph. (1988). - 450 FF.
- N° 130 — D. RABU — Géologie de l'autochtone des montagnes d'Oman. La fenêtre du Jabal Akdar. 1 vol., 614 p., 1 carte (1989). - 500 FF.
- N° 131 — J.-C. BARFETY — Le Jurassique dauphinois entre Durance et Rhône. Étude stratigraphique et géodynamique (zone externe des Alpes occidentales françaises). 1 vol., 656 p., 175 fig., 19 tabl., 24 pl. ph. (1988). - 600 FF.
- N° 132 — C. BOUCHET — Hydrogéologie du milieu volcanique. Le bassin de la Veyre (Chaîne des Puys - Massif central). Analyse et modélisation du bassin versant du lac d'Aydat. Étude d'un aquifère fissuré basaltique. 1 vol., 319 p., 137 fig., 26 tabl., 3 annexes (1987). - 200 FF. - (ÉPUISE).
- N° 133 — J.-G. ASTRUC — Le paléokarst quercynois au Paléogène. Altérations et sédimentations associées. 1 vol., 150 p., 63 fig., 5 tabl., 26 pl. h.-t. - 150 FF. - (ÉPUISE).
- N° 134 — S. GENTIER — Morphologie et comportement hydromécanique d'une fracture naturelle dans le granite sous contrainte normale. Étude expérimentale et théorique. 1 vol., 597 p. (1987). - 450 FF. - (ÉPUISE).
- N° 135 — J. GUERANGE-LOZES — Les nappes varisques de l'Albigeois cristallin. Lithostratigraphie, volcanisme et déformations. 1 vol., 259 p., 7 annexes, 34 fig., 18 tabl., 16 pl. photo (1987). - 450 FF.
- N° 136 — Programme géologie profonde de la France. Phase d'investigation : 1986-1987. Thème 2 : Socle et anomalie magnétique du bassin de Paris - Forage de Sancerre-Couy. Terrains sédimentaires : rapport d'exécution et descriptions préliminaires. 1 vol., 185 p. (1987). - 200 FF.
- N° 137 — Programme géologie profonde de la France. Phase d'investigation : 1986-1987. Thème 2 : Socle et anomalie magnétique du bassin de Paris - Forage de Sancerre-Couy. Socle : résultats préliminaires. 1 vol., 323 p., (1988). - 300 FF.
- N° 138 — Programme géologie profonde de la France. Phase d'investigation : 1986-1987. Thème 2 : Socle et anomalie magnétique du bassin de Paris - Forage de Sancerre-Couy. Données géophysiques. 1 vol., 259 p. (1988). - 250 FF. - (ÉPUISE).

- N° 139 — **Programme géologie profonde de la France.** Colloque national. Troisième phase d'investigation : 1985-1986. GPF 3. Thème 1 : Chevauchements nord-varisques (faille du Midi). *1 vol., 93 p.* (1987). - **100 FF.**
- N° 140 — **Programme géologie profonde de la France.** Colloque national. Troisième phase d'investigation : 1985-1986. GPF 3. Thème 3 : Chevauchements synmétamorphes varisques du Limousin. *1 vol., 104 p.* (1987). - **100 FF.**
- N° 141 — **Programme géologie profonde de la France.** Colloque national. Troisième phase d'investigation : 1985-1986. GPF 3. Thème 4 : Soubassement précambrien du domaine varisque en Bretagne. *1 vol., 49 p.* (1987). - **50 FF.**
- N° 142 — **Programme géologie profonde de la France.** Colloque national. Troisième phase d'investigation : 1985-1986. GPF 3. Thème 5 : Allochtonie des unités alpines. *1 vol., 94 p.* (1987). - **100 FF.**
- N° 143 — **Programme géologie profonde de la France.** Colloque national. Troisième phase d'investigation : 1985-1986. GPF 3. Thème 6 : Allochtonie des massifs paléozoïques nord-pyrénéens. *1 vol., 68 p.* (1987). - **100 FF.**
- N° 144 — **Programme géologie profonde de la France.** Colloque national. Troisième phase d'investigation : 1985-1986. GPF 3. Thème 7 : Bassins paléozoïques cachés sous l'Aquitaine. *1 vol., 57 p.* (1987). - **50 FF.**
- N° 145 — **Programme géologie profonde de la France.** Colloque national. Troisième phase d'investigation : 1985-1986. GPF 3. Thème 9 : Volcanisme récent du Massif central (Mont-Dore). *1 vol., 65 p.* (1987). - **100 FF.**
- N° 146 — **Programme géologie profonde de la France.** Colloque national. Troisième phase d'investigation : 1985-1986. GPF 3. Thème 12 : Projet Vosges. Le socle vosgien, segment de la chaîne varisque d'Europe. *1 vol., 136 p.* (1987). - **150 FF.** - (ÉPUISÉ).
- N° 147 — M. LYS — **Biostratigraphie du Carbonifère et du Permien en Mésogée** (Espagne, Afrique du Nord, Régions Égéennes, Proche-Orient). Études micropaléontologiques (foraminifères). Paléobiogéographie. *1 vol., 315 p., 72 fig., 21 planches, 28 tabl. dont 12 h.-t.* (1988). - **300 FF.** - (ÉPUISÉ).
- N° 148 — J. AGARD, A. BENNANI, F. PERMINGEAT — **Les unités métallifères à tungstène du Maroc.** Une vue d'ensemble. *1 vol., 50 p., 7 fig., 2 tabl.* (1988). - **100 FF.** - (ÉPUISÉ).
- N° 149 — D. BILLAUX, B. FEUGA — **Étude comparée des méthodes de modélisation de la fracturation des roches.** *1 vol., 45 p., 22 fig.* (1988). - **50 FF.** - (ÉPUISÉ).
- N° 150 — A. CHEREAU, R. DEGALLIER, A. DURAND *et al.* — **Détermination des paramètres hydrodynamiques des nappes souterraines à partir de leurs variations de niveau sous l'influence des pompages.** *1 vol., 737 p., 15 fig.* (1988). - **450 FF.** - (ÉPUISÉ).
- N° 151 — P. MANDIER — **Le relief de la moyenne vallée du Rhône au Tertiaire et au Quaternaire.** Essai de synthèse paléogéographique. *3 vol., 654 p., 229 fig., 18 tabl., 11 cartes, 5 pl. h.-t.* (1988). - **750 FF.**
- N° 152 — P. CHEVREMENT, C. GAGNY, H. DE LA ROCHE, J.-P. PUPIN, P. ROSSI — **Représentation cartographique du plutonisme acide et du plutonisme intermédiaire à basique associé.** *1 vol., 68 p., 19 fig., 2 tabl.* (1988). - **100 FF.** - (ÉPUISÉ).
- N° 153 — J. BODIN — **Le Dévonien inférieur et moyen des Pyrénées ariégeoises et centrales.** Biostratigraphie, séries hétéropiques et mise en évidence de nappes hercyniennes précoces. *1 vol., 270 p., 79 fig., 5 tabl.* (1988). - **250 FF.**
- N° 154 — M. URVOIS — **Apports de l'estimation géostatistique de l'épaisseur des unités métallifères dans la compréhension des mécanismes de mise en place des sédiments de la fosse Atlantis II (Mer Rouge).** *1 vol., 228 p., 81 fig., 5 tabl.* (1988). - **250 FF.**
- N° 155 — H. MASSOUD — **Modélisation de la petite fracturation par les techniques de la géostatistique.** *1 vol., 210 p., 42 fig.* (1988). - **200 FF.** - (ÉPUISÉ).
- N° 156 — B. CALINE, Y. GRUET, C. LEGENDRE, J. LE RHUN, A. L'HOMER, R. MATHIEU, R. ZBINDEN — **Les récifs à Annélides (hermelles) en baie du Mont-Saint-Michel.** Écologie, géomorphologie, sédimentologie, implications géologiques. *1 vol., 190 p., 52 fig., 10 pl. photo* (1988). - **200 FF.**
- N° 157 — D. THIEBLEMONT — **Le magmatisme paléozoïque en Vendée.** Apport de la géochimie des éléments traces et de la pétrologie du métamorphisme à la compréhension du développement orogénique varisque. *1 vol., 372 p., 128 fig., 27 tabl., 10 pl. photo, 58 ann.* (1988). - **350 FF.**
- N° 158 — **Gisements métallifères dans leur contexte géologique.** Actes du colloque PIRSEM. *Vol. 1, 488 p., nb. fig., vol. 2, 902 p., nb. fig.* (1988). - **650 FF.**
- N° 159 — I. CZERNICHOWSKI-LAURIOL — **Modélisation de l'évolution des fluides géothermaux lors de leur exploitation par forages.** *1 vol., 202 p., 33 fig., 9 tabl.* (1988). - **200 FF.**
- N° 160 — **Hydrogéologie et sûreté des dépôts de déchets radioactifs et industriels toxiques.** Vol. 1 : Communications Association internationale des hydrogéologues. *1 vol., 634 p., 270 fig., 35 tabl.* (1988). - **500 FF.** - (ÉPUISÉ).
- N° 161 — **Hydrogéologie et sûreté des dépôts de déchets radioactifs et industriels toxiques.** Vol. 2 : Actes Association internationale des hydrogéologues. *1 vol., 160 p., 11 fig., 2 tabl.* (1988). - **150 FF.**
- N° 162 — P. LOISEAU — **Étude structurale et géostatistique des gneiss de la région du Cézallier (Massif central français).** Modélisation tridimensionnelle de réseaux de fractures. Application à l'écoulement des fluides. *1 vol., 192 p., 83 fig., 15 tabl.* (1988). - **200 FF.**
- N° 163 — D. NURY — **L'Oligocène de Provence méridionale.** Stratigraphie dynamique sédimentaire. Reconstitutions paléogéographiques. *1 vol., 418 p., 120 fig., 37 tabl., 7 pl. photo* (1988). - **400 FF.**
- N° 164 — J.-P. PLATEL — **Le Crétacé supérieur de la plate-forme septentrionale du Bassin d'Aquitaine.** Stratigraphie et évolution géodynamique. *1 vol., 578 p., 100 fig., 21 tabl., 10 cartes coul.* (1989). - **500 FF.**
- N° 165 — **Programme géologie profonde de la France.** Programme national. Cibles de forages profonds suggérés par les profils sismiques ECORS. *1 vol., 46 p., 22 fig.* (1988). - **50 FF.** - (ÉPUISÉ).
- N° 166 — M. LARDEAU — **Minéralogie et pétrogenèse du minerai sulfuré du gisement volcano-sédimentaire à Zn-Cu-Ba. (Pb-Ag) de Chessy-les-Mines (Rhône).** Application à l'étude des amas sulfurés métamorphisés. *1 vol., 196 p., 74 fig., 32 tabl., 5 ann.* (1989). - **200 FF.**
- N° 167 — Y. MO—LO, E. MAKOVICKY et S. KARUP-MOLLER — **Sulfures complexes plombo-argentifères : minéralogie et cristalochimie de la série andorite-fizelyite (Pb, Mn, Fe, Cd, Sn)<sup>3</sup> — 2 x (Ag, Cu)x (Sb, Bi, As)<sub>2</sub> + x (S, Se)<sub>6</sub>.** *1 vol., 114 p., 18 fig., 21 tabl., 58 pl. photo en ann.* (1989). - **100 FF.**
- N° 168 — S. LOUAHALA — **Signatures spectrales de roches en milieu tempéré.** Valeurs réelles et valeurs perçues par le satellite. *1 vol., 212 p., 79 fig., 15 tabl., 5 photos* (1989). - **200 FF.**

- N° 169 — J.-C. ARAGON — **Sédimentologie et stratigraphie séquentielle de l'Albien dans le bassin de Quillan et le Synclinorium d'Ascac (Zone nord-pyrénéenne, Aude)**. 1 vol., 192 p., 47 fig., 17 pl. photo (1988). - 200 FF.
- N° 170 — M. BONNEMAISON — **Indices de diagenèse liés aux nannofossiles calcaires dans le Crétacé des Pyrénées**. Comparaison avec des sites océaniques dans le Golfe de Gascogne. 1 vol., 272 p., 47 fig., 47 tabl., 24 pl. photo (1988). - 250 FF.
- N° 171 — P. ANDREIEFF, P. BOUYASSE et D. WESTERCAMP — **Géologie de l'arc insulaire des petites Antilles et évolution géodynamique de l'est-Caraïbe**. 1 vol., 392 p., 40 fig., 7 tabl., 9 pl. photo (1989). - 400 FF.
- N° 172 — J. DUBREUILH — **Synthèse paléogéographique et structurale des dépôts fluviatiles tertiaires du nord du bassin d'Aquitaine. Passage aux formations palustres, lacustres et marines**. 1 vol., 468 p., 79 fig., 9 tabl., 2 ann. (1989). - 450 FF.
- N° 173 — P. BARANGER — **Origine et diagenèse des constituants organiques associés aux niveaux salifères tertiaires de Bresse (France)**. Étude expérimentale de la réduction d'espèces métalliques par la matière organique sédimentaire. 1 vol., 424 p., 51 fig., 5 tabl., 4 pl. photo (1989). - 400 FF.
- N° 174 — J. TOURENQ — **Les sables et argiles du Bourbonnais (Massif central, France)**. Une formation fluvio-lacustre d'âge pliocène supérieur. Étude minéralogique, sédimentologique et stratigraphique. 1 vol., 340 p., 140 fig., 109 tabl., 7 pl. photo (1989). - 350 FF.
- N° 175 — J.-P. CAPDEVILLE — **Synthèse paléogéographique et structurale des dépôts fluvio-lacustres tertiaires du nord du bassin Aquitain entre Lot et Dordogne**. 1 vol., 302 p., 78 fig., 12 tabl. (1989). - 400 FF.
- N° 176 — **Programme géologie de la France**. Programme national. Forages scientifiques de l'Ardèche. 1 vol., 116 p., 38 fig., 8 tabl. (1989). - 100 FF.
- N° 177 — M. POUPON — **Les altérations hydrothermales associées aux amas sulfurés de Chessy et de Sain-Bel (Paléozoïque, série de la Brèvenne, Massif central français)** (1989). - 300 FF.
- N° 178 — D. PRIMEY et G. FARJANEL avec la collaboration de D. FAUCONNIER — **Étude paléobotanique et palynologique des gisements stéphano-autuniens de Lucenay-lès-Aix et Devay (Bassin de Decize, Nièvre)**. 1 vol., 210 p., 51 fig., 10 tabl., 8 pl. photo (1989). - 250 FF.
- N° 179 — M. DONSIMONI avec la collaboration de J.-F. BECQ-GIRAUDON, J. BOIS, M. DEGOUY, G. GONZALEZ, D. MARITON, J.-F. PASQUET, D. PRIMEY, C. REMOND — **Le gisement de charbon de Lucenay-lès-Aix (Nièvre)**. Essai de synthèse géologique d'après les sondages récents (1981-1986). 1 vol., 84 p., 18 fig., 6 tabl. (1988). - 250 FF.
- N° 180 — J.-M. PUIG — **Le système karstique de la fontaine de Vaucluse**. 1 vol., 214 p., 69 fig., 27 tabl. (1990). - 200 FF. - (ÉPUISE).
- N° 181 — Colloque : «Valorisation des ressources du sous-sol», recueil des communications. Paris, 27-28 novembre 1984. 1 vol., 76 p., 23 fig., 5 tabl. (1990). - 70 FF.
- N° 182 — Colloque-bilan : «Valorisation des ressources minérales», recueil des communications. Paris, 27-28 septembre 1988. 1 vol., 324 p., 80 fig., 20 tabl. (1990). - 350 FF.
- N° 183 — **Mobilité et concentration des métaux de base dans les couvertures sédimentaires. Manifestations, mécanismes, prospection. (Mobility and concentration of base metals in sedimentary cover rocks. Manifestations, mechanisms, prospection)**. Coordonné par H. Pélissonnier, J.-F. Sureau. 1 vol., nb. illustrations (1990). - 600 FF.
- N° 184 — J. ROJAS, D. GIOT, Y.-M. LE NINDRE, A. CRIAUD, C. FOUILLAC, M. BRACH, A. MENJOZ, J.-C. MARTIN, M. LAMBERT, avec la collaboration de J.-P. CHILES, A.-M. FOUILLAC, H. PAUWELS — **Caractérisation et modélisation du réservoir géothermique du Dogger, Bassin Parisien, France. Rapport final**. 1 vol., 240 p., 138 fig., 32 tabl. (1990). - 300 FF.
- N° 185 — A. GENTER — **Géothermie roches chaudes sèches, le granite de Soultz-sous-Forêts (Bas-Rhin, France)**. 1 vol., 246 p., 82 fig., 16 tabl., 4 ann., 4 pl. photo (1990). - 250 FF.
- N° 186 — D. BILLAUX — **Hydrogéologie des milieux fracturés. Géométrie, connectivité et comportement hydraulique**. 1 vol., 296 p. (1990). - 300 FF. - (ÉPUISE).
- N° 187 — X. WU — **L'arsénopyrite aurifère, composition, conditions de genèse. L'apport des synthèses minérales et de l'étude de gisements d'or (Le Châtelet, l'Aurières, France)**. 1 vol., 209 p., 52 fig., 20 tabl., 4 pl. (1990). - 350 FF.
- N° 188 — M. GUIOMAR — **Le Carbonifère des chaînes subalpines de Haute-Provence (France) dans son cadre structural**. 1 vol., 246 p., 149 fig., 4 pl. photo (1990). - 400 FF.
- N° 189 — V. BOUCHOT — **Contexte géologique et structural des minéralisations aurifères du district de Saint-Yrieix (Limousin, Massif central français)**. 1 vol., 284 p., 86 fig., 19 tabl., 1 pl. photo (1990). - 300 FF.
- N° 190 — M. SCHULER — **Environnements et paléoclimats paléogènes palynologie et biostratigraphie de l'Éocène et de l'Oligocène inférieur dans les fossés rhénan, rhodanien et de Hesse**. 1 vol., 503 p., 144 fig., 87 tabl., 14 pl. h.-t. (1990). - 600 FF.
- N° 191 — D. VASLET — **Le paléozoïque (anté-permien supérieur) d'Arabie saoudite. Volume 1. Histoire géologique de la bordure occidentale de la plate-forme arabe**. 1 vol., 209 p., nbs. fig. (1990). - 250 FF. - (ÉPUISE).
- N° 192 — Y.-M. LE NINDRE, J. MANIVIT, D. VASLET — **Géodynamique et paléogéographie de la plate-forme arabe du Permien au Jurassique. Volume 2. Histoire géologique de la bordure occidentale de la plate-forme arabe**. 1 vol., 280 p., 54 fig., 4 tabl., 4 annexes (1990). - 500 FF.
- N° 193 — Y.-M. LE NINDRE, D. VASLET, J. MANIVIT — **Le Permo-Trias d'Arabie centrale. Volume 3. Histoire géologique de la bordure occidentale de la plate-forme arabe**. 290 p., 51 fig., 4 tabl., 11 pl. photo. (1990). - 600 FF.
- N° 194 — J. MANIVIT, Y.-M. LE NINDRE, D. VASLET — **Le Jurassique d'Arabie centrale. Volume 4. Histoire géologique de la bordure occidentale de la plate-forme arabe**. 559 p., 74 fig., 1 tabl., 12 pl. photo. (1990). - 600 FF.
- N° 195 — COLLECTIF — **L'eau souterraine, un patrimoine à gérer en commun, colloque 6-7 novembre 1990, Paris. Volume 1. Communications**. 443 p. (1990). - 750 FF.
- N° 196 — COLLECTIF — **L'eau souterraine, un patrimoine à gérer en commun. Colloque 6-7 novembre 1990, Paris. Volume 2. Rapports généraux. Table ronde**. 171 p. (1992). - 170 FF. - (ÉPUISE).
- N° 197 — O. MAQUAIRE — **Les mouvements de terrain de la côte au Calvados. Recherche et prévention**. 1 vol., 431 p., 157 fig., 16 ph. (1990). - 350 FF.
- N° 198 — O. ROUZEAU — **Problématique de la transposition des modèles de distribution de température dans le sol aux interprétations issues de la télédétection thermique spatiale. Application au bassin de Paris**. 1 vol., 193 p., 96 fig., 54 pl. h.-t. (1990). - 400 FF.

- N° 199 — B. CROCHET — Molasses syntectoniques du versant nord des Pyrénées : la série de Palassou. *1 vol., 387 p., 129 fig.* (1990). - 400 FF.
- N° 200 — COLLECTIF — Programme géologie profonde de la France. Phase 1989-1990. Thème 11. Ardèche : diagenèse et relations fluides-roches. Forages scientifiques de l'Ardèche. Les interactions fluides-roches sur une paléomarge distensive. Forage de Balazuc 1 : Rapport d'exécution et données préliminaires. *1 vol., 126 p., 52 fig., 23 tabl.* (1990). - 150 FF.
- N° 201 — G. BRONNER — Structure et évolution d'un craton archéen. La dorsale Réguibat occidentale (Mauritanie). Tectonique et métallogénie des formations ferrifères. *448 p., 84 fig., 9 cartes h.-t.* (1992). - 750 FF.
- N° 202 — H.-T. LIAO — Estimation des réserves récupérables de gisements d'or. Comparaison entre le krigeage disjonctif et le krigeage des indicatrices. *1 vol., 198 p., 100 fig., 44 tabl.* (1990). - 400 FF.
- N° 203 — P. FREYSSINET — Géochimie et minéralogie des latérites du Sud-Mali. *1 vol., 278 p., 87 fig., 3 tabl., 8 ph.* (1991). - 350 FF.
- N° 204 — M.-M. BLANC-VALLERON — Les formations paléogènes évaporitiques du bassin potassique de Mulhouse et des bassins plus septentrionaux d'Alsace. *514 p., 162 fig., 47 tabl., 185 ph.* (1991). - 500 FF.
- N° 205 — C. CENSIER — Dynamique sédimentaire d'un système fluvial diamantifère mésozoïque : la formation de Carnot (République centrafricaine). *568 p., 129 fig., 48 tabl., 29 ph.* (1991). - 570 FF.
- N° 206 — P. VALLA — Applications de la modélisation numérique aux méthodes d'électromagnétisme fréquentiel en prospection géophysique. *472 p., 108 fig., 1 tabl.* (1991). - 480 FF.
- N° 207 — M. TERRIER — Néotectonique de la Provence occidentale (France). Vers une analyse multicritère des déformations récentes. Applications à la classification des structures sismogènes. *1 vol., 232 p., 76 fig., 16 tabl.* - 450 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 208 — J.-P. DEROIN — Méthodologie d'utilisation de l'imagerie satellitaire à haute résolution spatiale en zone tempérée. Apports à la connaissance géomorphologique, géologique et minérale des Cévennes et du Bas-Languedoc (sud de la France). *1 vol., 386 p., 71 fig., 8 tabl., 7 ph.* (1992). - 350 FF.
- N° 209 — J.-L. SCHNEIDER, J.-P. WOLF — Carte géologique et cartes hydrogéologiques à 1/1 500 000 de la République du Tchad. Mémoire explicatif. *2 vol.* - 600 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 210 — N. MOUKOLO — Hydrogéologie du Congo. *130 p.* (1992). - 150 FF.
- N° 211 — Géologie profonde de la France. Forum GPF. Nouvelles cibles, 18 mars 1992, Paris. *1 vol., 130 p., 37 fig.* (1992). - 100 FF.
- N° 212 — J. LORENZ — Le Dogger du Berry. Contribution à la connaissance des plates-formes carbonatées européennes du Jurassique. *1 vol., 400 p., 12 pl.* (1992). - 450 FF.
- N° 213 — VIth international symposium on the observation of the continental crust through drilling Continental scientific drilling programmes. Géologie profonde de la France. *1 vol., 288 p., 10 fig., 2 tabl.* (1992). - 100 FF.
- N° 214 — L. MERCIER — Approche thermique de la collision continentale dans le Massif central français : exemple des nappes de l'Artense. *1 vol., 234 p., nb fig., 14 tabl.* (1992). - 250 FF.
- N° 215 — Y.-M. LENINDRE, Ph. DUTARTRE — Découverte du bassin d'Arcachon par la télédétection spatiale. *1 vol., 110 p., 23 fig., 27 pl.* (1993). - 500 FF.
- N° 216 — J.-C. GOUJOU — Analyse pétro-structurale dans un avant-pays métamorphique : influence du plutonisme tardi-orogénique varisque sur l'encaissant épi à mésozonal de Vendée. *1 vol., 347 p.* (1992). - 400 FF.
- N° 217 — F. GIRAULT — Auscultation par imagerie numérique de quelques versants instables. *1 vol., 193 p.* (1992). - 200 FF.
- N° 218 — Forage scientifique Ardèche. Le forage de Balazuc. *1 vol., 122 p.* (1992). - 450 FF. - (ÉPUISÉ).
- N° 219 — Late orogenic extension in Mountain-Belts. *1 vol., 230 p.* (1993). - 450 FF.
- N° 220 — Y. LEI — La tectonique cassante du gisement aurifère de Salsigne (Aude, France). *1 vol., 174 p.* (1993). - 450 FF.
- N° 221 — D. RABU (coordinator) — Stratigraphy and structure of the Oman mountains. *1 vol., 262 p., 143 fig., 24 tabl., 4 pl. h.t.* (1993). - 650 FF.
- N° 222 — F. MENILLET — Les meulière du bassin de Paris (France) et les faciès associés. Rôle des altérations supergènes néogènes à quaternaire ancien dans leur genèse. *1 vol., 425 p., 186 fig., 34 tabl., 5 pl. photo.* (1993). - 450 FF.
- N° 223 — VIe Symposium international sur l'observation de la croûte continentale par forage (VIth International Symposium of the observation of the continental crust through drilling). Publications. Géologie de la France. Paris 7-10 avril 1992 sous les auspices du Ministère de la recherche et de la technologie et du Programme international sur la lithosphère. *1 vol., 349 p.* (1993). - 400 FF.
- N° 224 — J.-P. MILESI, J.-L. LESCUYER — The Chessy Zn-Cu-Ba massive sulphide deposit and the devonian Brevenne volcanosedimentary belt (eastern Massif central, France). *1 vol., 258 p., 18 fig., 4 tabl., 8 pl.* (1993). - 350 FF.
- N° 225 — M. MOISY — Evolution de la perméabilité et de la circulation des fluides hydrothermaux dans une zone de cisaillement fragile. *1 vol., 214 p., 81 fig.* (1993). - 280 FF.
- N° 226 — G. RECOCHE — Les concentrations aurifères supergènes liées aux minéralisations sulfurées polymétalliques de la ceinture volcano-sédimentaire d'Ariab-Arbaat (Red Sea Hills Soudan) : étude du gisement de Hassaï. *1 vol., 320 p., 64 fig., 18 pl. h.t., 2 pl. annexes h.t.* (1993). - 450 FF.
- N° 227 — B. SETIAWAN — Les lignées granitiques et les skarns minéralisés en Zn de Longlaai, Est-Kalimantan (Bornéo, Indonésie). *1 vol., 482 p., nombreuses fig., 9 pl. coul. h.t.* (1993). - 500 FF.
- N° 228 — R. HEBERT — Evolution tectonométamorphique d'un arc insulaire au Protérozoïque supérieur : le domaine de Saint-Brieuc (Massif armoricain). *1 vol.* (1994). - 350 FF.
- N° 229 — Géologie profonde de la France. Programme national soutenu par le ministère de la Recherche et de la Technologie. Forages scientifiques de l'Ardèche. Les interactions fluides-roches sur une paléomarge distensive. Forage Morte Mérie 1. Rapport d'exécution et données préliminaires. *1 vol., 156 p., 47 fig., 15 tabl.* (1993). - 420 FF.
- N° 230 — P. AMBERT — Symposium international "Géothermie 94 en Europe. De la recherche à l'exploitation". Orléans, France 8-9 février 1994. International symposium "Geothermics 94 in Europe. From research to development". Orléans, France, 8-9 february 1994. *1 vol., 516 p., 63 communications.* (1994). - 400 FF.
- N° 231 — L'évolution géomorphologique du Languedoc central depuis le Néogène (Grands Causses méridionaux - Piémont languedocien). *1 vol., 210 p., 137 fig., 3 cartes h.t.* (1994). - 450 FF.
- N° 232 — M. AZAROUAL — Modélisation des interactions solutions hydrothermales-granite. Application au futur échangeur géothermique de type roches chaudes sèches de Soultz-sous-Forêts, Alsace (France). *1 vol., 233 p., 73 fig., 25 tabl.* (1994). - 400 FF.

- N° 233 — H. VIVIAN, J.C. THOURET, J.C. BOCQUET, J.P. DEDIEU, D. FABRE, A. THOMAS — **Les instabilités d'un bassin-versant montagnard anthropisé . Le torrent de l'Eglise . Les Arcs . Savoie.** 192p., 44 fig., 27 tabl., 12 cartes, 6 cartes en annexe (à paraître)
- N° 234 — J.M. LEISTEL, D. BONIJOLY, C. BRAUX, Ph. FREYSSINET, A. KOSAKEVITCH, X. LECA, J.L. LESCUYER, E. MARCOUX, J.P. MILÉSI, P. PIANTONE, F. SOBOL, M. TEGYEY, D. THIÉBLEMONT, L. VIALLEFOND.— **The massive sulphide deposits of the South Iberian pyrite province : geological setting and exploration criteria.** 1 vol., 236 p., 48 fig., 24 tabl. (1994) . - 450 FF.
- N° 235 — S. CLAUSER — **Etudes stratigraphiques du Campanien et du Maastrichtien de l'Europe occidentale. Côte basque, Charentes (France), Limbourg (Pays-Bas),** 1 vol., 266 p., 108 fig., 6 tabl. (1994).- 400 FF.
- N° 236 — A. DAVID — **Influence des paramètres hydroclimatologiques sur les déplacements verticaux du radon-222 en zone non-saturée.** 1 vol., 199 p., 111 fig., 3 annexes (1995). - 500 FF.
- N° 237 — **Atelier sur les ressources minérales et le développement durable. Elincourt Sainte-Marguerite (France) (5-7 mai 1994). Résumés et documents de base.** 167 p. **Mineral resources and sustainable development : a workshop. Elincourt Sainte-Marguerite (France) 5-7 may 1994. Abstracts and background documents.** 156 p. (1994) - 400 FF.
- N° 238 — J. JEHLICKA — **Etude structurale de matières organiques soumises à des processus métamorphiques.** 1 vol., 240 p., 38 fig., 23 tabl., 10 pl. photo (1994). - 480 FF.
- N° 239 — Ph. ALVAREZ — **Les facteurs de contrôle de la sédimentation du supergroupe ouest-congolien (Sud-Congo). Rampe carbonatée et activité biologique au Protérozoïque supérieur.** 1 vol., 235 p., 56 fig., 18 pl. photo (1995). - 500 FF.
- N° 240 — D. LAHONDÈRE — **Les schistes bleus et les éclogites à lawsonite des unités continentales et océaniques de la Corse alpine. Nouvelles données pétrologiques et structurales.** 1 vol., 285 p., 117 fig., 29 tabl., 6 pl. photo (1996) (à paraître)
- N° 241 — C. ROTH — **Contribution de la géostatistique à la résolution du problème inverse en hydrogéologie.** 1 vol., 195 p., 81 fig. (1995). - 500 FF.
- N° 242 — F. GUÉRIN — **Production et mécanismes de migration du radon-222 dans les milieux fissurés : application à la recherche des discontinuités perméables du socle cristallin.** 1 vol., 282 p., 141 fig., 130 tabl. (1995). - 600 FF.
- N° 243 — **Colloque international Minéralogie fondamentale et appliquée à la mémoire de Claude GUILLEMIN, 1923-1994. Résumés des communications.** Institut de France 4 et 5 septembre 1995. 1 vol., 117 p. (1995). - 80 FF.
- N° 244 — **Workshop on Albanian ophiolites and related mineralization. IUGS/UNESCO modeling programme. 10-17 October 1995. Papers and abstracts. Field guidebook.** 1 vol., 191 p., 41 fig., 25 tabl. (1995). - 400 FF.
- N° 245 — D. DESSANDIER — **Etude du milieu poreux et des propriétés de transfert des fluides du tuffeau blanc de Touraine. Application à la durabilité des pierres en œuvre.** 1 vol., 279 p., 97 fig., 53 tabl. (1995). - 600 FF.
- N° 246 — G. OUILLOU — **Application de l'analyse multifractale et de la transformée en ondelettes anisotropes à la caractérisation géométrique multi-échelle des réseaux de failles et de fractures.** 1 vol., 313 p., 129 fig. (1995). - 650 FF.
- N° 247 — **Colloque GéoFrance 3D. Connaissance des structures et des processus géologiques du sous-sol de la France : vers un observatoire 3D de la croûte continentale. Synthèse des groupes thématiques.** 1 vol., 88 p., 23 fig. (1995). - 200 FF.
- N° 248 — **Colloque Formations superficielles et géomorphologie.** Rouen 19-20 mars 1996. 1 vol., 99 p., 14 fig. (1996). - 250 FF.
- N° 249 — F.G. BOURROUILH-LE JAN — **Plates-formes carbonatées et atolls du Centre et Sud Pacifique. Stratigraphie, sédimentologie, minéralogie et géochimie. Diagenèses et émersion : aragonite, calcite, dolomite, bauxite et phosphate.** 1 vol., 365 p., 215 fig. (1996). - 600 FF.
- N° 250 — F. LÉONE — **Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain.** 1 vol., 286 p., 65 fig., 34 tabl., 17 annexes (1996). - 600 FF.
- N° 251 — C. DEZAYES — **Caractérisation et interprétation d'un volume rocheux fracturé à partir de données de forages. Les forages géothermiques de Soultz-sous-Forêts.** 1 vol., 222 p., 117 fig., 6 fig. (1996). -500 FF.
- N° 252 — C. CARNEC — **Interférométrie SAR différentielle. Application à la détection et au suivi de mouvements de terrain.** 1 vol., 173 p., 77 fig. (1996). -400 FF.
- N° 253 — A. GUTIEREZ — **Evaluation des ressources en eau souterraine de l'île de Malte.** 1 vol., 250 p., 174 fig., 65 tabl. (1996).- 600 FF
- N° 254 — S. EL MAGNOUNI — **Méthodologie d'aide à la décision pour l'évaluation et la gestion multicritère des ressources en eau souterraine.** 1 vol., 178 p., 56 fig. (1996).-400FF
- N° 255 — M. CALVET— **Morphogenèse d'une montagne méditerranéenne : les Pyrénées orientales.** 3 vol., 1177p., 111 pl. photo n. et bl (1996).-900FF
- N° 256 — **Colloque contribution des eaux souterraines au fonctionnement des hydrosystèmes, conséquences pour la gestion,** 1 vol., 134 p. (1996). -350 FF
- N° 257 — M. CHABART — **La recharge de l'aquifère multicouche du Roussillon et les conséquences d'un éventuel changement climatique sur la gestion de la ressource en eau (Pyrénées-Orientales).** 1 vol., 160 p., 132 fig., 59 tabl. (1996).-650 FF
- N° 258 — F. CHEVRON — **Dénitrification biologique d'une nappe phréatique polluée par des composés azotés d'origine industrielle.** 1 vol., 216 p., 46 fig., 17 tabl., 3 pl. photo (1996).-500 FF

- N° 259 — Y MARCHAND — **Cartographies sédimentologiques et morphologiques par télédétection de la baie du Mont Saint-Michel (Ouest de la France)** 1 vol., 236 p., 70 fig., 21 tabl. (1997).
- N° 260 — P. ANDREIEFF — **Note d'orientation pour l'établissement de la carte géologique de France à 1/50000.** (1997) (sous presse)
- N° 261 — A. COMPANY-REMOND — **Images SAR : Possibilités d'extraction d'un paramètre physique du ruissellement, la rugosité (Modélisation et expérimentation)** 1 vol., (1997) (sous presse).
- N° 267 - M.-P. DABARD.- **Les formations à cherts carbonés (phtanites) de la chaîne cadomienne : genèse et signification géodynamique. Exemple du segment armoricain.** 1 vol., 248 p., 83 p., 34 tabl. (1997). - 350 FF.
- N° 268 - B. MARSAUD - **Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux.** 1 vol., 301 p. (1997). - 450 FF.
- N° 269 - C. MOREAU-KERVEVAN - **Adsorption et désorption de l'atrazine, le dééthylatrazine et l'hydroxyatrazine, au contact de sols, de solides d'aquifère et de constituants isolés des sols.** 1 vol., 184 p., 45 fig., 5 tabl. (1997). - 300 FF.
- N° 270 - F. MALAYA-MIKOLO - **Chronologie des événements sédimentaires, magmatiques et tectono-métamorphiques du Précambrien d'Afrique centrale occidentale (Gabon) : tectogenèse Ogooué et héritage archéen.** 1 vol., 185 p., 37 fig., 21 tabl., 3 pl. photo (1997). 250 FF.
- N° 271 - **Mise en œuvre de matériaux rapportés destinés au confinement des centres de stockage. Guide technique.** 1 vol., 241 p., 14 fig., 22 tabl., 8 ann. (1997). - 250 FF.
- N° 272 - **Gestion et traitement des sites pollués. Scénarii de référence "sous-sol" pour la France métropolitaine (catalogue des différents contextes hydrogéologiques susceptibles d'être rencontrés).** 1 vol., 33 p., 1 fig., 3 tabl., 1 ann. (1997). - 150 FF.
- N° 273 - **Conception d'un réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines au droit d'un centre de stockage de déchets, ultimes ou non. Guide méthodologique.** 1 vol., 101 p., 23 fig., 9 tabl., 1 ann. (1997). - 200 FF.
- N° 274 - **Colloque Modélisation du sous-sol. 3-4 février 1997. BRGM-ENSMP-INRIA.** 1 vol., 142 p. (1997). - 250 FF.
- N° 275 - **Colloque La protection régionale des eaux souterraines. 4e journée technique du Comité national français de l'AIH.** 1 vol., 101 p., 9 fig., 3 tabl. (1997) - 250 FF.
- N° 276 - S. DOUMBIA - **Géochimie, géochronologie et géologie structurale des formations birimiennes de Katiola-Marabadiassa (Centre-Nord de la Côte-d'Ivoire). Evolution magmatique et contexte géodynamique du Paléoprotérozoïque.** 1 vol., 253 p., 68 fig., 3 annexes (1998). - 510 FF.
- N° 277 - E. POLI - **Stratigraphie séquentielle haute-résolution, modèles de dépôt et géométrie 2D-3D des séquences triasiques de la marge téthysienne ardéchoise.** 1 vol., 355 p. (1998). - 650 FF.
- N° 278 - F. MAROT - **Caractérisation et traitement de sédiments de dragage contenant des polluants métalliques.** 1 vol., 330 p., 45 fig., 44 tabl., 54 annexes (1998). - 450 FF.
- N° 279 - J.L. BLÈS, M. BOUR, P. DOMINIQUE *et al.* - **Zonage sismique de la France métropolitaine pour l'application des règles parasismiques aux installations classées.** 1 vol., 56 p., 8 fig., 4 tabl. (1998). - 350 FF.
- N° 280 - P. FREYSSINET, P. PIANTONE, M. AZAROUAL *et al.* - **Evolution chimique et minéralogique des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères au cours de la maturation.** 1 vol., 146 p., 45 fig., 19 tabl., 16 photos (1998). - 380 FF.
- N° 281 - **Actes du XXVIIe congrès du Groupe français pesticides. BRGM Orléans 21-22 mai 1997.** 1 vol., 475 p., nombreuses illustrations (1998). - 450 FF.
- N° 282 - J. MARGAT - **Les eaux souterraines dans le Bassin méditerranéen. Ressources et utilisations.** 1 vol., 110 p., 44 fig., 11 tabl. (1998). - 350 FF.
- N° 283 - L. MERCURY - **Equilibres minéraux - solutions en milieu non saturé des sols. Thermodynamique de l'eau capillaire et modélisation physico-chimique.** 1 vol., 319 p. y compris annexes, 76 fig., 34 tabl. (1998). - 450 FF.

Afin d'améliorer l'accès à l'information, les Éditions BRGM mettent à la disposition du public, certains documents notés comme (ÉPUISE) dans la liste ci-dessus.

Ces reproductions n'étant faites qu'au fur et à mesure des demandes, veuillez nous consulter pour devis.





## BON DE COMMANDE

à présenter à votre librairie habituelle ou à défaut

à retourner à : **ÉDITIONS DU BRGM** - B.P. 6009 - 45060 ORLÉANS Cedex 2 - FRANCE

Nom ou Organisme: \_\_\_\_\_

Adresse: \_\_\_\_\_

- Veuillez me faire parvenir dès parution les Documents du BRGM  
Je réglerai ceux-ci à réception de la facture
- Veuillez me faire parvenir le(s) Document(s) suivant(s):

| VOTRE MODE DE PAIEMENT AU CHOIX   |  |           |
|---|--|-----------|
| <input type="checkbox"/> Chèque postal<br><input type="checkbox"/> Chèque bancaire                        | Avec votre carte de paiement                   | SIGNATURE |
| Carte bancaire  | (N'oubliez pas d'inscrire son n° et de signer) |           |
| <input type="checkbox"/> Visa<br><input type="checkbox"/> Eurocard<br><input type="checkbox"/> Mastercard | Date d'expiration de votre carte bancaire      |           |

|                                | Nombre<br>exemplaire | Prix<br>unitaire | TOTAL |
|--------------------------------|----------------------|------------------|-------|
| N°-----                        | -----                | -----            | ----- |
| N°-----                        | -----                | -----            | ----- |
| N°-----                        | -----                | -----            | ----- |
| N°-----                        | -----                | -----            | ----- |
| N°-----                        | -----                | -----            | ----- |
| N°-----                        | -----                | -----            | ----- |
| Total                          |                      |                  | ----- |
| * Frais de port et d'emballage |                      |                  | ----- |
| Montant total                  |                      |                  | ----- |

\* 50 F pour la France ou 75 F pour l'étranger



Impression et façonnage

**BRGM Service reprographie**

Dépôt légal : mars 1999

Une approche pluri-disciplinaire sur la carte géologique à 1/50 000 de Saint-André-de-Valborgne permet de replacer les Cévennes centrales au sein de la chaîne varisque d'Europe occidentale. Ce secteur est constitué de séries présumées paléozoïques affectées par la déformation varisque. L'analyse structurale et microstructurale permet la caractérisation de zones de cisaillement dans les séries schisteuses. Le mécanisme de déformation dominant dans ces zones, où les exsudats de quartz sont très abondants, est la dissolution-cristallisation. Ces zones de cisaillement définissent une structuration des Cévennes en duplex à vergence S à SE. En tenant compte de cette géométrie, un nouveau log stratigraphique est proposé. L'étude thermo-barométrique sur les paragenèses minérales et des inclusions fluides indique que la déformation est contemporaine d'un métamorphisme sous des conditions de  $\pm 500$  °C et  $4,3 \pm 0,4$  Kb, daté dans la littérature, entre 340 et 330 Ma. Ces chevauchements sont associés aux processus d'épaississement crustal de la chaîne varisque. Après les chevauchements, les inclusions fluides enregistrent une chute de pression et de température correspondant à l'exhumation des nappes. L'orientation des plans d'inclusions fluides suggère que cette exhumation s'effectue en contexte tectonique régional en extension. Par la suite, les Cévennes sont affectées par une extension contemporaine d'intrusions de granodiorites entre 330 et 290 Ma, d'une déformation fragile entre 300 et 280 Ma et de la formation du bassin sédimentaire d'Alès à cette même période. La direction de cette extension varie dans le temps de ENE-WSW à NNE-SSW. L'ensemble du scénario proposé s'intègre dans le modèle d'évolution de la branche Sud de la chaîne varisque d'Europe occidentale. D'après les modélisations analogiques d'une lithosphère en extension, nous proposons que les Cévennes constituent un secteur affecté de manière fragile en horsts et grabens, au sein duquel les structures compressives sont conservées.

A multidisciplinary approach to the 1:50,000-scale geological map of Saint-André-de-Valborgne has made it possible to situate the Central Cevennes within the Variscan belt of Western Europe. The area is underlain by Variscan-deformed rocks of presumed Paleozoic age where structural and microstructural analysis has characterized shear zones in the schistose series. Abundant quartz segregations in these zones indicate that the dominant mechanism of deformation was dissolution-crystallization. The shear zones define a S- to SE-verging duplex structure for the Cevennes, and a new stratigraphic log is proposed that takes this geometry into consideration. Thermo-barometric study of the mineral parageneses and fluid inclusions indicates that the deformation was contemporaneous with a metamorphism that took place under T-P conditions of 500°C and  $4.3 \pm 0.4$  kb, and which is dated in the literature at between 340 and 330 Ma. The thrusts were associated with crustal thickening of the Variscan belt. The fluid inclusions also register a post-thrusting fall in pressure and temperature corresponding to exhumation of the nappes; the orientation of the fluid-inclusion planes suggests that this exhumation occurred under a regional extensional tectonic regime. The Cevennes were then affected by further extension contemporaneous with a) the intrusion of granodiorites between 330 and 290 Ma, b) brittle deformation between 300 and 280 Ma, and c) the opening of the Alès sedimentary basin during the same period; the direction of this extension varied with time from ENE-WSW to NNE-SSW. The whole of the proposed scenario can be integrated into the evolution model of the southern branch of the Variscan belt of Western Europe. Based on the analogue modelling of a lithosphere under extension, we consider that the Cevennes area underwent brittle deformation with the formation of horsts and grabens that have preserved the compressive structures.

**Éditions BRGM**

3, avenue Claude Guillemin, B.P. 6009  
45060 Orléans cedex 2, France

ISBN 2-7159-0883-0