UNIVERSITÉ DE LORRAINE

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

01 INPL 04

Ecole Nationale Supérieure de Géologie

Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques

Thèse

pour obtenir le grade de

DOCTEUR

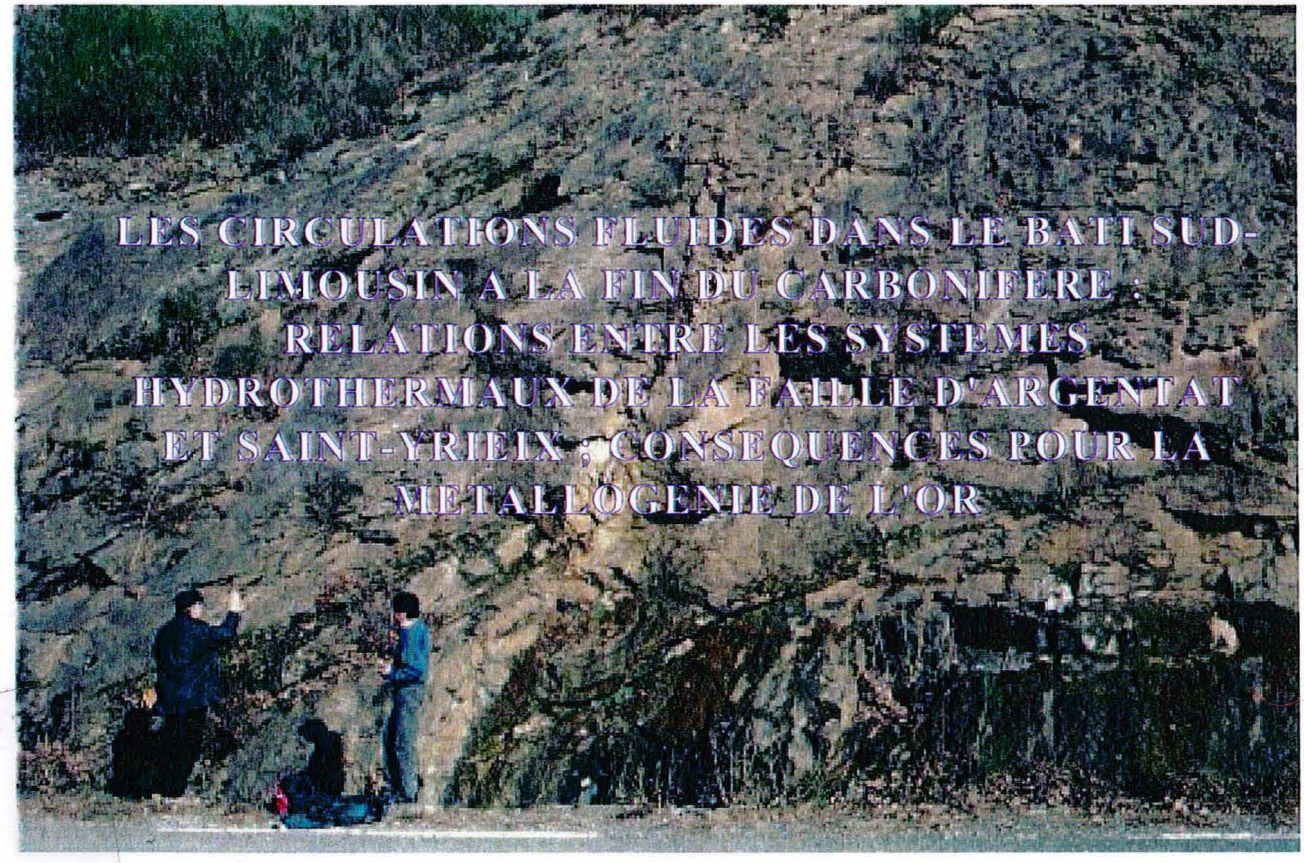
de L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Option : **GEOSCIENCES**

présentée et soutenue publiquement le 5 Juillet 2001

Par

Mustapha SOUHASSOU



JURY

Président

Marc LESPINASSE, Professeur, UMR-G2R, Nancy

Rapporteurs

Anne-Marie BOULLIER, Directeur de recherches, LGIT-CNRS, Grenoble

conférences, USTL, Lille

eur BRGM, Orléans

D 136 026935 3

Directeurs de thèse

Christian MARIGNAC, Professeur, ENM-CRPG, Nancy

Michel CATHELINEAU, Directeur de recherches, CREGU-G2R, Nancy

Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques - Centre National de la Recherche Scientifique (CRPG-CNRS)
BP 20, 54501 Vandoeuvre-lès-Nancy cedex, France Tel: (33) 83 59 42 00 Fax: (33) 83 51 17 98

01 INPLOR 0110

Ecole Nationale Supérieure de Géologie

Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques

Thèse

pour obtenir le grade de

DOCTEUR (TH) 2001 SOUHASSOU, M.

de L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Option : **GEOSCIENCES**

présentée et soutenue publiquement le 5 Juillet 2001

Par

Mustapha SOUHASSOU

LES CIRCULATIONS FLUIDES DANS LE BATI SUD-LIMOUSIN A LA FIN DU CARBONIFERE : RELATIONS ENTRE LES SYSTEMES HYDROTHERMAUX DE LA FAILLE D'ARGENTAT ET SAINT-YRIEIX ; CONSEQUENCES POUR LA METALLOGENIE DE L'OR

Service Commun de la Documentation
INPL
Nancy-Brabois

JURY

Président

Marc LESPINASSE, Professeur, UMR-G2R, Nancy

Rapporteurs

Anne-Marie BOULLIER, Directeur de recherches, LGIT-CNRS, Grenoble

Michel DUBOIS, Maître de conférences, USTL, Lille

Examinateur

Vincent BOUCHOT, Ingénieur BRGM, Orléans

Directeurs de thèse

Christian MARIGNAC, Professeur, ENM-CRPG, Nancy

Michel CATHELINEAU, Directeur de recherches, CREGU-G2R, Nancy

Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques - Centre National de la Recherche Scientifique (CRPG-CNRS)
BP 20, 54501 Vandoeuvre-lès-Nancy cedex, France Tel: (33) 83 59 42 00 Fax: (33) 83 51 17 98

A la mémoire de ma mère

SFIA H'MED

qui nous a quitté quelques mois avant le terme de ce travail

Remerciements

Ce travail a bénéficié de soutien d'un bon nombre de personnes que je tiens à remercier pour toute l'aide et l'attention qu'ils m'ont accordé.

Merci à MM Ch. Marignac et M. Cathelineau de m'avoir fait confiance et tout au long du parcours (mille excuse Christian d'avoir un peu trop tirer sur la mécanique ces derniers temps).

Je tiens à remercier Mme A. M. Boullier et MM. M. Dubois, V. Bouchot, M. Lespinasse d'avoir accepter de juger ce travail.

Durant ce travail, j'ai eu accès aux différents moyens techniques du CRPG et du CREGU-G2R, et je tiens à remercier leurs responsables respectifs.

Que soit remercié M. C. Boiron et T. Lhomme pour les analyses Raman et le calcul des isochores, V. Bouchot et J. Y. Roig de nous avoir montré des sites clé et guidé le long de la faille d'Argentat.

Un merci particulier au personnel du service général et secrétariat qui, comme bien de fois, n'ont pas hésiter à me venir en aide. Merci Manu, de sacrifier une demi-journée d'un week-end bien ensoleillé pour m'aider à tirer cet exemplaire, merci encore une fois.

La liste est longue mais l'aide aussi, merci Valérie et Mme Siatka, pour l'efficacité (pour secouer quelques services de l'INPL).

Je tiens remercier le personnel du CRPG, ITA (Caroline F, Chantal L, Izabelle G, Jacques M,...), chercheurs (J. M. Stussi, D. Guasquet, A. Cheilletz, G. Giuliani,...) et étudiants partis (Nathalie, Sylvie, Derege, Yannick, Jocelyn,...) et présents (tous ,en particulier, les compagnons des longues soirées au CRPG et chez Mourad : Gilles, "Le polak", Laure, Hibti, Jérôme, Alice, Baha, Claire). Merci Baha pour les bons Tagine et Couscous.

Ce travail n'aurait pas vu le jour sans l'aide précieuse de ma famille, qui a toujours été à mes côtés, merci pour son aide morale et financière, surtout mon frère, Mohamed, qui a assumé la charge, très difficile, d'être le grand frère et de devoir assumer, à la fois, le rôle de papa de maman et du frère, merci encore une fois frangin, ça n'a pas été facile.

A ma défunte mère, qui a voulu que j'aille toujours plus loin, et qui nous a quitté sans prévenir ni voir le fruit de ce qu'elle a semé.

"Imma, Hayam ayn iyoumzen aligue ourn dikh akm aaloukh, samhiyi cha ourth dmikh".

Résumé

L'étude des circulations fluides dans le bâti Sud limousin a été entreprise pour mieux comprendre la métallogénie de l'or dans le Sud Limousin. Il s'agit en particulier de tester l'hypothèse d'une relation de cause à effet entre les circulations liées à la faille d'Argentat et les minéralisations du district de St-Yrieix (Roig *et al.*, 1997). Dans ce but, une étude d'inclusions fluides a été menée dans deux secteurs : le secteur de St-Yrieix, d'une part, pour y comparer les circulations fluides régionales avec celles, bien connues, des failles aurifères ; le secteur d'Argentat, d'autre part, où rien n'est encore connu. L'étude a été conduite en combinant l'analyse microstructurale (distribution dans l'espace et dans le temps, des microfissures qui drainent les fluides), la microthermométrie des inclusions fluides et la microspectrométrie Raman pour l'analyse des phases volatiles.
Les principaux résultats de cette étude sont :

- Dans le secteur de St-Yrieix, on trouve, à l'échelle régionale, les mêmes fluides, circulant dans les mêmes systèmes de drains et avec la même histoire que dans les gisements d'or (Lauriéras et Cheni) : une première génération de fluides aquo-carboniques ($CO_2 >> CH_4 > N_2$) "pseudo-métamorphiques" et circulant dans un régime de décompression lente depuis une profondeur de 10-15km, à des températures de 450-400°C, et finissant par une "crise distensive" autour de 5-6km (transition litho-hydro-statique) avec invasion "météorique" et refroidissement (350-300°C), une deuxième génération de fluides chauds ($\geq$ 400°C) et salés ($\geq$ 15%pds éq. NaCl) également d'origine profonde, et témoignant d'une recharge thermique du système, se mélangeant avec des eaux météoriques froides, provoquant le dépôt de l'or dans les zones minéralisées ;

- Dans le secteur d'Argentat, les drains microfissuraux résultent de l'alternance (complexe) de (micro)-épisodes en compression et d'épisodes en extension ; les mêmes fluides que dans le secteur de St-Yrieix y sont reconnus, circulant dans les mêmes régimes P-T, mais avec deux grandes différences : (i) les circulations sont beaucoup moins pervasives ; (ii) les fluides de la deuxième génération montrent une inversion de température : les fluides salés sont froids (< 200°C) et les eaux "météoriques" sont chaudes (300°C).

Au total, la comparaison des résultats dans les deux secteurs conduit à infirmer l'hypothèse de départ, en inversant le sens des circulations régionales : la faille d'Argentat aurait été alimentée en fluides profonds (notamment au stade de dépôt de l'or) par une source que l'on peut envisager de situer dans la croûte moyenne, sous le district de St-Yrieix, et qui serait liée à la mise en place, autour de 305 Ma, d'un batholite granitique comparable à celui du Velay dans les Cévennes.

This work addresses the question of the relationship between gold deposition and fluid circulation at the crustal scale in the S Limousin area (French Massif Central). Precisely, we investigate the possibility that fluid channelling along the Argentat fault zone was the ultimate source for mineralising fluids in the St-Yrieix gold district (Roig *et al.*, 1997).
For this purpose, a fluid inclusion study was done in both the St-Yrieix district and the Argentat domain. In the St-Yrieix district, the aim was to investigate regional fluids and to compare with the well-known fluids from the gold-quartz lodes. At Argentat no previous fluid study had been performed. The study combined the investigation of microstructural patterns (i. e., the space-time distribution of microcracks, as potential fluid drains), the microthermometric study of fluid inclusions and the determination of the composition of the volatile phase by Raman microspectrometry. The main results are :

- In the St-Yrieix district, there is evidence that the regional fluids were the same, and circulated under the same conditions, as within the gold mineralized shear-zones (Lauriéras, Cheni). There was a first episode of deep "pseudo-metamorphic" fluids of the C-O-H-N-NaCl system ($CO_2 >> CH_4 > N_2$) percolating while the S Limousin was undergoing a slow uplift, from a depth of at least 10-15 km, at temperatures of 450-400°C. Eventually, due to the inception of extensional tectonics at a depth of c. 5-6 km, the pressure dropped down to the hydrostatic conditions, and cold meteoric water invaded the hydrothermal system, that cooled down to 350-300°C. Thereafter, a second episode was characterised by the circulation of deep, hot ($\geq$ 400°C), saline ($\geq$ 15 wt. %. eq. NaCl) waters, testifying for new heat input in the hydrothermal system. These fluids were mixed with cold meteoric water (< 200°C), at the origin of the gold deposition in the main drains.

- At Argentat, the microcracks that channelled the fluid circulation resulted from a complicated alternation of compressive and distensive tectonic events. The fluids were basically the same as in the St-Yrieix district, and the P-T-t evolution was quite similar. However, two important differences are evident : (i) fluid circulation was far less pervasive in the Argentat hydrothermal system; (ii) there is a significant thermal inversion when the fluids of the second episode are considered : here, the deep saline fluid is cold (< 200°C), whereas the meteoric water is hot (c. 300°C).

Comparing our results in the two domains, we come to the conclusion that indeed the Argentat and St-Yrieix hydrothermal systems were interconnected, but that it is very likely that deep fluids were focused from the St-Yrieix system toward the Argentat system, particularly during the second (mineralising) episode of regional fluid circulation. We speculate that the ultimate origin of these fluids could be found in the emplacement at c. 305 Ma of a huge granite intrusion in the middle crust.

Sommaire

Résumé ..... *I*
Abstract ..... *II*
Sommaire ..... *III*
Liste des figures ..... *IX*
Liste des tableaux ..... *XII*

CHAPITRE I — Introduction générale

I- CARACTÈRES GÉNÉRAUX DE LA CHAÎNE VARISQUE (FIG.I-1) 3
I. 1- INTRODUCTION 3
I. 2- PÉRIODES OROGÉNIQUES VARISQUES 3
I. 3- EVÉNEMENTS AURIFÈRES VARISQUES 4
I. 3. 1- LA PÉRIODE ÉOVARISQUE 4
I. 3. 2- La période mésovarisque 4
I. 3. 3- La période néovarisque 4
II- UNITÉS LITHOTECTONIQUES DU MASSIF CENTRAL **(FIG. I-2)** 6
II. 1- UNITÉS ÉPIZONALES SUPÉRIEURES 6
II. 2- UNITÉ SUPÉRIEURE DES GNEISS (U.S.G.) 6
II. 3- UNITÉ INFÉRIEURE DES GNEISS (U.I.G.) 7
II. 4- UNITÉ DU PARA-AUTOCHTONE (U.P.A.) 7
II. 5- UNITÉ MÉRIDIONALE PALÉOZOÏQUE 7
III- GRANDES STRUCTURES DU SUD LIMOUSIN 9
IV- PROBLÉMATIQUE DE L'OR DANS LE BAS-LIMOUSIN 9
IV. 1- LE DISTRICT DE ST-YRIEIX 9
IV. 2- L'OR ET LES CIRCULATIONS RÉGIONALES DE FLUIDES 12
IV. 3- OBJECTIFS DE CE TRAVAIL 12

CHAPITRE II — St-Yrieix : Pétrographie & microstructures

I- INTRODUCTION 17
II- ECHANTILLONNAGE ET DESCRIPTION 17
II. 1- NE DU BOURNEIX 17
II. 1. 1-La vallée de l'Isle 17
II. 1. 2-Moulin du Chalard 19
II. 1. 3-Le Moulin du Bétour 19
II. 1. 4-Point coté 319 20
II. 2- SW DU BOURNEIX 20
II. 2. 1-La carrière de Jumilhac 20
II. 2. 2-Le Cros 20
II. 3- SAINT YRIEIX 20
III- ANALYSE MICROSTRUCTURALE 21
III. 1- PRINCIPE DE L'ANALYSEUR D'IMAGE 21
III. 1 .1- Description 21
III. 1 .2- Principe de la mesure 22
III. 1 .3- Principe des PIF 23
III. 2- DONNÉES MICROSTRUCTURALES 24
III. 2. 1- Analyse microstructurale dans les gneiss et les micaschistes 24
III. 2. 1. 1- Description 24
III. 2. 1. 1. 1-Vallée de l'Isle *24*
III. 2. 1. 1. 2- Moulin du Chalard *27*

*III. 2. 1. 1. 3- **Point coté 319** (CFM40)* *28*
*III. 2. 1. 1. 4- **Le Cros*** *28*
*III. 2. 1. 1. 5- **Carrière Lama** (CFM48 : quartz de "pull apart")* *29*
III. 2. 1. 2- Synthèse (Fig. II-8) 30
III. 2. 2- Analyse microstructurale dans les pegmatites 31
III. 2. 2. 1- Description 31
III. 2. 2. 1. 1- La vallée de l'Isle *31*
*III. 2. 2. 1. 2- **Moulin du Chalard** (CFM33)* *32*
III. 2. 2. 1. 3- Carrière de Jumilhac (CFM43) *32*
III. 2. 2. 2- Synthèse 33
III. 2. 3- Analyse microstructurale dans les granites 34
III. 2. 3. 1- Description 34
III. 2. 3. 1. 1- La vallée de l'Isle (CFM28) *34*
III. 2. 3. 1. 2- Le moulin du Bétour (CFM37) *35*
III. 2. 3. 2- Synthèse (Fig. II-13) 36
III. 3- CONCLUSION 37

CHAPITRE III — Les fluides dans le domaine de St-Yrieix

I- MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE DES INCLUSIONS FLUIDES 43
I. 1- LA MICROTHERMOMÉTRIE 43
I. 1. 1- PRINCIPE DE LA MICROTHERMOMÉTRIE 43
I. 1. 2- Les températures mesurées 44
I. 1. 3- Appareillage 45
I. 1. 4- La typologie des inclusions fluides 46
I. 1. 5- Le calcul des isochores 46
I. 2- LA MICROSPECTROMÉTRIE RAMAN 47
I. 3- LASER INDUCTED BREAKDOWN SPECTROSCOPY (LIBS, FIG. III-1) 48
II- ETUDE MICROTHÉRMOMÉTRIQUE 50
II. 1- PIF À N50-70°E 50
II. 1. 1- La typologie des inclusions fluides 50
II. 1. 2- Les inclusions aquo-carboniques 51
II. 1. 2. 1- Les températures de fusion 51
II. 1. 2. 2- La température d'homogénéisation 51
II. 1. 3- Les données Raman 51
II. 1. 4- Les inclusions aqueuses 52
II. 1. 4. 1- La température de fusion de la glace 52
II. 1. 4. 1. 1- Les pegmatites *52*
II. 1. 4. 1. 2- Les lentilles de quartz *53*
II. 1. 4. 2- La température d'homogénéisation 53
II. 1. 4. 2. 1- Les pegmatites *53*
II. 1. 4. 2. 2- Les lentilles de quartz *54*
II. 2- PIF À N80-110°E 56
II. 2. 1- La typologie des inclusions fluides 56
II. 2. 2- Les inclusions aquo-carboniques (Lw-c) 56
II. 2. 3- Les données Raman 56
II. 2. 4- Les inclusions aqueuses (Lw) 57
II. 2. 4. 1- La température de fusion de la glace 57
II. 2. 4. 2- La température d'homogénéisation 57
II. 3- PIF À N110-130°E 59
II. 3. 1- La typologie des inclusions fluides 59
II. 3. 2- Les inclusions aquo-carboniques (Vw-c et Lw-c) 59
II. 3. 2. 1- Les températures de fusion 59
Les inclusions de type Lw-c : *59*
Les inclusions de type Vw-c : *60*

II. 3. 2. 2- La température d'homogénéisation 60
II. 3. 3- Les données Raman 61
II. 3. 4- Les inclusions aqueuses (Lw) 62
II. 3. 4. 1- La température de fusion de la glace 62
II. 3. 4. 2- La température d'homogénéisation 62
II. 4- PIF à N140-160°E 64
II. 4. 1- La typologie des inclusions fluides 64
II. 4. 2- Les inclusions aqueuses (Lw) 65
II. 4. 2. 1- La température de fusion de la glace 65
II. 4. 2. 2- La température d'homogénéisation 65
II. 5- PIF à N170-30°E 67
II. 5. 1- La typologie des inclusions fluides 67
II. 5. 2- Les inclusions aqueuses (Lw) 67
II. 5. 2. 1- La température de fusion de la glace 67
II. 5. 2. 2- La température d'homogénéisation 67
II. 6- SYNTHÈSE 69
II. 6. 1- Les inclusions aquo-carboniques (Vw-c et Lw-c) 69
II. 6. 2- Les inclusions aqueuses (Vw et Lw) 69
II. 6. 2. 1- La température de fusion de la glace 69
II. 6. 2. 2- La température d'homogénéisation 70
III- COMPOSITION DES FLUIDES 74
III. 1- LES INCLUSIONS AQUO-CARBONIQUES 74
III. 1. 1- La composition de la phase volatile : données du RAMAN 74
III. 1. 2- La composition globale 74
III. 1. 3- Laser Inducted Breakdown Spectroscopy (LIBS) 78
IV- INTERPRÉTATION 79
IV. 1- MISE EN ÉVIDENCE DE DEUX FAMILLES DE FLUIDES 79
IV. 1. 1- Analyse des diagrammes de corrélation Tfg-Th 79
IV. 1. 1. 1- Les fluides aquo-carboniques 79
IV. 1. 1. 2- Les fluides aqueux : analyse par direction de PIF 80
IV. 1. 2- Synthèse 83
IV. 2- SIGNIFICATION DU "TREND" T1 83
IV. 3- LES FLUIDES AQUO-CARBONIQUES ET LE "TREND" T2 86
IV. 3. 1- SM41 86
IV. 3. 2- Le reste 88
IV. 4- DISCUSSION 88
IV. 5- CONCLUSION 91

CHAPITRE IV — **Argentat : minéralogie & microstructures**

I- INTRODUCTION 95
II - LE SECTEUR NORD 95
II. 1- GIMEL CASCADE 95
II. 1. 1- La faille normale ductile 96
II. 1. 2- La faille normale "fragile" 96
II. 1. 3- Conclusion 98
II. 2- PUY-DES-ANGLES ET LE MAUPAS 100
II. 2. 1 - Site de Puy-des-Angles 100
II. 2. 1. 1- Les caractères généraux 100
II. 2. 1. 2- Etude microstructurale 100
II. 2. 1. 3- Etude minéralogique 104
II. 2. 1. 3. 1- Les micas 104
II. 2. 1. 3. 2- Les sulfures 105
II. 2. 1. 3. 3- Les monazites 105

II. 2. 2 - Site du Maupas 111
II. 2. 2. 1- Caractères généraux 111
II. 2. 2. 2- Etude microstructurale 111
II. 2. 2. 3- Etude minéralogique des sulfures 115
II. 2. 3- Conclusion 118
II. 3 - SITE AR109 (RN20): STRUCTURES E-W 120
II. 3. 1- Structures 120
II. 3. 2- Paragenèses 121
II. 3. 2. 1- L'échantillon SM36 121
II. 3. 2. 2- L'échantillon SM34 123
II. 3. 3- Etude minéralogique 123
II. 3. 3. 1- Les micas 123
II. 3. 3. 2- Les sulfures 126
II. 3. 3. 2. 1- L'échantillon SM36 ..... *126*
II. 3. 3. 2. 2- L'échantillon SM34 ..... *126*
II. 3. 3. 2. 3- Discussion *129*
II. 3. 4- Conclusion 130
III- LE SECTEUR CENTRE : ARGENTAT S. S. 131
III. 1- LE SITE AR116 131
III. 1. 1- Les structures 131
III. 1. 2- la succession paragénetique 133
III. 1. 3- L'étude minéralogique 137
III. 1. 3. 1- Les phengites *137*
III. 1. 3. 2- La pyrite *137*
III. 1. 3. 3- L'arsénopyrite *139*
III. 1. 3. 4- Les autres sulfures *139*
III. 2- PUY-DU-TOUR 142
III. 3- LE TINDEX (SM29-32) 143
IV- LE SECTEUR SUD : L'INDICE AURIFÈRE DE GRAND FRAUD 144
IV. 1- LA STRUCTURE FILONIENNE (FIG. IV-32) 144
IV. 1. 1- Extension Nord (Fig. IV-33) 144
IV. 1. 2- Clédy 144
IV. 1. 3 - Interprétation 149
IV. 2 - DÉFORMATION ET MINÉRALISATION DANS LE QUARTZ FILONIEN : ÉTUDE DE SM15 149
IV. 2. 1 - Étude détaillée de la fracturation 149
IV. 2. 1. 1 - Des joints stylolithiques 149
IV. 2. 1. 2 - Les veinules cicatrisées ("healed") 149
IV. 2. 1. 3 - Les veinules colmatées ("sealed") 150
IV. 2. 1. 4 - Synthèse microstructurale 154
IV. 2. 2 - Place de la pyrite et dc l'arsénopyrite 154
IV. 3 - INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES : STRUCTURES DANS L'ENCAISSANT PROCHE 156
IV. 4 - CONCLUSION 160
V- CONCLUSION 162
V. 1 - SYNTHÈSE DES DONNÉES MICROSTRUCTURALES 162
V. 2 - DISCUSSION 162
V. 2. 1 - Validité de la synthèse 162
V. 2. 2 - Signification 163
V. 2. 3 - Relation des minéralisations avec la déformation 164
V. 2. 4 - Age de ces événements 165
V. 2. 5 - Contraste N-S 165
V. 3 - CONCLUSION : COMPARAISON AVEC LE SECTEUR DE ST- YRIEIX 166
V. 3. 1 - Différences de l'intensité des circulation hydrothermales 166
V. 3. 2 - Interconnection des deux systèmes 166

INTRODUCTION 171
I- ETUDE MICROTHERMOMÉTRIQUE 171
I. 1- SECTEUR NORD 171
I. 1. 1- Gimel -Cascade 171
I. 1. 1. 1- La typologie des inclusions fluides 171
I. 1. 1. 2- Les inclusions aquo-carboniques 173
I. 1. 1. 2. 1- microthermométrie 173
I. 1. 1. 2. 2- Les données Raman 173
I. 1. 1. 3- Les inclusions aqueuses 175
I. 1. 1. 3. 1- Les températures de fusion de la glace 175
I. 1. 1. 3. 2- Les températures d'homogénéisation 176
I. 1. 2- Puy-des-Angles et le Maupas 178
I. 1. 2. 1- La typologie des inclusions fluides 178
I. 1. 2. 2- Les inclusions aquo-carboniques 178
I. 1. 2. 3- Les inclusions aqueuses 180
I. 1. 2. 3. 1- Les températures de fusion de la glace 180
I. 1. 2. 3. 2- Les températures d'homogénéisation 180
I. 1. 3- Micaschistes (SM60) 181
I. 1. 3. 1- Typologie des inclusions fluides 182
I. 1. 3. 2- Les inclusions aquo-carboniques 183
I. 1. 3. 2. 1- Microthermométrie 183
I. 1. 3. 2. 2- Les données Raman 183
I. 1. 3. 3- Les inclusions aqueuses 184
I. 1. 3. 3. 1- Les températures de fusion de la glace 184
I. 1. 3. 3. 2- Les températures d'homogénéisation 184
I. 1. 4- Transect II 186
I. 1. 4. 1- Description des échantillons 186
I. 1. 4. 1. 1- SM44 (leptynites de Tulle de l'UIG) 186
I. 1. 4. 1. 2- SM46 (Tonalite foliée) 187
I. 1. 4. 1. 3- SM48 (leptynites sodiques de l'UIG) 188
I. 1. 4. 2- Typologie des inclusions fluides 189
I. 1. 4. 3- Les inclusions aquo-carboniques 190
I. 1. 4. 3. 1- Les températures de fusion 190
I. 1. 4. 3. 2- Les température d'homogénéisation 190
I. 1. 4. 4- Les inclusions aqueuses 192
I. 1. 4. 4. 1- Les températures de fusion de la glace 192
I. 1. 4. 4. 2- Les température d'homogénéisation 192
I. 2- SECTEUR CENTRE : ARGENTAT S.S. 194
I. 2. 1- Typologie des inclusions fluides 194
I. 2. 2- Les inclusions aquo-carboniques (SM26) 195
I. 2. 2. 1- Microthermométrie 195
I. 2. 2. 2- La composition Raman 198
I. 2. 3- Les inclusions aqueuses 198
I. 2. 3. 1- Les températures de fusion de la glace 198
I. 2. 3. 2- Les températures d'homogénéisation 199
I. 3- SECTEUR SUD : LE TRANSECT DU GRAND FRAUD 201
I. 3. 1- Typologie 201
I. 3. 1. 1- SM19 (Pegmatite) 201
I. 3. 1. 2- SM17 (Lentille de quartz) 201
I. 3. 1. 3- SM21 (Le granite de Teyssieu) 202
I. 3. 2- Les températures de fusion de la glace 203
I. 3. 2. 1- SM19 (Pegmatite plissée) 203
I. 3. 2. 2- SM17 (Lentille de quartz) 204

I. 3. 2. 3- SM21 (Le granite de Teyssieu) 204
I. 3. 2. 4- Synthèse 204
I. 3. 3- Les températures d'homogénéisation 205
I. 3. 3. 1- SM19 (Pegmatite plissée) 205
I. 3. 3. 2- SM17 (Lentille de quartz) 205
I. 3. 3. 3- Le granite de Teyssieu (SM21) 206
I. 3. 3. 4- Synthèse 206
II- LA COMPOSITION DES FLUIDES 207
II. 1- LA COMPOSITION DE LA PHASE VOLATILE : RAMAN 207
II. 2- LA COMPOSITION TOTALE 209
III- INTERPRÉTATION 211
III. 1- LES FLUIDES AQUO-CARBONIQUES 211
III. 2- LES FLUIDES AQUEUX 217
IV- CONCLUSION 219

CHAPITRE VI Conclusion générale

I- COMPARAISON DES DOMAINES DE ST-YRIEIX ET D'ARGENTAT 223
I. 1- LES POINTS COMMUNS : NATURES DES FLUIDES ET ÉVOLUTION P-T-t 223
I. 2- LES DIFFÉRENCES : INTENSITÉ DU DRAINAGE 224
II- INTERCONNECTION DES SYSTÈMES DE ST-YRIEIX ET D'ARGENTAT 225
II. 1- RÉALITÉ DE L'INTERCONNECTION 225
II. 2- SENS DE L'INTERCONNECTION 226
II. 3- VERS UN MODÈLE RÉGIONAL DE CIRCULATION DES FLUIDES 227
III- SOURCE DES FLUIDES PROFONDS : UNE HYPOTHÈSE 230

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 233

CHAPITRE I Introduction générale

Fig. I-1. Carte schématique de la chaîne varisque de l'Europe 5
Fig. I-2. Carte des principales unités lithotectoniques dans le Massif Central français 8
Fig. I-3. Modèle géométrique 3D des plutons granitiques et de l'ensemble des structures aurifères du limousin méridional 10
Fig. I-4. Coupes géologiques dans la faille d'Argentat (A) et dans le district aurifère de St-Yrieix (B) à partir de l'interprétation des profils sismiques 11
Fig. I-5. Carte des anomalies As des sédiments de ruisseaux soulignant le paléochamps hydrothermal de la faille d'Argentat 13
Fig. I-6. Carte géologique simplifiée du Sud Limousin et localisation des différents secteur étudiés dans ce travail 14

CHAPITRE II St-Yrieix Pétrographie & microstructures

Fig. II-1 Carte d'échantillonnage dans le district de St-Yrieix 18
Fig. II-2 : Schéma de l'affleurement de la vallée de l'Isle 18
Fig. II-3 : Photographie montrant la déformation des 18
Fig. II-4 : Système d'incrustation vidéographique (Lapique *et al.*, 1988) 22
Fig. II-5 Photographies montrant des structures de remaniement tectonique dans la lentille de quartz CFM31 25
Fig. II-6- Stéréogrammes des isodensités des pôles de PIF dans les différentes lentilles de quartz des gneiss et micaschistes. 26
Fig. II-7 Photographie des joints de grains (a) avec des figures de décrépitation (b) dans le quartz (CFM48). 29
Fig. II-8: Stéréogramme des isodensités des pôles des PIF (A) et rosace des direction des PIF (B) dans l'ensemble des "rods" de quartz des gneiss et micaschistes. 30
Fig. II-9 - Stéréogrammes des isodensités des pôles de PIF dans les différents échantillons de pegmatites 31
Fig. II-10: Stéréogramme des isodensités des pôles de PIF (A) et rosace des direction de PIF (B) dans l'ensemble des pegmatites. 33
Fig. II-11 : Photographie d'une lame épaisse prise dans le granite de la vallée de l'Isle. 34
Fig. II-12 -Stéréogrammes des pôles de PIF dans les différents échantillons de granites 35
Fig. II-13 : Stéréogramme des isodensités des pôles de PIF (A) et rosace des direction de PIF (B) de l'ensemble des granites. 36
Fig. II-14: Statistique des PIF dans l'encaissant régional des structures du Bourneix 38
Fig. II-15: Tableau synthétique de la géométrie et la fréquence des plans d'inclusions fluides dans les différents types de matériaux dans le district aurifère de St- Yrieix 39

CHAPITRE III Les fluides dans le domaine de St-Yrieix

Fig. III-1 : schéma du dispositif de la spectrométrie LIBS (Fabre et al., 1999). 49
Fig. III-2: Histogramme des fréquences des Tfg pour les différents types d'inclusion fluide dans les PIF à N50-70°E 55
Fig. III-3 : Histogramme des fréquences des Th pour les différents types d'inclusion fluide dans les PIF à N50-70°E 55
Fig. III-4: Histogramme des fréquences des Tfg pour les PIFà N80-110°E 58
Fig. III-5: Histogramme des fréquences des Th pour les PIFà N80-110°E 58
Fig. III-6: Histogrammes des fréquences des $TfCO_2$ (A) et TfClath (B) pour les PIF à N110-130°E 60
Fig. III-7: Histogramme des fréquences des Tfg pour les PIFà N110-130°E 62
Fig. III-8: Histogramme des fréquences des Th pour les PIF à N110-130°E 63

Fig. III-9: Histogramme des fréquences des Tfg pour les PIF à N140-160°E 66
Fig. III-10: Histogramme des fréquences des Th pour les PIFà N140-160°E 66
Fig. III-11: Histogramme des fréquences des Tfg pour les PIFà N170-30°E 68
Fig. III-12: Histogramme des fréquences des Th pour les PIFà N170-30°E 68
Fig. III-13 Histogrammes des $TfCO_2$ pour l'ensemble des PIF 71
Fig. III-14 Histogrammes des TfClath pour l'ensemble des PIF 71
Fig. III-15 Histogramme des Tfg pour les inclusions aquo-carboniques dans les différentes directions de PIF 72
Fig. III-16 Histogramme des Th pour les inclusions aquo-carboniques dans les différentes directions de PIF 72
Fig. III-17 Histogramme des Tfg pour les inclusions aqueuses dans les différentes directions de PIF.... 73
Fig. III-18 Histogramme des Th pour les inclusions aqueuses dans les différentes directions de PIF..... 73
Fig. III-19. Diagramme ternaire CO_2-CH_4-N_2 de la composition des phases volatiles obtenue par microspectroscopie Raman 76
Fig. III-20: Diagramme ternaire H_2O-CO_2-(CH_4+N_2) et H_2O-Volatils-Salinité de la composition totale des inclusions fluides aquo-carboniques 77
Fig. III-21 Spectres d'ablation laser des inclusions aqueuses et aquo-carboniques dans différents échantillons(CFM31 ; CFM41 ; CFM29 et CFM40). 78
Fig. III-22: Diagramme Tfg-Th des inclusions aquo-carboniques dans l'ensemble des PIF 79
Fig. III-23: Diagramme Tfg-Th des inclusions dans l'ensemble des PIF à N80-110°E 80
Fig. III-24: Diagramme Tfg-Th des inclusions dans l'ensemble des PIF à N50-70°E 81
Fig. III-25: Diagramme Tfg-Th des inclusions dans l'ensemble des PIF à N110-130°E 82
Fig. III-26: Diagramme Tfg-Th des inclusions dans l'ensemble des PIF à N140-160°E 82
Fig. III-27: Diagramme Tfg-Th des inclusions dans l'ensemble des PIF à N170-30°E 83
Fig. III-28 Diagramme Tfg~Th des inclusions aqueuses pour l'ensemble des PIF, avec la bande de mélange et les points de références pour la modélisation 84
Fig. III-29 Modèle P-T interprétatif du trend principal T1; chaque couple d'isochore délimite la bande de mélange à une Tfg donnée(-2, -4, -6 et -10°C) 85
Fig. III-30 Les tracés des isochores des inclusions fluides aquo-carboniques dans les PIF à N110-130°E (A), N50-70°E (B) et N80-110°E (C) 87
Fig. III-31 - Chemins P-T enregistrés par l'ensemble des fluides étudiés dans l'encaissant régional de St-Yiriex. 90

CHAPITRE IV — Argentat : minéralogie & microstructures

Fig. IV- 1. Carte géologique simplifiée du secteur de tulle 97
Fig. IV-2. Relation entre les fentes de quartz blanc laiteux et les structures C/S des failles normales (coupe interprétative). 99
Fig. IV-3 - Schémas structural de Puy-des-Angles et du Maupas 101
Fig. IV-4 - Schéma de la lame épaisse SM10 (plan horizontal), montrant les différentes générations de quartz 102
Fig. IV-5 - Schéma de la lame SM11, montrant les différentes génération de quartz et photographies des différentes structures. 103
Fig. IV-6 - Photographie au microscope optique montrant le quartz Q_4 et les sulfures associés 104
Fig. IV-7 - Les différents types de phyllites dans l'échantillon SM9 (lumière polarisée). 106
Fig. IV-8 - diagrammes de composition chimique des phyllites du site de Puy-des-Angles. 107
Fig. IV-9 - Imagerie en électrons rétrodiffusés (microscope électronique à balayage) 110
Fig. IV-10 - Schémas de lames épaisses du site du Maupas. 113
Fig. IV-11 - Photographies de quelques manifestations tectoniques et hydrothermales dans le site du Maupas. 114
Fig. IV-12 - photographies au microscope électronique à balayage, montrant le relation pyrite-arsénopyrite et la zonation des arsénopyrite. 116
Fig. IV-13 - la composition chimique des arsénopyrites dans le site du Maupas 116
Fig. IV-14 - Régimes de déformation et hydrothermalisme associé dans le sites de Puy-des-Angles et du Maupas 119

Fig. IV-15 - Coupe N-S dans le site de la RN20, montrant les couloirs de failles normales E-W minéralisées, recoupant un chevauchement précoce silicifié. 120
Fig. IV-16 - La succession paragenétique dans les structures E-W du site AR109 (échantillon SM36), montrant les différentes générations de quartz, phengite et pyrite. 122
Fig. IV-17 - Photos illustrant les successions paragénitiques dans les structures du site AR109 124
Fig. IV-18 - Diagrammes de variation de la composition chimique des phengites dans le site RN20... 125
Fig. IV-19 - Zonation des pyrites de l'échantillon SM36 (Site RN20). 127
Fig. IV-20 - Variation de la composition chimique dans les pyrites de l'échantillon SM36. 128
Fig. IV-21 - Photographies au microscope électronique à balayage, montrant les différentes zonation dans les pyrites de l'échantillon SM34, avec (A) "patchy zoning" et (B) zonation grossière. 128
Fig. IV-22 - Variation de la composition chimique des pyrites dans les structures E-W du site RN20 et comparaison entre les deux échantillon (SM34 et SM36). 129
Fig. IV-23 - Synthèse des régime de déformation, et des manifestations tectoniques et hydrothermales associées, dans le site de la RN20. 130
Fig. IV-24 - carte géologique simplifiée du secteur d'Argentat s. s. 132
Fig. IV-25 - Coupe N-S dans les structures d'Argentat minéralisées (site AR116) 133
Fig. IV-26 - photographies au microscope optique, montrant la succession paragénitique dans l'échantillon SM23. 135
Fig. IV-27 - Photographies MEB des sulfures du site AR 116 136
Fig. IV-28 - Composition chimique des phengites du site AR116 (échantillon SM23) 138
Fig. IV-29 - Photographie au microscope électronique à balayage montrant la zonation dans un cristal de pyrite et les graphiques de composition des différents points. 140
Fig. IV-30 - Photographie MEB montrant la variation texturale des cristaux d'arsénopyrite dans l'échantillon SM23 (site AR116). 141
Fig. IV-31 - Variation de la composition chimique dans une arsénopyrite hétérogène dans l'échantillon SM23. 142
Fig. IV-32 - Carte géologique simplifiée du secteur de Grand fraud 145
Fig. IV-33 - cartographie des anomalies Au, As et Sb dans le secteur du Grand Fraud. 146
Fig. IV-34 - schéma de la lame épaisse SM13, montrant les différentes génération de quartz. 147
Fig. IV-35 - Stéréogramme des isodensités des PIF dans le quartz Q_2 de l'échantillon SM13. 147
Fig. IV-36 - Schéma des différentes structures macroscopiques observées dans la structure filonienne du Grand 148
Fig. IV-37 - photographie des joints stylolithiques dans l'échantillon SM15 (A) et la rosace de fréquence de leur direction. 151
Fig. IV-38 -illustrations des veinules de type healed dans le filon du grand Fraud 152
Fig. IV-39 - rosaces de fréquence des différentes directions des structures de type "healed" dans le filon de quartz du Grand Fraud. 152
Fig. IV-40 - les différentes structures de type "sealed" dans le quartz du filon de Grand Fraud et la rosace de la fréquence de leur direction. 153
Fig. IV- 41 - détail de la zonation de la pyrite, les graphiques de la variation de la composition chimique et les photographie MEB montrant l'oxydation de la pyrite et un grain d'or. 155
Fig. IV-42 - la reconstitution en 3D des différentes structures de l'échantillon SM17 157
Fig. IV-43 - photographie au microscope optique montrant des gerbes de chlorite (A) et un cisaillement dextre (B). 159
Fig. IV-44 - Régimes de déformation et leur manifestation dans le secteur du Grand Fraud 161
Fig. IV-45 - évolution temporelle des régimes de déformation dans l'emprise de la faille d'Argentat... 178

CHAPITRE V — Les fluides dans le domaine d'Argentat

Fig. V-1 - Rosace des fréquences de la direction des plan d'inclusion fluide (208 mesures) dans le granite de Millevaches (SM54) 172
Fig. V-2 - Diagrammes de fréquence de $TfCO_2$ (A), TfClath (B), $ThCO_2$ (C) et de Tfg (D) dans les différents types d'inclusions aquo-carboniques de l'échantillon SM54. 174
Fig. V-3 - Histogramme de fréquence des température d'homogénéisation totale dans les inclusions aquo-carboniques de l'échantillon SM54. 174
Fig. V-4 - Projection des données de microthermométrie des inclusions Lw de l'échantillon SM54, dans le diagramme ternaire $NaCl-CaCl_2-H_2O$ 176

Fig. V-5 - Histogrammes de fréquence des Tfg (A) et des Th correspondantes (B) dans les inclusions aqueuses de l'échantillon SM54 177
Fig. V-6 Schéma de la structuration du quartz précoce (SM3) au Maupas. 179
Fig. V-7 - Histogramme de fréquence des Tfg dans les inclusions aqueuses et aquo-carboniques du Maupas (SM3) et de Puy-des-Angles (SM10). 180
Fig. V-8 - Histogramme des fréquences des Th dans les inclusions du Maupas (SM3) et de Puy-des-Angles (SM10) 181
Fig. V-9 - Rosaces de fréquence de la direction de la schistosité (A) et de PIF (B) dans l'échantillon SM60. 182
Fig. V-10 - Histogramme de fréquence de la température de fusion des clathrates dans les inclusions Lw-c dans l'échantillon SM60. 183
Fig. V-11 - Histogramme des Tfg des différents types d'inclusions dans l'échantillon SM60 185
Fig. V-12 - Histogramme des températures d'homogénéisation des inclusions de l'échantillon SM60. 185
Fig. V-13 - Rosaces des fréquences de la direction de la schistosité (A) et de la direction des PIF (B) dans SM44. 187
Fig. V-14 - Coupe E-W dans les gneiss gris montrant les schistosités et la structuration des tonalites, affleurement sur la D978 au niveau du Pt2 187
Fig. V-15 - Photographie au microscope optique montrant la structuration et la minéralogie de la tonalite SM46 (lumière polarisée) 188
Fig. V-16 - Photographie au microscope optique de la leptynite SM48, montrant le rubanement des mylonites. 189
Fig. V-17 - Histogramme des fréquences des Tf CO_2 (A) et TfClath (B) des les inclusions Lw-c de l'échantillon SM44. 191
Fig. V-18 - Histogramme des fréquences des Tfg (A) et Th (B) dans les inclusion aquo-carboniques dans l'échantillon SM44. 191
Fig. V-19 - Histogramme de fréquence des Tfg des inclusions aqueuses mesurées dans le transect II. 193
Fig. V-20 - Histogramme de fréquence des Th des inclusions aqueuses mesurées dans les échantillons du transect II 193
Fig. V-21 - Histogramme des fréquences de $TfCO_2$ (A) et des TfClath (B) dans les inclusions aquo-carboniques de l'échantillon SM26. 196
Fig. V-22 a - projection des données de microthermométrie des inclusions Lw-cS de l'échantillon SM26, dans le diagramme ternaire NaCl-$CaCl_2$-H_2O 197
Tableau 4 - Composition de la phase volatile dans les inclusions fluides Lw-c et Vw-c dans l'encaissant à Argentat (SM26) 198
Fig. V-22 b - Diagramme ternaire H_2O-NaCl-$CaCl_2$ permettant le calcul de la composition des inclusions Lw dans l'échantillon SM26 (Vanko *et al.*, 1988). 199
Fig. V-23 - Histogramme des fréquences des Tfg dans les inclusions aqueuses et aquo-carboniques dans le site AR116 (SM23 : quartz filonien ; SM26 : encaissant). 200
Fig. V-24 - Histogramme des fréquences des Th mesurées dans les différentes inclusions du site AR116 (SM23 : quartz filonien ; SM26 : encaissant) 200
Fig. V-25 - Stéréogramme des isodensités de direction des PIF dans l'échantillon SM21. 203
Fig. V-26 - Histogrammes de fréquence des Tfg dans les différents échantillons étudiés dans le transect du Grand Fraud. 205
Fig. V-27 - Histogramme des Th des inclusions fluides dans les échantillons du transect du Grand-Fraud. 206
Fig. V-28 - Diagramme ternaire CO_2-CH_4-N_2 de la composition de la phase volatile obtenue par microspectrometrie Raman dans le domaine d'Argentat 208
Tableau 5 - Composition totale des inclusions fluides aquo-carboniques du domaine d'Argentat (en mole %). 209
Fig. V-30 - Diagramme Tfg-Th des inclusions aqueuses et aquo-carboniques dans le secteur du Maupas (SM3) et de Puy-des-Angles (SM10) 212
Fig. V-31 - Diagramme Tfg-Th des inclusions aqueuses et aquo-carboniques dans le transect II 213
Fig. V-32 - Diagramme Tfg-Th des inclusions aqueuses et aquo-carboniques dans l'échantillon SM54 (secteur de Gimel) 213
Fig. V-33 - Diagramme Tfg-Th des inclusions aqueuses et aquo-carboniques dans l'échantillon de micaschistes SM60 214

Fig. V-34 - Diagramme Tfg-Th des inclusions aqueuses et aquo-carboniques dans le secteur d'Argentat; structure minéralisée (SM23) et son encaissant (SM26) 214
Fig. V-35 - Diagramme Tfg-Th des inclusions aqueuses des différents échantillons du transect du grand Fraud 215
Fig. V-36 - Diagramme synthétique des Tfg-Th de l'ensemble des inclusions aquo-carboniques dans les différents échantillons 215
Fig. V-37 - Modèle d'interprétation des isochores des inclusions aquo-carboniques dans les différents échantillons 216
Fig. V-38 - Synthèse des données des Tfg-Th de l'ensemble des inclusions aqueuses 218

CHAPITRE VI — Conclusion générale

Fig. VI-1. Modèle de circulations fluides dans les systèmes de St-Yrieix et d'Argentat à la fin de la collision 228
Fig. VI-2. Modèle de circulations fluides dans les systèmes de St-Yrieix et d'Argentat à la fin de l'extension au carbonifère 229
Fig. VI-3. Modèle de l'origine des fluides profonds, aurifères : cas des Cévennes 231

Liste des tableaux

CHAPITRE III — Les fluides dans le domaine de St-Yrieix

Tableau III-1: Composition de la phase volatile des inclusions fluides des PIF à N50°-70°E 52
Tableau III-2: Composition de la phase volatile des inclusions des PIF à N80°-100°E 57
Tableau III-3 : Composition Raman des volatils dans les PIF à N110-130°E 61
Tableau III-4 : Composition de la phase volatile dans les différentes directions. 75

CHAPITRE IV — Argentat : minéralogie & microstructures

Tableau IV-1: Composition chimique des arsénopyrites 108
Tableau IV-2: la composition chimique de la pyrite, la chalcopyrite et la galène dans le site de Puy-des-Angles 109
Tableau IV-3: Composition chimique en % poids (w %) et % atomique (a %) de la pyrite dans le site du Maupas. 117
Tableau IV-4: Analyses représentatives des sulfures de SM23 139

CHAPITRE V — Les fluides dans le domaine d'Argentat

Tableau V-1: Composition de la phase volatile des inclusions carboniques et aquo-carboniques du granite SM54. 175
Tableau V-2: Données microthermométriques et composition de la phase volatile des inclusions aquo-carboniques dans le quartz de Puy-des-Angles (SM10). 179
Tableau V-3: Composition de la phase volatile dans les inclusions aquo-carboniques de l'échantillon SM60 184
Tableau V-4: Composition de la phase volatile dans les inclusions fluides Lw-c et Vw-c dans l'encaissant à Argentat (SM26) 198
Tableau V-5: Composition totale des inclusions fluides aquo-carboniques du domaine d'Argentat 209

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GENERALE

I- CARACTERES GENERAUX DE LA CHAINE VARISQUE (FIG.I-1)

I. 1- INTRODUCTION

La chaîne varisque de l'Europe de l'Ouest, qui s'étend depuis le Sud de la péninsule Ibérique jusqu'à la bordure est du massif de Bohème, est issue de la collision entre le Gondwana au sud et la Baltica au nord au cours d'une période s'étalant du Silurien au Carbonifère (Matte, 1986), cette collision ayant induit la fermeture de domaines océaniques (l'océan Rheique et l'océan Galice-Massif Central) et la subduction entre des microblocs continentaux issus de la fragmentation de la marge nord du Gondwana (Berthelsen, 1992 ; Frenke, 1992).

En France, la chaîne varisque constitue un socle cristallin qui affleure de façon discontinue sous forme de massifs tels que le Massif Armoricain, le Massif des Vosges, le Massif Central (fig. I-1). Cette chaîne est associée dans sa globalité à des concentrations métallifères, gisements et indices (U, Au, Sn, W, Sb, ...). Le Massif Central constitue la province métallogénique la plus riche de France (Marignac et Cuney, 1999).

I. 2- PERIODES OROGENIQUES VARISQUES

On considère classiquement que l'histoire de la chaîne se divise en trois épisodes, éo-, méso- et néo-varisques, respectivement (Ledru *et al.*, 1994) ;

- l'épisode éo-varisque couvre la subduction et la résorption de croûte océanique vers 400-440 Ma (Pin et Peucat, 1986), à l'origine d'un métamorphisme de haut grade (HT-eclogite puis HP-granulite) (Pin et Vielzeuf, 1988).
- au Dévonien-Carbonifère inférieur (phase méso-varisque), la collision aboutit à une tectonique de nappes (Autran et Cogné, 1980 ; Pin et Peucat, 1986 ; Friedrich *et al.*, 1988 ; Pin, 1989) ; au cours de cette période les roches du métamorphisme du haut grade ont été soumises à une rétromorphose lors de leur exhumation au Dévonien moyen. A cette exhumation est associée une migmatisation précoce qui touche les termes supérieurs des partie allochtones (Faure *et al.*, 1997). La phase majeure de la collision varisque se situe vers 355 Ma au passage Dévonien supérieur-Carbonifère inférieur (Pin et Peucat, 1986 ; Costa, 1990 ; 1992).
- au carbonifère moyen à supérieur (phase néo-varisque) alternent compression (grands décrochements) et distension, dans un contexte de flux thermiques élevés : nombreux granites, anatexie des dômes granito-gneissiques du Velay et

de la zone axiale de la Montagne Noire, associée à l'exhumation tardi-orogénique (Faure *et al.*, 1997).

I. 3- EVENEMENTS AURIFERES VARISQUES

Les trois grandes périodes orogéniques varisques (Ledru *et al.*, 1989 ; 1994), sont associées dans le socle hercynien français, à trois événements aurifères (Cathelineau *et al.,* 1990 ; Bril *et al.*, 1994 ; Marignac et Cuney, 1999) dont le dernier (Or-300Ma) correspond à une crise métallifère majeure vers 300Ma qui est à l'origine des principales concentrations d'or dans le sous-sol français (Bouchot *et al.,* 1997).

I. 3. 1- La période éovarisque

À cette période est associé un événement aurifère Or-400 Ma qui est limité à l'unité de Saint Georges-sur-Loire (Massif Armoricain) localisée dans la bordure entre les domaines orogéniques internes et externes. L'or et l'argent ont été mis en place dans un contexte de stockwerks associés à des lentilles stratiformes de sulfures polymétalliques (Bouchot *et al.*, 1997).

I. 3. 2- La période mésovarisque

À la fin de la période mésovarisque est associé l'événement aurifère et à métaux de base Or–360 Ma (Bouchot *et al.*, 1997), qui correspond au dépôt d'amas sulfurés à Zn-Cu-Pb-Ba (Chessy- série de la Brévenne : Poupon, 1990 ; Milési et Lescuyer, 1993) qui contiennent localement de l'or, et qui sont piégés dans des bassins Viséens.

I. 3. 3- La période néovarisque

Cette période, qui correspond à l'étape la plus importante du point de vue métallogénique et plus particulièrement la métallogénie de l'or, est comprise entre 350 et 285 Ma et peut être divisée en deux stades (Bouchot *et al.*, 1997).

Un premier stade qui se déroule entre 350 et 325 Ma, auquel n'est associé aucun dépôt d'or en dépit de circulations fluides syn - métamorphes responsables de la mise en place des lentilles de quartz d'exsudation le long des chevauchements dans les Cévennes (Arnaud et Burg, 1993 ; Arnaud 1997).

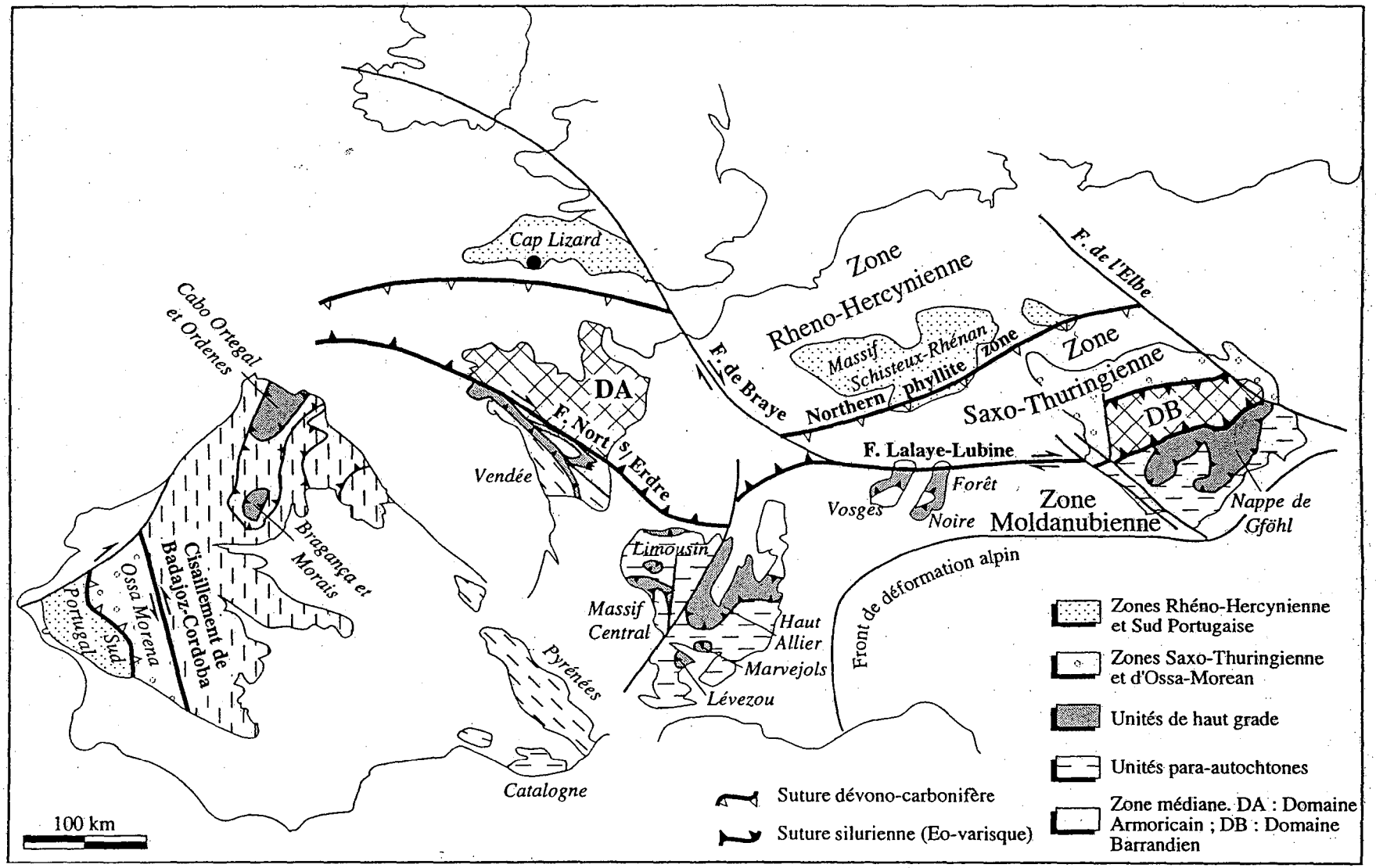


Fig. I-1. Carte schématique de la chaîne varisque de l'Europe, simplifié d'après Matte (1986), Franke (1989), Costa (1990).

Le deuxième stade, compris entre 325 et 285 Ma, est caractérisé par une tectonique extensive, avec des cisaillements crustaux, granitisation amorcée à la fin du premier stade néovarisque, et une exhumation rapide de la croûte profonde associée à une érosion et à l'ouverture de bassins Stéphano-Pérmiens (ex. Bassin d'Argentat). Au cours de cette période se développe un hydrothermalisme à l'échelle régionale avec des fluides arséniés le long des grandes structures, étant à l'origine des minéralisations à W autour de 320 Ma (Marignac et Cuney, 1999) et Au-Sb vers 300 Ma qui correspond à l'événement aurifère majeur Or–300 Ma.

II- UNITES LITHOTECTONIQUES DU MASSIF CENTRAL (FIG. I-2)

La structuration du Massif Central français s'étale sur une période d'environ 150 Ma, elle commence à l'éovarisque par un enfouissement de la croûte continentale et océanique et elle se poursuit jusqu'au néovarisque où on assiste à un désépaississement crustal.
On considère que le Massif Central français est constitué de cinq unités lithotectoniques (Floc'h, 1983 ; Ledru *et al.*, 1994) du haut vers le bas :

II. 1- UNITES EPIZONALES SUPERIEURES

Il s'agit d'unités peu métamorphiques (ne dépassant pas l'épizone) dont l'extension géographique est très restreinte. Elles sont représentées dans le NE du Massif Central par la série de la Brévenne et dans le Sud Limousin par les unités de Génis, Thiviers-Payzac et Leyme, elles comprennent principalement des termes gréseux et schisteux.

II. 2- UNITE SUPERIEURE DES GNEISS (U.S.G.)

C'est l'unité la plus métamorphique du Massif Central. Elle est constituée par des termes paradérivés et métadérivés notamment les célèbres "groupes leptyno-amphibolitiques". La présence d'éclogites et granulites - qui correspondent à des reliques de haute pression (Santallier *et al.*, 1988 ; Santallier *et al.*, 1994) - témoigne de l'enfouissement éovarisque. Les dernières déformations observées sont contemporaines des conditions du métamorphisme barrovien méso-varisque (Roig, 1997).
Cette unité est constituée dans le Bas-Limousin par :

- des gneiss plagioclasiques où sont intercalées des lentilles de roches basiques et ultrabasiques et plusieurs massifs de diorites quartziques mis en place au Dévonien

supérieur - Carbonifère inférieur (entre 379 ± 17 et 355 ± 2 Ma U/Pb zircon, Bernard-Griffiths *et al.*, 1985) ;

- le complexe leptyno-amphibolitique qui constitue les flancs de l'antiforme de Tulle et l'encaissant de la partie sud de la faille d'Argentat.

II. 3- UNITE INFERIEURE DES GNEISS (U.I.G.)

Cette unité comprend à la fois des termes paradérivés (micaschistes et paragneiss) et de puissantes formations d'orthogneiss acides, dont certains protolithes sont datés de la base du Cambrien inférieur comme les orthogneiss de Mulatet - Argentat (535 ± 21 Ma, Rb/Sr Roche totale : Bernard - Griffiths, 1975), tandis que d'autres dérivent de granodiorites d'âge Ordovicien inférieur (orthogneiss de Meuzac), affectés par une migmatisation datant du Dévonien moyen (383 ± 15 Ma, orthogneiss de Meuzac, U/Pb zircon : Lafon, 1986). Cette unité a enregistré essentiellement un métamorphisme barrovien de moyen à haut degré.
Au Sud Limousin cette unité est constituée par les orthogneiss ordoviciens qui constituent le coeur des antiformes de Meuzac au Nord et de Tulle au Sud où sont injectés des granites datés du Carbonifère inférieur (ex : granite de Chanteix), et les orthogneiss de type Argentat qui affleurent le long de la faille ; ainsi que par des micaschistes, qui constituent l'essentiel de l'encaissant des structures minéralisées de Saint Yrieix et forment une lanière tout au long de la faille ductile d'Argentat, qui les sépare des micaschistes de Millevaches (UPA).

II. 4- UNITE DU PARA-AUTOCHTONE (U.P.A.)

Elle est constituée de micaschistes mésozonaux, avec des intercalations de bancs de quartzites et métagrauwakes et quelques rares orthogneiss comme ceux de la Xaintrie (467 ± 8 Ma, Rb/Sr roche totale : Monier, 1980). Elle affleure à l'Est de la faille d'Argentat et au cœur des grands antiformes (Dronne, St-Goussaud,...) du Limousin. Elle est interprétée comme unité autochtone par rapport aux unités précédentes (Ledru *et al.*, 1989).

II. 5- UNITE MERIDIONALE PALEOZOÏQUE

Au sud du Massif central, de part et d'autre de la zone axiale de la montagne noire, un complexe de nappes déversées vers le Sud représente la partie la plus haute de l'édifice. Ces nappes anchi- à épi-zonales, à matériel de plate-forme gréso-pélitique et carbonatée (Cambrien-Dévonien), commencent à se former dès la fin du viséen (olistostromes et flyschs syn-tectoniques) (Engel *et al.*, 1981).

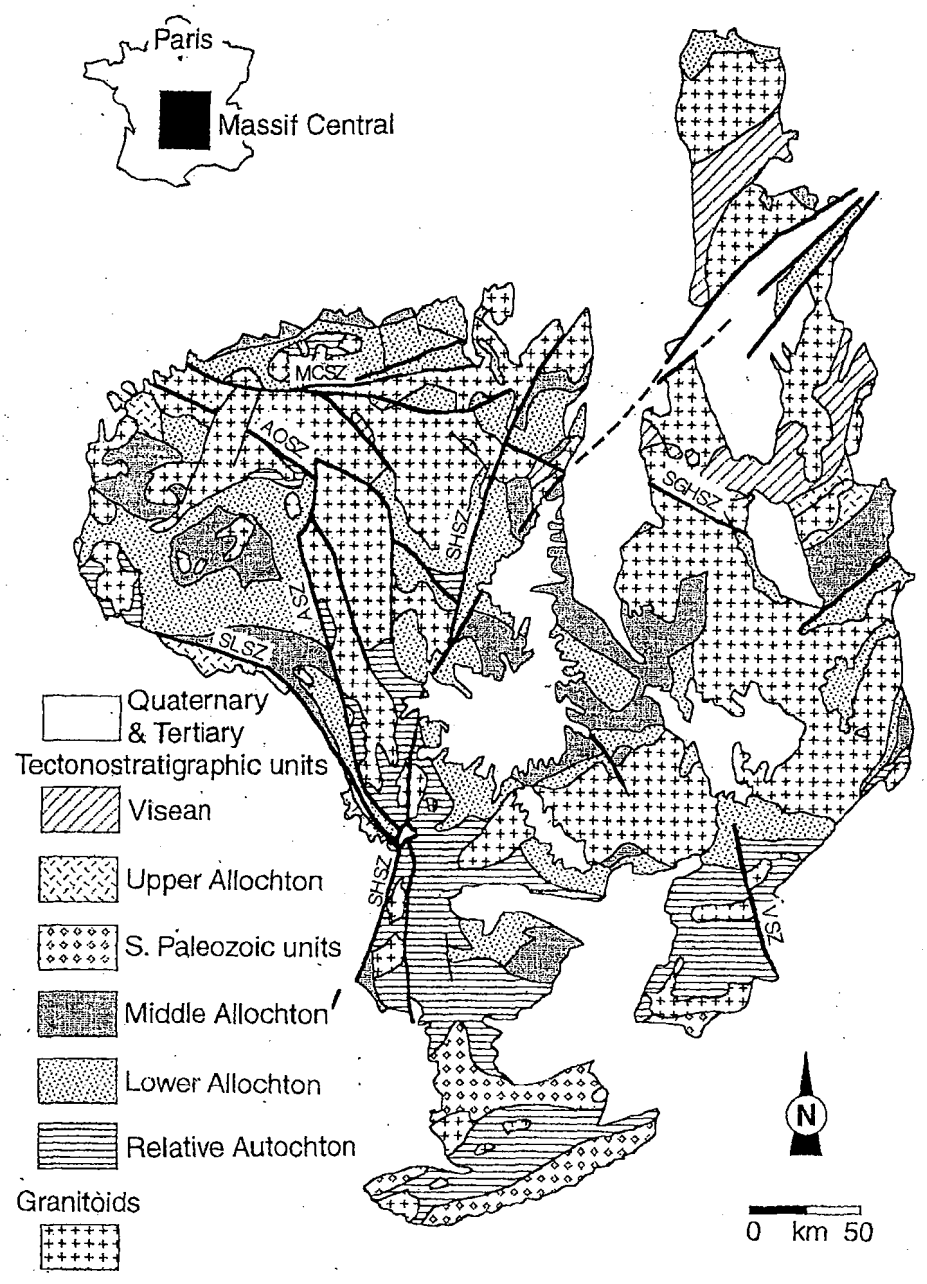


Fig. I-2. Carte des principales unités lithotectoniques et des granites dans le Massif Central français (d'après Ledru et al., 1994).

MCSZ : "shear-zone" de Marche-Combraille
AOSZ : "shear-zone" de Arrènes-Ouzilly
ASZ : "shear-zone" de Argentat
SHSZ : "shear-zone" de Sillon Houillier
SGHSZ : "shear-zone" de Saint-Germain l'Hermitage
SLSZ : "shear-zone" Sud Limousine
VSZ : "shear-zone" de Villefort

III- GRANDES STRUCTURES DU SUD LIMOUSIN

Le Sud Limousin montre un ensemble d'antiformes et de synformes E-W, correspondant à un serrage N-S Carbonifère plissant les nappes (antiformes de Tulle et de Meuzac, synforme d'Uzerches: Fig. I-3), et recoupés par des accidents cisaillants ductiles, certains "locaux" (shear-zones de St-Yrieix, chevauchement N50-60°E à pendage Ouest : Nicaud et Floc'h, 2000), d'autres régionaux, comme la faille ductile d'Argentat (cf. Fig. I-2). Cette dernière montre un jeu polyphasé :

- faille normale ductile à regard Ouest, au toit du massif leucogranitique de Millevaches (Roig, 1997), fonctionnant à la limite Viséen-Namurien (c. 340 Ma);
- décrochement dextre (Roig, 1997), affectant les antiformes et synformes E-W (Fig. I-3)

L'imagerie sismique réalisée dans le cadre du programme "GéoFrance 3D-Cartographie et Métallogénie du Massif Central" (Bitri *et al.*, 1999 ; Bellot *et al.*, 2000) montre que la faille normale ductile d'Argentat est un accident majeur qui se prolonge jusque dans la croûte moyenne (Fig. I-4) ; les autres structures semblent confinées à la croûte supérieure ; en outre, l'imagerie révèle la présence de failles normales raides (faille cataclastique d'Argentat qui est aussi observée à l'affleurement : Roig, 1997 ; faille de Lauriéras, ignorée jusqu'ici).

IV- PROBLEMATIQUE DE L'OR DANS LE BAS-LIMOUSIN

IV. 1- Le district de St-Yrieix

L'or est exploité dans le Sud Limousin depuis l'époque gallo-romaine, avec les gisements du district de St-Yrieix (Lauriéras, Cheni, Bourneix,...etc) (Bouchot *et al.*, 1997).

Dans l'ensemble des travaux réalisés sur les structures aurifères du district de St-Yrieix (Hubert, 1986 ; Bouchot *et al.*, 1989 ; Boiron *et al.*, 1992 ; Essarraj, 1992 , Vallance *et al.*, 2000), les auteurs s'accordent (à quelques détails près) sur une évolution en deux temps, avec d'abord la circulation de fluides aquo-carboniques (H_2O-CO_2-CH_4-N_2), qualifiés de "pseudo-métamorphiques", limités à des accidents, autour de 400°C et 0.8-2 kbar associés au dépôt d'arsénopyrite-pyrite ; puis la circulation, pervasive, d'un fluide aqueux (H_2O-NaCl), qualifiés de météorique, dans des conditions hydrostatiques (autour de 0.5 kbar), à des températures de l'ordre de 150-250°C. Ce second stade correspond au stade aurifère principal, avec une paragenèse à or, galène, sphalérite et sulfosels.

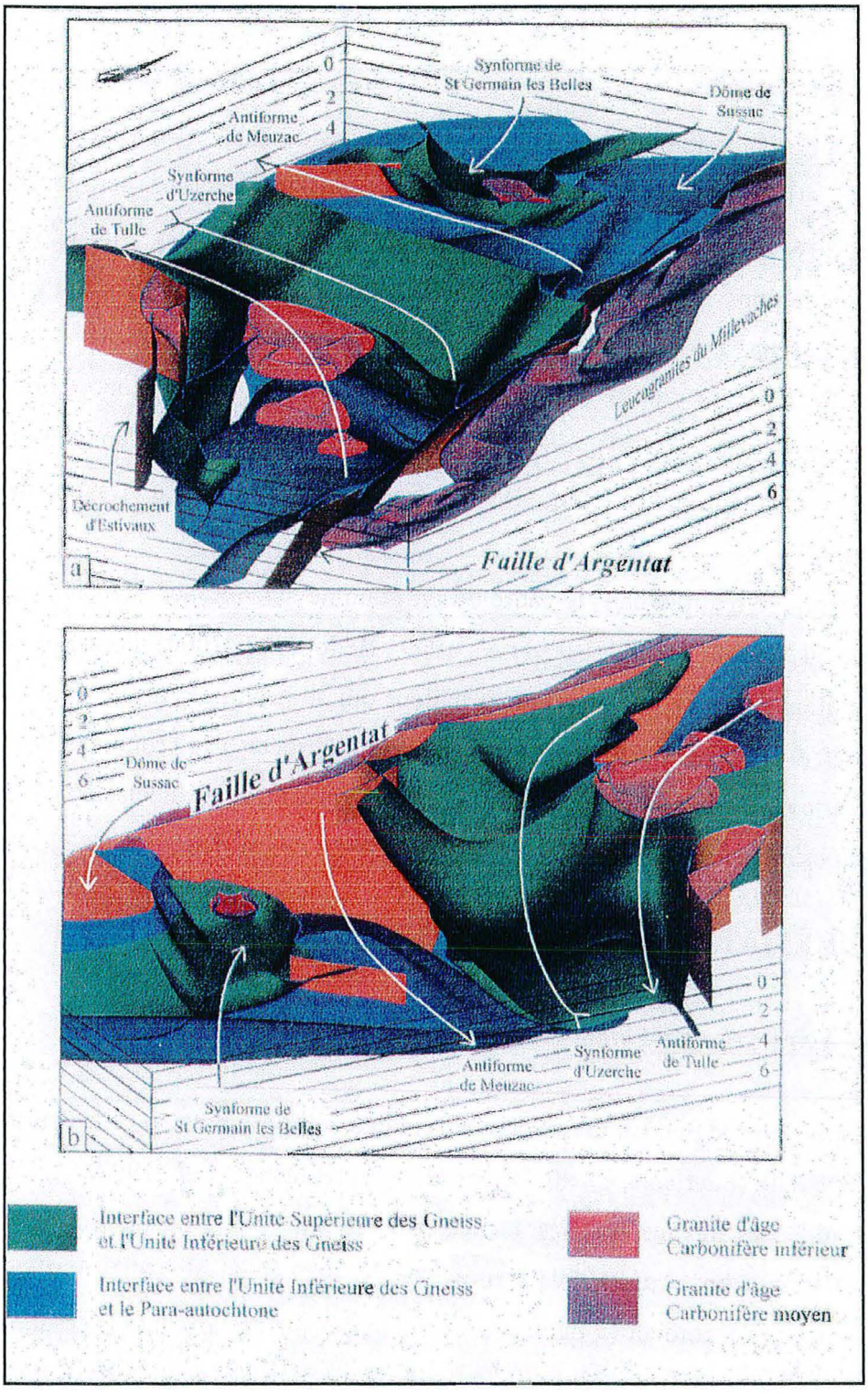


Fig. I-3 : Modèle géométrique 3D des plutons granitiques et l'ensemble des structures aurifères du Limousin méridional (Roig et al., 1997).
a. vue vers le NW
b. vue vers le SE

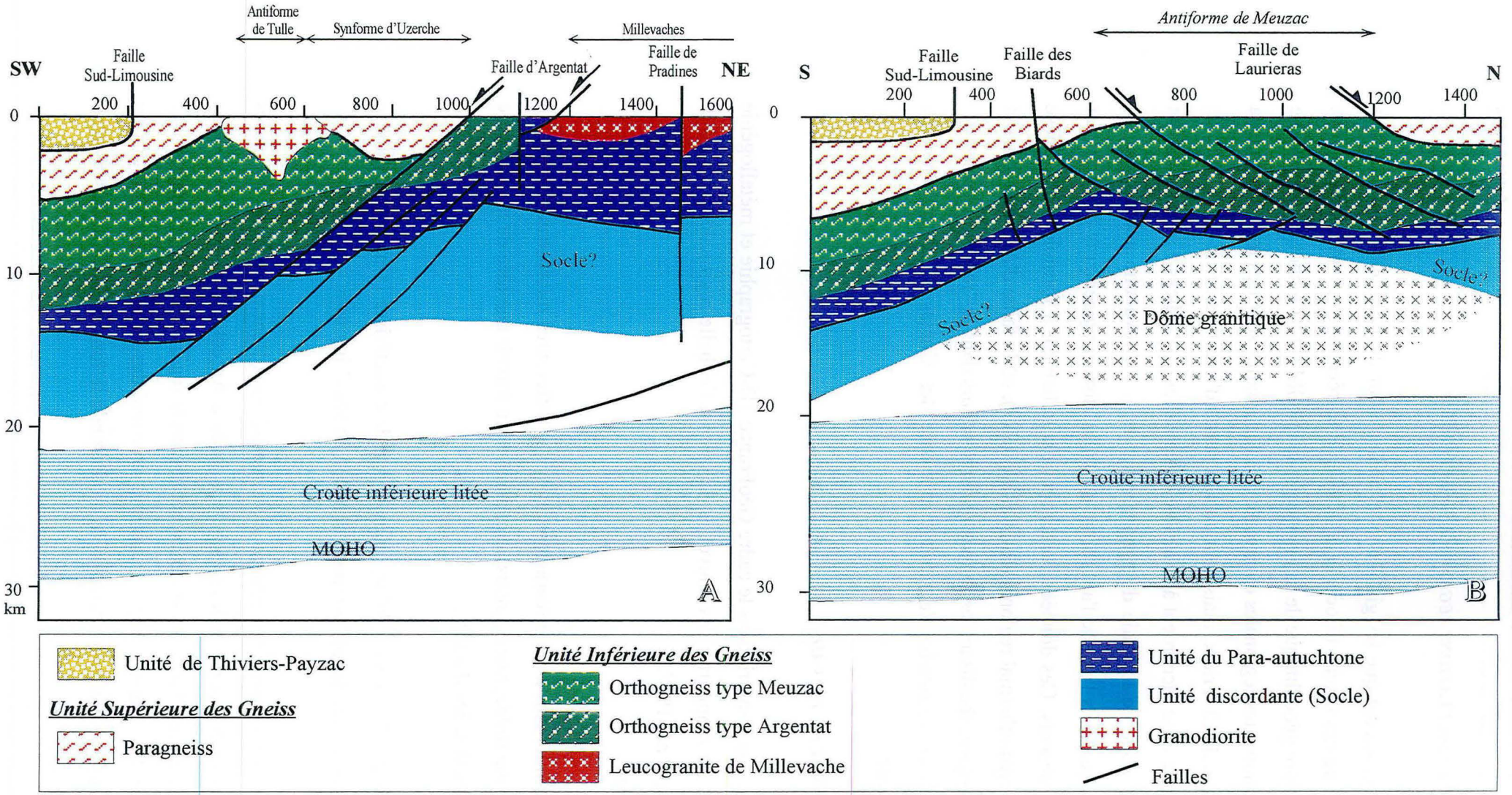


Fig. I-4 : Coupes géologiques dans la faille d'Argentat (A) et dans le district aurifère de St-Yrieix (B) à partir de l'interprétation des profils sismiques (d'après Bitri et al., 1999)

IV. 2- L'OR ET LES CIRCULATIONS REGIONALES DE FLUIDES

C'est un constat déjà ancien que les gisements et indices d'or du Limousin sont confinés dans l'Unité Inférieure des Gneiss (Floc'h *et al.*, 1984). Plus récemment, l'interprétation des résultats de l'inventaire géochimique de la France par le BRGM (cf. Bouchot *et al.*, 1997) a révélé de grandes anomalies régionales en arsenic : ces anomalies sont très intenses dans la région des gisements de St-Yrieix, mais font en fait partie d'une "bande" E-W le long de l'antiforme de Meuzac et se raccordent à la lanière d'anomalies et d'indices à or associés qui suit étroitement le tracé de la faille d'Argentat (Fig. I-5). En revanche aucun système analogue ne se marque dans l'axe de l'antiforme de Tulle, dont les gisements d'or sont par ailleurs également absents. Ces données conduisent naturellement à formuler l'hypothèse d'un vaste système hydrothermal régional (Roig *et al.*, 1997), où la faille d'Argentat jouerait le rôle d'un drain majeur, focalisant les fluides minéralisateurs dans le "réservoir" constitué par les orthogneiss et paragneiss de l'unité Inférieure des Gneiss (UIG) au cœur de l'antiforme de Meuzac.

IV. 3- OBJECTIFS DE CE TRAVAIL

Le but de ce travail, qui s'inscrit dans le cadre GéoFrance 3D-Cartographie et métallogénie du Massif Central, est d'apporter des nouvelles données à l'échelle régionale, pour tester l'hypothèse de Roig *et al.*, 1997.
Ce travail consiste en :

(i) une étude microstructurale (caractérisation des différentes microstructures : plan d'inclusion fluide, fentes, joints...etc, dans le but d'avoir une idée de la géométrie de circulation des fluides) ;

(ii) une étude des inclusions fluides dans le but de caractériser la nature physiquo-chimique des fluides ayant circulé dans le bâti Sud-Limousin.

Pour ce fait un échantillonnage conséquent a été réalisé dans l'encaissant des structures minéralisées du Bourneix-Lauriéras et le long de la faille d'Argentat (fig. I-6). Cette étude est menée en parallèle avec d'autres travaux en cours dans la région (circulation fluides dans Cheni et Fagassière, J. Vallance - Nancy ; contrôle structural des minéralisations du district (Lauriéras), J. Nicaud - Limoges ; altération hydrothermale le long de la faille d'Argentat, V. Theysse - St–Etienne).

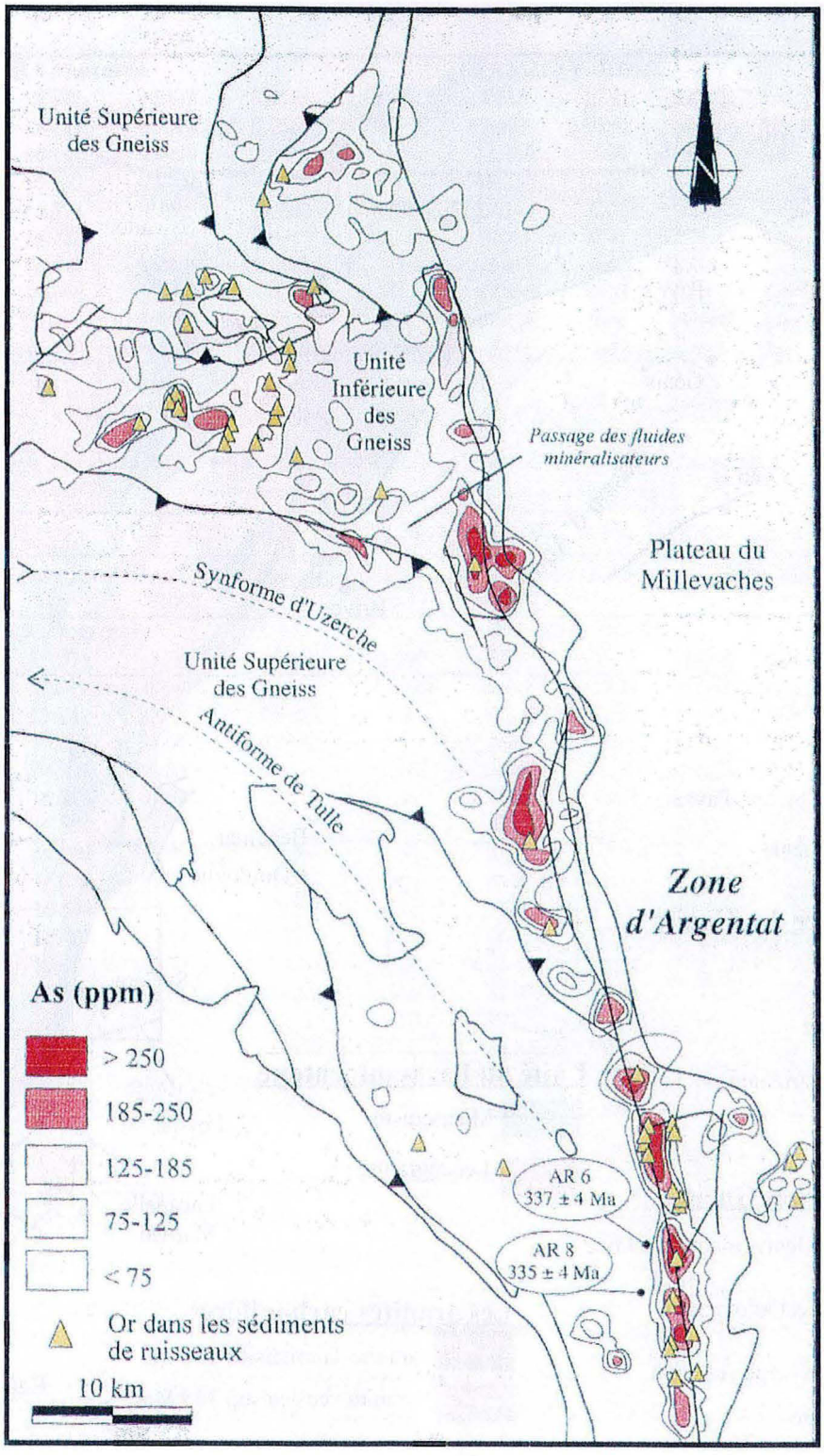


Fig. I-5 : Carte des anomalies As des sédiments de ruisseaux soulignant le paléochamps hydrothermal de la faille d'Argentat (in Roig et al., 1997, d'après Bouchot et Marroncle, 1992)

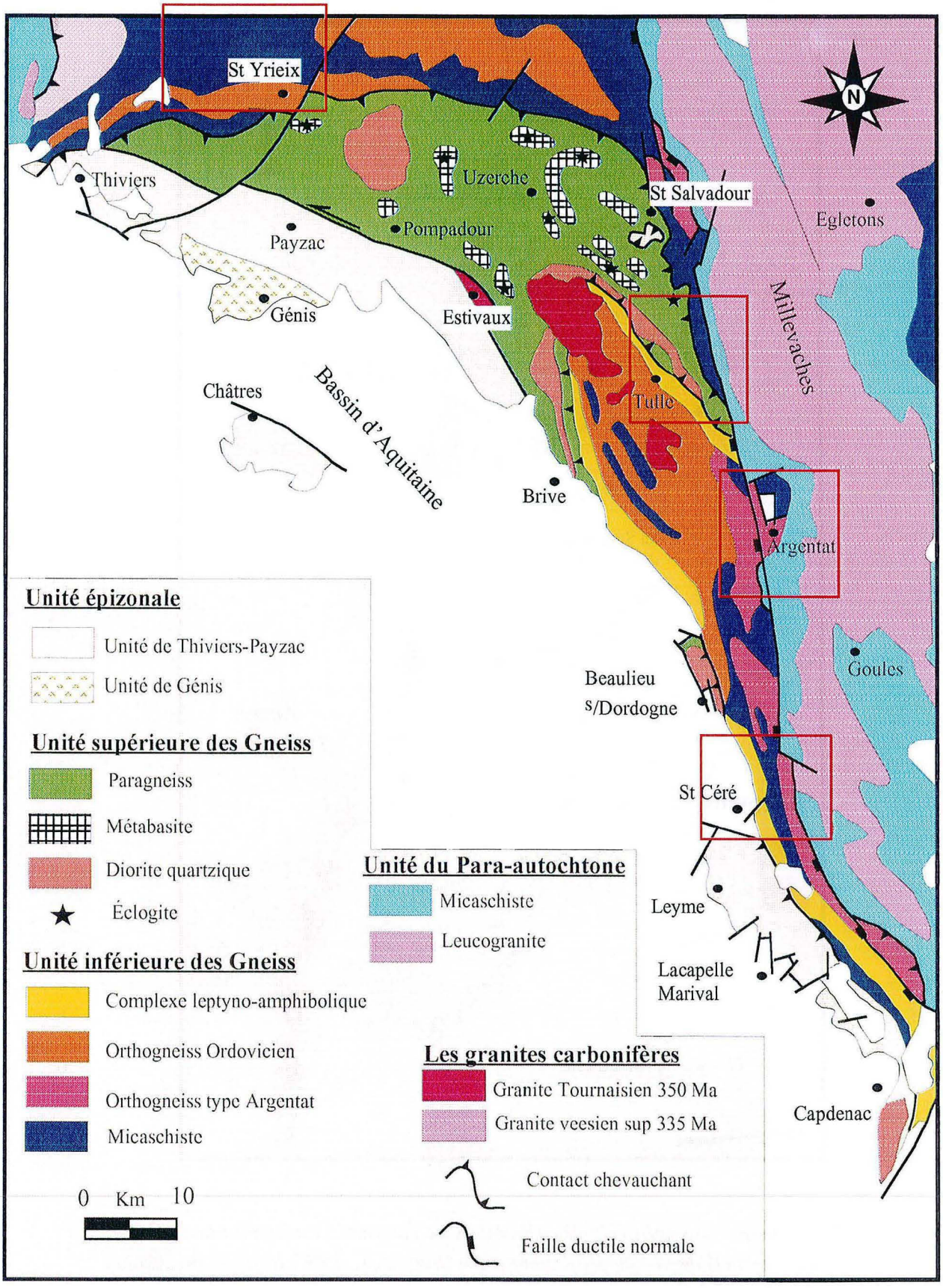


Fig. I-6 : Carte géologique simplifiée du Bas-Limousin (d'après Roig 1997), et localisation des secteurs étudiés

CHAPITRE II

PETROGRAPHIE & MICROSTRUCTURES

I- INTRODUCTION

Dans le but de cerner l'ampleur de la circulation des fluides aurifères dans le district de Saint-Yrieix, en 1997 MM. M. Cuney, J. P. Floc'h et Ch. Marignac ont échantillonné, dans le cadre du programme GéoFrance 3D, différents matériaux qui constituent l'encaissant immédiat de la structure aurifère du Bourneix (Fig. II-1).

Au NE de la structure du Bourneix, ont été explorés, en quatre points différents, des micaschistes imprégnés par des filons de pegmatites et de granites datés à 337.9 ± 0.7 Ma par la méthode $^{39}Ar/^{40}Ar$ (Alexandrov, 2000).

À quelques km au SW de la mine du Bourneix, deux sites ont été explorés. Enfin on a échantillonné dans l'arc leptynique de Saint-Yrieix, constitué par des gneiss oeillés à biotite ou biotite et muscovite avec une schistosité à N110°25°S.

Tous les échantillons prélevés étaient systématiquement orientés, ce qui nous permet une étude microstructurale basée sur l'étude de la répartition, la direction et le pendage des plans d'inclusions fluides (PIF) à l'aide de l'analyseur d'images. Ces inclusions fluides seront étudiées en microthermométrie, ce qui nous permettra d'appréhender la nature physico-chimique des fluides, les conditions de percolation et leur directions de circulation.

II- ECHANTILLONNAGE ET DESCRIPTION

II. 1- NE DU BOURNEIX

L'échantillonnage avait été fait selon un profil passant par la structure du Bourneix (Fig. II-1). Les matériaux échantillonnés correspondent à des pegmatites, granites et des lentilles de quartz dans des gneiss et des micaschistes.

II. 1. 1-La vallée de l'Isle

Dans cette zone, comme le montre la Fig. II-2, affleure des micaschistes à sillimanite, dont la schistosité est à N153°18°SW. On a échantillonné une lentille de quartz d'exsudation (CFM31) ; un filon de granite à muscovite (CFM28), qui se développe dans une direction (N140°23SW) subparallèle à la direction de la schistosité; et une pegmatite (CFM29) à quartz et feldspaths potassiques, sécante et en taches sur les micaschistes. Sur l'affleurement la relation granite- pegmatite est mal visible mais la pegmatite est déformée avec des micas tordus et cisaillés (Fig. II-3) alors que le granite ne l'est pas.

Les muscovites des échantillons du granite (CFM30) et des micaschistes (CFM32) ont fourni à Alexandrov (2000) des âges plateau respectivement 339.2 ± 0.6 Ma et 339.4 ± 1.3 Ma par la méthode $^{39}Ar/^{40}Ar$.

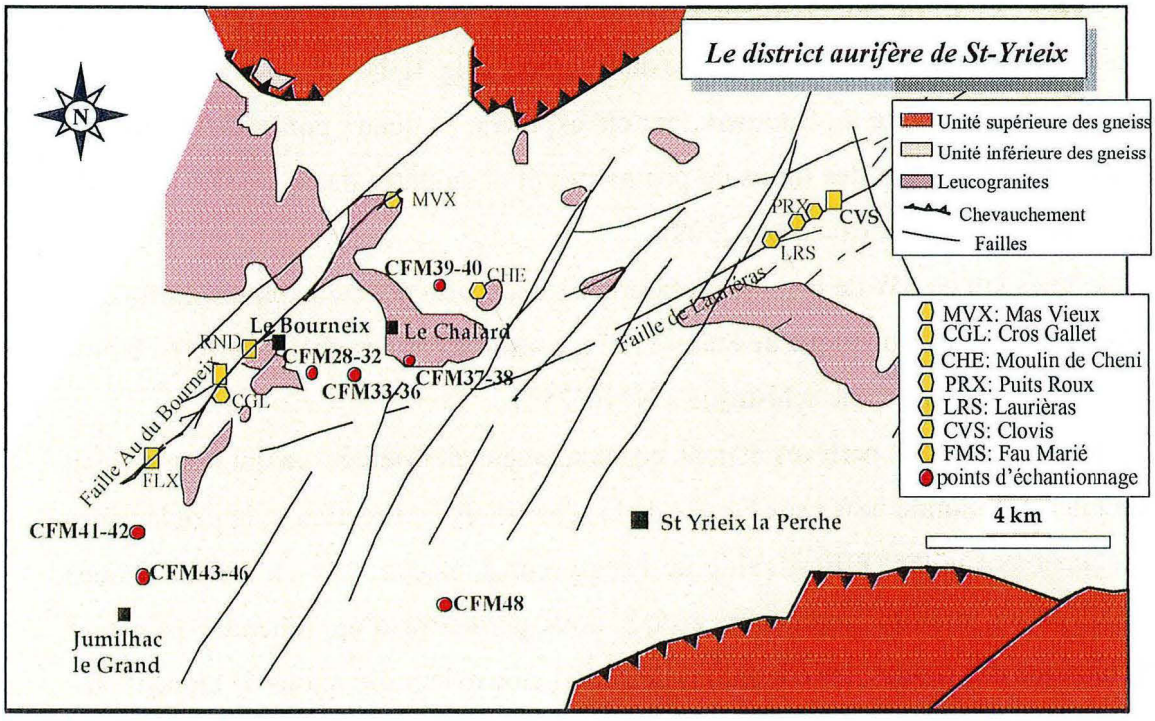


Fig. II-1 : Carte d'échantillonnage dans le district de St-Yrieix (d'après document de COGEMA modifié)

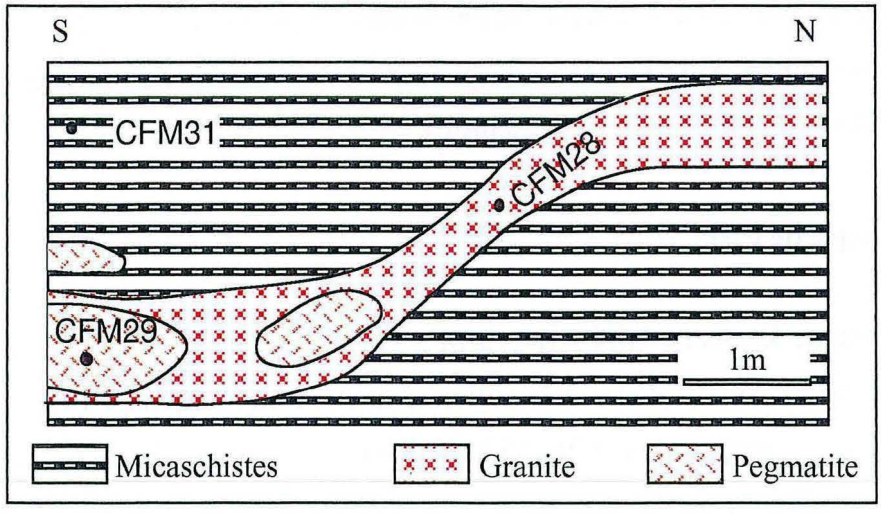


Fig. II-2 : Coupe schématique N-S de l'affleurement de la vallée de l'Isle

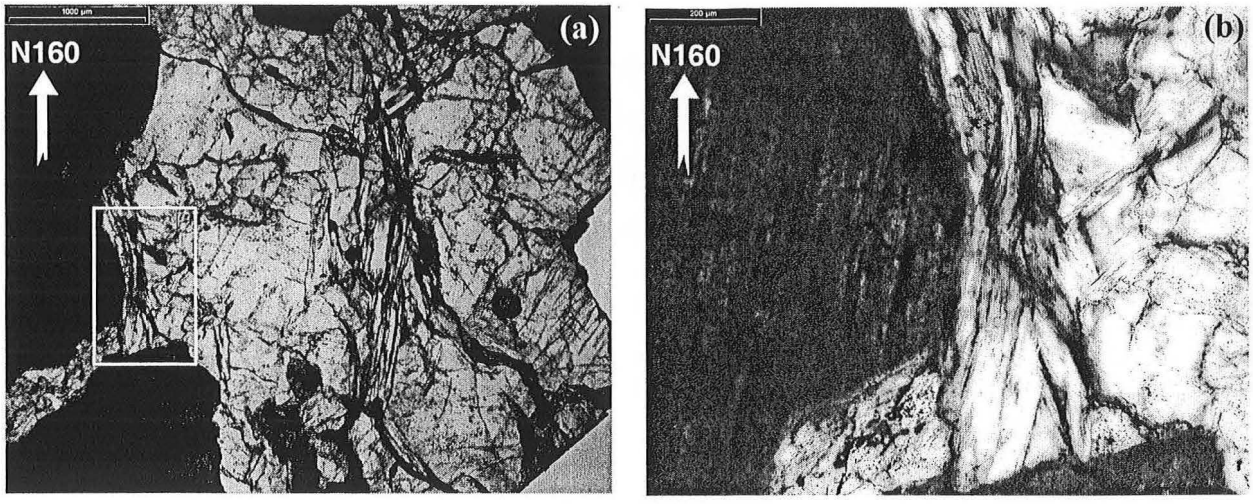


Fig. II-3 : (a) Photographie montrant la déformation des micas (tordus et cisaillés, CFM29), (b) photographie de détail dans la partie encadrée (plan horizontal)

II. 1. 2-Moulin du Chalard

Sur ce site, qui présente les mêmes faciès que la vallée de L'Isle, ont été échantillonnés (i) un filonnet centimétrique de pegmatite (CFM33) à N40°45SE, à quartz, feldspath et muscovite, sécant sur les micaschistes qui développent une schistosité à N90°20N, et (ii) des "rods" de quartz (CFM34 et CFM35) affectés par des plis P2 correspondant à des microplissement en chevrons serrés dissymétriques et déversés, parfois sub-isoclinaux, de la foliation principale S1 (Chenevoy *et al.*, 1990).

II. 1. 3-Le Moulin du Bétour

Il s'agit d'un leucogranite subalcalin à grain moyen, à biotite et muscovite (leucogranite du Chalard CFM37), avec une relative abondance des muscovites par rapport aux biotites. Il est souvent associé à un leucogranite alcalin à grain fin à grossier, à muscovite exclusive ou avec biotite subordonnée. Le leucogranite alcalin à muscovite passe progressivement au leucogranite à deux micas, il montre des différenciations locales à gros grain riche en quartz, albite, muscovite et pyrite (Chenevoy *et al., 1990*). L'échantillon CFM38 du même granite a donné un âge $^{39}Ar/^{40}Ar$ de 338 ± 0.7 Ma (Alexandrov, 2000)

II. 1. 4-Point coté 319

A environ 1 km à l'ouest de la mine de Moulin de Chéni, ont été échantillonnés des rods de quartz (CFM40) dans des micaschistes qui présentent une schistosité à N175°10E. Dans ces micaschistes s'injectent des filons de granites, soit en "sills" conforme à la schistosité, soit des dykes verticaux selon la direction N135°E.

II. 2- SW du Bourneix

II. 2. 1-La carrière de Jumilhac

Dans la carrière de Jumilhac, des pegmatites à quartz- feldspaths- muscovite (CFM43) N–S verticales recoupent les leptynites. Elles sont affectées d'un aplatissement, avec une schistosité mimétique de celle des leptynites (N110°25S), elles sont donc tardi-métamorphiques. Dans certaines pegmatites on note le développement de muscovites secondaires qui ont fourni dans l'échantillon CFM45 un âge plateau de 337.0 ± 0.6 Ma en $^{39}Ar/^{40}Ar$ (Alexandrov, 2000). Les leptynites sont également recoupées par des filons de quartz dont les épontes sont des diaclases à épidotes (CFM46), et qui ne sont pas déformés. L'échantillon CFM43 a été prélevé dans une pegmatite plissée, mais on ne sait pas s'il s'agit du flanc "normal" ou du flanc "inverse".

II. 2. 2-Le Cros

Dans cette zone, et d'après la carte au 1/50000 de Thiviers (Roger, 1979), le faciès est constitué essentiellement par des "gneiss micaschisteux" à grain fin à moyen où les micas sont abondants, des "micaschistes lamelleux" à disthène et sillimanite riches en muscovite qui se développent sous forme de grandes lames, probablement en relation avec des joints tapissés de muscovite. Dans ces micaschistes (N110°35S) ont été échantillonnés un "rod" de quartz (CFM41), et son enveloppe de micaschistes (CFM41a), dont les muscovites ont été datées à 337.9 ± 0.6 Ma par la méthode $^{39}Ar/^{40}Ar$ (Alexandrov, 2000).

II. 3- Saint Yrieix

Au SW de St-Yrieix, ont été explorés au niveau de la carrière Lama des orthogneiss leucocrates à foliation plate régulière, sauf dans des zones de cisaillement auxquelles sont associées des fentes à quartz résultant plus ou moins d'une ouverture en "pull apart" (?) (CFM48). Localement, les plans de foliation sont enrichis de muscovite.

III- ANALYSE MICROSTRUCTURALE

III. 1- PRINCIPE DE L'ANALYSEUR D'IMAGE

Les différentes microstructures (plan d'inclusions fluides, fractures sèches, cisaillement, linéation, schistosité,...) présentes à l'échelle de la lame épaisse, ont été géométriquement caractérisées à l'aide de l'analyseur vidéographique interactif développé au CRPG (Lapique *et al.*, 1988 ; Champenois, 1989) et celui de l'UMR G2R de l'Université de Nancy I (Nogueira et Noronha, 1995 ; Nivlet, 1997).

III. 1 .1- Description

L'appareil est constitué d'une caméra vidéo (Fig. II-4), installée sur un microscope et reliée à un moniteur, sur lequel est visualisée l'image en couleur (R.V.B) qui va constituer le document de travail.

Au moniteur sont reliés un micro-ordinateur, doté de différents logiciels d'acquisition de mesures des paramètres structuraux en deux et trois dimensions et de traitement de données, et une tablette de digitalisation avec un curseur qui permet de superposer sur l'image du moniteur les différents points qui caractérisent l'objet dont on veut caractériser la géométrie. Sur la tablette sont intégrés des codes qui permettent de discriminer les objets en types et sous-types. Ainsi on peut faire la différence entre un plan d'inclusions fluides, une fracture sèche et un plan de cisaillement et même distinguer entre un plan d'inclusions fluides aquo-carboniques et un autre avec des inclusions aqueuses.

Le microscope est équipé d'une platine dont le déplacement dans le plan (X, Y) est contrôlé manuellement par des vis micrométriques, alors que le déplacement vertical (Z) est automatisé grâce à un moteur dont le sens du déplacement est contrôlé par la souris de la tablette de digitalisation.

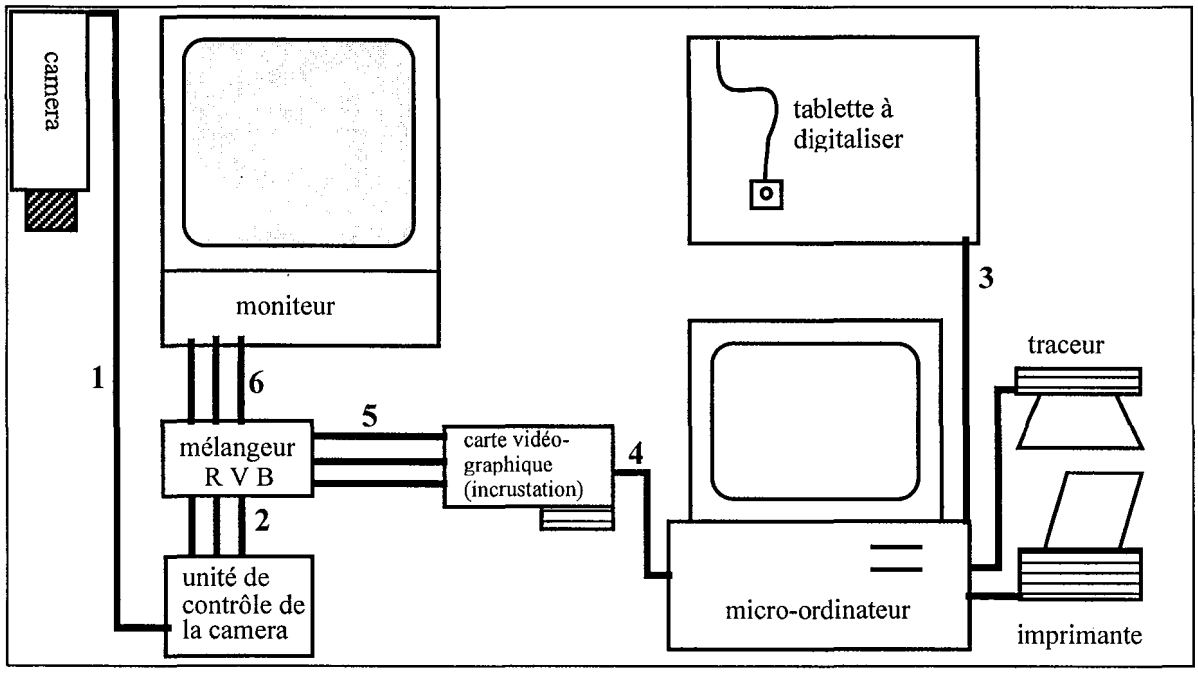


Fig. II-4 : Système d'incrustation vidéographique (Lapique et al., 1988).
L'image de la caméra (1) est convertie (2) en ses composantes R.V.B. Le tracé sur la tablette à digitaliser (3) est géré par la carte vidéographique (4). Les images (5) et (2) sont mélangées en une image R.V.B. unique (6) visualisée sur le moniteur.

III. 1 .2- Principe de la mesure

Toutes les mesures ont été effectuées sur des lames épaisses (polies double face) taillées dans des échantillons orientés et dans la majorité des cas dans le plan horizontal. Une fois la lame montée sur la platine, et la mise au point faite, deux droites sont tracées : une qui va servir de droite de référence pour la direction qui, dans la base de données brutes, se voit attribuer la direction N0°E. On prend généralement le bord de la lame dont on connaît la direction. Les valeurs sont ainsi corrigées. La deuxième droite sert de facteur d'échelle. Grâce au micromètre on dessine sur un papier libre une droite dont on connaît la longueur. A chaque fois qu'on change d'échantillon on digitalise ces droites, qui sont spécifiques à chaque grossissement.

Pour les structures linéaires, deux points sont digitalisés correspondant aux deux limites de la structure, et les résultats sont présentés sous forme de tableau de fréquences des différentes directions, regroupées par classes dont l'intervalle est défini à l'avance. Certaines structures telles que les veines sont assimilées à des structures linéaires, en digitalisant soit les épontes soit une direction moyenne qui correspond à une droite médiane.

Pour les structures planaires, une fois que les deux points qui correspondent à la direction sont digitalisés on suit en profondeur ou en surface la propagation de la structure. Le troisième point est ainsi digitalisé dans le plan de la structure. Le déplacement est directement mesuré grâce à un boîtier connecté au moteur de la platine et au micro-ordinateur qui intègre la distance parcourue depuis la digitalisation de la droite de direction ce qui permet de calculer, grâce à des logiciels de trigonométrie, l'angle d'inclinaison du plan qui correspond au pendage.

D'après Lapique *et al.* (1988), la résolution de la caméra, la définition du moniteur (taille du pixel = 0.31 mm) et la précision de la tablette de digitalisation permettent pour un trait d'un pixel un déplacement minimal de 0.5 mm et la précision est de l'ordre de 2 %. Cependant, pour des mesures en trois dimension, le pendage des structures subhorizontales (<35°) ne peuvent être mesuré, ce qui correspond sur les stéréogrammes à une zone centrale aveugle (Lespinasse, 1991). On accordera dans la suite beaucoup plus d'attention aux directions qu'aux pendages. Dans le cas de familles de plans peu pentés, des lames dans de plans choisis non horizontaux peuvent permettre de résoudre ce problème.

Pour chaque structure on mesure, ainsi, la direction, le pendage, la longueur et la largeur du plan. Les données récupérées sont alors prêtes pour des traitements statistiques grâce aux différents logiciels de stéréographie.

III. 1 .3- Principe des plans d'inclusions fluides (PIF)

Le plan d'inclusions fluides (PIF) consiste en une fracture microscopique ouverte dans un minéral hôte colmatée par des fluides sous forme d'inclusions. Ces PIF sont considérés comme fractures de mode I (Atkison, 1987) qui se développent dans le plan σ_1-σ_2 formant, donc, des plans dont la géométrie est liée aux principales directions de contraintes (Tuttle, 1949 ; Wise, 1964 ; Lespinasse et Pêcher, 1986 ; Lespinasse, 1991). Elles correspondent à des structures parallèle à l'axe σ_1 et perpendiculaire à l'axe σ_3 (Lespinasse 1999 ; André, 2000).

La combinaison de l'étude de la géométrie des plans d'inclusions fluides et la microthermométrie est technique qui a fait ses épreuves, où les plans d'inclusions fluides sont considérés comme outil microstructural permettant de reconstituer les paléocontraintes (Lespinasse et Pêcher, 1986 ; Kowallis *et al.*, 1987 ; Laubach, 1989 ; Ren *et al.*, 1989 ; Cathelineau *et al.*, 1990 ; Cathelineau *et al.*, 1994 ; Lespinasse 1999).

III. 2- DONNEES MICROSTRUCTURALES

III. 2. 1- Analyse microstructurale dans les gneiss et les micaschistes

III. 2. 1. 1- Description

La majorité des échantillons récoltés dans ce type de faciès correspondent à des lentilles ou rods de quartz d'exsudation, sauf dans les orthogneiss de la carrière Lama.

III. 2. 1. 1. 1- Vallée de l'Isle
(lentille de quartz dans des micaschistes à sillimanite CFM31)

Il s'agit d'un quartz clair composé de grands cristaux (1-3 mm) qui développent des phénomènes de recristallisation sur les bordures et le long de certaines fractures à extension limitée. Ce quartz est affecté d'un réseau intense de fractures, et recoupé par de petites veinules micromillimétriques à millimétriques colmatées par des feldspaths.

Les inclusions fluides y sont réparties en trois groupes différents :

(i) plans à inclusions aqueuses plus ou moins homogènes à remplissage gazeux d'environ 20 % et dont la taille peut atteindre 25 μm ;

(ii) inclusions aqueuses en plages diffuses, qui par endroit retracent les limites de joints de grains. Le remplissage gazeux de ces inclusions est de l'ordre de 20 à 30 % et leur taille peut atteindre 30 μm ;

(iii) inclusions fluides de petite taille dépassant rarement les 10 μm, organisées en plans secondaires qui se branchent sur des plans plus anciens (Fig. II-5), avec lesquels ils forment un angle de 45 à 50°. Ce genre de structures est souvent considéré comme la preuve d'un remaniement tectonique (Boullier, 1999 ; Touret, 2001).

La projection des pôles des plans d'inclusions fluides dans un stéréogramme (Fig. II-6.a), met en évidence deux directions principales, la plus fréquente étant la direction N50-70°E ; la seconde varie entre N110° et N120°E. Le pendage dans les deux cas va de 50°N jusqu'aux structures plates. Seuls des plans, assez raides, appartenant à la deuxième direction, montrent des structures de remaniement tectonique. Les inclusions qu'ils renferment ne se différencient de celles des autres PIF que par leur très petite taille ($\leq$ 10 μm).

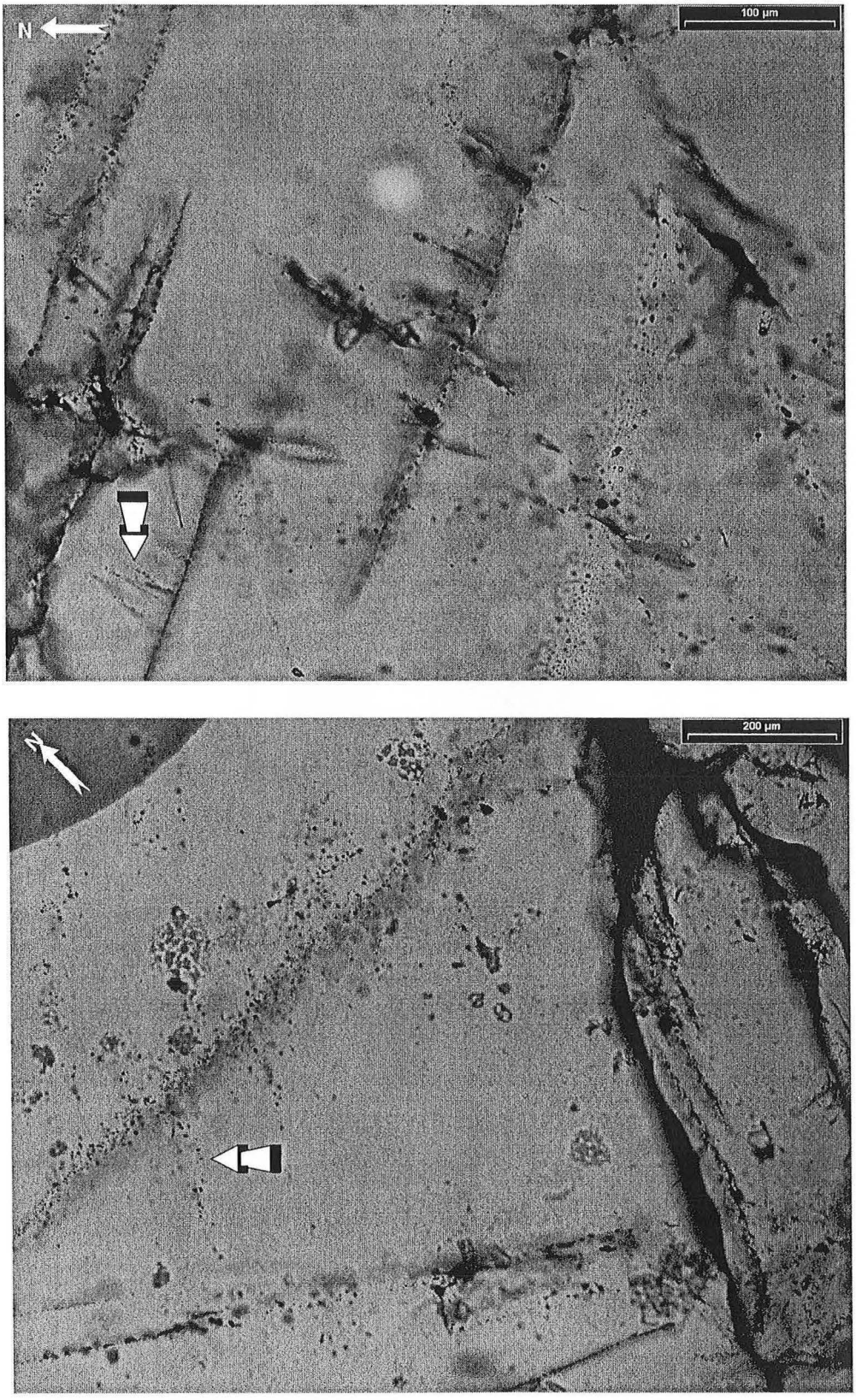


Fig. II-5 : Photographies montrant des structures de remaniement tectonique dans la lentille de quartz CFM31, les flèches pointent les directions secondaires.

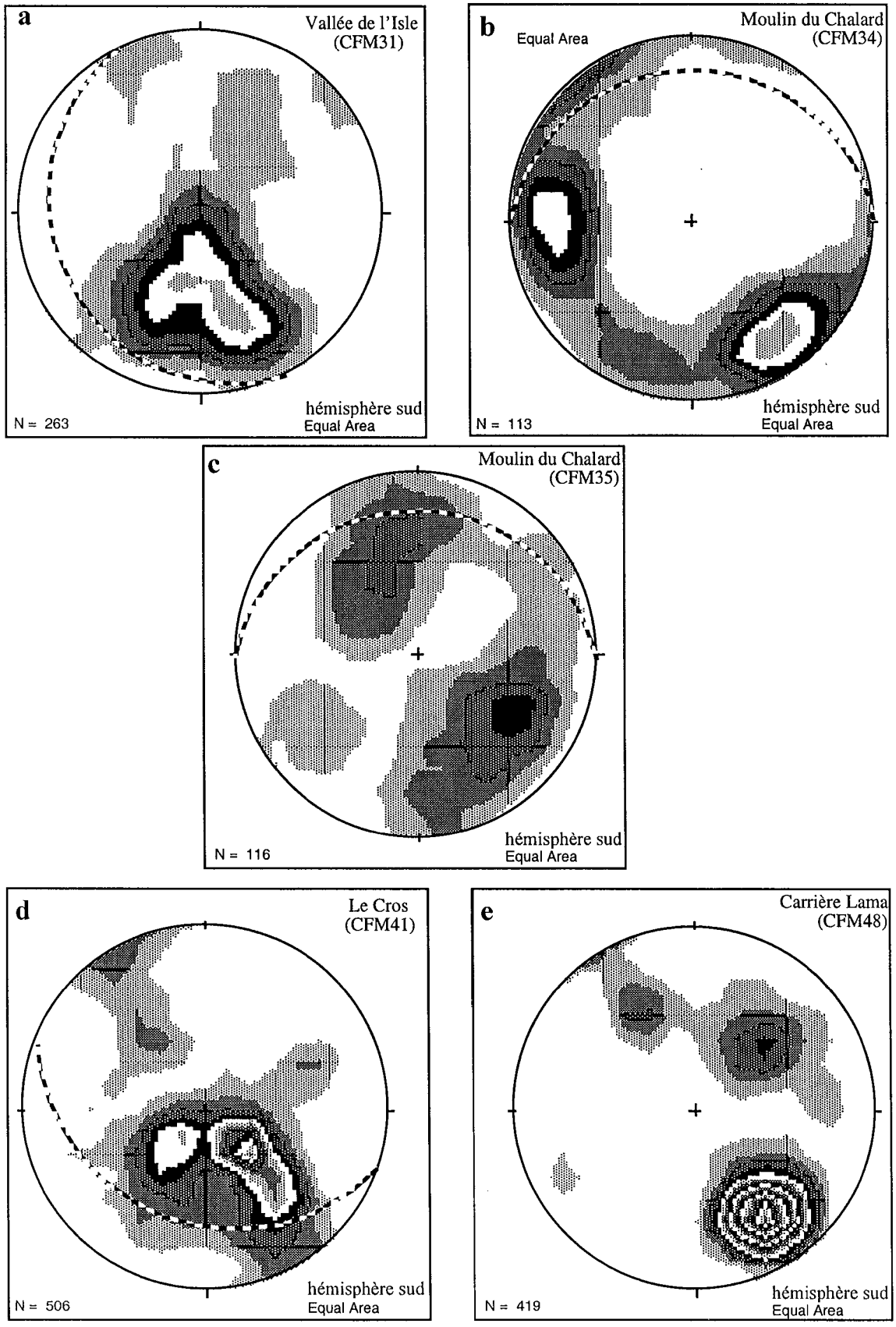


Fig. II-6 : Stéréogrammes des isodensités des pôles de PIF et les traces cyclographiques de la schistosité dans les différentes lentilles de quartz des gneiss et micaschistes.

III. 2. 1. 1. 2- Moulin du Chalard

Dans la zone du moulin du Chalard, ont été prélevées deux lentilles "d'exsudation" plissées, l'une à quartz- feldspaths (CFM34) et l'autre uniquement à quartz (CFM35).

L'échantillon CFM34

Cet échantillon est constitué par de gros grains de quartz (4-8 mm) limpide, pas très déformés avec des recristallisations dans les joints de grains. Cette recristallisation est antérieure à un réseau de microfractures entrecroisées qui affectent l'ensemble de l'échantillon.

La répartition statistique des différents plans d'inclusions fluides laisse apparaître trois directions principales (Fig. II-6.b). Une direction NE-SW, dont les valeurs les plus fréquentes sont comprises entre N50°E et N70°E avec un pendage vers le Nord et dont la valeur varie entre 60° et 80°, mais on note la présence de quelques plans de mêmes directions avec plongement plutôt vers le Sud. Le deuxième groupe, moins fréquent que le premier, correspond à une direction N-S (N170°E - N10°E) à pendage Est variant entre 60° et 80°. Quant au troisième groupe, très rare, il est représenté par une direction moyenne d'environ N110°70N. Les différents PIF de cet échantillon ont un pendage subvertical et sont colmatés par des inclusions fluides biphasées, relativement homogènes, la taille moyenne varie entre 10 et 15 μm et le remplissage gazeux est de l'ordre de 10 à 20 %.

L'échantillon CFM35

L'échantillon est constitué par des cristaux de quartz dont la taille peut atteindre 5 mm, ils sont cimentés par un quartz de recristallisation. L'ensemble est affecté par une intense fracturation macroscopique (N-S) et microscopique (NE-SW) qui correspond à des plans d'inclusions fluides moins marqués. Sur le stéréogramme des isodensités des pôles de PIF (Fig. II-6.c) on constate que la direction couvre une gamme relativement large, elle va de N35 °E jusqu'à N70°E avec un pendage moyen relativement constant aux alentour de 50-55 °N et S. Ces plans renferment des inclusions biphasées aqueuses, plus ou moins arrondies, de taille moyenne (15-20 μm) et un remplissage gazeux de l'ordre de 10 à 20 %. Certains PIF de cette direction contiennent des inclusions fluides triphasées avec un remplissage gazeux d'environ 25 % et une taille qui peut atteindre 30 μm

Les fractures macroscopiques, qui semblent recouper les précédentes, sont associées à une circulation tardive avec des plans qui contiennent des inclusions fluides de taille

variable (< 15 µm), leur forme est irrégulière avec des contours anguleux, elles ont parfois une forme annulaire.

III. 2. 1. 1. 3- **Point coté 319** (CFM40)

Il s'agit d'une lentille de quartz dans des micaschistes, où se développe une schistosité à N175°-10E. Elle est constituée par des cristaux de quartz qui peuvent atteindre une taille 8 mm, ils sont intensément déformés cimentés par une matrice quartzeuse à grain très fin micrométrique.

Ces grands cristaux sont affectés par une fracturation très intense de direction relativement variable. Trois directions de plans d'inclusions fluides ont été observées. La direction principale est E-W, suivie par la direction NE-SW, moins fréquente et une direction mineure entre N0°E et N20°E. Les différents PIF renferment des inclusions fluides biphasées de taille et de forme variables ; certaines atteignent 25 à 30 µm avec un remplissage gazeux relativement faible (entre 10 et 20 %), cependant quelques rares inclusions peuvent atteindre des remplissages entre 50 et 70 %.

Cet échantillon est traversé par des veinules de quartz plus sombre (quartz gris), d'une ouverture d'environ 2 mm et dont la direction est 50-70°E. L'examen en détail de ces veinules, qui semblent très tardives, a permis de constater un remplissage en deux étapes, avec en premier lieu la croissance d'un quartz gris, automorphe en aiguilles fines perpendiculaires aux parois de la veine avec des inclusions de très petite taille. La deuxième étape correspond au développement d'un quartz limpide au cœur des veinules associé à des sulfures (pyrite?), il s'agit d'un quartz de recristallisation avec des inclusions fluides biphasées de 15 à 20 µm avec un remplissage gazeux avoisinant les 20 %. Dans cette direction on observe des couloirs de circulations tardives accompagnées par la recristallisation d'un quartz microcristallin.

III. 2. 1. 1. 4- **Le Cros**
("rod" de quartz dans des schistes à disthène et sillimanite CFM41)

Il s'agit d'un quartz limpide à grains millimétriques affectés par des fractures qui renferment par endroit des inclusions biphasées aqueuses de forme sensiblement arrondie ou anguleuse. Leur taille est d'environ 15 µm et leur remplissage gazeux est faible, il est de l'ordre de 10 à 15 %. Ces PIF se développent essentiellement selon une direction NE-SW (Fig. II-6.d) avec un pendage relativement faible allant de 30°W jusqu'à environ 50°NW. Quelques rares inclusions biphasées, voire triphasées, avec un fort remplissage gazeux

(entre 50 et 80 %) et une taille d'environ 20 µm, constituent des PIF avec les mêmes caractéristiques géométriques que les précédents mais aussi des PIF à N110-130°E et un pendage moyen à 20°N.

III. 2. 1. 1. 5- **Carrière Lama** (CFM48 : quartz de "pull apart")

La phase quartzeuse est constituée par des cristaux de quartz clair de taille variable avec un contour irrégulier et anguleux pouvant témoigner d'une déformation plastique. Ces cristaux sont cimentés par une matrice quartzeuse à grain fin (pluri-micrométriques).

Les joints de grains et sous-joints (Fig. II-7) sont soulignés par des inclusions fluides de très petite taille (≤ 6 µm), monophasées et biphasées, montrant des figures de décrépitation très fréquentes. De nombreux PIF recoupent les grains de quartz déformés.

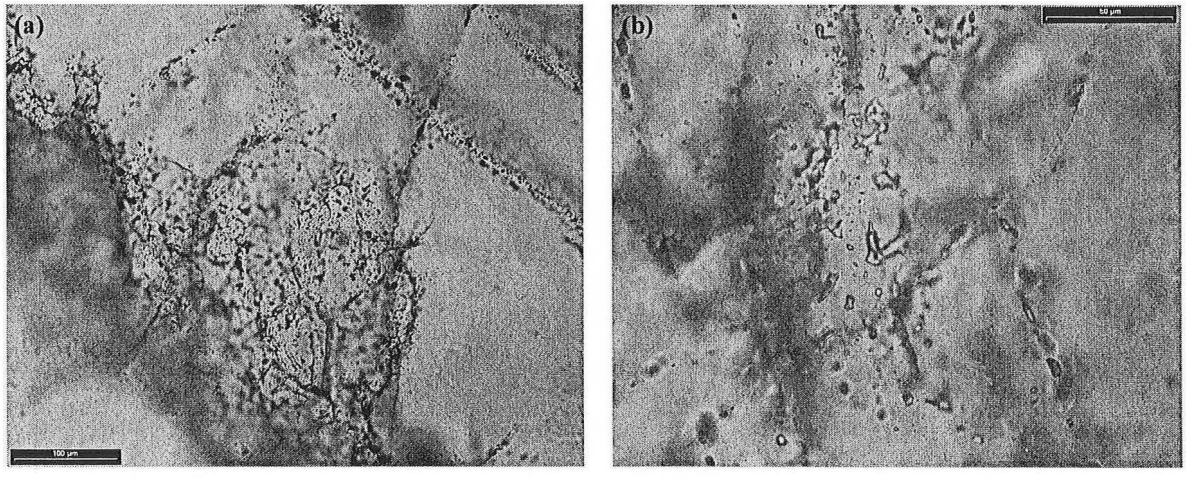


Fig. II-7 : Photographie des joints de grains (a) avec des figures de décrépitation (b) dans le quartz (CFM48).

A partir du stéréogramme (Fig. II-6.e) des isodensités des pôles de plans d'inclusions fluides, on distingue une direction principale aux alentours de N60°E avec un angle de pendage de 60° essentiellement vers le Nord et quelques rares plans qui plongent vers le Sud. Ces PIF renferment des inclusions fluides biphasées de taille moyenne et de faible remplissage gazeux (environ 15%). Un deuxième type de PIF, très rare par rapport au précédent, est constitué par des inclusions fluides anguleuses avec un remplissage gazeux assez important (30 à 40 %), une petite taille, généralement inférieure à 10 µm et un contour irrégulier. Ces PIF ont une direction moyenne de N135° - 45°W.

III. 2. 1. 2- Synthèse (Fig. II-8)

De façon remarquable, à l'échelle régionale, les directions majeures de PIF sont peu dispersées (Fig. II-8). Il apparaît un groupe de directions largement prédominantes. La direction (N50-70°, 50-70°N) est dominante, les (N110-130°, 20-30°N) ; (N170-30°, 70W-60°E) ; (N80-110°, 70°N/S) sont présentes mais moins fréquentes ; enfin, la direction (N140-160°, 70°E) est très rare.

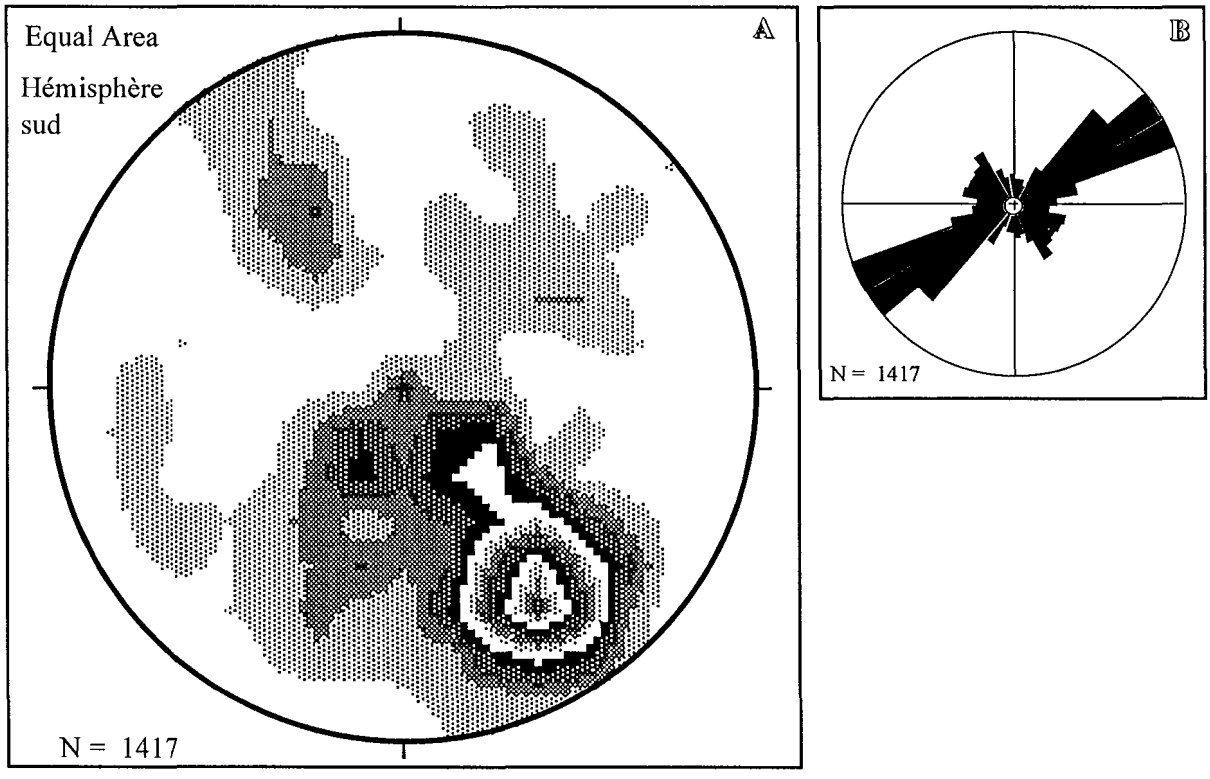


Fig. II-8 : Stéréogramme des isodensités des pôles des PIF (A) et rosace des direction des PIF (B) dans l'ensemble des "rods" de quartz des gneiss et micaschistes.

III. 2. 2- Analyse microstructurale dans les pegmatites

III. 2. 2. 1- Description

III. 2. 2. 1. 1- La vallée de l'Isle
(CFM29: pegmatite à quartz et feldspaths potassiques, sécante sur les micaschistes)

Les feldspaths, très altérés, sont affectés par des fentes de tensions de direction globalement N-S, remplies par du quartz microcristallin. A ces fentes sont associés quelques couloirs de cisaillement dextres à N160°E, déformant les micas. Les gros cristaux de quartz (≥ 1 mm) (voir Fig. II-3 A) limpides sont affectés par des fractures colmatées par des inclusions biphasées de taille variable qui pour certaines peuvent atteindre 30 µm. La statistique de la répartition des pôles des PIF (Fig. II-9.a) permet de distinguer deux groupes.

Un premier groupe couvrant une large gamme de direction N-S qui va de N170°E à N30°E avec un pendage subvertical vers l'ouest, contient des inclusions à faible remplissage gazeux (5-15 %).

Le deuxième groupe correspond à des PIF dont la direction est relativement constante, comprise entre N155°E et N165°E avec un pendage fort de l'ordre de 60° à 70° vers l'Est le plus souvent, et des inclusions fluides caractérisées par un remplissage gazeux très variable qui peut dans certains cas atteindre 70 % du volume total. Les PIF sont parallèles aux joints de tension dans les feldspaths et, dans certains cas, les prolongent.

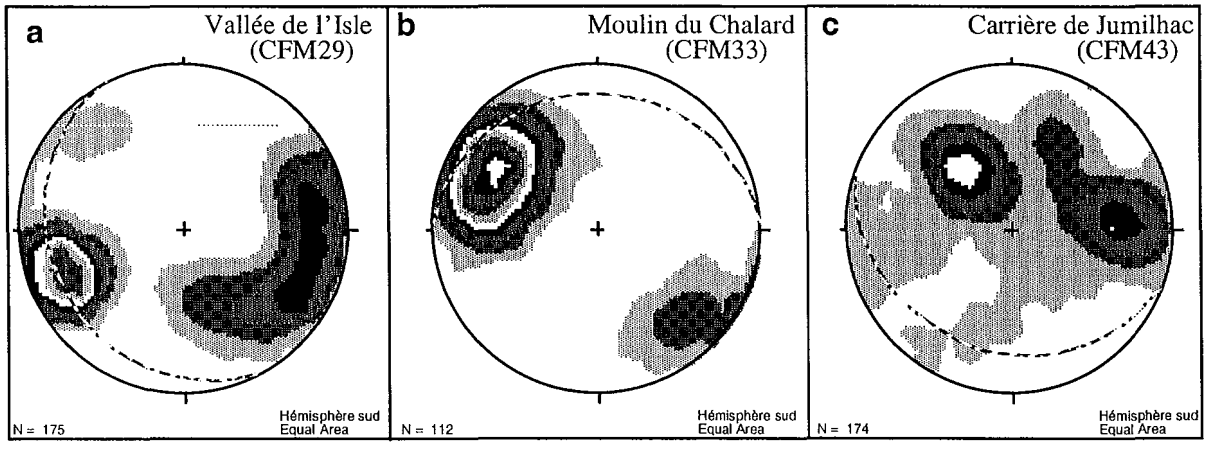


Fig. II-9 : Stéréogrammes des isodensités des pôles de PIFet les traces cyclographiques de la schistosit dans les différents échantillons de pegmatites.

III. 2. 2. 1. 2- **Moulin du Chalard** (CFM33)

Il s'agit d'une pegmatite très riche en feldspaths, moins altérés que ceux de la pegmatite de la vallée de l'Isle (CFM29), présentant encore des zones fraîches et des plans de clivage bien visibles. Les micas sont tordus et plaqués entre les gros cristaux de quartz, témoignant donc d'une déformation.

Le quartz se présente sous forme de gros cristaux très limpides avec des contours effacés par un quartz fin très clair qui correspond probablement à un quartz de recristallisation. L'ensemble est affecté par une fracturation globale selon une direction NE-SW très réglée : PIF entre N30° et N45°E (Fig. II-9.b) avec un angle de pendage de l'ordre de 60° généralement vers le SE. Ces PIF renferment des inclusions fluides biphasées de grande taille qui peut atteindre parfois 35 µm, leur remplissage gazeux est moyen (10 à 30 %).

III. 2. 2. 1. 3- Carrière de Jumilhac (CFM43)

Les feldspaths sont très abondants surtout au contact de l'encaissant où ils sont très altérés. Le quartz se présente soit sous forme de grains de grande taille (2 à 3 mm) plus ou moins automorphes soit sous forme de grains fins limpides qui remplissent des veines qui se développent au contact des leptynites. A ce dernier quartz sont associés des chlorites très discrètes localisées généralement aux épontes mais aussi au cœur des veines. Ces chlorites, qui sont orientées selon une direction E-W, cohérente avec celle de la schistosité à N110°-25S observée à l'échelle macroscopique, sont donc vraisemblablement synchrones de l'aplatissement des pegmatites. Les plans d'inclusions fluides ont deux groupes de direction (Fig. II-4. a). Une première direction majeure à environ N40°E à N60°E et un pendage moyen de 30 à 45°SE, les inclusions de ces plans sont de forme irrégulière avec quelques phénomènes d'étranglement ("necking-down"), elles sont de petite taille 10 à 15 µm et le remplissage gazeux est relativement faible, il est d'environ 10 %.

La deuxième direction varie entre N165°E et N05°E avec un pendage de l'ordre de 50 à 70° vers l'ouest. Dans ce cas les inclusions fluides sont de grande taille, elle peuvent atteindre 40 µm, la forme est régulière et le taux de remplissage est un peu plus élevé que celui du premier groupe, il avoisine les 20 %.

III. 2. 2. 2- Synthèse

La direction prédominante est N170-30°, 70W-60°E, qui est parallèle aux joints de tensions dans la vallée de L'Isle (CFM29), suivie par la direction N50-70°, 50-70N° et la direction N140-160°, 70°E.

Dans les pegmatites on remarque la présence des mêmes directions de PIF que dans les gneiss et micaschistes, mais pas avec les même fréquences. Il faut, toute fois, souligner la rareté des PIF à N50°E et le pendage inversé (Fig. II-10) dans le cas de la pegmatite de Jumilhac (CFM43). Etant donné que cette pegmatite est plissée, on peut supposer (dans le cas où l'échantillon serait dans un flanc inverse) qu'il s'agit de plans anté-aplatissement dont le pendage a été inversé par effet de miroir lors de l'aplatissement de la pegmatite ; mais cette hypothèse devrait être confirmée avant d'en tirer la conclusion que les PIF à N50°E sont précoces dans le Sud Limousin.

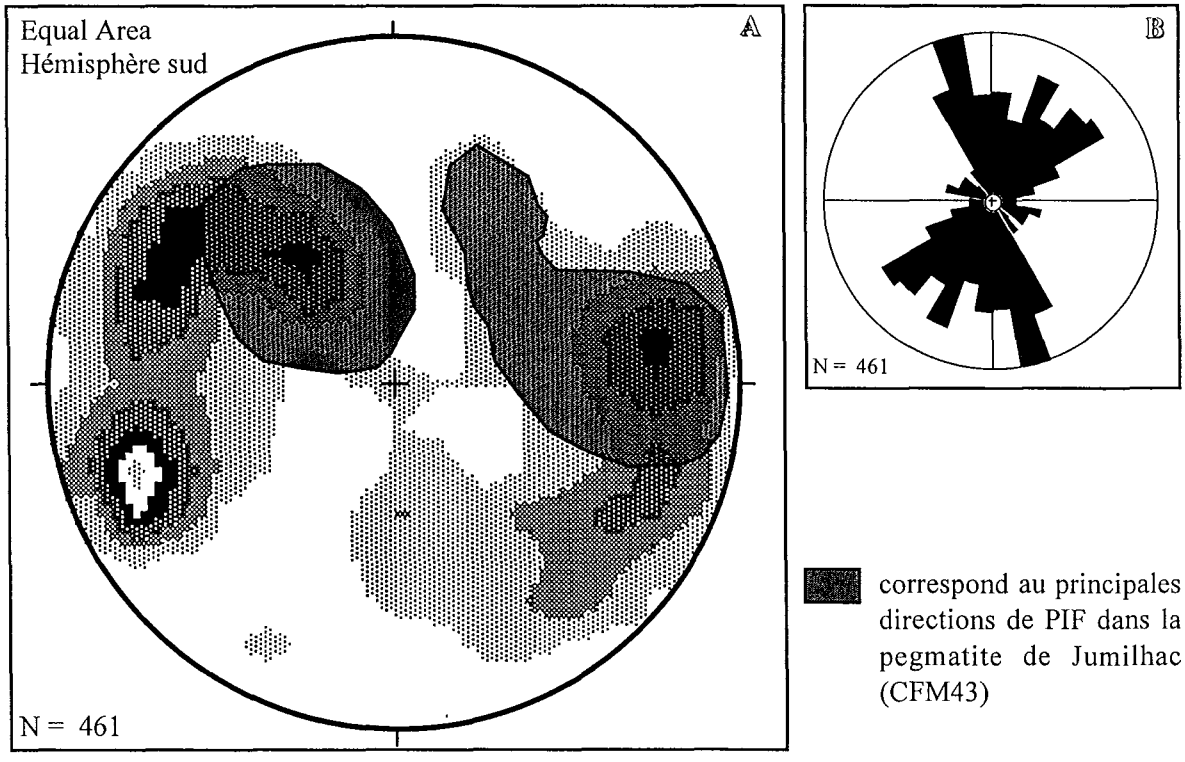


Fig. II-10 : Stéréogramme des isodensités des pôles de PIF (A) et rosace des direction de PIF (B) dans l'ensemble des pegmatites.

III. 2. 3- Analyse microstructurale dans les granites

III. 2. 3. 1- Description

III. 2. 3. 1. 1- La vallée de l'Isle (CFM28)

Il s'agit d'un granite à grain fin, rosâtre. Les feldspaths potassiques (Fig. II-11), automorphes, sont très altérés selon les plans de clivages et parfois le long de fractures obliques. Les micas se présentent sous forme de petites paillettes de muscovite dont quelques unes sont kinkées. Quant au quartz, on observe un premier type à forme relativement régulière, à cœur "sale" et à bordures plus claires. Le deuxième type correspond à un quartz limpide à contours onduleux, bien nettoyé, c'est probablement un quartz de recristallisation.

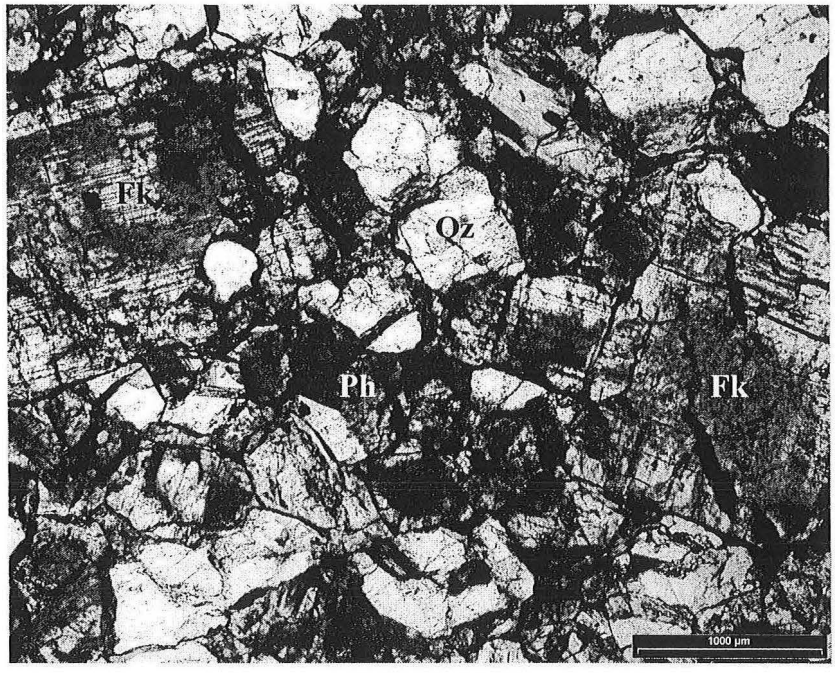


Fig. II-11 : Photographie d'une lame épaisse prise dans le granite de la vallée de l'Isle, Qz : Quartz, Fk : Feldspaths potassiques, Ph : Phengite.

Les inclusions fluides sont monophasées et biphasées, leur forme est généralement allongée et anguleuse avec une taille variant de 10 à 20 µm et un remplissage gazeux homogène de l'ordre de 20 %. Elles sont en PIF intergranulaires, mais les joints de grains sont parfois soulignés par de petites inclusions biphasées. On note l'absence d'inclusions fluides magmatiques primaires.

Le stéréogramme des isodensités (Fig. II-12.a) montre une direction principale N100°E à N130°E avec un pendage vers le nord mais selon un angle très variable, les valeurs les plus représentées se situent entre 20 et 60°. D'autres directions moins représentées indiquent des directions à N30°E et N170°E et des forts pendages, respectivement, vers le SE et l'ouest.

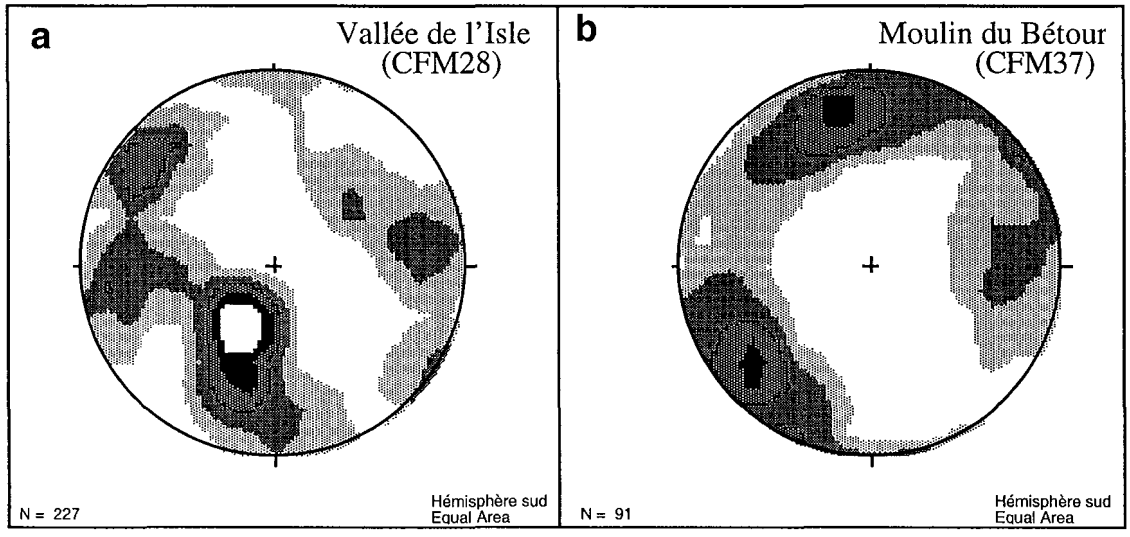


Fig. II-12 : Stéréogrammes des isodensités des pôles de PIF dans les différents échantillons de granites

III. 2. 3. 1. 2- Le moulin du Bétour (CFM37)

Il s'agit d'un leucogranite subalcalin à grain moyen et à biotite et muscovite (leucogranite du Chalard). Il est constitué par des gros cristaux de feldspaths dont l'altération est très accentuée, elle se développe parfois selon des plans obliques. Les micas sont représentés par des muscovites sous forme de grosses paillettes automorphes et de rares biotites, de petite taille. On note l'apparition de la chlorite qui se développe dans des veines tardives associée à un quartz limpide qui se présente sous forme de grandes plages ou de cristaux très fins issus d'une recristallisation tardive. Les inclusions fluides sont soit dans les joints de grains, où elles sont de faible taille soit dans des plages horizontales ou organisées en PIF, et sont alors biphasées de taille variable de 10 à 20 µm et de faible remplissage gazeux. Le stéréogramme de la figure II-12.b indique un angle de pendage des

PIF très fort (environ 70°) et deux gammes de direction, une à environ N80°E avec un pendage vers le sud et une deuxième correspondant à une direction moyenne d'environ N140°E et un pendage vers le NE et pour quelques rares plans vers le SW. On peut remarquer que ces deux groupes de direction ne sont pas déconnectés et qu'il y a un certains nombre de directions intermédiaires entre les deux.

III. 2. 3. 2- Synthèse (Fig. II-13)

Les granites sont différents des pegmatites et des micaschistes, avec une direction principale (N170-30° 70°W/60°E), qui caractérise surtout le granite de la vallée de l'Isle. Les directions (N80-110° 70°N/S), (N140-160° 70°E) et (N110-130° 20-30°N) sont présentes mais en faible fréquence. On note que la direction (N110-130° 20-30°N) correspond à des plans perpendiculaires au pendage des filons de granite de la vallée de l'Isle (CFM28).

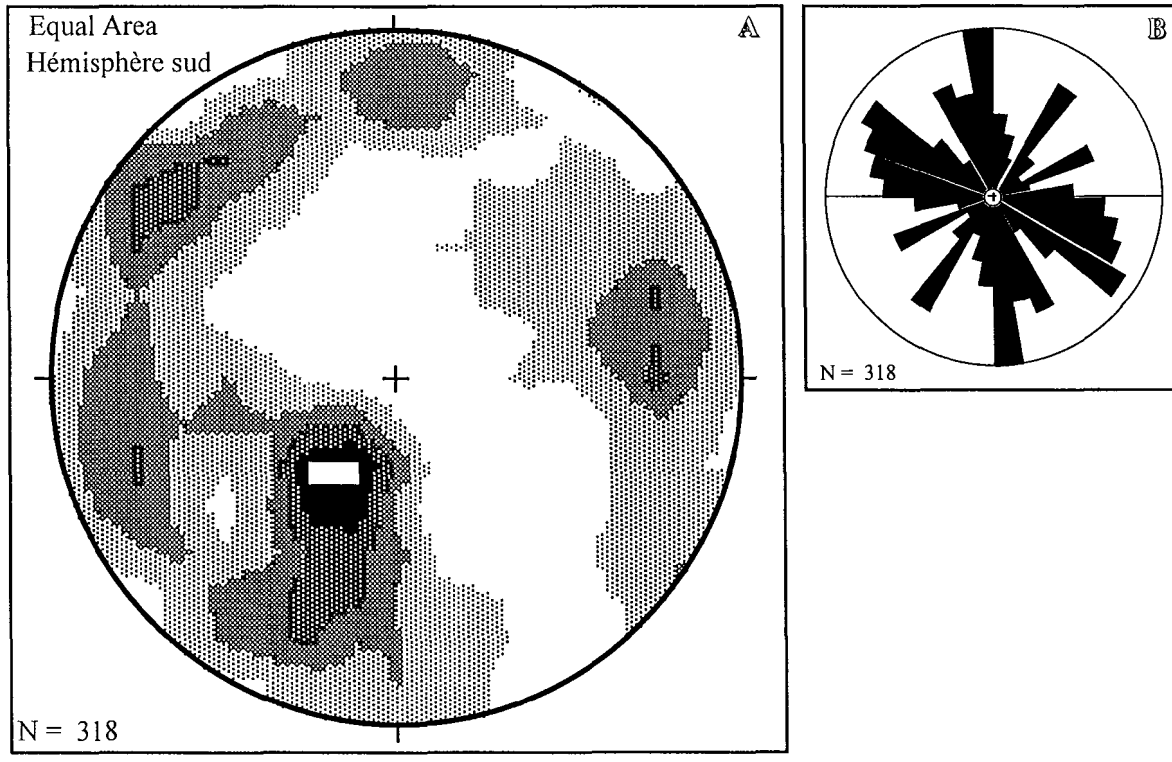


Fig. II-13 : Stéréogramme des isodensités des pôles de PIF (A) et rosace des direction de PIF (B) de l'ensemble des granites.

III. 3- CONCLUSION

Sur la figure II-14 on peut voir que la direction NE-SW est principalement développée dans les quartz métamorphiques, où elle constitue la direction la plus fréquente. Mis à part la lentille du moulin du Chalard (CFM34) la direction N-S est relativement rare dans les roches métamorphiques, mais elle est fréquente, surtout, dans les pegmatites et les granites.

Indépendamment de la nature des roches étudiées, le pendage des PIF dans la majorité des cas est subvertical (fig.II-14 B), toutefois, ces PIF sont peu pentés (20-30°) dans le granite de l'Isle (CFM28) et dans la lentille de quartz du Cros (CFM41).

Le caractère assez homogène des séries métamorphiques dans le district nous permet de nous affranchir du problème de la réorientation, locale, des contraintes, et donc, pouvoir comparer nos résultats de l'étude microstructurale avec ceux obtenus dans les gisements d'or. Le tableau synthétique de la Fig. II-15, souligne l'identité fondamentale des caractéristiques de la microfracturation dans les gisements d'or et leur encaissant proche (Lauriéras : Essarraj, 1992 ; Chéni : Vallance *et al.*, 2000) et dans l'encaissant régional (ce travail), du moins en termes de direction. Si on s'intéresse aux fréquences, en revanche, plusieurs différences apparaissent :

- Les micaschistes montrent surtout la direction N50-70°E, qui est, en revanche, absente des granites de la vallée de l'Isle (CFM28) et du moulin du Bétour (CFM37), ce qui contraste curieusement avec la situation aux épontes de Cheni. Dans la mesure où l'hypothèse sur le caractère précoce de cette direction dans les pegmatites de Jumilhac serait validée, on pourrait spéculer sur l'âge relatif des différentes générations de granites par rapport à l'expression de cette direction ;

- les directions N-S sont surtout dans les granites et pegmatites ;

- les directions E-W sont surtout dans les veines à quartz minéralisées.

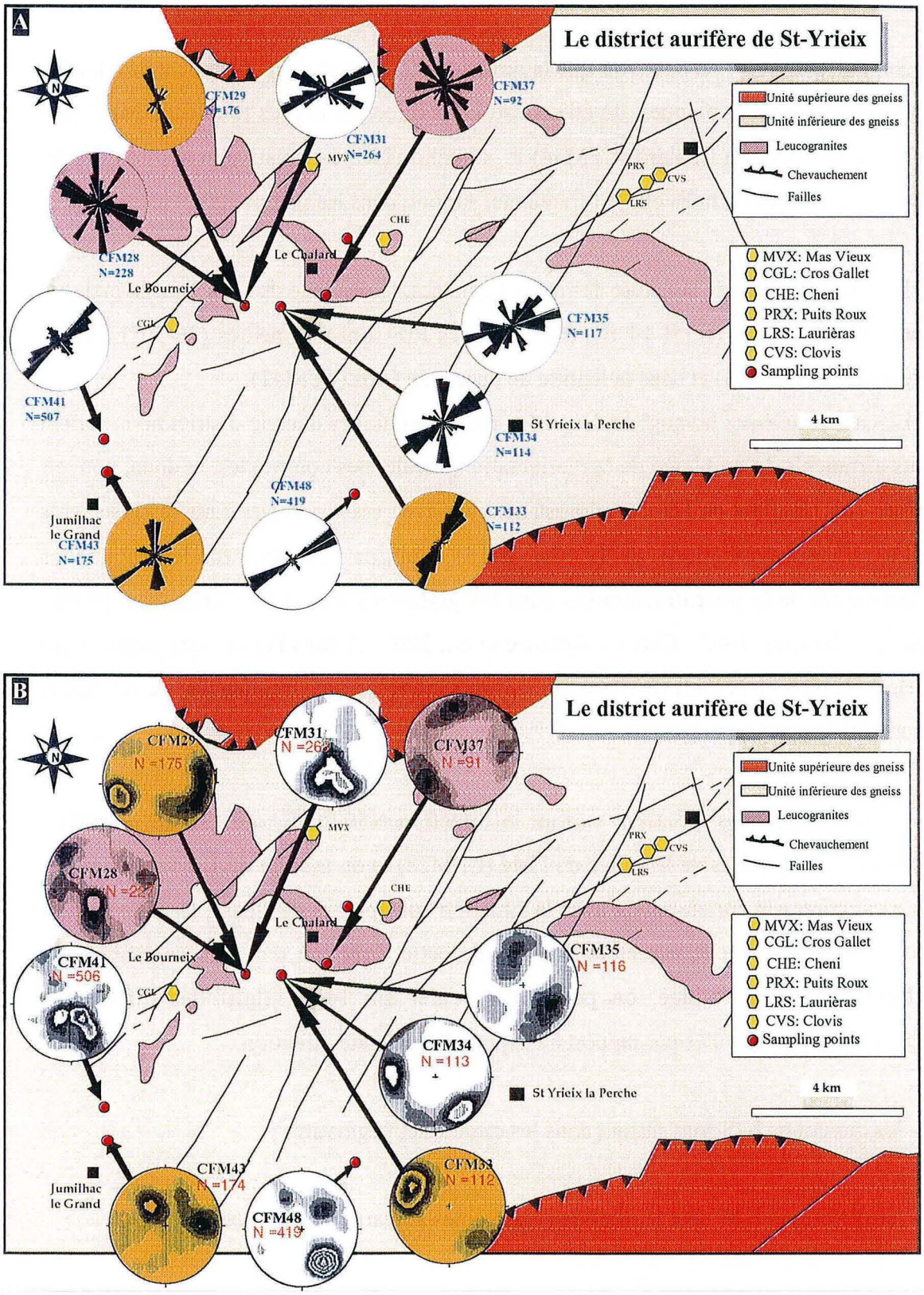


Fig. II-14 : Statistique des PIF dans l'encaissant régional du district de St-Yrieix, A) rosaces des orientations des PIF ; B) stéréogrammes des isodensités des pôles de PIF (hémisphère sud)

En blanc les lentilles de quartz dans les roches métamorphiques, en jaune les pegmatites et en rose les granites.

Faciès / Direction	M. de Cheni	Lauriéras		Encaissant régional		
	Veines de quartz & granite	Veines de quartz	Gneiss encaissant	Micaschistes Gneiss	Pegmatite	Granites
N50-70, 50-70N (1)	+++	–	+++	+++	++	–
N110-130, 20-30N	–	–	–	+	–	+
N140-160, 70E	++	–	+	ε	+	+
N170-30, 70W/60E (2)	–	+	–	+	+++	+++
N80-110, 70N/S (3)	–	+++	–	+	–	+

+++ Abondant
++ moyen
+ Faible
ε En trace

(1), (2), (3) Ordre chronologique d'apparition des PIF
Essarraj, 1992
Vallance *et al.*, 2000
Ce travail

Fig. II-15 : Tableau synthétique de la géométrie et la fréquence des plans d'inclusions fluides dans les différents types de matériaux dans le district aurifère de St-Yrieix (structures aurifères, leur encaissant immédiat et régional).

CHAPITRE III

LES FLUIDES REGIONAUX DU SECTEUR DE ST-YRIEIX : ETUDE DES INCLUSIONS FLUIDES

I- METHODOLOGIE DE L'ETUDE DES INCLUSIONS FLUIDES

Les inclusions fluides sont des cavités intracristallines de taille micrométrique, où sont piégés des fluides qui témoignent des circulations au cours de l'histoire géologique.

Les fluides piégés peuvent être synchrones à la formation du minéral hôte, il s'agit en l'occurrence d'inclusions fluides primaires, ou ils sont postérieurs (car ils accompagnent généralement la déformation), à ce moment on qualifie les inclusions fluides de secondaires. Un troisième type d'inclusion fluide intermédiaire consiste en un fluide piégé dans des fractures (dites pseudo-secondaires) ouvertes avant la fin de la cristallisation du minéral hôte. Ces inclusions peuvent se présenter sous forme de plans dont l'extension ne dépasse pas les limites de grains. Dans certains cas, la différence entre les inclusions fluides secondaires et pseudo-secondaires n'est pas évidente, si on ne se base que sur l'ampleur de la fracture, vu que certains plans d'inclusions secondaires sont de longueur très réduite et ne dépassent donc pas la limite de grain.

I. 1- LA MICROTHERMOMETRIE

I. 1. 1- Principe de la microthermométrie

La microthermométrie est une technique non destructive, primordiale pour toute étude d'inclusion fluide. Elle consiste en des mesures, sous microscope, des températures de changement de phases du fluide dans les microinclusions, ceci en faisant varier la température entre -180°C et 600°C.

La microthermométrie est basée sur le principe d'évolution isochore et isochimique (Roedder, 1984), selon lequel les inclusions fluides sont considérées comme des microcavités étanches et dont le volume reste constant, à condition que la température appliquée ne dépasse pas la température de solubilité du minéral hôte et que la pression interne ne dépasse pas 0.3 à 0.5 kbar pour les minéraux tendres et clivables (Weisbrod *et al.*, 1987). Dans le cas du quartz la pression interne est fonction de la forme et de la taille des inclusions fluides (Leroy, 1979 ; Bodnar *et al.*, 1989) selon la relation $\mathbf{PI = 4.26\ D^{-0.423}}$, où le terme D correspond au diamètre de l'inclusion fluide (1-100 μm) et PI est la pression interne à partir de laquelle l'inclusion devrait décrépiter, mais certaines inclusions peuvent résister à des différences de pression de l'ordre de 2 kbar comme dans le cas de décompression rétrograde (Vityk et Bodnar, 1995). Dans ces conditions, le fluide préserve ses propriétés physico-chimiques durant tous les cycles de refroidissement et de chauffage.

I. 1. 2- Les températures mesurées

La microthermométrie balaye un large intervalle de température correspondant à différents types de changements de phases. Les températures les plus mesurées dans ce travail sont :

TfCO_2 (Température de fusion du CO_2) : Elle correspond à l'apparition de CO_2 liquide (transition solide- liquide). Il s'agit de la température du point triple du CO_2 qui est de -56.6°C dans le cas de CO_2 pur. La présence d'autres volatils (CH_4, N_2, H_2S, ...) abaisse cette température (Roedder, 1984).

Te (Température eutectique) : elle correspond au début de la fusion de la glace lors du chauffage de l'inclusion gelée. Cette température peut donner des renseignements, qualitatifs, sur la nature des sels dissous dans la solution liquide. En pratique, la température eutectique est très délicate à mesurer, puisqu'elle correspond à l'apparition de la première goutte du liquide que la résolution des microscopes classiques ne permet pas souvent d'observer. Ce qu'on mesure de façon générale est une température eutectique surestimée.

Tfg (Température de fin de fusion de la glace) : elle est liée à la salinité des liquides. Elle permet de déterminer la concentration des sels en solution, grâce à des tables de référence et des équations de calcul pour chaque système. Dans le cas des fluides à forte concentration de volatils cette mesure est faussée par la présence des hydrates de gaz (clathrates) qui pour leur formation absorbent une partie de l'eau (Bozzo *et al.*, 1973 ; Ramboz, 1980) et augmentent ainsi la concentration en sel, dans ce cas la combinaison de la Tfg et la température de fusion des clathrates est nécessaire pour déterminer la salinité. Dans le cas des fluides contenant plus d'un sel, la Tfg est insuffisante pour le calcul de la salinité, il faut, alors, la température de fusion de l'hydrohalite (Vanko *et al.*, 1988).

TfClath (Température de fusion des clathrates (hydrates de gaz) : c'est une mesure qui, combinée soit avec la température d'homogénéisation du CO_2, soit avec la Tfg permet d'appréhender la quantité de sels en solution dans le cas d'inclusions aquo-carboniques (Bakker, 1997). Elle renseigne aussi sur la pureté du CO_2 dans la phase volatile, puisqu'elle augmente avec l'augmentation de la teneur en CH_4 ou diminue en présence de N_2.

TfHh (température de fusion de l'hydrohalite :hydrates de NaCl) : elle est mesurée dans le cas des systèmes chlorurés complexes où se forment des hydrates de sels. Cette température combinée avec la température de fusion de la glace permet de quantifier la composition des solutions, dans le système modèle $CaCl_2$-NaCl-H_2O (Vanko *et al.*, 1988) ou dans le système modèle $MgCl_2$-NaCl-H_2O (Dubois et Marignac, 1997).

ThCO_2 (Température d'homogénéisation de CO_2) : elle correspond à l'homogénéisation de la phase volatile, qui se fait en phase liquide ou vapeur. Cette mesure permet avec les TfClath, Th,... ; de déterminer les paramètres volumétriques des phases volatiles.

Th : c'est la température d'homogénéisation de la phase liquide et vapeur qui peut se faire soit en phase liquide soit en phase vapeur et ce en fonction de la densité.

Ts : température de fusion du solide qui peut être soit un cube de sel dans le cas des solutions sursaturées, soit des phases minérales ou organiques qui peuvent provenir du fluide primaire ou de l'interaction entre le fluide et l'encaissant lors de sa circulation. La fusion de ces solide peut se produire avant l'homogénéisation de la phase fluide ou après.

La température d'homogénéisation totale correspond à la température où l'inclusion fluide ne contient qu'une seule phase. Elle correspond à la température minimale de piégeage qui peut être soit Ts, dans le cas de l'homogénéisation de la phase fluide avant la fusion du solide, soit Th lorsque la fusion du solide parvient avant l'homogénéisation de la phase fluide. Dans le cas de cette étude l'homogénéisation se fait soit en phase liquide soit en phase vapeur et jamais par la fusion des solides, la température Th correspond, donc, à la température d'homogénéisation totale.

I. 1. 3- Appareillage

Dans le cadre de cette étude les mesures microthermométriques ont été effectuées au CRPG-CNRS à Nancy sur une platine USGS adaptée par Fluid Inc (Denver, USA). Elle couvre un intervalle de température allant de -196°C à 700°C. Cette platine est constituée d'une chambre métallique divisée en six compartiment par sept lamelles de verre. Pour des températures de chauffage qui dépassent 500°C, les lamelles en verre sont remplacées par des lamelles en silice. La taille de cette chambre est plus grande que celle des autres platines du commerce (*Chaix-Méca, Linkam*), elle permet de travailler sur des échantillons qui font au maximum 22 mm de diamètre et 3 mm d'épaisseur.

Pour la cryométrie on fait circuler de l'azote gaz refroidi par l'azote liquide. Alors que pour la thermométrie c'est une résistance intégrée qui permet de chauffer l'air comprimé du laboratoire dans le cas des températures <500°C, et de chauffer l'azote gaz pour les températures >500°C.

La température est mesurée grâce à un thermocouple placé au contact de l'échantillon, à moins de 300 µm de l'inclusion à analyser. Le thermocouple est relié à un "trendicator" qui affiche les températures réelles. La reproductibilité est de ± 0.2°C pour le refroidissement et de ± 2°C pour le chauffage. La calibration est faite en utilisant les standards de Syn. Flinc. Ce sont des inclusions synthétiques dont les températures de changement de phase sont bien connues. Elles couvrent un large intervalle allant de -56.6°C (température du point triple de CO_2 pur) jusqu'à 374.1°C (température du point critique de H_2O pur).

I. 1. 4- La typologie des inclusions fluides

La typologie des inclusions fluides retenue pour cette étude est celle décrite par Boiron *et al.* (1992). Elle est basée sur l'homogénéisation globale des inclusions fluides et leur composition.

V correspond aux inclusions homogénéisant en phase vapeur, alors que **L** correspond aux inclusions dont l'homogénéisation se fait en phase liquide.

L'indice **c** est attribué aux inclusions dont les composés C-H-O-S sont dominants, **c-w** correspond aux inclusions qui contiennent aussi bien des composés carboniques que aqueux avec une dominance des composés carboniques (inclusions triphasées), alors que **w-c** correspond à des inclusions, plus riches en eau, où il n'y a que les clathrates pour indiquer la présence de phases carboniques (inclusions biphasées à toute température inférieure à 30°C). L'indice **w-(c)** correspond à des inclusions aqueuses qui contiennent des phases carboniques dont la présence n'a été révélée qu'en microspectrométrie Raman, alors que l'indice **w** correspond aux inclusions fluides purement aqueuses. L'indice **s** indique la présence de phases solides.

I. 1. 5- Le calcul des isochores

Les estimations des pressions et des températures ont été réalisées, en utilisant différentes équations d'état selon la nature du système auquel appartient l'inclusion fluide en question.

Dans le cas des solutions aqueuses (Système H_2O-NaCl), les isochores sont calculés à partir des données de microthermométrie (salinité, Th) , soit en utilisation directement la régression de Zhang et Frantz (1987), soit en utilisant le programme MacFlinCor version 0.92 (Brown et Hagemann, 1995) qui offre le choix de calcul avec différentes équations d'état (Zhang et Frantz, 1987 ; Bowers et Helgeson, 1983 ; Brown et Lamb, 1989 ; Bodnar et Vityk, 1994).

Dans le cas des fluides aquo-carboniques les isochores sont calculés à partir de la composition, les propriétés volumétriques de l'inclusion fluide à l'aide du programme GASWET réalisé par Bakker (1999), qui correspond à une adaptation de l'équation d'état de Bowers et Helgeson (1983, 1985) pour le système H2O-CO2-CH4-N2-NaCl. la salinité, la composition totale et la densité de chaque inclusion sont calculés à l'aide du programme "ICE" (Bakker, 1997). Ces propriétés sont estimées à partir des données de microthermométrie combinées à la composition de la phase volatile obtenue par spectroscopie Raman.

A partir des données *P-V-T-X*, on détermine pour chaque inclusion une droite d'évolution dans le plan P-T, qui nous permet d'estimer les conditions minimales de piégeage. Pour les conditions réelles de piégeages, elles sont estimées à partir des recoupements des données d'inclusions fluides et données de minéralogie, géologie structurale, thermochronolgie,...

I. 2- LA MICROSPECTROMETRIE RAMAN

La microspectrométrie Raman est une spectrométrie vibrationnelle qui permet d'identifier de façon non destructive les constituants moléculaires de composés minéraux ou organiques, à l'état solide, liquide ou gazeux. En géologie, cette technique d'analyse est indispensable pour l'étude des inclusions fluides. La microspectrométrie Raman permet d'identifier les espèces moléculaires constitutives des fluides géologiques (CO_2, CH_4, N_2, H_2S), de déterminer leur composition relative dans la phase analysée. L'identification des composés analysés s'effectue grâce à la longueur d'onde de leurs raies Raman et leurs teneurs (mol. %) sont déduites de l'aire sous pic (Dubessy, 1984; Delhaye et Dhamelincourt, 1975; Dhamelincourt, 1979; Dhamelincourt *et al.*, 1979)

Les données Raman couplées avec la microthermométrie permettent de déterminer les compositions et densités globales des inclusions fluides. L'analyse Raman d'un cristal apporte des informations sur sa structure et permet aussi d'évaluer le type d'interactions intermoléculaires dans le réseau cristallin (liaison de Van der Waals, liaison hydrogène,...) et de caractériser le degré d'ordre ou de désordre.

L'échantillon à analyser, qui peut se présenter sous forme de poudre, lame mince, lame épaisse ou fragment, est irradié par la lumière monochromatique intense d'un faisceau laser. Il diffuse une lumière sans changement de longueur d'onde (diffusion Rayleigh) et une lumière avec changement de longueur d'onde: c'est la diffusion Raman. Les raies Raman obtenues sont caractéristiques des vibrations des liaisons intra- et intermoléculaires de l'échantillon éclairé.

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé le microspectromètre Raman DILOR multicanal XY de l'UMR-G2R en collaboration avec M.C. Boiron et Th. Lhomme. Les analyses ont été réalisées avec la résolution spatiale d'un microscope optique. L'excitatrice est la raie verte d'un faisceau laser à Argon dont la longueur d'onde est de 514.5 nm. Le volume analysé varie entre 10 μm^3 et 100 μm^3.

I. 3- LASER INDUCTED BREAKDOWN SPECTROSCOPY (LIBS, FIG. III-1)

(Fabre *et al.,* 1999 ; Fabre, 2000)

La spectrométrie d'émission optique couplée à l'ablation laser (LIBS) est une méthode d'analyse quantitative, mais destructive. Il s'agit d'une analyse ponctuelle pour quantifier un certain nombre d'éléments (les alcalins, les alcalino-terreux, les métaux) dans des inclusions individuelles. Cette méthode consiste à produire, à une pression atmosphérique sous un flux d'argon, un micro-plasma (T = 10000°K) à l'aide d'un laser Nd-YAG quadruplé en fréquence. Les éléments du micro-plasma portés à l'état excité émettent des radiations caractéristiques des transitions électroniques lorsqu'ils repassent à l'état fondamental. La résolution latérale, mesurée dans différents matériaux (quartz, halite, calcite,...) est de l'ordre de 6 µm. Ainsi, le laser permet à la fois de creuser un micro-puits sous la surface de l'échantillon afin d'atteindre l'inclusion en profondeur puis de créer un plasma de la phase aqueuse à analyser.

Des courbes de calibration de rapports de concentrations d'éléments (Na/K, Na/Li, Na/Ca, Ca/Mg, Ba/Sr, Ca/Sr...) ont été réalisées à l'aide de différents types de standards : verres synthétiques, minéraux et inclusions fluides synthétiques. Elles permettent alors de connaître les rapports molaires du fluide piégé.

Cette méthode ne nécessite aucune préparation de l'échantillon, toutefois, les inclusions doivent avoir une taille de l'ordre de 20 µm et une salinité autour de 7 % poids éq. NaCl.

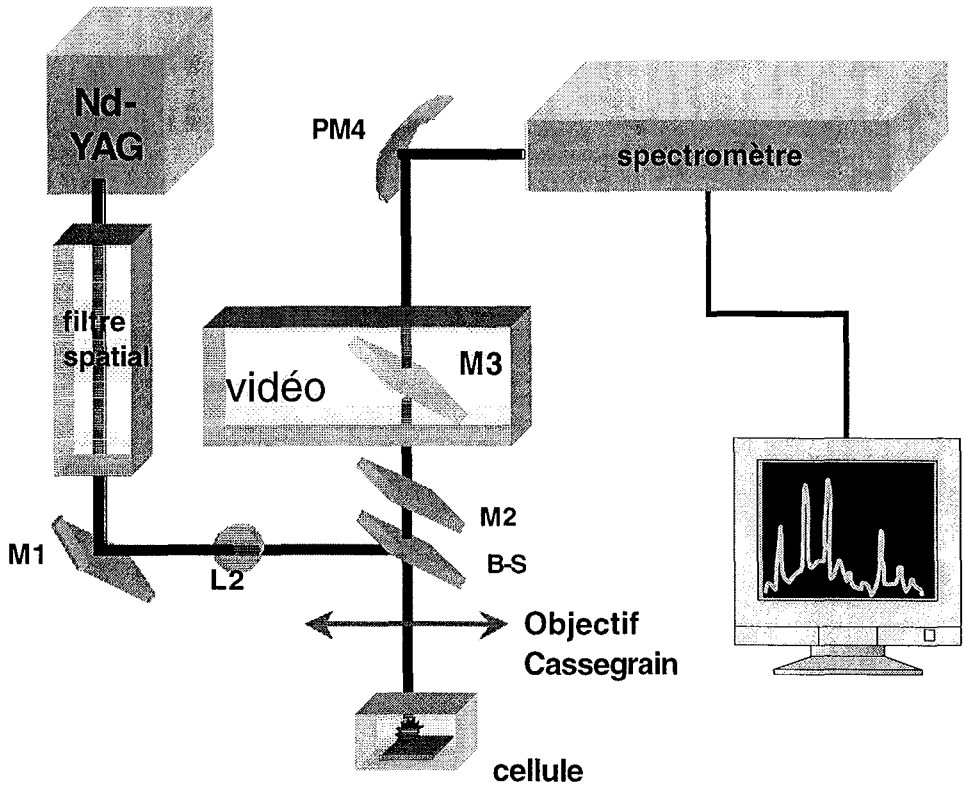


Fig. III-1 : schéma du dispositif de la spectrométrie LIBS (Fabre et al., 1999).

Nd-YAG : laser couplé à un spectromètre à émission optique,

M : miroir,

PM : miroir parabolique,

L : lentille,

B-S : lame séparatrice

II- ETUDE MICROTHERMOMETRIQUE

Suivant la taille des inclusions fluides et dans le but de couvrir l'ensemble des matériaux qui encaissent les minéralisations du Bourneix, on a sélectionné plusieurs échantillons de quartz dans les trois différents types de roches ("rods" de quartz des micaschistes et gneiss, pegmatites et granites). Ces échantillons ont fait l'objet d'une étude microstructurale qui a permis d'identifier cinq directions principales de PIF et leur fréquence dans chaque type de matériau (voir Chapitre II).

Les inclusions fluides étudiées ont été choisies pour chaque faciès dans les directions les plus représentées. Pour l'échantillon du granite les inclusions ont été étudiées dans les PIF à N110-130°E et N170-30°E. Pour les pegmatites, nous avons essayé de caractériser les inclusions qui constituent les traînées à N50-70°E, N140-160°E et N170-30°E. Dans les lentilles de quartz des micaschistes, les cinq directions de PIF sont représentées.

Les résultats de microthermométrie obtenues dans les différentes roches seront traitées, dans les paragraphes suivants, par direction de plan d'inclusions fluides, et les températures de fusion de la glace seront traitées dans le système NaCl-H_2O. En effet l'ensemble des température eutectiques mesurées est proche de l'eutectique du système NaCl-H_2O (-21°C). Les salinités seront, donc, calculées dans le système NaCl-H_2O avec l'équation de Bodnar (1993) :

Salinité (% poids NaCl) = $0.00+1.78\ T - 0.0442\ T^2 + 0.000557\ T^3$, avec T = -Tfg

II. 1- PIF A N50-70°E

II. 1. 1- La typologie des inclusions fluides

Quatre types d'inclusion fluide ont été rencontrés dans cette direction :

Vw-c : il correspond à des inclusions fluides aquo-carboniques, caractérisées par une forme régulière, un remplissage gazeux de l'ordre de 70 à 80 % et une taille d'environ 12 µm.

Lw-c : les inclusions sont aquo-carboniques avec des formes plus ou moins arrondies de taille similaire aux Vw-c, mais leur remplissage est plus faible, il est de 20 à 30 %.

Vw : les inclusions sont des vapeurs aqueuses, de forme régulière et de remplissage élevé (50-70%). La taille varie de 12 jusqu'à 20 µm.

Lw : il correspond au type le plus fréquent avec des formes d'inclusions très variables et des tailles allant de 6 à 35 µm, leur remplissage est relativement homogène (10-30 %).

II. 1. 2- Les inclusions aquo-carboniques

II. 1. 2. 1- Les températures de fusion

Dans cette direction, des PIF de l'échantillon CFM40 (quartz dans des micaschistes) contiennent des inclusions fluides biphasées qui montrent la fusion de CO_2 entre -58.1°C et -59.1°C, la fusion des clathrates entre 7.1°C et 8.4°C, mais ne montrent jamais les deux phases volatiles. Certaines inclusions homogénéisent en phase vapeur (Vw-c) et d'autres en phase liquide (Lw-c), dans le même plan.

Par ailleurs, dans les échantillons CFM29 (pegmatite) et CFM41 (lentille de quartz dans des micaschistes), certains PIF contiennent des inclusions biphasées aqueuses en microthermométrie (ni glace de CO_2 ni clathrates) mais où la microspectrométrie Raman révèle cependant la présence de volatils (voir plus loin). Ces inclusions homogénéisent en phase vapeur dans CFM29 (Vw-(c)) et en phase liquide dans CFM41 (Lw-(c)). Les températures de fusion de la glace dans les différents cas sont comprises entre -2° et -3.2°C (fig.III-2).

II. 1. 2. 2- La température d'homogénéisation

Les températures d'homogénéisation totale sont très variables (fig.III-3), entre 200° et 410°C. La température maximale est enregistrée dans une inclusion de type Vw-(c), alors que la température minimale correspond à une inclusion de type Lw-(c). On note cependant que les Th sont les mêmes pour les Lw-c et les Vw-c de l'échantillon CFM40 ($280° \leq Th \leq 300°C$).

II. 1. 3- Les données Raman

Quelques inclusions ont été analysées en microspectrométrie Raman et montrent des compositions variables (tableau III-1) de volatils avec une forte dominance de CO_2 (72.1 à 100 mol. %). Pour les autres volatils les teneurs varient entre 8.9 et 10.6 mol. % pour le méthane et entre 10.8 et 19.0 mol. % pour l'azote. Dans les inclusions Lw-(c), le CO_2 est dominant.

Échantillon	Typologie des I.F.	CO_2 (mol.%)	CH_4 (mol.%)	N_2 (mol.%)
CFM40	Vw-c	77.5	10.6	11.9
CFM40	Lw-c	79.0	10.2	10.8
CFM29	Vw-(c)	72.1	8.9	19.0
CFM41	Lw-(c)	100.0	0.0	0.0
CFM41	Lw-(c)	94.1	1.7	4.2

Tableau III-1: Composition de la phase volatile des inclusions fluides des PIF à N50°-70°E

II. 1. 4- Les inclusions aqueuses

II. 1. 4. 1- La température de fusion de la glace

II. 1. 4. 1. 1- Les pegmatites

Les pegmatites sont caractérisées par des Tfg plutôt basses (entre -7.4° et -1°C correspondant à des salinités de l'ordre de 11 à 1.7 % poids éq. NaCl) avec un maximum entre -3°C et -6.5°C (fig.III-2).

Les inclusions de type Lw :

Dans la pegmatite de Jumilhac (CFM43), où les inclusions sont toutes de type Lw, la Tfg varie entre -4.2°C et -5.2°C, soit une salinité entre 6.7 et 8.1 % poids éq. NaCl. Pour la pegmatite de la Vallée de l'Isle (CFM29), les inclusions de type Lw ont des Tfg qui varient entre -6.4 et -1°C (1.7 à 9.7 % poids éq. NaCl).

Les inclusions de type Vw :

Les inclusions de type Vw sont rencontrées dans la pegmatite de la vallée de l'Isle (CFM29), où deux Tfg ont été mesurées à -3.9°C et -7.4°C, elles correspondent respectivement à des salinités de 6 et 11 % poids éq. NaCl. L'inclusion dont la Tfg est basse (-7.4°C) appartient à un PIF où elle coexiste avec des liquides alors que l'autre inclusion est dans un autre plan à part.

II. 1. 4. 1. 2- Les lentilles de quartz

Les inclusions de type Lw :

Ce groupe est constitué par trois "rods" de quartz qui correspondent à un domaine de Tfg relativement restreint (-3.1° à -1°C) avec un mode autour de -2.5°C (fig.III-2) rencontré dans la lentille du Cros-Gallet (CFM41) dont la Tfg varie entre -1.8°C et -3°C. Les inclusions mesurées dans les deux autres lentilles (CFM40 et CFM48) ne sont pas très nombreuses, mais leurs Tfg sont moins dispersées. Elles varient entre -3.1°C et -2°C pour le "rod" CFM40 alors qu'elles sont un peu plus élevées pour la lentille CFM48 où elles sont comprises entre -2.2° et -1°C.

Les inclusions de type Vw :

Les seules inclusions de type Vw mesurées dans les "rods" de quartz proviennent d'un plan à vapeurs de la lentille de quartz du Cros-Gallet (CFM41). Leur Tfg est constante (-2.8/-3°C), elle correspond à un salinité de l'ordre de 4.7-5.0 % poids éq. NaCl.

II. 1. 4. 2- La température d'homogénéisation

II. 1. 4. 2. 1- Les pegmatites

Les températures d'homogénéisation sont très étalées (fig.III-3). Elles varient entre 150°C et 392°C.

Les inclusions de type Lw :

Dans la pegmatite CFM29, les Th sont très variables, elles vont de 150°C jusqu'à 353°C avec un mode entre 220°C et 280°C. Pour la pegmatite de Jumilhac (CFM43), les inclusions homogénéisent en phase liquide à des températures bien concentrées dans un intervalle très restreint compris entre 210°C et 230°C.

Les inclusions de type Vw :

Les deux inclusions de la pegmatite de la vallée de l'Isle (CFM29) qui homogénéisent en phase vapeur, indiquent des Th différentes. En effet, l'inclusion qui coexiste avec des

inclusions de type Lw a une faible Th (262°C) alors que l'autre inclusion correspond à une Th élevée (392°C). Toutefois ces deux températures doivent être critiquées : on sait que les températures d'homogénéisation en phase vapeur sont souvent difficiles à mesurer, vu qu'on n'est pas toujours sûr que la partie liquide de l'inclusion a complètement disparu au profit de la vapeur, ceci induit de façon générale une sous-estimation de la température d'homogénéisation. Ainsi, la Th à 262°C mesurée dans une inclusion salée (11 % poids éq. NaCl), ne peut pas être considérée comme valide, puisque le point critique pour cette composition est à 476°C. De même, la Th à 392°C est encore un peu faible (point critique à 432°C pour une salinité de 6.3 % poids éq. NaCl). Ces températures ne peuvent pas être retenues.

II. 1. 4. 2. 2- Les lentilles de quartz

Les inclusions de type Lw :

Ces inclusions fluides homogénéisent en phase liquide à des températures très variables (fig.III-3). Elles varient de 178°C à 390°C pour la lentille CFM41, avec deux températures plus fréquentes autour de 220°C et 300°C. Ces deux modes sont présents également dans la lentille CFM40. Quant au quartz de la carrière de Jumilhac l'homogénéisation se fait en phase liquide à des températures basses (171-237°C).

Les inclusions de type Vw :

Les inclusions de type Vw de la lentille de quartz CFM41 ont des températures d'homogénéisation très élevées, elles sont de 340° et 390°C. Elles constituent avec les vapeurs de la pegmatite (CFM29) le groupe des Th les plus élevées, bien que encore apparemment sous-estimées.

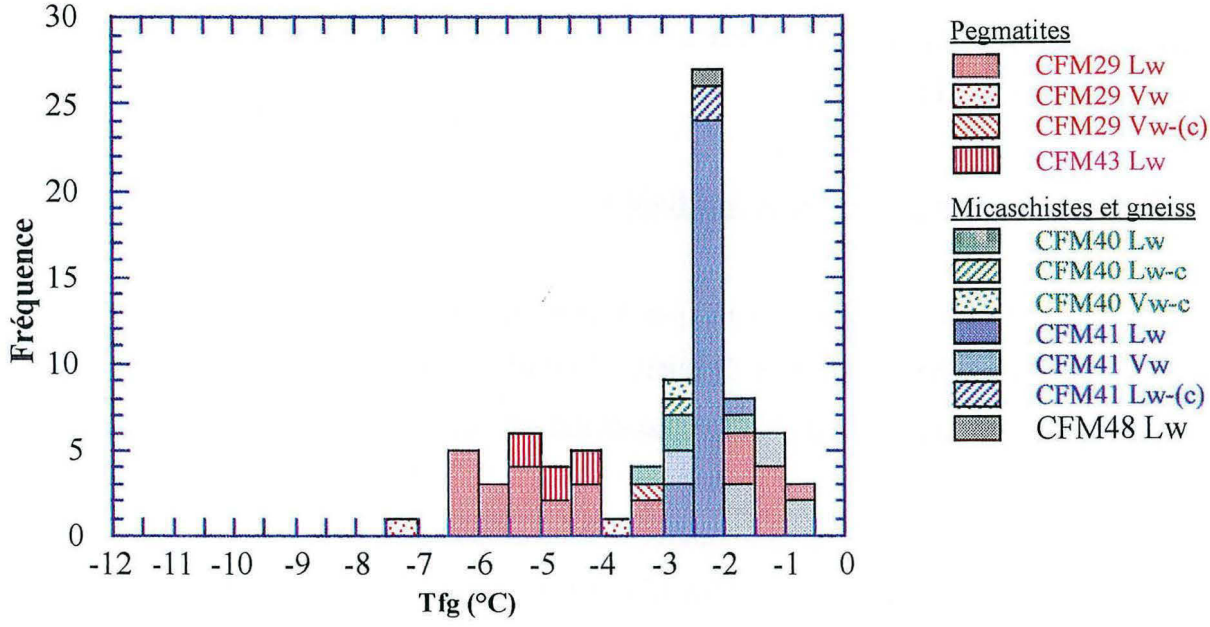


Fig. III-2: Histogramme des fréquences des Tfg pour les différents types d'inclusion fluide dans les PIF à N50-70°E

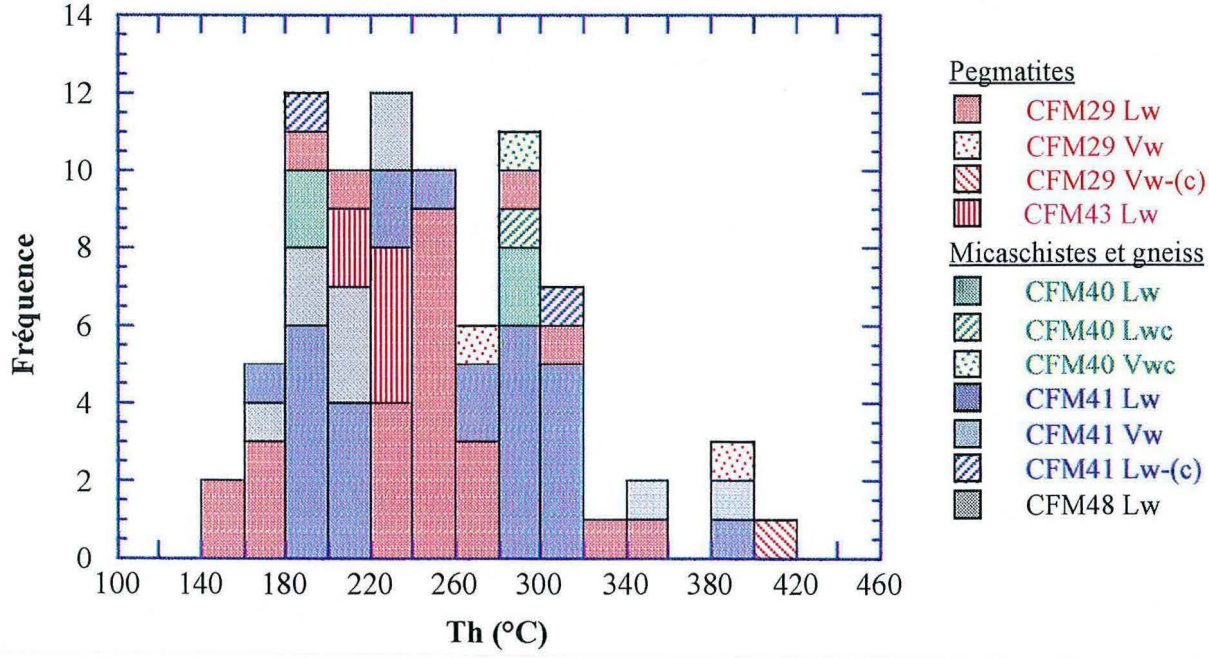


Fig. III-3 : Histogramme des fréquences des Th pour les différents types d'inclusion fluide dans les PIF à N50-70°E

II. 2- PIF A N80-110°E

Les inclusions fluides appartenant au PIF à N80-110°E ont été mesurées dans deux lentilles de quartz (CFM31 et CFM40).

II. 2. 1- La typologie des inclusions fluides

Lw-c: il s'agit d'inclusions aquo-carboniques homogénéisant en phase liquide, qui ne sont rencontrées que dans la lentille de quartz CFM40. Leur forme est régulière avec une taille de 6 à 15 μm et un remplissage gazeux moyen de l'ordre de 25 %.

Lw: les inclusions sont aqueuses et homogénéisent en phase liquide. Leur taille est très variable, elle est en moyenne de 10 à 15 μm avec un remplissage gazeux de 10 à 30 % mais certaines inclusions (CFM31) peuvent atteindre une taille de 30 à 35 μm et sont remplies jusqu'à 70 % de vapeur aqueuse.

II. 2. 2- Les inclusions aquo-carboniques (Lw-c)

La température de fusion de CO_2 est relativement étalée, elle est comprise entre -57.2° et -58.9° pour des températures de fusion des clathrates constantes (7.6-8.3°C) et des températures de fusion de la glace (fig.III-4) comprises entre -2.2° et -4.3° (3.7-6.9 % poids éq. NaCl).

Les températures d'homogénéisation (Th) sont relativement élevées (fig.III-5), elles varient entre 270° et 340°C.

II. 2. 3- Les données Raman

Les analyses Raman confirment la présence d'autres phases volatiles (Tableau III-2) révélée par l'étude microthermométrique. En effet les teneurs en CO_2 varient entre 52 et 90 mol. %, le CH_4 varie entre 3.4 et 39.2 mol. % au même titre que l'azote qui varie entre 2.3 et 44 mol.%.

Typologie	CO_2 mol.%	CH_4 mol.%	N_2 mol.%
Lw-(c)	52.6	3.4	44
Lw-c	58.5	39.2	2.3
Lw-c	63.5	28.3	8.2
Lw-c	71.2	17.9	10.9
Lw-c	90.0	3.4	6.6

Tableau III-2: Composition de la phase volatile des inclusions des PIF à N80°-100°E

II. 2. 4- Les inclusions aqueuses (Lw)

II. 2. 4. 1- La température de fusion de la glace

Les températures de fusion de la glace sont très étendues, elles vont de -10.7°C jusqu'à -0.7°C, correspondant à des salinités comprises entre 14.7 et 1.2 % poids éq. NaCl. Les statistiques de la répartition des Tfg (fig.III-4) montrent un groupe large (-6.6°C $\leq$ Tfg $\leq$ -0.7°C correspondant à une salinité entre 1.2 et 10.0 % poids éq. NaCl) constitué de trois températures principales, à -1°C et -5°C, rencontrées essentiellement dans le quartz CFM31 et à -3.5 $\pm$ 0.5°C observée dans le quartz CFM40.

Un petit groupe d'inclusions fluides de CFM31, qui représente environ 8% des mesures faites dans cet échantillon, montre une température de fusion de la glace très basse comprise entre -10.7°C et -9.7°C (14.7-13.6 % poids éq. NaCl) ; elles sont de grande taille (30-35 µm) et de remplissage élevé (50-70 %). Ces inclusions, analysées au Raman, n'ont pas montré de phase volatile.

II. 2. 4. 2- La température d'homogénéisation

Ces inclusions fluides homogénéisent en phase liquide à des températures très variables (fig.III-5). Elles vont de 151°C jusqu'à 325°C avec un mode bien évident à 210°C et un petit groupe d'inclusion homogénéisant entre 260°C et 340°C, où on rencontre aussi les inclusions aquo-carboniques décrites précédemment .

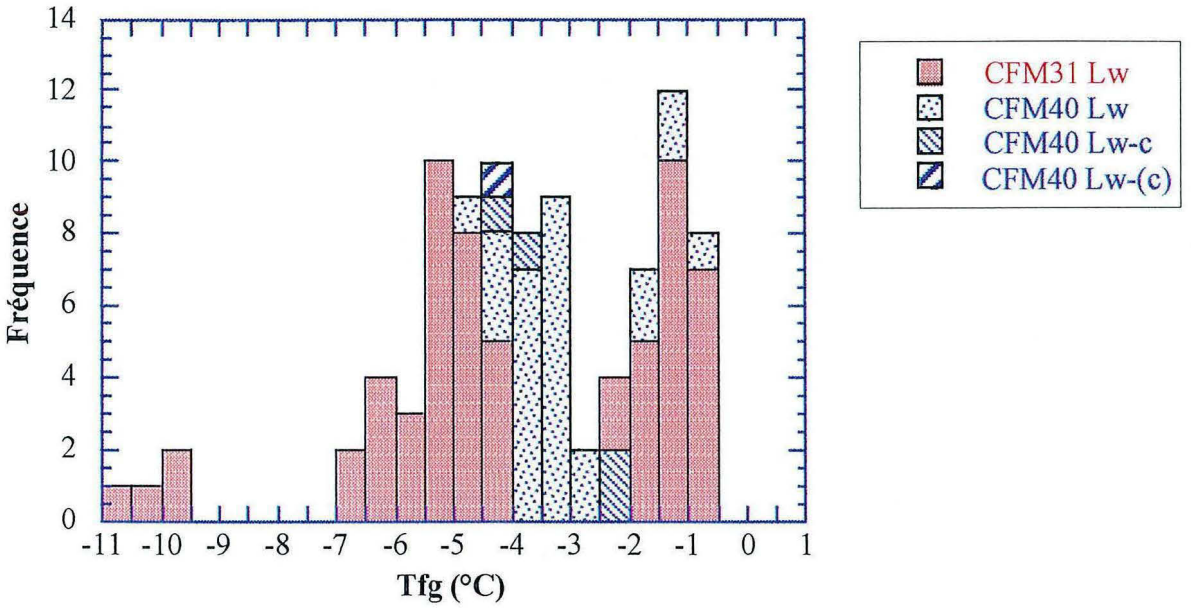


Fig. III-4: Histogramme des fréquences des Tfg pour les PIFà N80-110°E

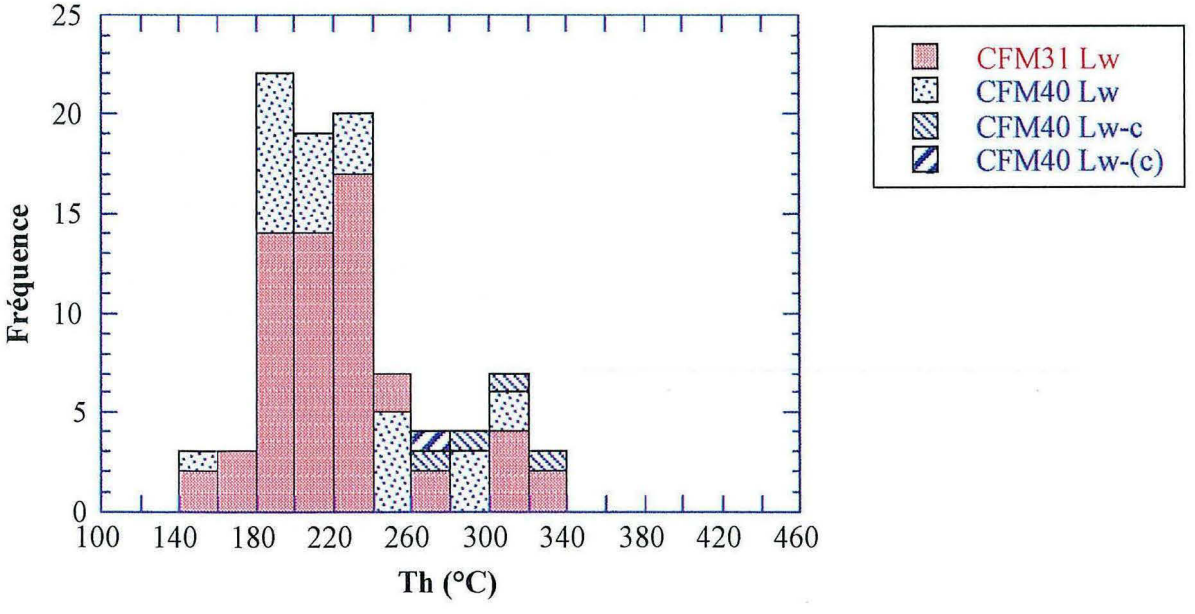


Fig. III-5: Histogramme des fréquences des Th pour les PIFà N80-110°E

II. 3- PIF A N110-130°E

Les inclusions fluides appartenant aux PIF à N110-130°E, ont été mesurées dans le quartz du granite de la vallée de l'Isle (CFM28) et dans la lentille de quartz dans les micaschistes du Cros-Gallet (CFM41).

II. 3. 1- La typologie des inclusions fluides

Vw-c : les inclusions sont de taille moyenne (environ 20 µm), caractérisées par un remplissage gazeux de l'ordre de 30 à 60 % et par un contour anguleux.

Lw-c : à l'inverse des Vw-c, ce type contient des inclusions de petite taille (10-15 µm), leur remplissage gazeux est de l'ordre de 25 % et leur forme est plus ou moins régulière.

Lw : il s'agit d'inclusions aqueuses, provenant du granite de la vallée de l'Isle (CFM28), caractérisées par une forme variable, une taille comprise entre 6 et 20 µm et un remplissage gazeux relativement homogène (20 %).

II. 3. 2- Les inclusions aquo-carboniques (Vw-c et Lw-c)

Les inclusions aquo-carboniques de cette direction ne sont rencontrées que dans la lentille de quartz CFM41, où certains PIF contiennent à la fois des inclusions de type Vw-c et des inclusions de type Lw-c.

II. 3. 2. 1- Les températures de fusion

Les inclusions de type Lw-c :

Les $TfCO_2$ que la résolution du microscope a permis de mesurer dans les inclusions fluides de type Lw-c sont comprises entre -57.3°C et -58.8°C (fig.III-6a) pour des températures de fusion des clathrates variables, avec une distribution bimodale (7.7 -7.9°C et 10.0-10.4°C) (fig.III-6b). Quant aux Tfg, elles sont comprises entre -4.0° et -5.3°C (salinité entre 6.5 et 8.3 % poids éq. NaCl) avec un mode à environ -5°C (fig.III-7).

Les inclusions de type Vw-c :

Pour ce type d'inclusions (Vw-c) les $TfCO_2$ ne sont pas très différentes de celles des inclusions Lw-c, elles varient entre -57.2°C et -59.2°C (fig.III-6a) avec des températures de fusion des clathrates qui couvrent le même intervalle (7.8°C -10.2°C) que pour le premier type (Lw-c) (fig.III-6b). De même les Tfg, sont similaires, elles varient entre -4.3° et -5.4°C (6.9-8.4 % poids éq. NaCl) avec le même mode à environ -5°C (fig.III-7).

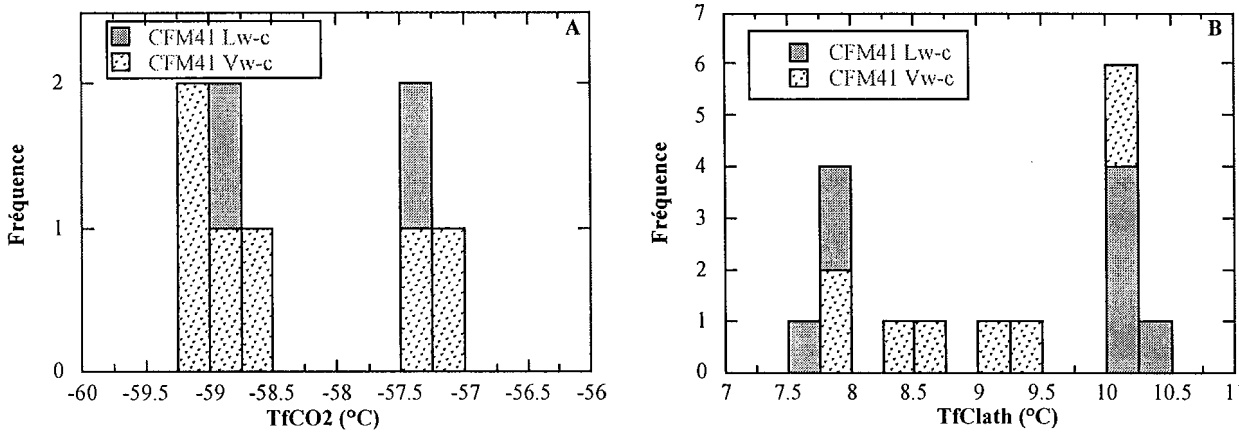


Fig. III-6: Histogrammes des fréquences des $TfCO_2$ (A) et TfClath (B) pour les PIF à N110-130°E

Exceptées les quelques inclusions de type Vw-c qui ont des TfClath entre 8.4° et 9.3°C, toutes les températures de fusion (Tfg, $TfCO_2$, TfClath) sont similaires dans les deux types d'inclusions (Lw-c et Vw-c). Elles correspondent à une répartition bimodale à -59.2°/-58.5°C et -57.4°/-57.2°C pour la $TfCO_2$ et à 10-10.5°C et 7.5-8.0°C pour la Tf Clath, alors que la fréquence des Tfg est unimodale à -4.5°/-5.0°C.

II. 3. 2. 2- La température d'homogénéisation

Les inclusions de type Lw-c ont des Th qui varient entre 208° et 330°C.

Les inclusions de type Vw-c affichent des Th aussi variables (220° -317°C) que pour les Lw-c.

De façon générale les températures d'homogénéisation sont très variables (fig.III-8), elles couvrent un intervalle 208-330°C, où elles dessinent indifféremment dans les liquides et les vapeurs trois modes à 220-240°C, 260-280°C et à 300-320°C.

II. 3. 3- Les données Raman

La microspectrométrie Raman révèle une forte teneur en CO_2 (tableau III-3), elle varie entre 87 et 94 mol. % dans les Lw-c et entre 82 et 94 mol. % dans les Vw-c.

Dans les deux types d'inclusion fluide (Lw-c et Vw-c) la teneur en CH_4 est similaire (0.7 - 3 mol. %), mais elle est très faible dans cette direction par rapport aux inclusions fluides des directions précédentes. La teneur en azote est plus élevée comparée au CH_4, elle est de l'ordre de 4.5 à 16.3 mol. % et 5.5 à 10.5 mol. %, respectivement, dans les Vw-c et Lw-c.

Typologie	CO_2 (mol. %)	CH_4 (mol. %)	N_2 (mol. %)
Vw-(c)	87.4	1.1	11.5
Vw-c	88.5	0.7	10.8
	90.0	1.5	8.5
	91.2	1.0	7.8
	94.0	1.5	4.5
	81.6	2.1	16.3
Lw-(c)	87.7	3.0	9.3
Lw-c	92.7	1.3	6.0
	89.8	1.7	8.5
	88.3	1.2	10.5
	90.8	0.8	8.4
	90.9	1.9	7.2
	90.5	2.2	7.3
	93.2	1.3	5.5

Tableau III-3 : Composition Raman des volatils dans les PIF à N110-130°E.

II. 3. 4- Les inclusions aqueuses (Lw)

II. 3. 4. 1- La température de fusion de la glace

Les PIF à N110-130°E à inclusions aqueuses sont celles du granite de la vallée de l'Isle (CFM28). Il s'y ajoute une inclusion dans la lentille de quartz du Cros-Gallet (CFM41), qui provient cependant d'un PIF à Lw-c, mais ni TfCO2 ni la fusion des clathrates n'y ont été observés (cependant elle a fait l'objet d'une analyse Raman, ayant montré la présence de volatils (CO_2, CH_4) dans la phase vapeur ; c'est donc une Lw-(c)).

Dans cette direction, les températures de fusion de la glace varient entre -1.9°C et -8.1°C (3.2-11.8 % poids éq. NaCl) avec un maximum entre -4.5°C et -5°C (fig.III-7), soit des salinités de 7.2 % et 7.86 % poids éq. NaCl. Pour l'inclusion Lw-(c) de la lentille de quartz du Cros-Gallet la température de fusion de la glace est de -4.8°C.

II. 3. 4. 2- La température d'homogénéisation

Les températures d'homogénéisation (fig.III-8) sont comprises entre 145°C et 340°C; les valeurs les plus fréquentes se situent autour de 180°C et 250°C, elles sont rencontrées dans le granite de la vallée de l'Isle (CFM28). La température d'homogénéisation la plus élevée (325°C) correspond à la seule inclusion du quartz CFM41.

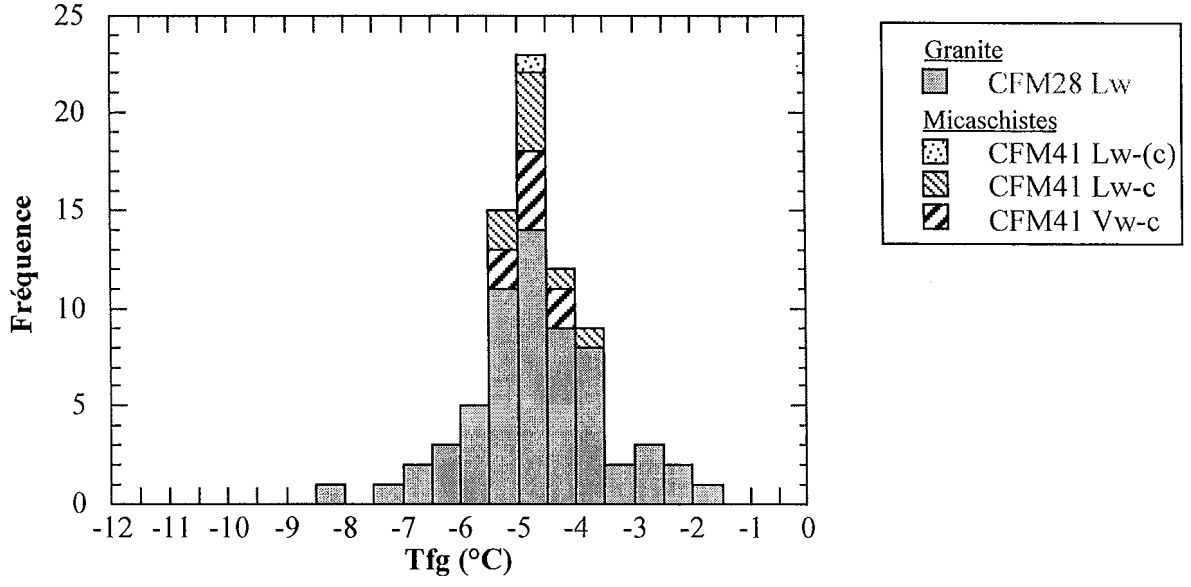


Fig. III-7: Histogramme des fréquences des Tfg pour les PIFà N110-130°E

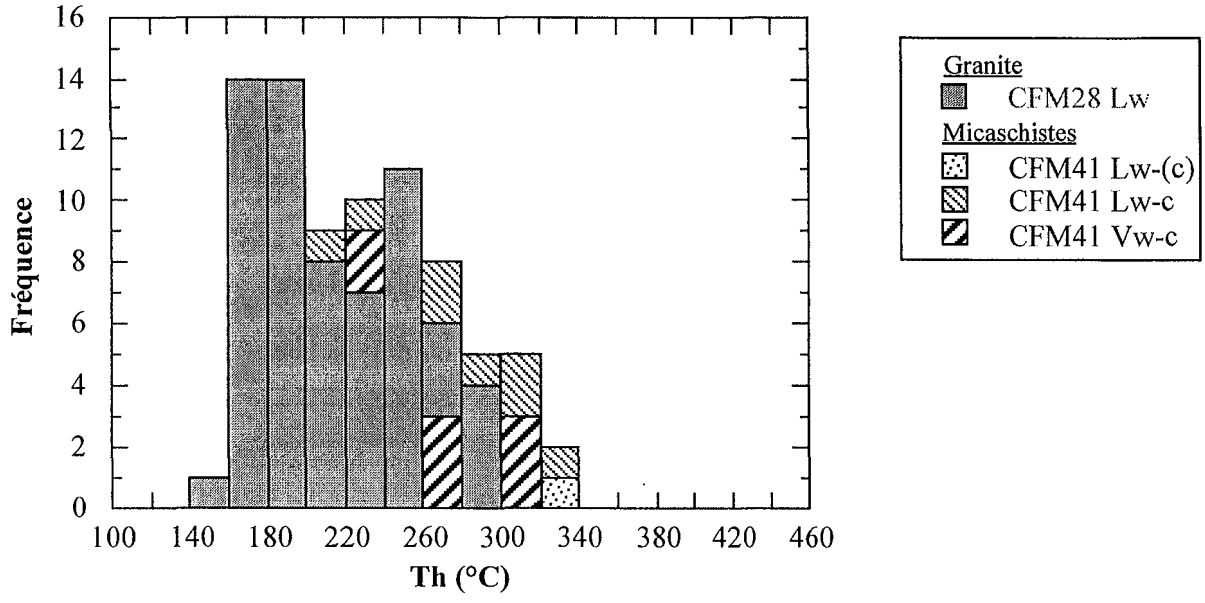


Fig. III-8: Histogramme des fréquences des Th pour les PIF à N110-130°E

II. 4- PIF A N140-160°E

II. 4. 1- La typologie des inclusions fluides

Lw : les inclusions fluides sont caractérisées par des formes et des tailles très variables. Dans le quartz de la carrière Lama (CFM48), elles sont de petite taille (6 µm) avec un remplissage gazeux de l'ordre de 35 %, alors que dans la pegmatite de la Vallée de l'Isle (CFM29), la taille peut atteindre jusqu'à 45 µm et le remplissage gazeux est relativement homogène (15 %).

Lw-(c) : Il s'agit d'une inclusion biphasée en microthermométrie mais dont la nature aquo-carbonique de sa phase volatile a été montrée par une analyse Raman, elle contient 65.2 mol. % CO_2, 17.2 mol. % CH_4 et 17.6 mol. % N_2. Cette inclusion, comme on peut le voir sur la photo ci-dessous, appartient à un PIF qui contient des inclusions aqueuses (Type Lw).

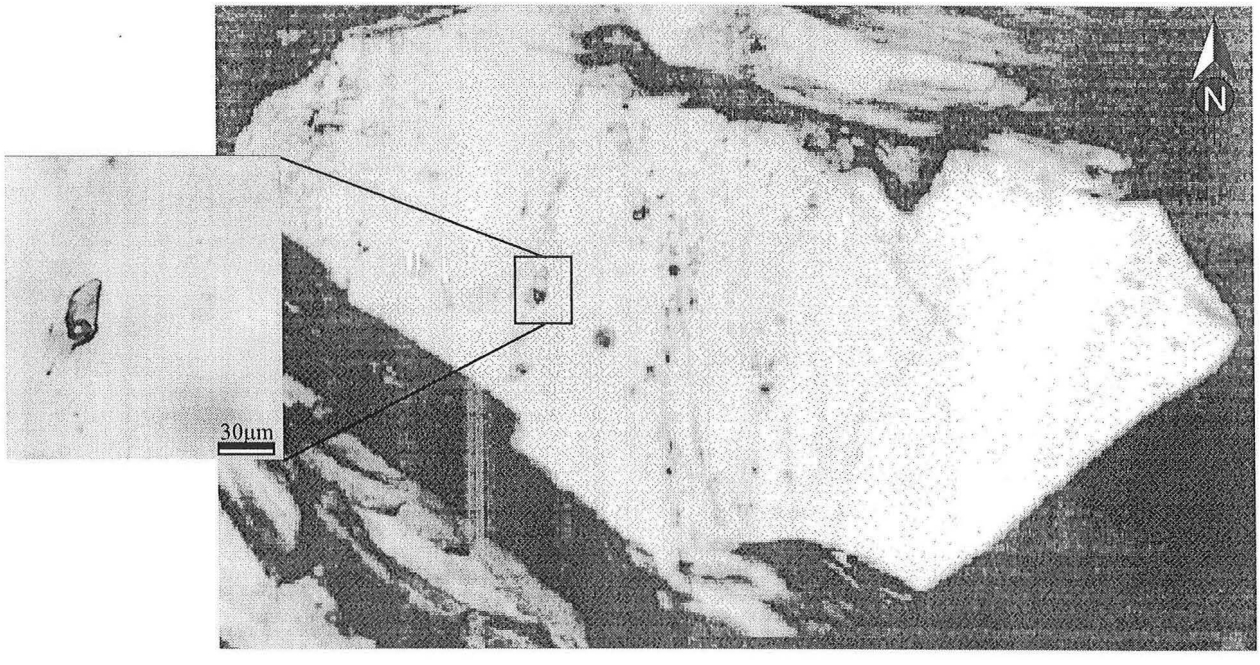


Photo montrant les PIF à N140-160°E dans la pegmatite de la vallée de l'Isle (CFM29) avec un zoom sur l'inclusion fluide dont l'analyse Raman révèle la nature aquo-carbonique.

II. 4. 2- Les inclusions aqueuses (Lw)

II. 4. 2. 1- La température de fusion de la glace

Pour ces PIF à N140-160°E, les températures de fusion de la glace sont comprises entre -0.3° et -5.1°C (0.5-8.0 % poids éq. NaCl). Elles sont réparties dans le diagramme des fréquences en deux groupes (fig.III-9). Le premier groupe est constitué exclusivement par les inclusions de la pegmatite CFM29, qui affichent des températures comprises entre -3.6° et -5.1°C (5.9-8.0 % poids éq. NaCl), alors que le deuxième groupe est étalé, il est constitué par les inclusions de la pegmatite (CFM29) et la lentille de quartz (CFM48). Il correspond à des Tfg comprises entre -0.3° et -3°C (0.5-5.0 % poids éq. NaCl) avec deux pics aux alentours de -2.5°C et -1°C.

II. 4. 2. 2- La température d'homogénéisation

Toutes les inclusions rencontrées dans les PIF à N140-160°E homogénéisent en phase liquide à des températures variables, comprises entre 140°C et 340°C (fig.III-10). Les fluides de la pegmatite CFM29 qui constituent l'essentiel des inclusions mesurées dans cette direction indiquent, pour la majorité, des températures qui varient entre 160°C et 260°C cependant quelques inclusions homogénéisent à des températures plus élevées (310-330°C). Pour les inclusions de la lentille CFM48, rencontrées dans cette direction, les températures d'homogénéisation sont bien concentrées dans un intervalle de température très restreint (170-200°C).

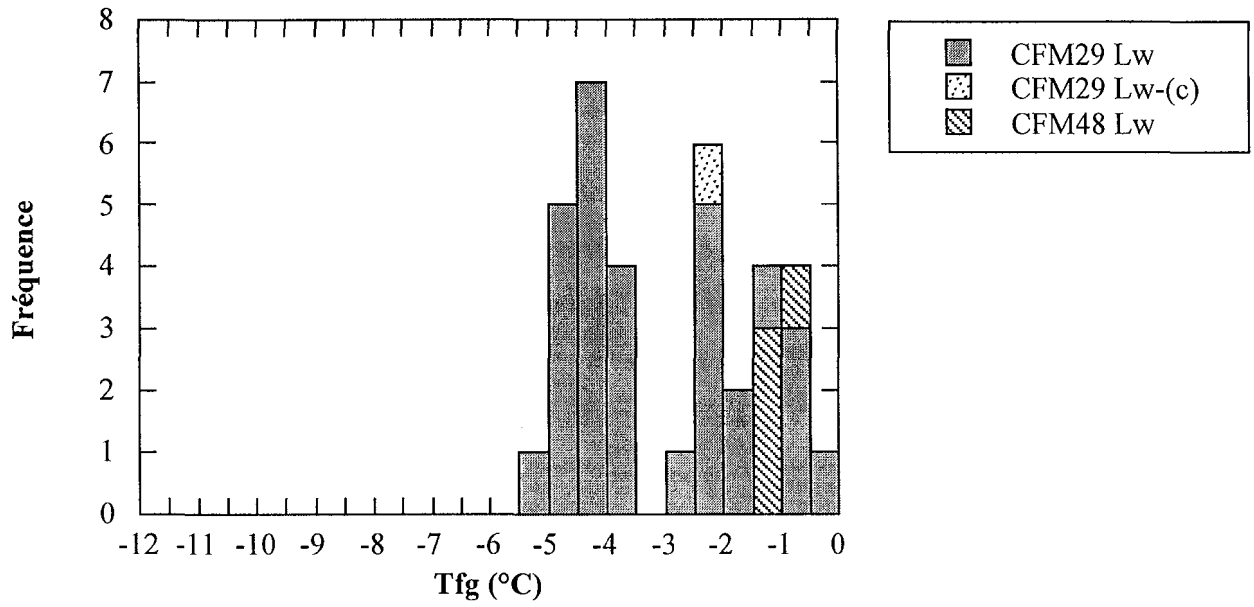


Fig. III-9: Histogramme des fréquences des Tfg pour les PIF à N140-160°E

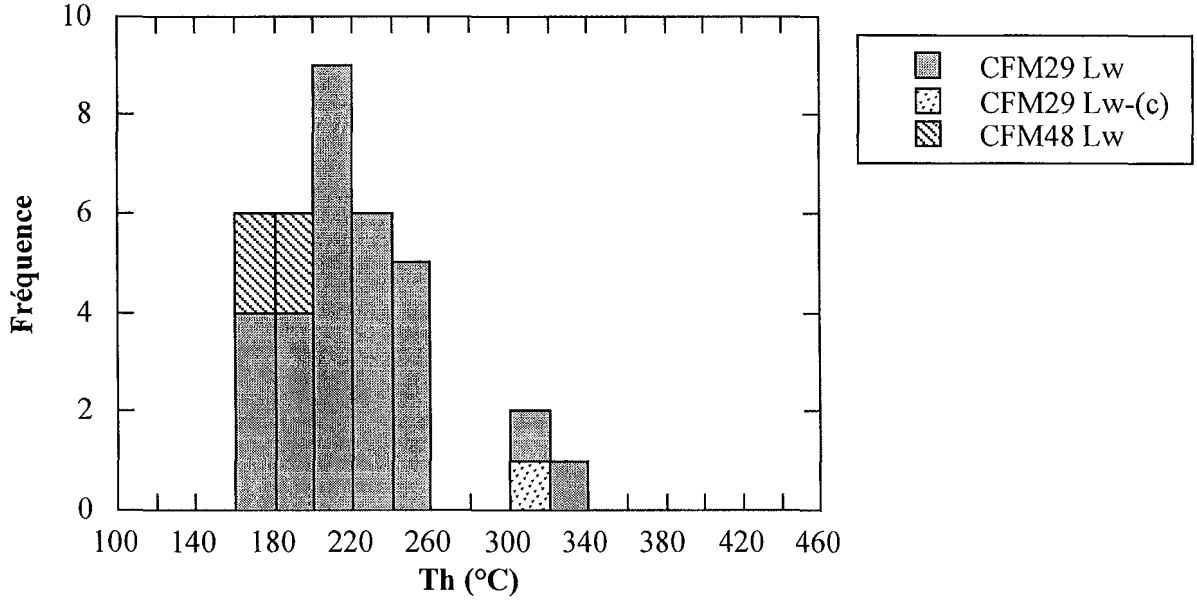


Fig. III-10: Histogramme des fréquences des Th pour les PIFà N140-160°E

II. 5- PIF A N170-30°E

Cette direction a été reconnue dans les trois types d'encaissants (granite, pegmatite, "rods" de quartz), ainsi des inclusions fluides ont été mesurées dans CFM40 et CFM41 pour les "rods" de quartz, dans CFM43 pour les pegmatites et dans CFM28 pour les granites.

II. 5. 1- La typologie des inclusions fluides

Lw il s'agit d'inclusions fluides aqueuses à forme très variable, elles sont anguleuses (CFM28, CFM40, CFM41) ou avec un contour régulier et très allongées (CFM43). Le remplissage gazeux est relativement homogène (10-30 %), leur taille moyenne est d'environ 10 à 25µm avec quelques inclusions qui peuvent atteindre 45 à 60 µm (CFM40).

II. 5. 2- Les inclusions aqueuses (Lw)

II. 5. 2. 1- La température de fusion de la glace

L'ensemble des températures de fusion de la glace est compris entre -1.4°C et -4.8°C (2.4-7.6 % poids éq. NaCl) avec deux pics à -2.5°C et -4.5°C (fig.III-11). Le granite de la vallée de l'Isle (CFM28) correspond à des Tfg relativement étendues par rapport aux autres échantillons, elles varient entre -2.8°C et -4.8°C (4.7-7.6 % poids éq. NaCl) avec un mode à -4°C. La pegmatite de Jumilhac (CFM43) est caractérisée par des Tfg relativement homogènes, avec des températures minimales à -4.6°C et maximales à -3.8°C. Les inclusions des deux lentilles de quartz forment un groupe de basse salinité (2.4-5.9 % poids éq. NaCl) correspondant à des Tfg comprises entre -3.6°C et -1.4°C pour CFM40, alors qu'elles sont bien centrées autour de -2.5°C (4.2 % poids éq. NaCl) pour la lentille du Cros-Gallet (CFM41).

II. 5. 2. 2- La température d'homogénéisation

L'homogénéisation se fait, pour l'ensemble des inclusions, en phase liquide à des températures qui varient entre 170°C et 350°C (fig.III-12), avec le même mode autour de 210-220°C, dans les quatre échantillons.

Hormis la pegmatite de Jumilhac (CFM43) qui correspond à des Th très homogènes (218-228°C), tous les autres échantillons indiquent des intervalles de températures très étendus. Ainsi les inclusions du granite (CFM28) homogénéisent entre 170°C et 283°C, alors que les inclusions provenant des lentilles de quartz homogénéisent entre 195°C et 282°C pour CFM40 et entre 207°C et 350°C pour la lentille de du Cros-Gallet (CFM41).

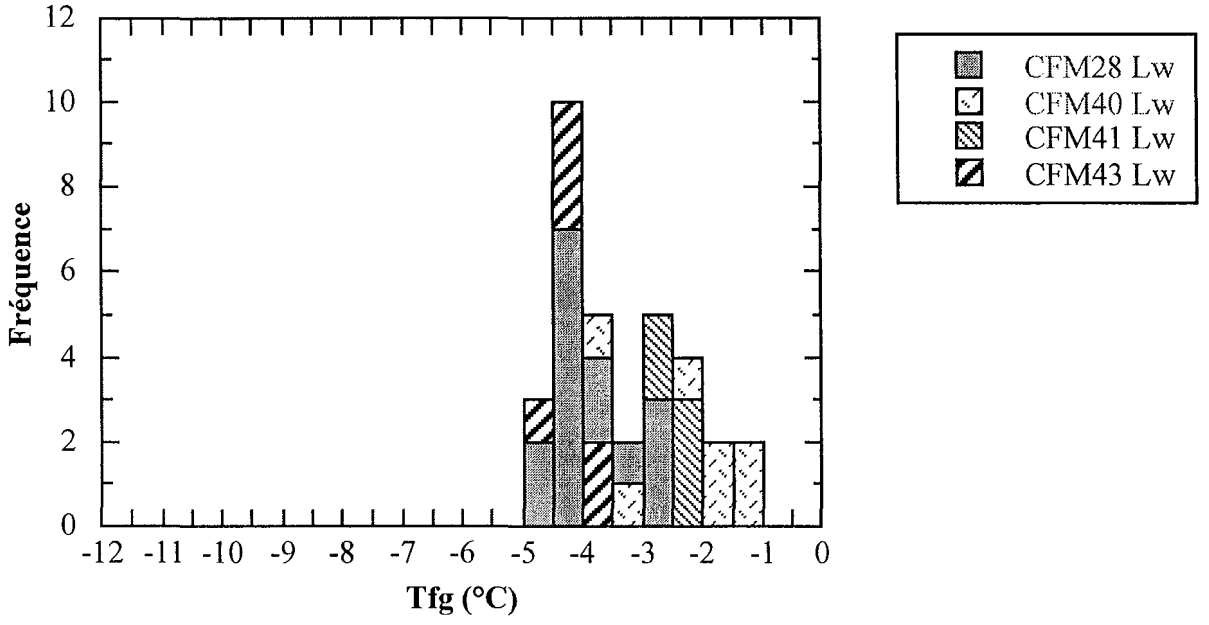


Fig. III-11: Histogramme des fréquences des Tfg pour les PIFà N170-30°E

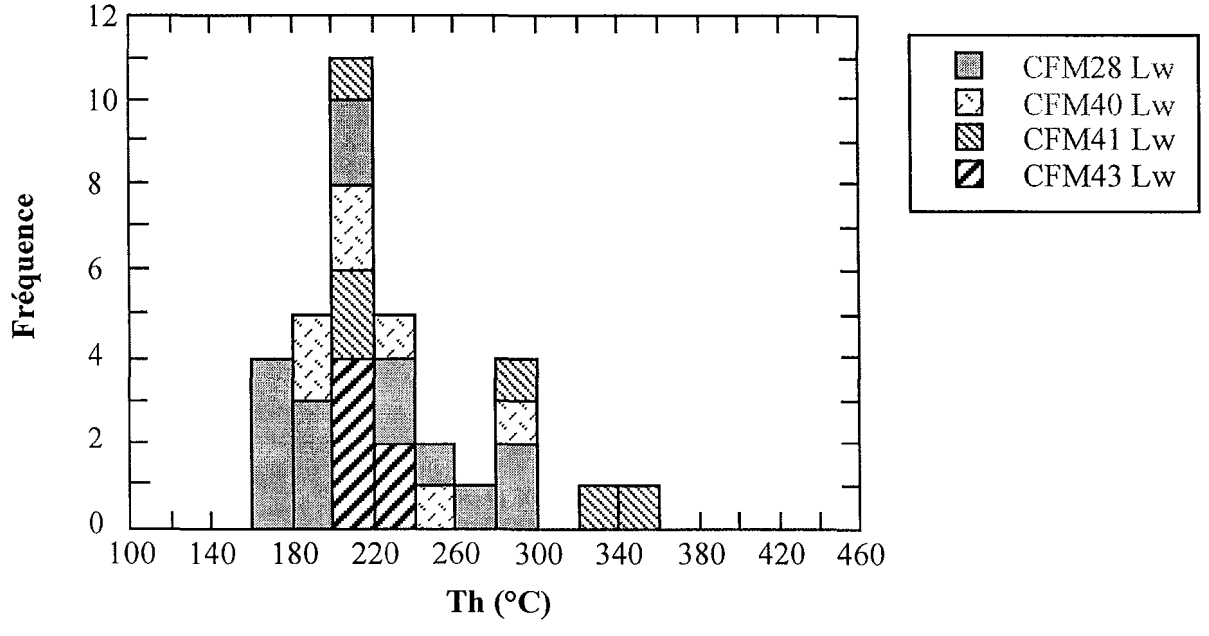


Fig. III-12: Histogramme des fréquences des Th pour les PIFà N170-30°E

II. 6- SYNTHESE

II. 6. 1- Les inclusions aquo-carboniques (Vw-c et Lw-c)

La majorité des inclusions étudiées dans les différentes directions, sont de nature aqueuse. Toutefois quelques rares inclusions sont aquo-carboniques. Elles ne sont observées que dans trois directions (fig.III-13 & fig.III-14) : PIF à N50-70°E où elles ont indiqué des $TfCO_2$ comprises entre -59.1°C et -58.1°C pour des températures de fusion de clathrates à 8±0.5°C. Pour la direction N80-110°E la température de fusion de CO_2 varie entre -58.9°C et -57.2°C alors que la TfClath est relativement constante (7.6-8.3°C). Les inclusions aquo-carboniques dans la direction N110-130°E enregistrent des TfCO2 entre -59.2°C et -57.2°C correspondant à des TfClath allant de 7.7°C à 10.4°C. La spectroscopie Raman effectuée sur quelques inclusions a révélé la présence de phases volatiles avec $CO_2>>N_2>CH_4$.

Les températures de fusion de la glace montrent une distribution bimodale (fig.III-15), avec un premier mode à -4.5°C constitué essentiellement par les inclusions des PIF à N110-130°E, mais aussi quelques inclusions de la direction N80-110°E. Quand au deuxième mode, à environ -2.5°C, il correspond à des inclusions de la direction N50-70°E et quelques unes de la direction N80-110°E.

Les températures d'homogénéisation sont très étalées (180-420°C), mais elles dessinent une distribution unimodale (fig.III-16) où sont représentées toutes les directions, avec un maximum vers 300 ± 20°C.

II. 6. 2- Les inclusions aqueuses (Vw et Lw)

II. 6. 2. 1- La température de fusion de la glace

Pour l'ensemble des directions, l'histogramme des fréquences des Tfg qui s'échelonnent de -0.3°C jusqu'à -10.7°C (fig.III-17) laisse apparaître une distribution bimodale bien évidente avec un premier mode autour de -2°C, représenté essentiellement par les inclusions des PIF à N50-70°E, PIF à N80-110°E et dans une moindre mesure par les

inclusions constituant les PIF à N170-30°E, qui, en plus du premier mode, montrent une zone de Tfg intermédiaire (Tfg à -4°C).

Le deuxième mode correspond à un pic de Tfg autour -5°C. la direction dominante est ici à N110-130°E, qui est moins bien représentée dans le premier mode. Les inclusions des PIF à N140-160°E sont représentées dans les deux modes. Elles varient entre -0.5°C et 2.5°C pour le premier et principalement entre -3.5°C et -5°C pour le deuxième.

Pour les PIF à N80-110°E, leurs inclusions sont représentées, globalement, avec la même fréquence dans les deux modes. C'est dans cette direction qu'on trouve les inclusions qui enregistrent la température de fusion de la glace la plus basse (entre -9.5°C et -11°C).

II. 6. 2. 2- La température d'homogénéisation

Les températures d'homogénéisation, comme nous l'avons vu précédemment, s'échelonnent de 150°C à 410°C (fig.III-18) avec 75% d'inclusions qui homogénéisent à des températures comprises entre 170°C et 250°C.

La distribution des Th pour les différentes directions est relativement similaire sauf pour les températures élevées (340-420°C). Elles caractérisent la direction N50-70°E avec les températures les plus fréquentes entre 180°C et 240°C où l'homogénéisation se fait en phase liquide aussi bien pour les inclusions aqueuses que pour les quelques rares aquo-carboniques rencontrées dans ce domaine. Quand aux températures élevées (340-410°C), elles correspondent à un groupe constitué par des liquides et des vapeurs aqueuses (et aquo-carboniques). Les inclusions des PIF à N80-110°E homogénéisent toutes en phases liquide, principalement entre 180°C et 260°C.

Dans la direction N110-130°E, les inclusions homogénéisent entre 160-340°C en phase liquide avec un petit groupe qui homogénéise en phase vapeur à 265-270°C et 310°C < Th <320°C. La majorité des inclusions qui homogénéisent entre 260°C et 340° sont aquo-carboniques, alors qu'en dessous de 260°C elles sont aqueuses.

Les Th dans les PIF à N140-160°E couvrent un intervalle de températures allant de 160-340°C, cependant les températures les plus fréquentes se situent entre 160°C et 260°C. L'homogénéisation se fait phase liquide même l'inclusion aquo-carbonique à Th=318°C.

Dans les PIF à N170-30°E, les inclusions fluides homogénéisent en phase liquide entre 170°C et 350°C où la température la plus représentée se situe vers 220°C. Ces inclusions sont aqueuses et l'absence de toute phase carbonique avait été confirmée par la microspectrométrie Raman.

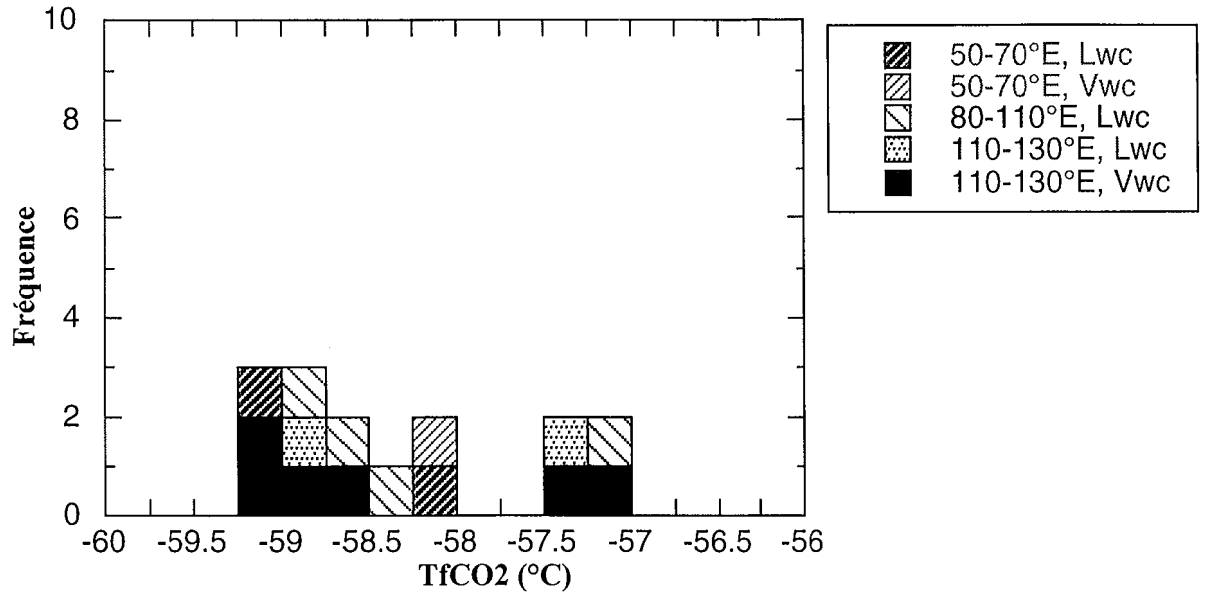


Fig. III-13 Histogrammes des $TfCO_2$ pour l'ensemble des PIF

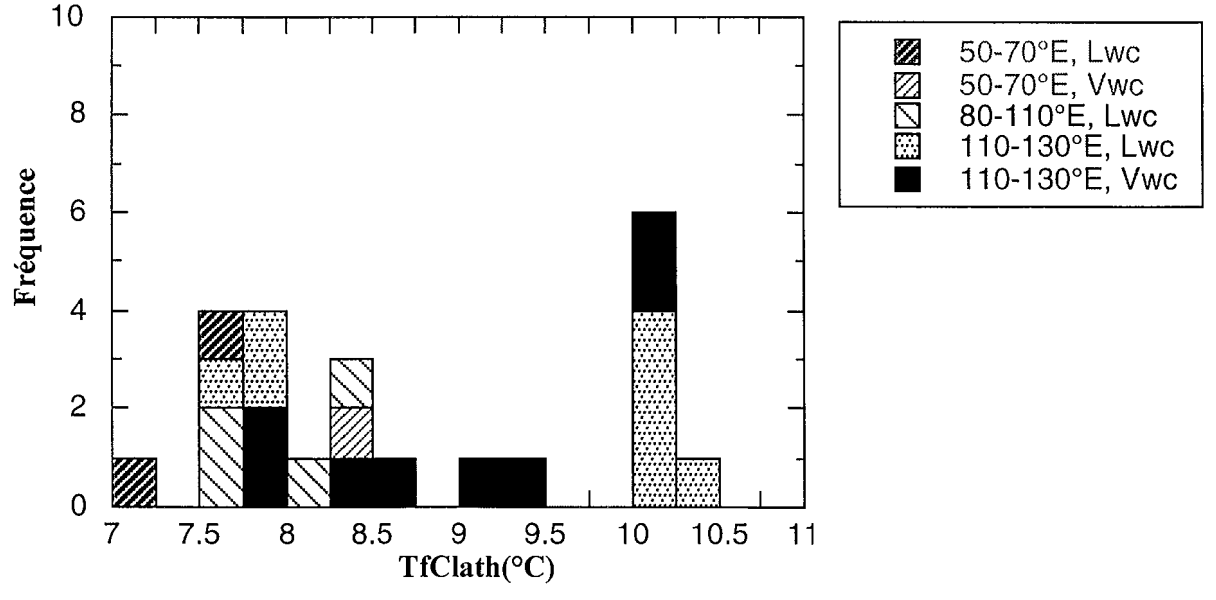


Fig. III-14 Histogrammes des TfClath pour l'ensemble des PIF

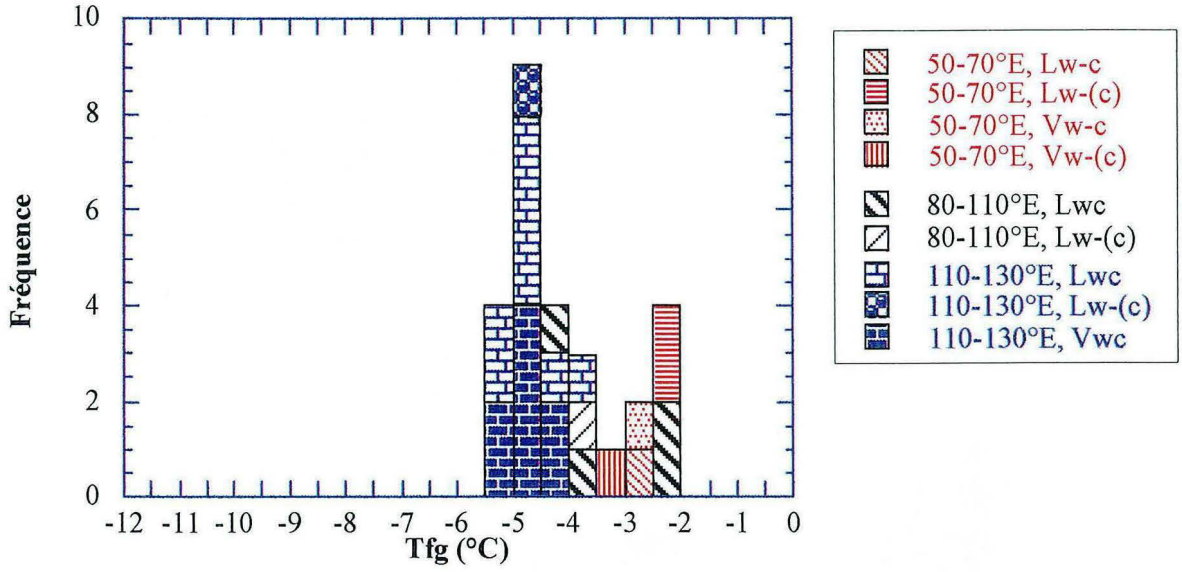


Fig. III-15 Histogramme des Tfg pour les inclusions aquo-carboniques dans les différentes directions de PIF

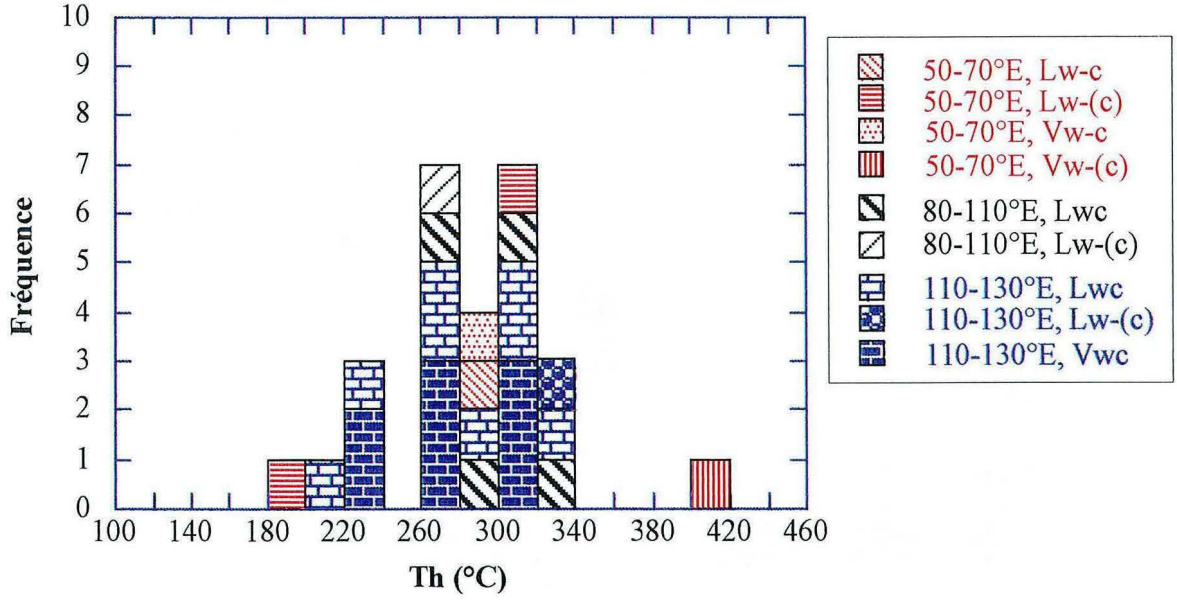


Fig. III-16 Histogramme des Th pour les inclusions aquo-carboniques dans les différentes directions de PIF

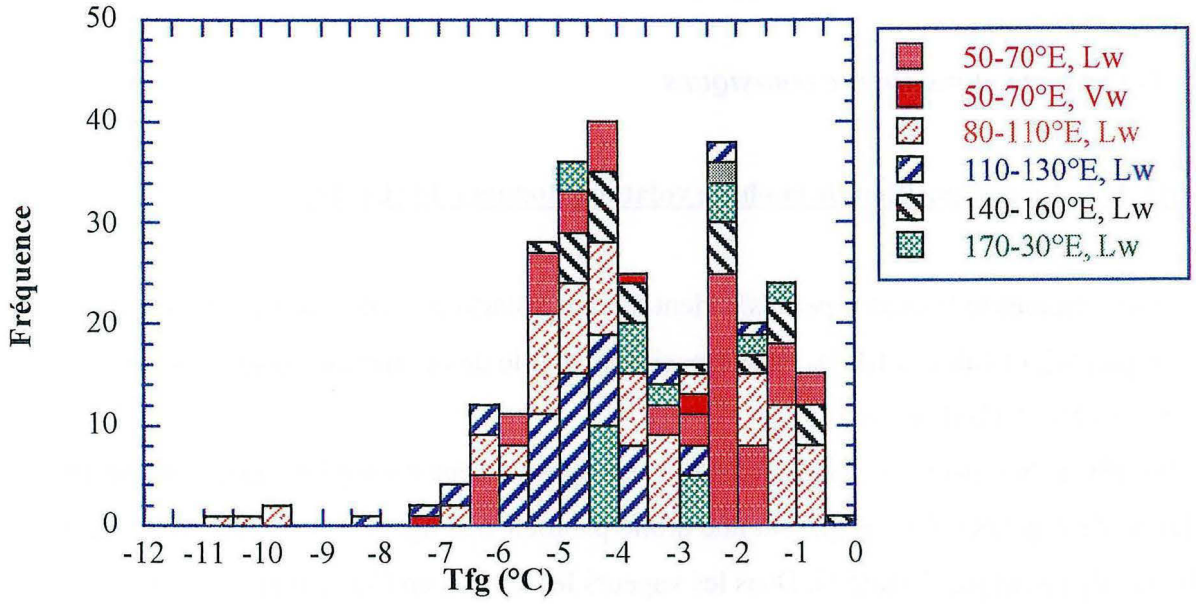


Fig. III-17 Histogramme des Tfg pour les inclusions aqueuses dans les différentes directions de PIF.

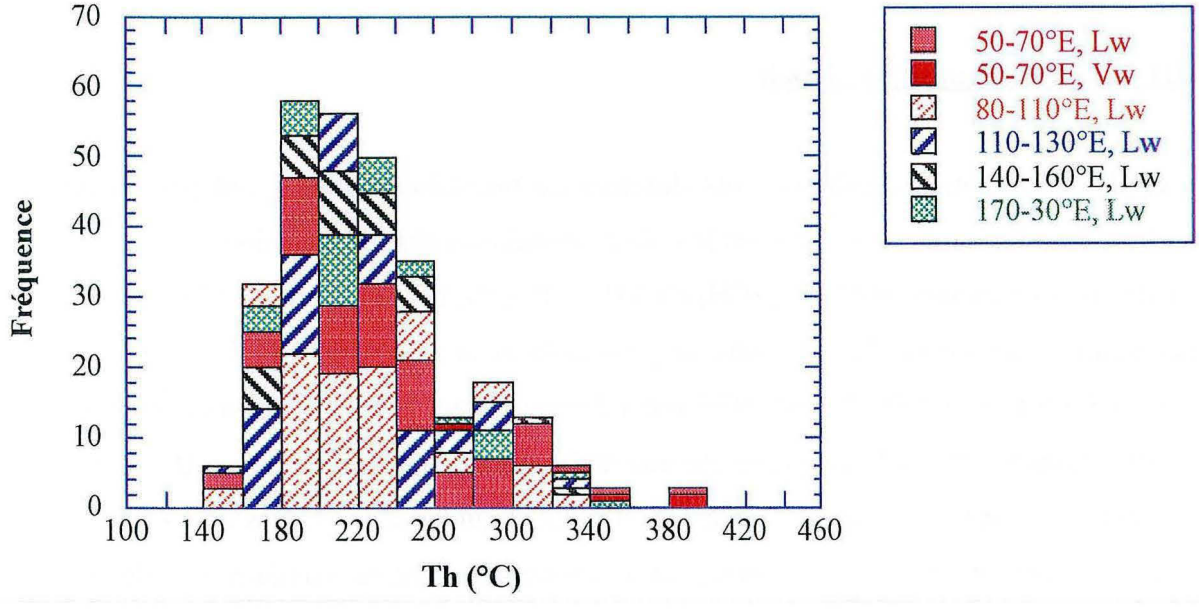


Fig. III-18 Histogramme des Th pour les inclusions aqueuses dans les différentes directions de PIF

III- COMPOSITION DES FLUIDES

III. 1- LES INCLUSIONS AQUO-CARBONIQUES

III. 1. 1- La composition de la phase volatile : données du RAMAN

La microspectrométrie Raman a permis d'identifier les volatils présents dans la phase vapeur et de les quantifier (Tableau III-4). La composition volatile de ces inclusions est très variable mais CO_2 >> N_2> CH_4 (Fig. III-19).

Dans les PIF à N110-130°E, la composition est relativement homogène qu'il s'agisse de liquides ou de vapeurs ; elle s'aligne sur une droite parallèle à la ligne CO_2-N_2 avec une teneur en CH_4 ne dépassant pas 5 mole %. Dans les vapeurs les teneurs en CO_2 varient entre 82 % et 95 mole %, alors que pour les liquide elle varie de 87 % à 95 mole %.

Dans la direction N80-110°E, toutes les inclusions homogénéisent en phase liquide. Leur composition en volatils est très variable, mais avec un taux de N_2 relativement constant (<15mole %). La teneur en CO_2 varie entre 58% et 90 mole %et le CH_4 varie entre 4 % et 40 mole %.

La composition de la phase carbonique dans la direction N50-70°E fluctue mais elle s'aligne sur une droite d'évolution qui relie le pôle CO_2 et le point à 25% CH_4-25% N_2-50% CO_2.

III. 1. 2- La composition globale

Les données Raman combinées aux données de microthermométrie ont permis de calculer la composition totale, la densité et le volume molaire de chaque inclusion.

Dans le diagramme ternaire H_2O-CO_2-(CH_4+N_2) (Fig. III-20), la composition de la majorité des inclusions constitue un "trend" entre le pôle H_2O et le pôle CO_2 (84 % < H2O < 98 mole %). La teneur en CH_4+N_2 est inférieure à 3 mole % sauf pour les vapeurs contenues dans les directions à N50-70°E dont la teneur atteint 5 mole % pour des teneurs en H_2O entre 85 et 90 mole % et entre 8 et 11mole % pour le CO_2. Les liquides sont pauvres en volatils (0 $\leq$ CH_4+N_2 $\leq$ 2 mole %; 3 $\leq$ CO_2 $\leq$ 12 mole %). Cette composition est similaire à celle des fluides piégés dans les PIF à N80-110 avec un peu plus de méthane (0-3 mole %).

PIF à 50-70°E	*Typologie des I.F.*	*CO_2 (mole.%)*	*CH_4 (mole.%)*	*N_2 (mole.%)*
CFM40	Vw-c	77.5	10.6	11.9
CFM40	Lw-c	79.0	10.2	10.8
CFM29	Vw-(c)	72.1	8.9	19.0
CFM41	Lw-(c)	100.0	0.0	0.0
CFM41	Lw-(c)	94.1	1.7	4.2
PIF à 80-110°E	***Typologie***	***CO_2 (mole.%)***	***CH_4 (mole.%)***	***N_2 (mole.%)***
CFM40	Lw-(c)	52.6	3.4	44
CFM40	Lw-c	58.5	39.2	2.3
	Lw-c	63.5	28.3	8.2
	Lw-c	71.2	17.9	10.9
	Lw-c	90.0	3.4	6.6
PIF à 110-130°E	***Typologie***	***CO_2 (mole.%)***	***CH_4 (mole.%)***	***N_2 (mole.%)***
CFM41	Vw-(c)	87.4	1.1	11.5
CFM41	Vw-c	88.5	0.7	10.8
		90.0	1.5	8.5
		91.2	1.0	7.8
		94.0	1.5	4.5
		81.6	2.1	16.3
CFM41	Lw-(c)	87.7	3.0	9.3
CFM41	Lw-c	92.7	1.3	6.0
		89.8	1.7	8.5
		88.3	1.2	10.5
		90.8	0.8	8.4
		90.9	1.9	7.2
		90.5	2.2	7.3
		93.2	1.3	5.5

Tableau III-4 : Composition de la phase volatile dans les différentes directions.

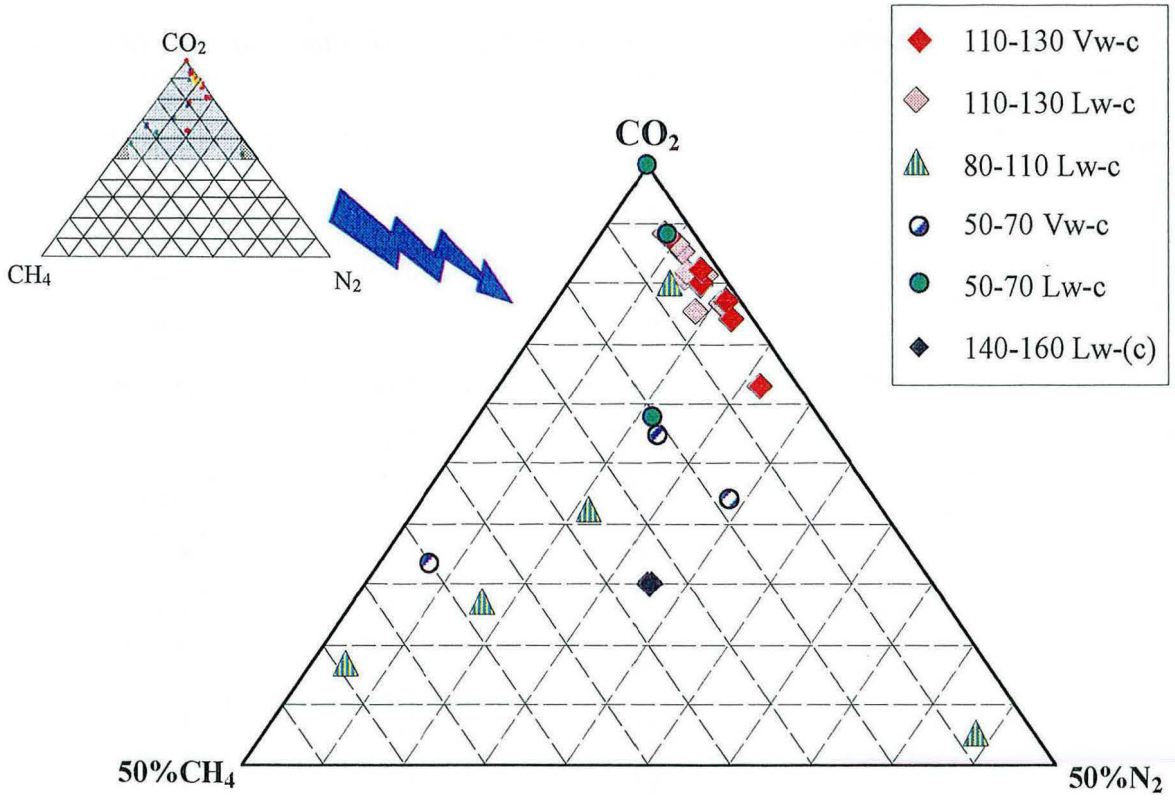
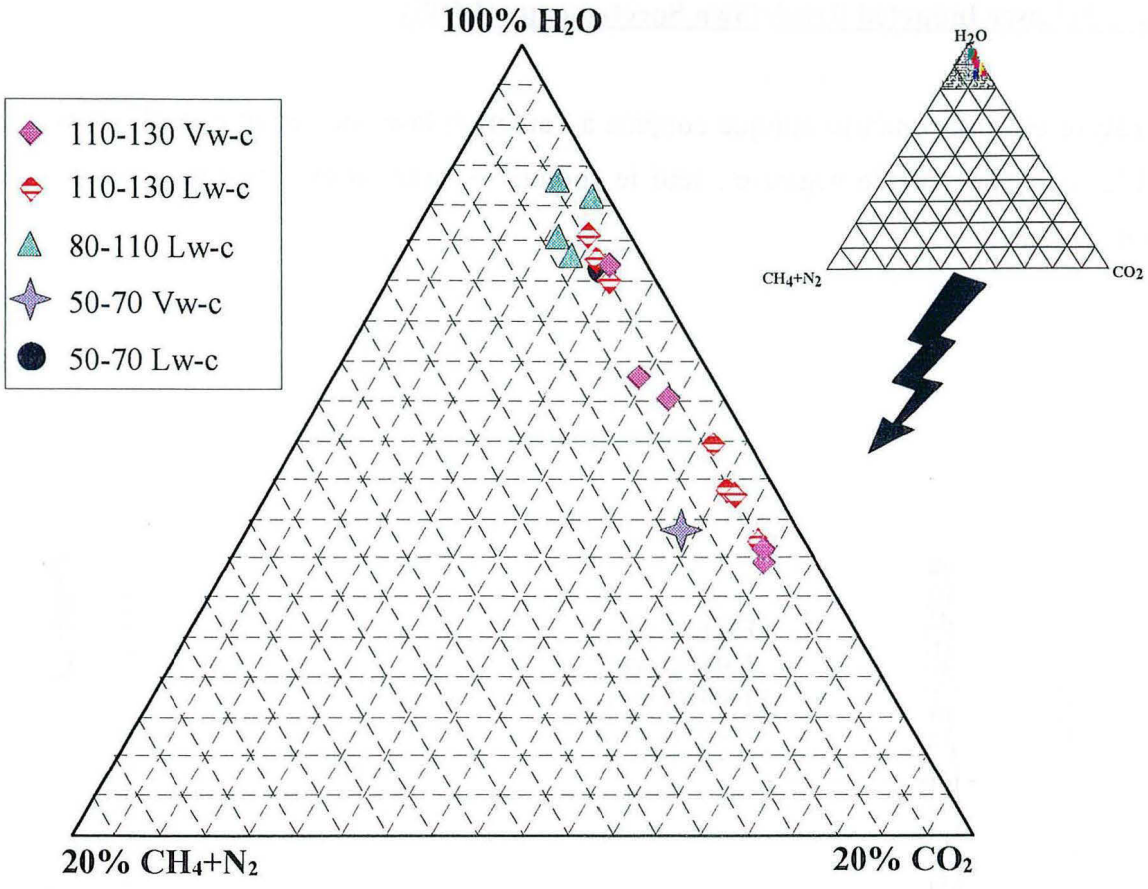


Fig. III-19. Diagramme ternaire CO_2-CH_4-N_2 de la composition des phases volatiles obtenue par microspectroscopie Raman



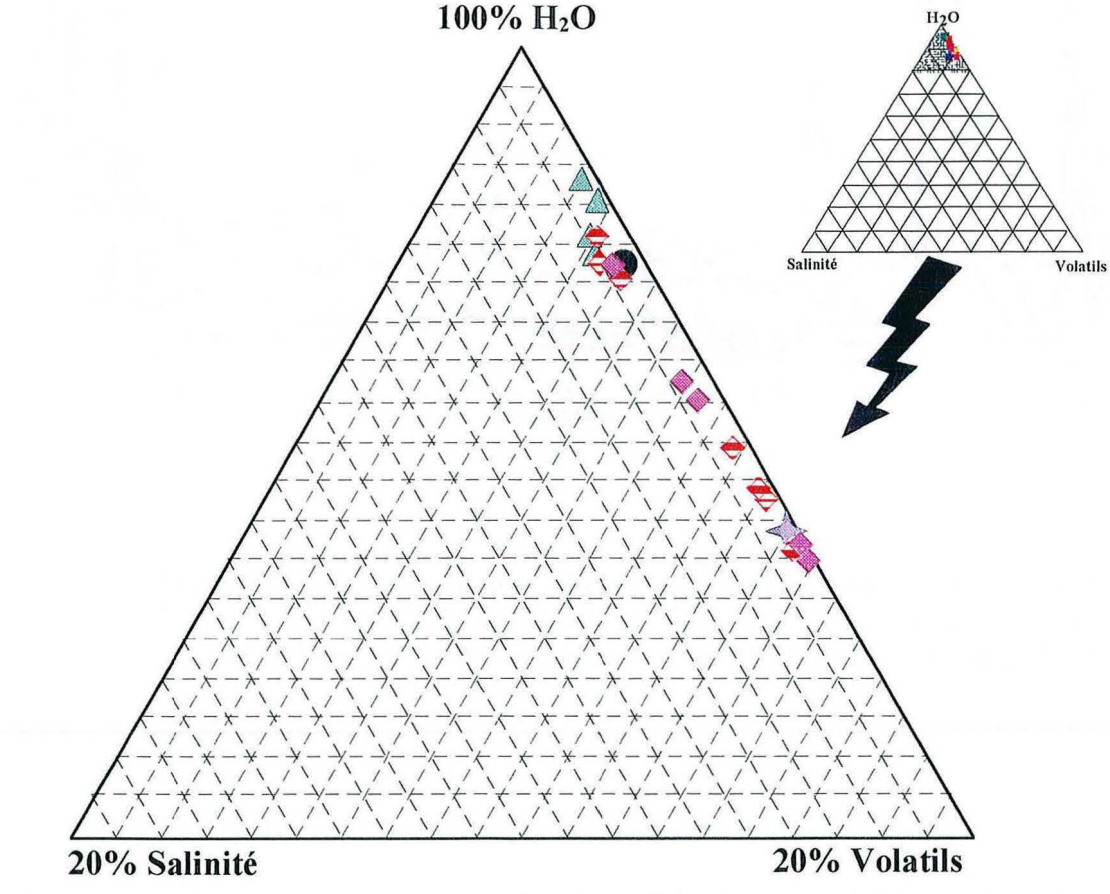


Fig. III-20: Diagramme ternaire H_2O-CO_2-(CH_4+N_2) et H_2O-Volatils-Salinité de la composition totale des inclusions fluides aquo-carboniques

III. 1. 3- Laser Inducted Breakdown Spectroscopy (LIBS)

L'analyse en spectrométrie optique couplée à l'ablation laser de certaines inclusions fluides (Fig. III-21) se révèle négative : seul le sodium est mis en évidence au seuil de détection de l'appareil.

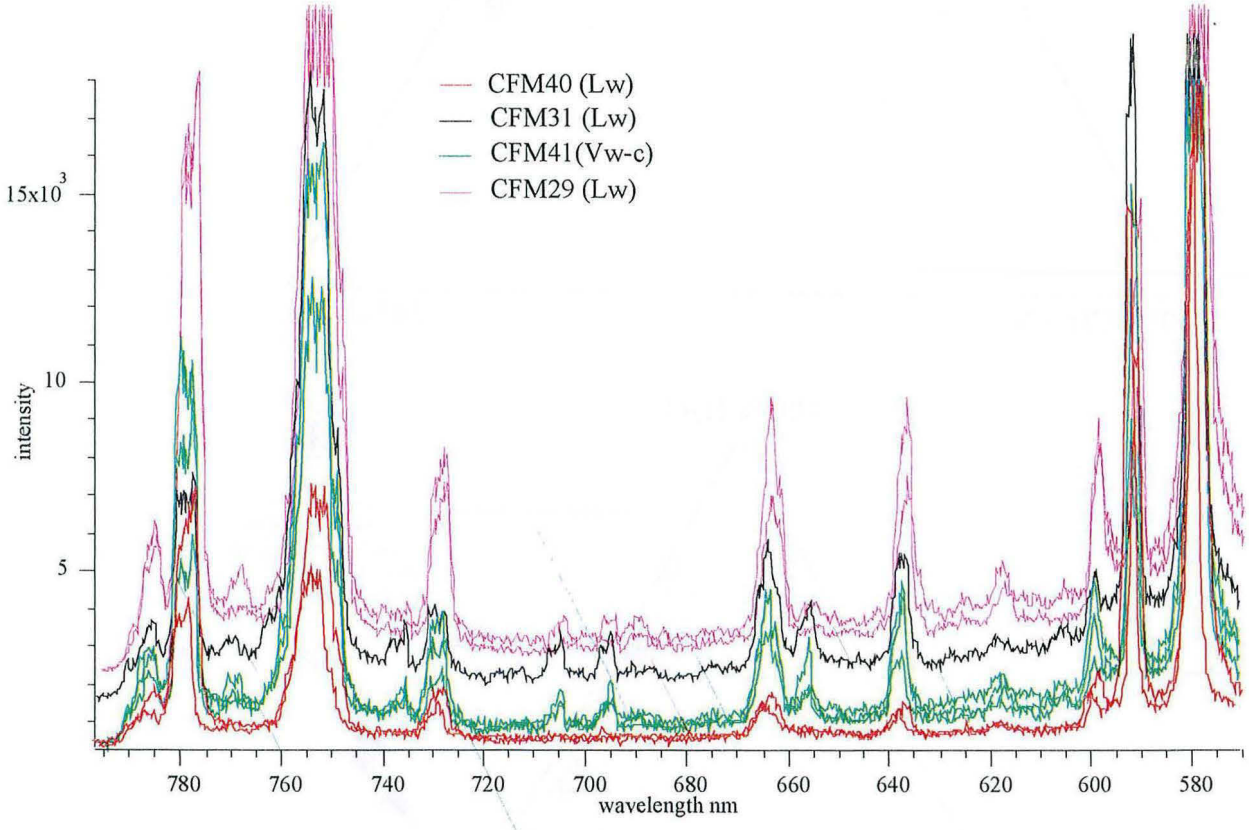


Fig. III-21 Spectres d'ablation laser des inclusions aqueuses et aquo-carboniques dans différents échantillons(CFM31 PIF à N80-110°E ; CFM41 PIF à N110-130°E, CFM29 dans PIF à N170-30°E, direction non déterminée pour CFM40).

IV- INTERPRETATION

IV. 1- MISE EN EVIDENCE DE DEUX FAMILLES DE FLUIDES

IV. 1. 1- Analyse des diagrammes de corrélation Tfg-Th

IV. 1. 1. 1- Les fluides aquo-carboniques

Le diagramme de corrélation de la figure III-22 montre que les inclusions fluides aquo-carboniques se répartissent en deux groupes :

(i) un ensemble de liquides et de vapeurs de relativement forte salinité, trouvés exclusivement dans les plans N110-130°E, faiblement pentés de l'échantillons SM41 ("rod" de quartz dans le micaschiste de Cros-Gallet ; cf. fig. II-6) ;

(ii) un ensemble, multidirectionnel, de liquides et de vapeurs nettement moins salés (cet ensemble inclut la plupart des inclusions de type Lw-(c).

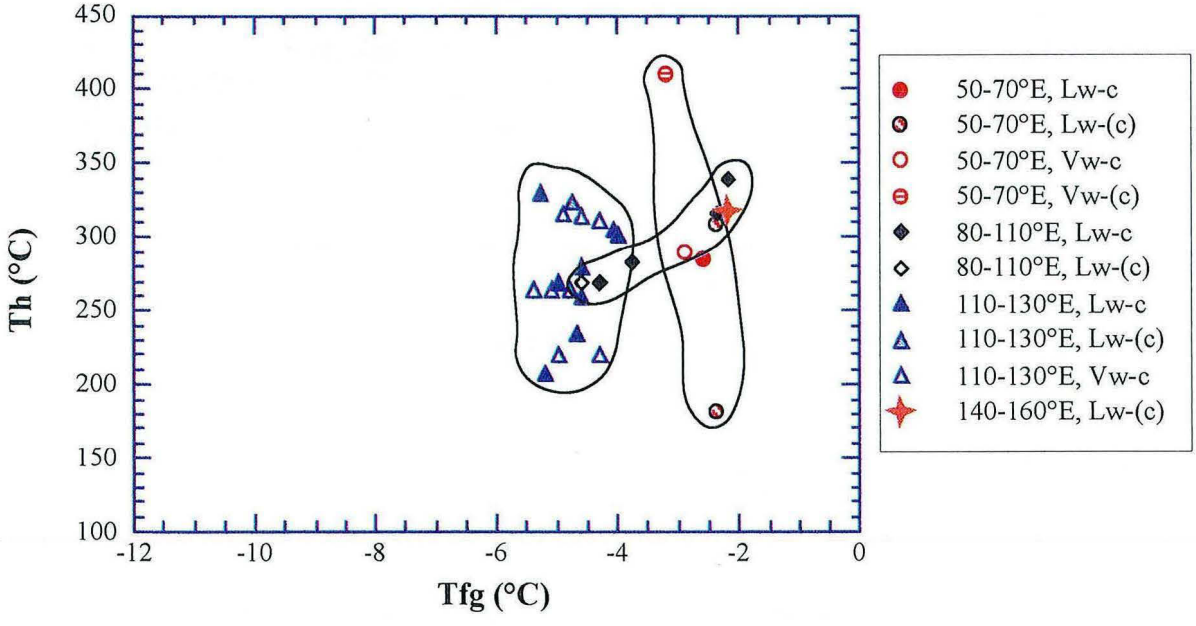


Fig. III-22: Diagramme Tfg-Th des inclusions aquo-carboniques dans l'ensemble des PIF

IV. 1. 1. 2- Les fluides aqueux : analyse par direction de PIF

(i) PIF à N80-110°E : on observe un "trend" (T1), très marqué (Fig. III-23), entre deux pôles, l'un salé (Tfg autour de -10°C, soit une salinité de 14.7 % poids éq. NaCl) à fort Th (autour de 325°C), l'autre très peu salé (Tfg autour de -1°C, soit 1.7 % poids éq. NaCl) et à faible Th (170°C). Ce "trend" est obscurci par une forte dispersion des Th à salinité constante, due en partie au phénomène de "necking down", matérialisé par le "trend" Tn (Fig. III-23).

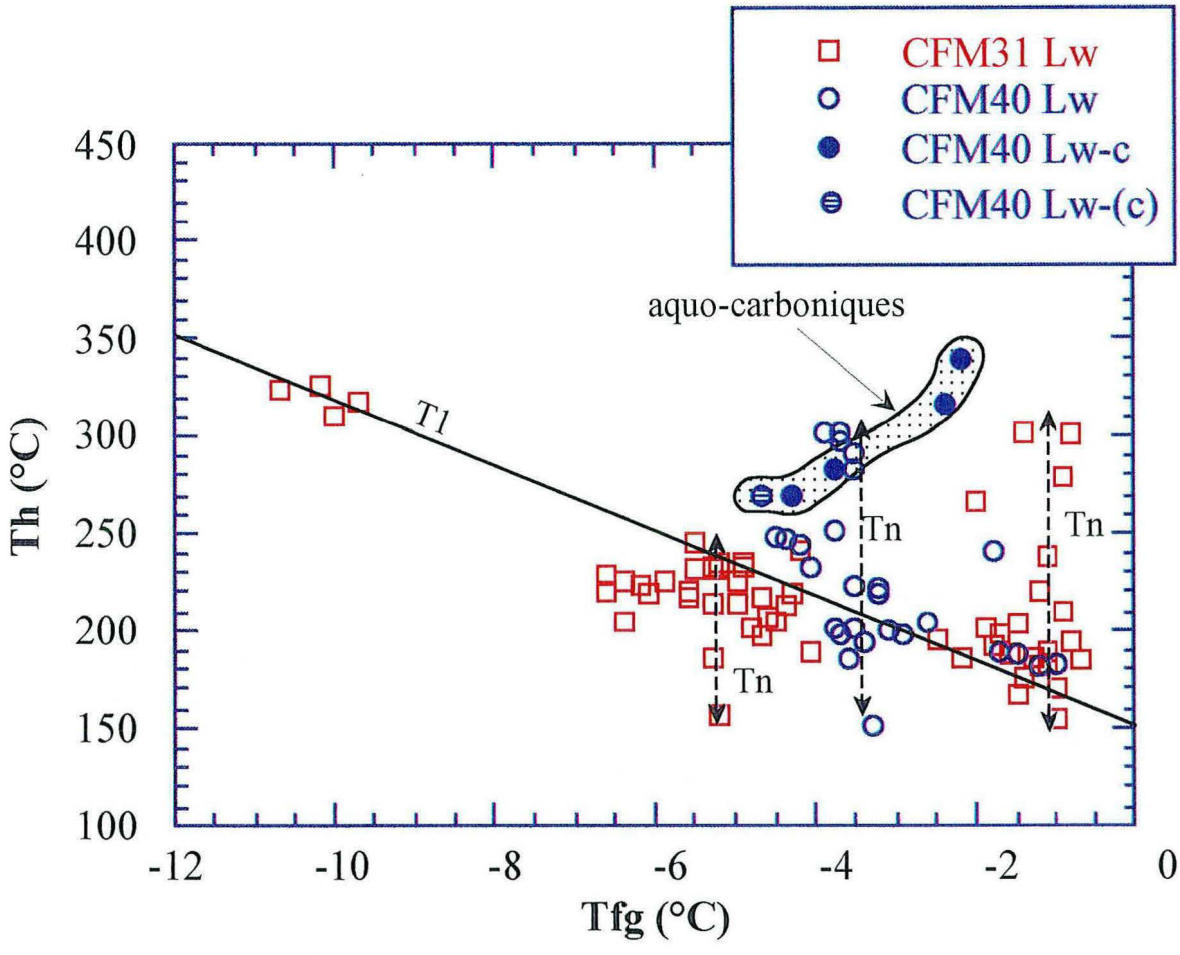


Fig. III-23: Diagramme Tfg-Th des inclusions dans l'ensemble des PIF à N80-110°E

(ii) PIF à N50-70°E : la plupart des inclusions de cette direction s'organisent selon un "trend" sensiblement différent, nommé T2 (Fig. III-24), même si on retrouve, toujours bien marqué, le "trend" T1 de la famille précédente ; le "trend" T2 est caractérisé par un pôle "vapeur" à très forte Th (jusqu'à 400°C et plus) et à salinité

modérée (Tfg à -3.5°C, 5.7 % poids éq. NaCl) et un pôle peu salé et basse Th, commun aux "trends" T1 et T2. Ici aussi des phénomène de "necking down" ont été observés.

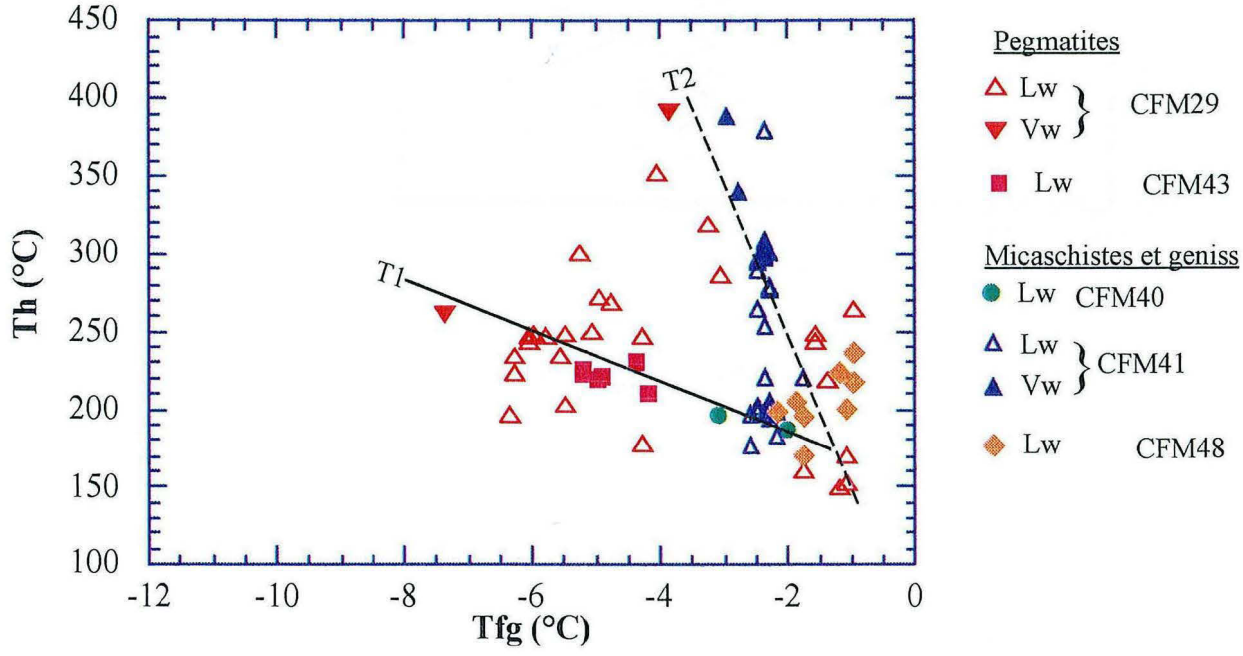


Fig. III-24: Diagramme Tfg-Th des inclusions dans l'ensemble des PIF à N50-70°E

(iii) PIF à N110-130°E : au "necking-down" près, les inclusions de cette famille s'organisent selon le même "trend" (T1) que celui des famille précédentes (Fig. III–25).

(iv) PIF à N140-160°E : dans cette famille, les différentes inclusions s'organisent, comme dans les familles précédentes, selon le "trend" T1 (Fig. III-26).

(v) PIF à N70-30°E : les inclusions de cette famille se disposent selon un nuage assez confus, que l'on peut, cependant, déconvoluer, sur la base des observations précédentes, selon les deux "trend" T1 et T2 (Fig. III-27)

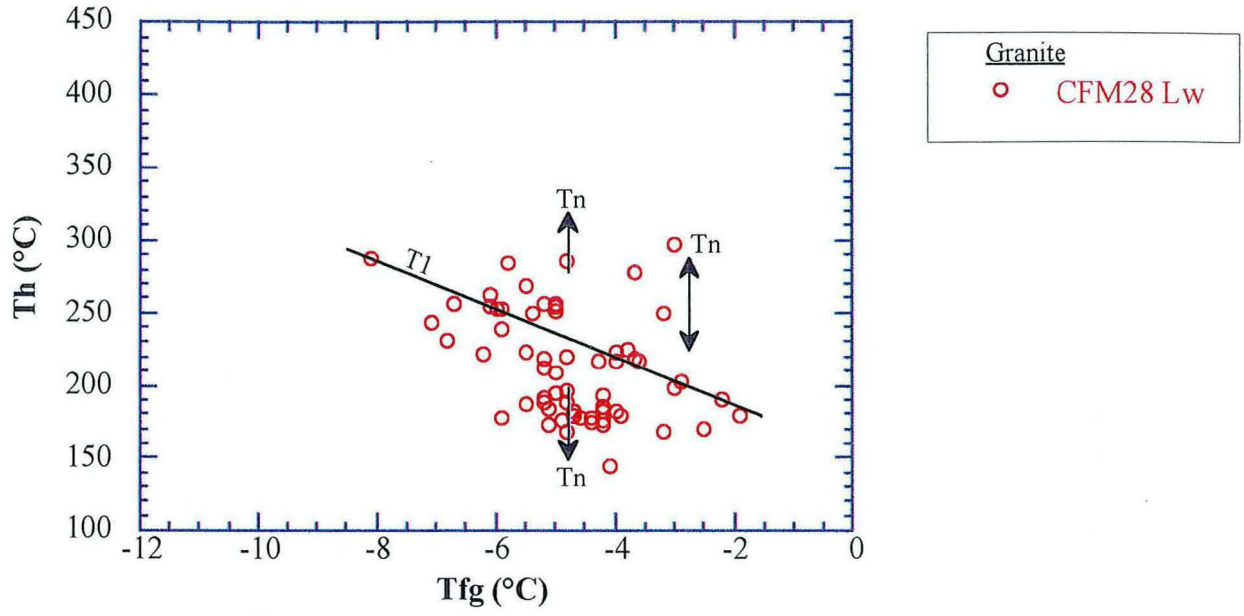


Fig. III-25: Diagramme Tfg-Th des inclusions dans l'ensemble des PIF à N110-130°E

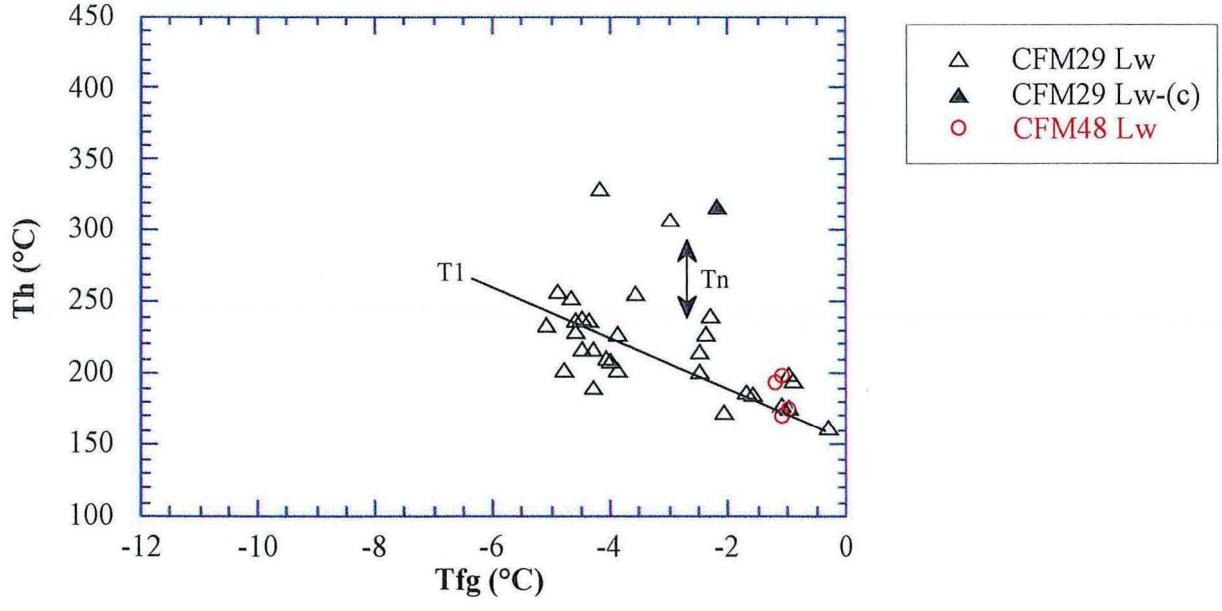


Fig. III-26: Diagramme Tfg-Th des inclusions dans l'ensemble des PIF à N140-160°E

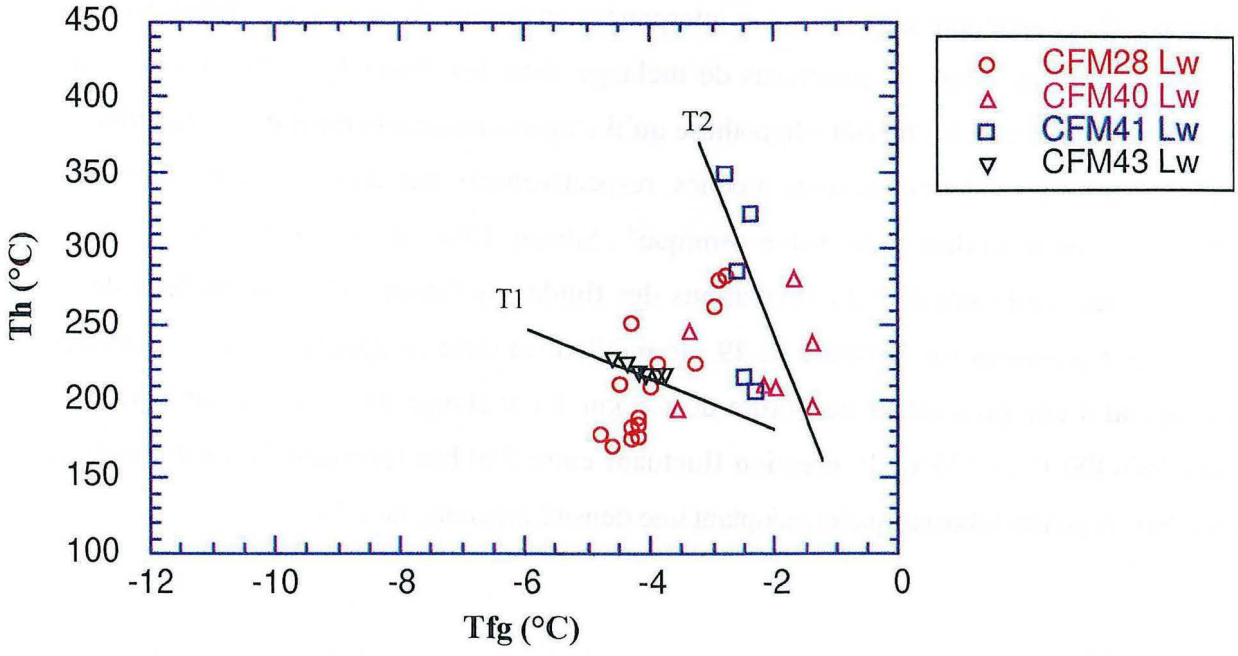


Fig. III-27: Diagramme Tfg-Th des inclusions dans l'ensemble des PIF à N170-30°E

IV. 1. 2- Synthèse

La figure III-28 confirme la réalité d'une partition des inclusions aqueuses selon les deux "trends" T1 et T2 définis dans le paragraphe précédent. On y observe, de plus, que les inclusions aqueuses à traces de volatils, de type Lw-(c) ou Vw-(c), s'intègrent parfaitement dans le "trend" T2 (de même, d'ailleurs, que de nombreuses Lw-c, cf. Fig. III-22). On peut donc envisager que l'ensemble des inclusions fluides qui ont fait l'objet de la présente étude enregistrent la circulation de deux familles de fluides bien distinctes :

(i) une première famille comprend les inclusions aquo-carboniques et les inclusions aqueuses du "trend" T2 (incluant les Lw-(c)) ;

(ii) la deuxième famille est représentée par les inclusions du "trend" T1.

IV. 2- Signification du "trend" T1

Le "trend" T1 s'interprète facilement en termes de mélange entre deux pôles hydrothermaux, un fluide chaud et salin (≥15% pds. éq. NaCl) et un fluide très peu salé (≤1% pds. éq. NaCl) et nettement plus froid. Cependant, comme le montre la figure III-28, les inclusions de ce "trend" se disposent plutôt sur une bande, avec une dispersion systématique en Th de l'ordre de 60°C, qu'il ne paraît pas possible d'attribuer au seul phénomène de "necking-down". Des

variations de ce type sont classiquement interprétées en termes de variation de pression et/ou de température au cours de processus de mélange dans les drains hydrothermaux (e. g., Vallance *et al.*, 2001). En faisant l'hypothèse qu'il s'agisse essentiellement de fluctuations de pression, entre les valeurs extrèmes proches, respectivement, des pressions litho- et hydro-statiques (selon le modèle de la "valve sismique" : Sibson, 1988), il est possible, par itération, d'estimer les conditions P-T de circulations des fluides du "trend" T1. Les résultats de ce travail sont présentés sur la figure III-29 : le meilleur modèle compatible avec les données correspond à une profondeur de l'ordre de 5.5 km. Le mélange T1 se serait donc effectué entre 380-400°C et 230°C, la pression fluctuant entre 550 bar (pression hydrostatique) et 1500 bar (pression lithostatique en adoptant une densité moyenne de 2.7).

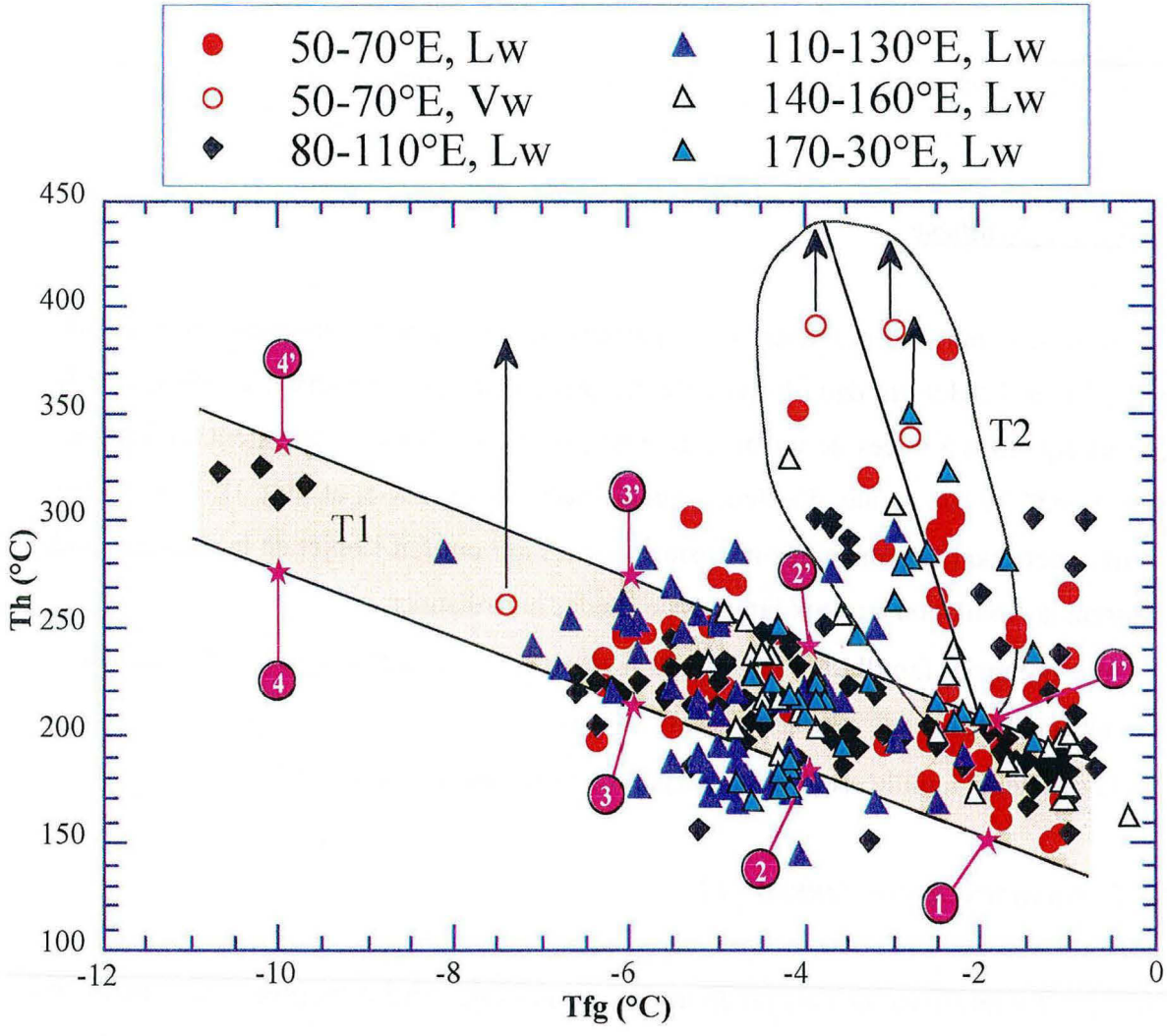


Fig. III-28 Diagramme Tfg~Th des inclusions aqueuses pour l'ensemble des PIF, avec la bande de mélange et les points de références pour la modélisation (voir Fig. III-29)

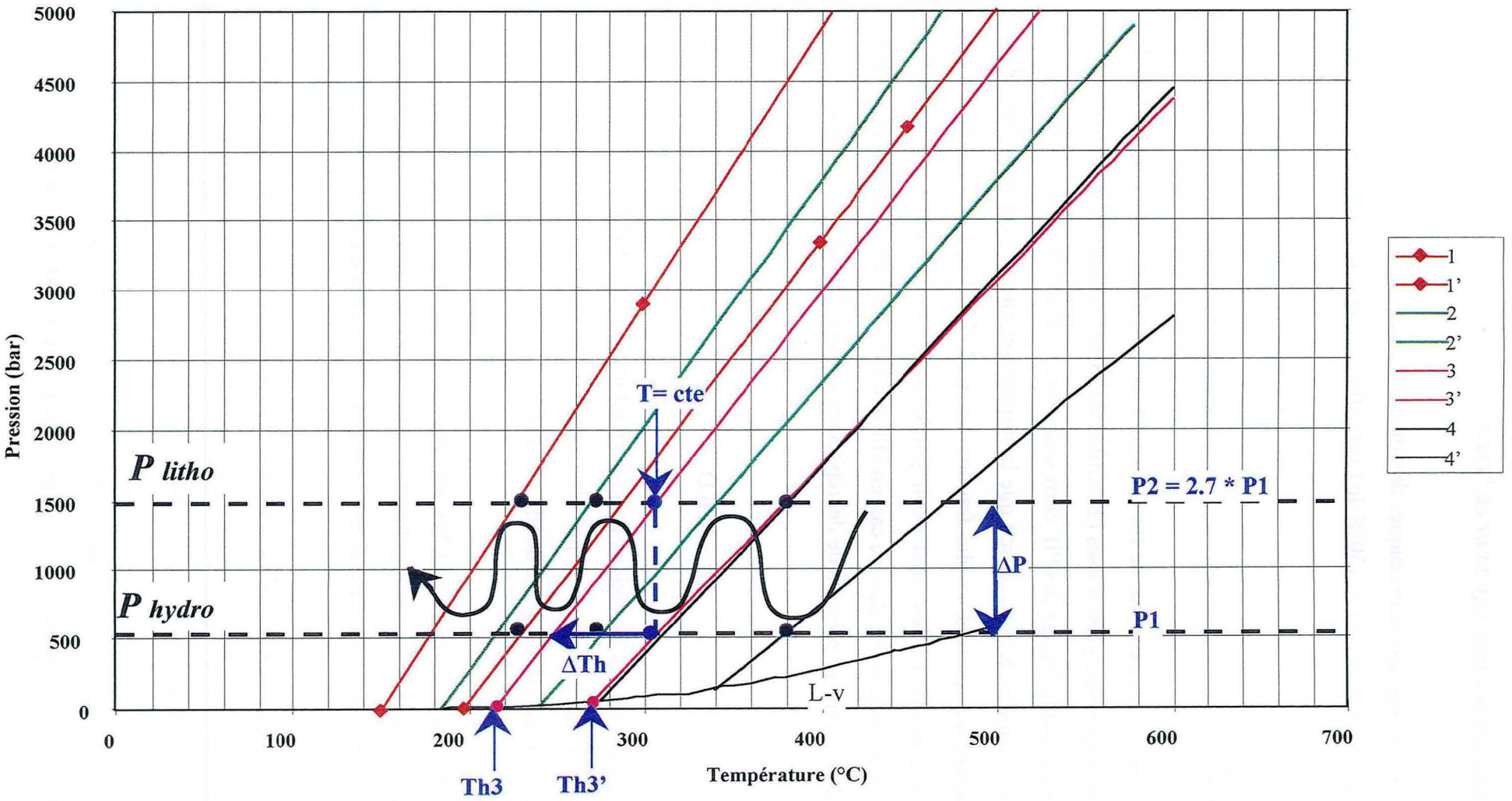


Fig. III-29 : ***Modèle P-T interprétatif du trend principal T1 ; chaque couple d'isochore délimite la bande de mélange à une Tfg donnée (-2, -4, -6 et -10°C)***

IV. 3- LES FLUIDES AQUO-CARBONIQUES ET LE "TREND" T2

Les isochores des inclusions aquo-carboniques dessinent un faisceau très dispersé (Fig. III-30), dont les inclusions des plans N110-130°E de l'échantillon SM41 (cf. § II-3) donnent une clé d'interprétation.

IV. 3. 1- SM41

Dans ces plans, en effet, la coexistence de Lw-c, majoritaires, régulières, de petite taille (10-15 μm) et de Vw-c, dispersées, plus grosses (20 μm) et de forme irrégulière, suggère que ces dernières résultent du ré-équilibrage des PIF correspondant lors d'une chute de pression plus ou moins isotherme : dans un tel cas, on sait que la surpression interne peut faire décrépiter les plus grosses inclusions, qui sont les plus fragiles (Leroy, 1979 ; Vityk et Bodnar, 1995) ; cependant, les Lw-c peuvent elles aussi avoir partiellement fui, ce qui expliquerait la dispersion des Th et des isochores ; dans ce cas, en utilisant la relation de Bodnar *et al.* (1989) qui lie la surpression interne (« pression de décrépitation », Pd) et le diamètre des inclusions (D) :

$$Pd = 4.26\ D^{-0.423},$$

il est possible de modéliser les conditions de la décrépitation dans les PIF N110-130°E de SM41 (Fig. III-30A). Le principe est que les isochores des Lw-c les plus raides sont représentatifs des conditions de piégeage du PIF ; et donc :

(i) d'une part, les "grosses" inclusions Vw-(c) (20 μm) résulteraient de la décrépitation de grosses inclusions Lw-c, soit une Pd de l'ordre de 1.2 kbar : on voit que cela est possible pour des pressions externes de 0.5 kbar à une température de 400°C ;

(ii) d'autre part, les rares petites inclusions Vw-c résulteraient de la décrépitation de Lw-c "normales" soit un Pd de 1.6 kbar : on voit que cela fixe une pression interne maximale de 2.5 kbar pour une température de 450°C.

Au total, les inclusions de ces PIF à N110-130°E auraient donc été piégées à $P \geq 2.5$ kbar et $T \geq 450$°C, et refléteraient un épisode de rééquilibrage autour de 0.5 kbar à 400°C.

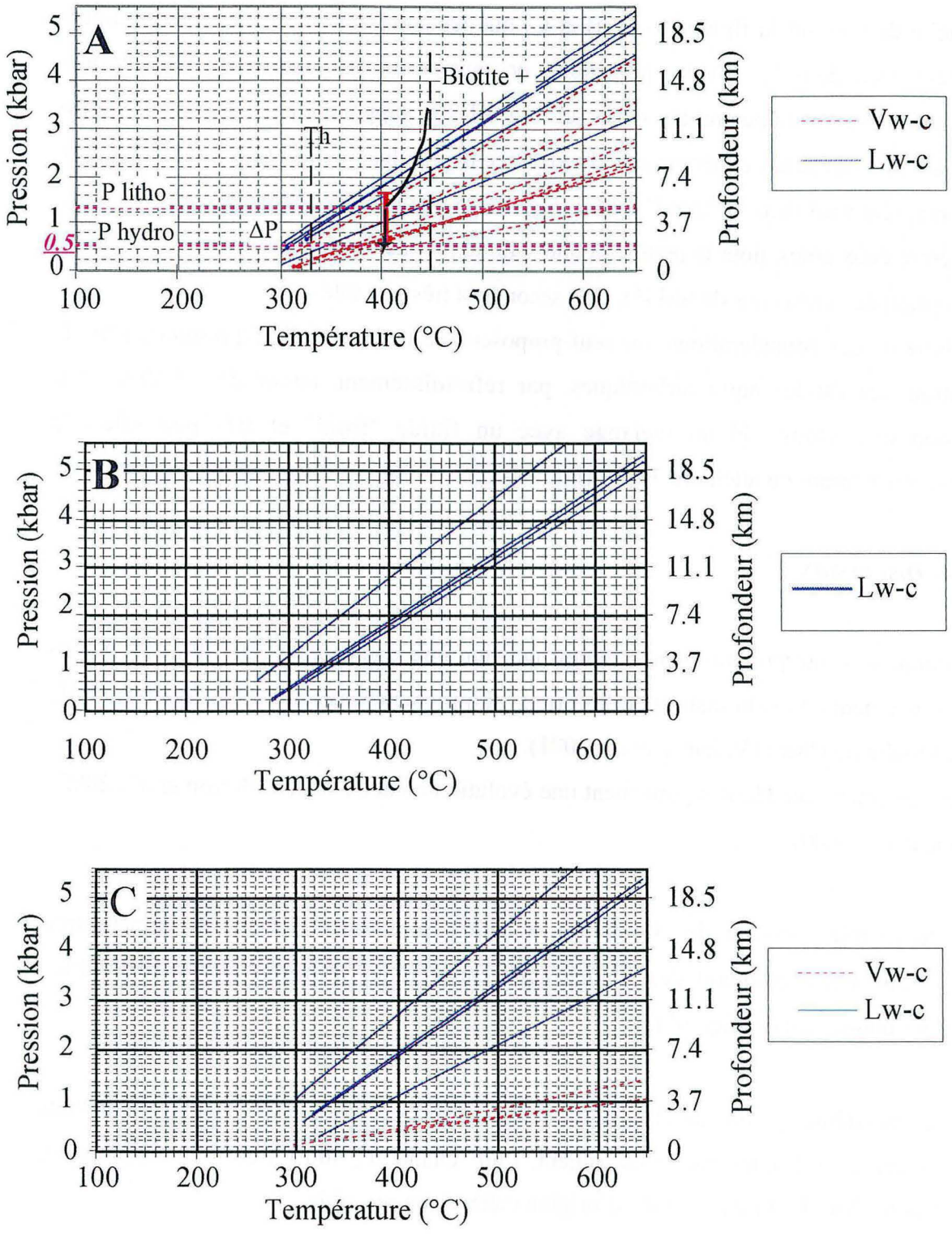


Fig. III-30 Les tracés des isochores des inclusions fluides aquo-carboniques dans les PIF à N110-130°E (A), N50-70°E (B) et N80-110°E (C).

IV. 3. 2- Le reste

Il est facile de voir sur la figure III-30 (B et C) que les autres inclusions aquo-carboniques s'intègrent bien dans le schéma précédent, en termes de pression et de température. Cependant, elles sont un peu moins salées (cf. Fig. III-20), suggérant le début d'un processus de dilution : ce qui serait cohérent avec l'existence des inclusions Lw-(c) ; celles-ci, à leur tour, s'intègrent bien dans le "trend" T2 (cf. Fig. III-28), qui se décrit comme un mélange de fluides entre deux pôles, dont le premier a une salinité proche de celles des aquo-carboniques (à l'exception des inclusions de SM41), et le second est très peu salé.
Sur la base de ces considérations, on peut proposer que le "trend" T2 représente la fin de l'évolution des fluides aquo-carboniques, par refroidissement autour de 0.5 kbar (voir discussion ci-dessous) dû au mélange avec un fluide "froid" et très peu salé ; le refroidissement aurait pu atteindre 300°C (Fig. III-31).

IV. 4- DISCUSSION

Les résultats des interprétations précédentes peuvent être comparés à ceux qui sont acquis dans les gisements d'or du district de St-Yrieix : Lauriéras (Essarraj, 1992 ; Essarraj *et al.*, 2001) ; Moulin de Chéni (Vallance *et al.*, 2001).
Dans ces gisement, on décrit typiquement une évolution en deux stades (Boiron *et al.*, 2000 ; Fourcade *et al.*, 2000) :

(i) un premier épisode de circulation, à hautes pressions($\leq$ 3kbar) et températures ($\leq$ 500°C), impliquant des fluides aquo-carboniques d'origine profonde (fluides "pseudo-métamorphiques") ;

(ii) un deuxième épisode de circulation, à "basse" pression (autour de 0.5 kbar), mettant en jeu deux fluides qui se mélangent, l'un "chaud" ($\geq$ 400°C) et modérément salé, l'autre "froid" et très peu salé, d'origine météorique probable.

La transition entre ces deux régimes est attribuée à la tectonique : suite à un soulèvement régulier, au cours duquel la pression et la température semblent avoir diminué de façon monotone jusque vers 1-1.5 kbar et 400°C, la pression restant lithostatique, l'apparition d'une tectonique en extension permet le passage "brutal" en conditions hydrostatiques et l'invasion du système hydrothermal par des eaux "météoriques" : c'est précisément la mise en

communication de deux réservoirs (l'un profond, l'autre superficiel) que permet cette tectonique qui est à l'origine du dépôt de l'or.

Comme le montre la figure III-31, nos données sont en excellent accord avec ces conclusions : d'une part, l'évolution des fluides aquo-carboniques et des fluides aqueux du "trend" T2 correspond bien en température et pression à celle des fluides précoces de Lauriéras et de Cheni ; d'autre part le "trend" T1 se superpose parfaitement au "trend" de mélange des fluides aurifères.

En outre, nos résultats permettent d'affiner le modèle général, sur quatre points :

(i) *La transition lithostatique-hydrostatique* : si nos interprétations du comportement des inclusions fluides des PIF N110-130°E de la lentille SM41 sont exactes, la pression de rééquilibrage de ca. 0.5 kbar que nous avons trouvée correspond à la fin de cette transition ; cette pression est la même que celle qui régit les circulation ultérieures, et il semble donc naturel de la considérer comme hydrostatique ; il est également naturel de penser qu'elle n'est pas inférieure à la pression hydrostatique du "trend" T1 (550 bar), ce qui correspond finalement à une profondeur de 5.5 km. Il s'ensuit que la transition lithostatique-hydrostatique s'est produite à une profondeur de cet ordre, quand, suite à la remontée isostatique (?), le bâti Sud- Limousin avait atteint une pression de l'ordre de 1.5 kbar.

(ii) *La fin de l'évolution des fluides précoces* : nos données suggèrent que dès le debut de la tectonique distensive, les fluides météoriques ont pu pénétrer dans le système et se mélanger aux fluides aquo-carboniques précoces ("trend" T2).

(iii) *Les conditions physiques pendant l'épisode de minéralisation* : de fréquentes fluctuations de pression sont mises en évidence (phénomène analogue à celui de "la valve sismique" de Sibson, 1988).

(iv) *Il est naturel de penser que ces conditions régnaient aussi à la fin de l'épisode précoce, lors de l'établissement du "trend" T2* : ceci ramènerait le refroidissement final de cet épisode autour de 350°C (Fig. III-31). Néanmoins, cette température reste plus faible que celle qui caractérise les fluides chauds du pôle salé du "trend" T1 (380-400°C) : l'apparition de ces fluides chauds dans le système est donc associée à un réchauffement significatif.

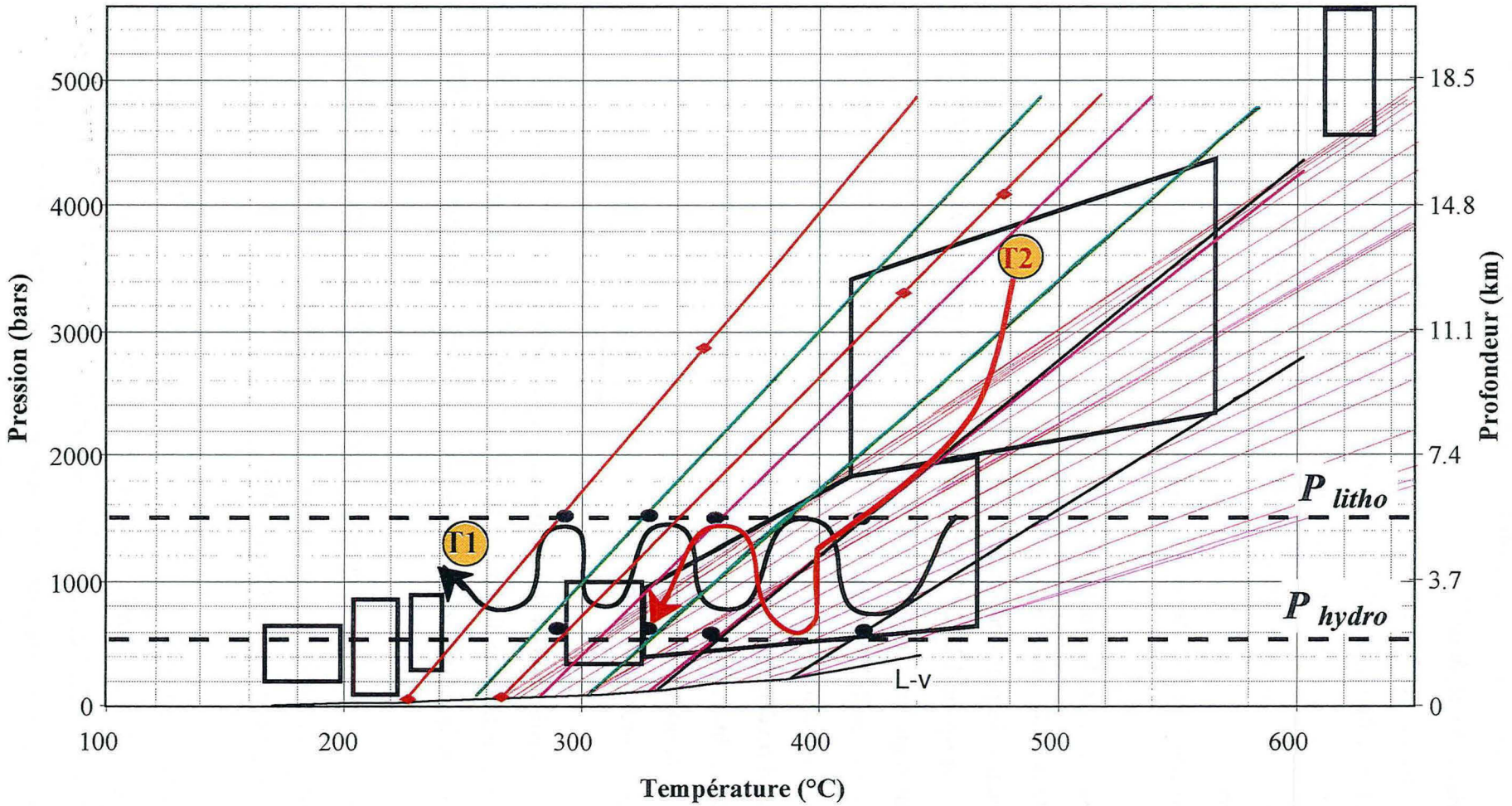


Fig. III-31 - Chemins P-T enregistrés par l'ensemble des fluides étudiés dans l'encaissant régional de St- Yiriex, comparés aux données issues des gisement d'or.
Encadrés : les estimations P-T pour les différents stades de Lauriéras et Cheni (Boiron et al., 2000)
T1, T2 : reconstitution des chemins P-T-t pour les fluides régionaux, avec T2 fluides précoces et T1 fluides aurifères (voir texte)

IV. 5- CONCLUSION

Les circulations fluides dans les terrains de l'Unité Inférieure des Gneiss vers la fin du Carbonifère, dans le district de Saint-Yrieix, ont les mêmes caractéristiques générales que dans les filons minéralisés en or :

(i) Deux régimes de circulation se succèdent : le premier, en contexte de soulèvement "lent" depuis une profondeur d'au moins 10 km, a lieu en conditions lithostatiques jusqu'au moment (à 5.5 km de profondeur) où le déclenchement d'une tectonique distensive provoque le passage brutal à un régime où alternent pression lithostatique et hydrostatique.

(ii) Les fluides les plus précoces sont des fluides aquo-carboniques (où domine le CO_2), d'origine profonde, circulant à 450-400°C pendant toute la remontée du bâti. Dès le commencement de la tectonique en extension, on voit apparaître dans le système des fluides "froids" et peu salés, qui ne se distinguent pas, en microthermométrie, des fluides d'origine météorique certaine observés dans la suite de l'histoire.

(iii) Après un certain temps de refroidissement, les fluides aquo-carboniques ayant été largement dilués, le système hydrothermal (où circulent toujours des fluides "météoriques") est ré-alimenté par des fluides salés ($\geq$ 15 % poids éq. NaCl) et chauds ($\geq$ 400°C), d'origine profonde probable, quoique d'une source sans doute différente de celle des fluides profonds précoces, puisqu'ils ne contiennent pas de constituants volatils.

Cependant, par rapport aux systèmes minéralisés, les circulations fluides qui sont développées dans les microfissures du bâti Sud-Limousin présentent une importante différence : les fluides aquo-carboniques, s'il y sont présents, comme on l'a vu, y restent rares et de plus sont dans l'ensemble plus dilués que dans l'encaissant proche des veines minéralisées ($X_{volatils} \leq 0.2$, contre 0.4 pour le moulin de Cheni par exemple : Vallance *et al.*, 2001). On en conclut que, tant que les microfractures ne se sont pas ouvertes dans le contexte extensif qui accompagne la minéralisation, les circulations de fluides à l'échelle régionale se sont essentiellement concentrées dans les drains majeurs ("shear zone" de Lauriéras, Cheni, etc...). En revanche le développement de la tectonique distensive, avec le réseau de microfractures "E–W" qui favorise les interconnections entre les autres réseaux, et où s'expriment le mieux les circulation du "trend" T1 (cf. Fig. III-23), se traduit par des circulations extensives aussi bien dans le bâti que dans les zones filoniennes.

CHAPITRE IV

MINERALOGIE ET MICROSTRUCTURES : DOMAINE D'ARGENTAT

I- INTRODUCTION

L'objectif est d'étudier la façon dont les fluides ont pu percoler dans l'emprise de la faille d'Argentat. Il faut pour cela faire l'inventaire des manifestations hydrothermales (néogenèse minérales et altération, veinules minéralisées et / ou disséminations, PIF) et les resituer dans leur cadre structural, en les reliant aux champs de déformation / contraintes responsables de la genèse des perméabilités, en tenant compte du fait que ces champs et leurs possibles variations ne sont pas nécessairement exprimés dans les objets régionaux, ni partout en même temps. La stratégie d'échantillonnage adoptée a consisté à sélectionner des sites privilégiés le long de la faille d'Argentat (grâce au travail de cartographie et de prospection des équipes du BRGM, notamment les travaux de V. Bouchot et J. Y. Roig), et pour chacun de ces sites, à extraire un maximum d'informations de l'étude des échantillons sélectionnés sur le terrain, on tente en suite de coordonner ces informations et d'en déduire une synthèse (forcément approximative) à l'échelle, d'abord du site, puis du système d'Argentat.
Dans le domaine de la faille d'Argentat, nous avons étudié trois secteurs où les manifestations hydrothermales sont particulièrement bien exprimées, respectivement dans la région de Gimel, à environ 15 km au Nord d'Argentat (secteur Nord), autour d'Argentat (secteur Centre), et dans la région de Grand-Fraud (secteur Sud). Dans chaque secteur l'échantillonnage a été réalisé, à la fois, dans les indices minéralisés, et le long de "transects" kilométriques, destinés à l'étude des fluides "régionaux".
Cette étude (Chapitre IV) constituera alors le cadre de référence pour l'étude des inclusions fluides (Chapitre V).

II - LE SECTEUR NORD

Dans le secteur Nord (Fig. IV-1), seront considérées successivement : le site de Gimel, les indices sulfurés de Puy-des-Angles et du Maupas ; et le site minéralisé AR109 sur la RN20.

II. 1- GIMEL CASCADE

La région de Gimel permet d'observer à la fois la faille ductile normale peu pentée d'Argentat, précoce, affectant ici le leucogranite de Millevaches ; et la faille normale verticale, plus tardive, et réputée fragile, qui sépare ici, comme partout, les micaschistes de Millevaches (autochtone) et les formations de l'Unité Inférieure des Gneiss représentées dans ce secteur par des "leptynites sodiques" (fig. IV-1).

II. 1. 1- La faille normale ductile

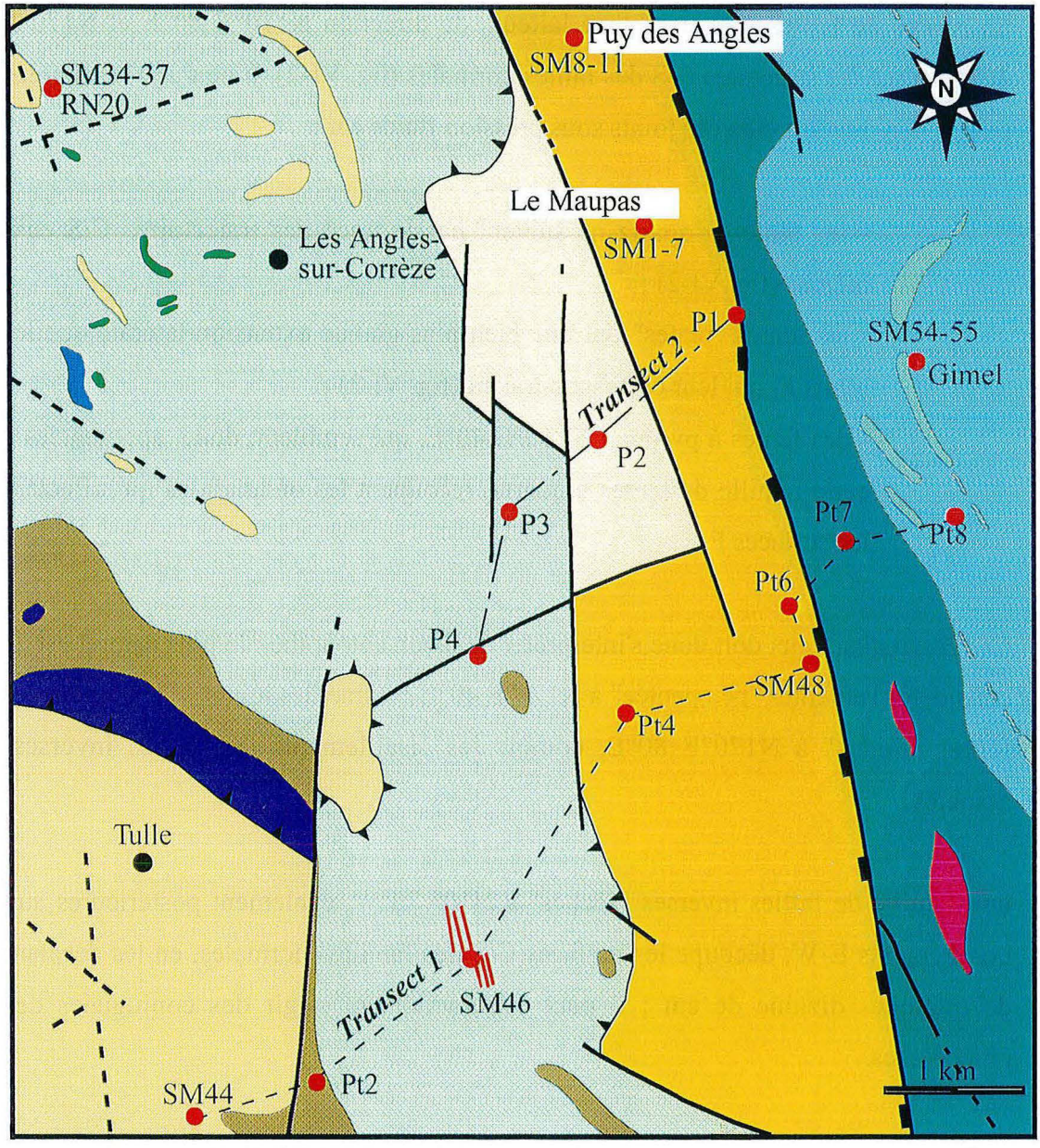
Etudiée au lieu dit "La cascade de Gimel", la faille ductile d'Argentat se manifeste comme des couloirs ultra-mylonitiques et silicifiés, de direction moyenne N175°E 20-30°W, avec des linéations d'étirement dans la ligne de plus grande pente.
Ces surfaces recoupent le leucogranite, où s'observent une foliation magmatique (schlierens, litages quartzo-feldspathiques) à N35°E 30°W et des surfaces de déformation plastique qui lui sont parallèles. La faille ductile plate est affectée par des ondulations à grand rayon de courbure et plans axiaux verticaux, dans les directions E-W et N-S.
En lame mince, les ultra-mylonites silicifiées contiennent une séricite syn-cinématique, suggérant que la silicification est corrélative d'un phénomène de lessivage acide avec hydrolyse des feldspaths. Elles sont recoupées par des veinules post-cinématiques verticales, à petits quartz automorphes "enchevêtrés", selon une direction majeure à N10°E, associée à une direction N170°E : celle-ci s'interprète en cisaillement, celle-la en tension.

II. 1. 2- La faille normale "fragile"

En allant vers l'Ouest (village de Gimel proprement dit), on observe d'abord que le leucogranite, dont la foliation est recoupée par des injections de granite à grain fin, est maintenant affecté par des cisaillements ductiles en faille normale mais à fort pendage (N160°E 70°W).
Puis, dans la zone de contact entre micaschistes et leptynites, une carrière dans les leptynites (P1, Fig. IV-1) permet les observations suivantes :

(i) la leptynite, apparemment silicifiée, dont on peut localement mesurer la foliation "relique" à N40°E 75°E, est recoupée par un réseau de cassures courbes (fig. IV-2) de même orientation (N160°E) mais de pendages contrastés (respectivement 40°E : F_1 ; et 80°E : F_2). Ces réseaux s'interprètent facilement comme un système C/S en faille normale, conjuguée (et un peu plus tardive) de celles de Gimel village.

(ii) les surfaces F_1 (à valeur "S") sont affectées de plis droits E-W à grands rayons de courbure (sans doute les mêmes que ceux qui, à Gimel Cascade, affectent les cisaillements plats).



Unité Supérieure des Gneiss

- Gneiss gris du Bas-Limousin
- Tonalite
- Hornblendite
- Amphibolites à hornblende
- Eclogite

Unité Inférieure des Gneiss

- Leptynites sodiques
- Leptynites de Tulle
- Leptynites d'Aubazine (potassique)

Unité du Para-autochtone

- Micaschiste de Millevache
- Leucogranites heterogènes
- Leucogranites homogènes
- Enclave de micaschiste

Les structures

- Faille normale
- Chevauchement
- Faille
- Site d'échantillonage
- Galerie de mine

Fig. IV-1. Carte géologique simplifiée du secteur Nord

(iii) un réseau de fentes à quartz blanc laiteux, de direction N170°E 80°E et N170°E 40°E, mime les structures C/S des failles normales (fig. VI-2). Il ne s'agit néanmoins pas de la réouverture de ces joints sous pression fluide car :

- les fentes à quartz ne suivent pas le tracé des trajectoires C/S eux-mêmes (fig. VI-2) ;
- les fentes "plates" ont une bien plus grande extension latérale que les joints F_1 qui leur correspondraient (fig. VI-2) ;
- des fentes à pyrite, à N160°E 40°E, qui semblent, donc, apparentées à cette famille de fentes à quartz, recoupent les ondulations qui affectent les surfaces F_1.

Ce réseau quartzeux doit donc s'interpréter de façon autonome : le plus naturel est de considérer les fentes "peu pentée" à N170°E 40°E comme des joints de tension, et les fentes "raides" à N170°E 80°E, comme les cisaillements (en failles inverses) associés.

(iv) une famille de failles inverses "sèches" à N10° 70°W, également postérieures aux bombements E-W, découpe les surfaces C/S des familles normales, en les décalant de quelques dizaine de cm ; il peut éventuellement s'agir des conjuguées des précédentes.

(v) enfin, un réseau de fines veinules de quartz laiteux à N10°E 80°E correspond très vraisemblablement à celles qui recoupent la faille ductile plate à Gimel -Cascade.

II. 1. 3- Conclusion

Ainsi, après la tectonique en extension E-W (d'abord ductile, puis plus fragile) qui caractérise le jeu primaire des failles d'Argentat, s'exprime, dans la région de Gimel, comme, nous le verrons, un peu plus à l'Est, dans le secteur hydrothermalisé de Puy des Angles- Maupas, une tectonique en raccourcissement horizontal, alternativement E-W et N-S. On est, en particulier, frappé par les similitudes entre le réseau de quartz qui s'observe dans l'emprise de la faille "fragile" et le réseau Q_2 de Puy des Angles (voir ci-après, § A. 2. 1. 1).

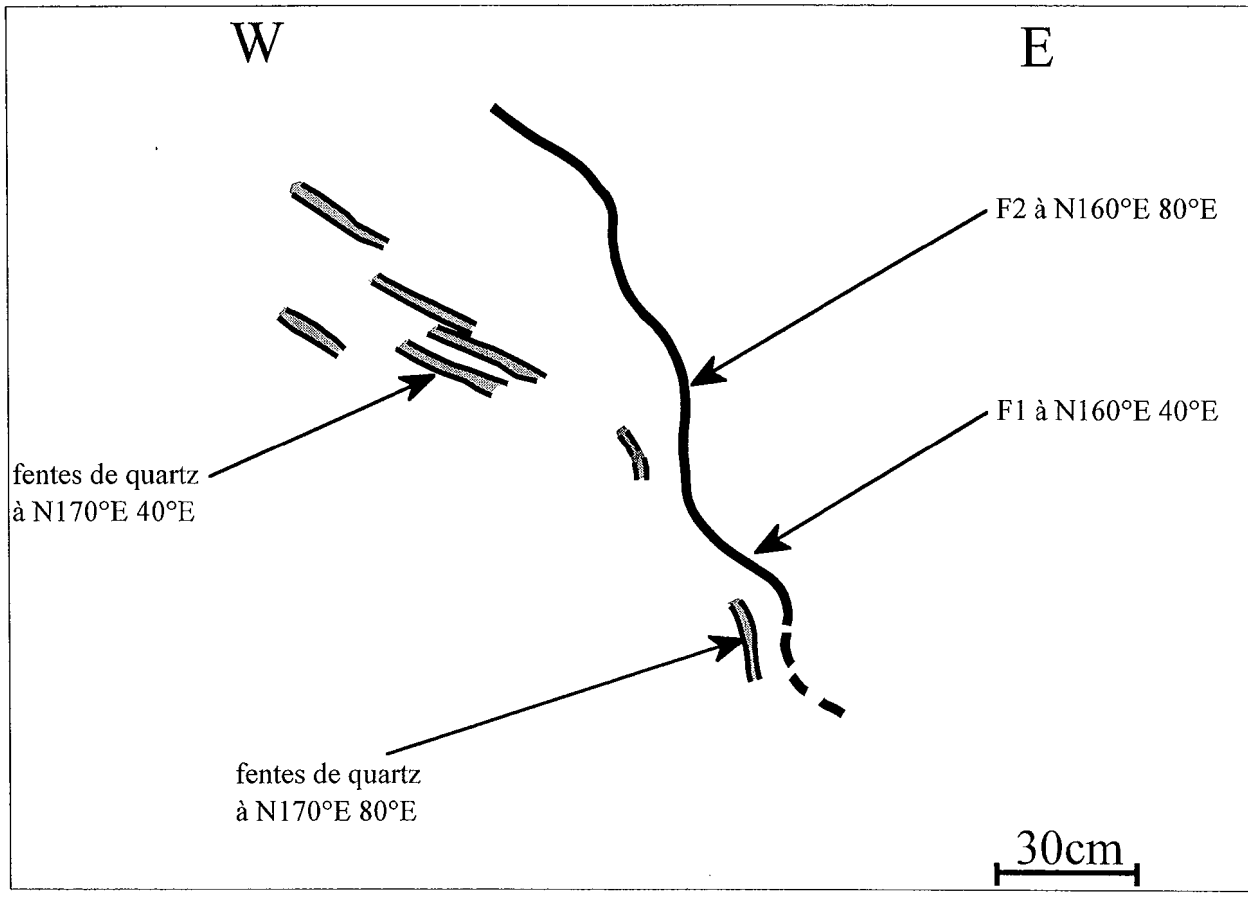


Fig. IV-2. Relation entre les fentes de quartz blanc laiteux et les structures C/S des failles normales (coupe interprétative).

II. 2- PUY-DES-ANGLES ET LE MAUPAS

Les deux indices de Puy-des-Angles et du Maupas sont en fait situés au toit de la faille ductile d'Argentat, dans l'Unité Inférieure des Gneiss, où ils paraissent s'aligner selon l'axe NW-SE d'un antiforme tardif déformant les schistosités (Fig. IV-3). Ils sont tous les deux encaissés dans des leptynites potassiques (leptynites d'Aubazine à microcline et biotite).

II. 2. 1 - Site de Puy-des-Angles

II. 2. 1. 1- Les caractères généraux

L'indice aurifère, qui s'allonge sur près de 500 m en NW-SE, comporte sur le terrain deux types de quartz : un quartz gris (Q_1) plus ou moins diffus, qui semble cependant dessiner un stockwerk très aléatoire (fracturation hydraulique probable) et un quartz (Q_2), apparemment stérile, plus tardif, et qui semble mieux organisé. Dans le quartz Q_2 on distingue en effet deux familles de joints ouverts et interconnectés (fracturation hydraulique) : des joints redressés, de direction moyenne N160-N0°E, avec de forts pendage Ouest, compris entre 50 et 70° ; et des joints beaucoup plus plats (allant de l'horizontale jusqu'à une trentaine de degrés vers l'Ouest). Ce système peut être interprété comme un ensemble de failles inverses et de joints de tension associés, qui témoigneraient donc d'un épisode de raccourcissement "E-W".

II. 2. 1. 2- Etude microstructurale

L'étude de trois échantillons orientés (SM9 à 11), étudiés dans des sections horizontales (Fig. IV-4 ; 5) permet de reconnaître une série d'événements hydrothermaux et tectoniques plus ou moins imbriqués affectant le quartz Q_1 :

(i) une expression précoce de sulfures de fer (arsénopyrite et pyrite subordonnée) sous forme d'agrégats (de taille millimétrique) de cristaux de petite taille (100µm environ) ; ces agrégats recoupent les quartz Q1 et sont recoupés par le quartz Q2, dont ils sont de toute façon absents (Fig. IV-5-A) ; ce sont ces sulfures qui déterminent le caractère gris de ces quartz nommés "quartz gris" ;

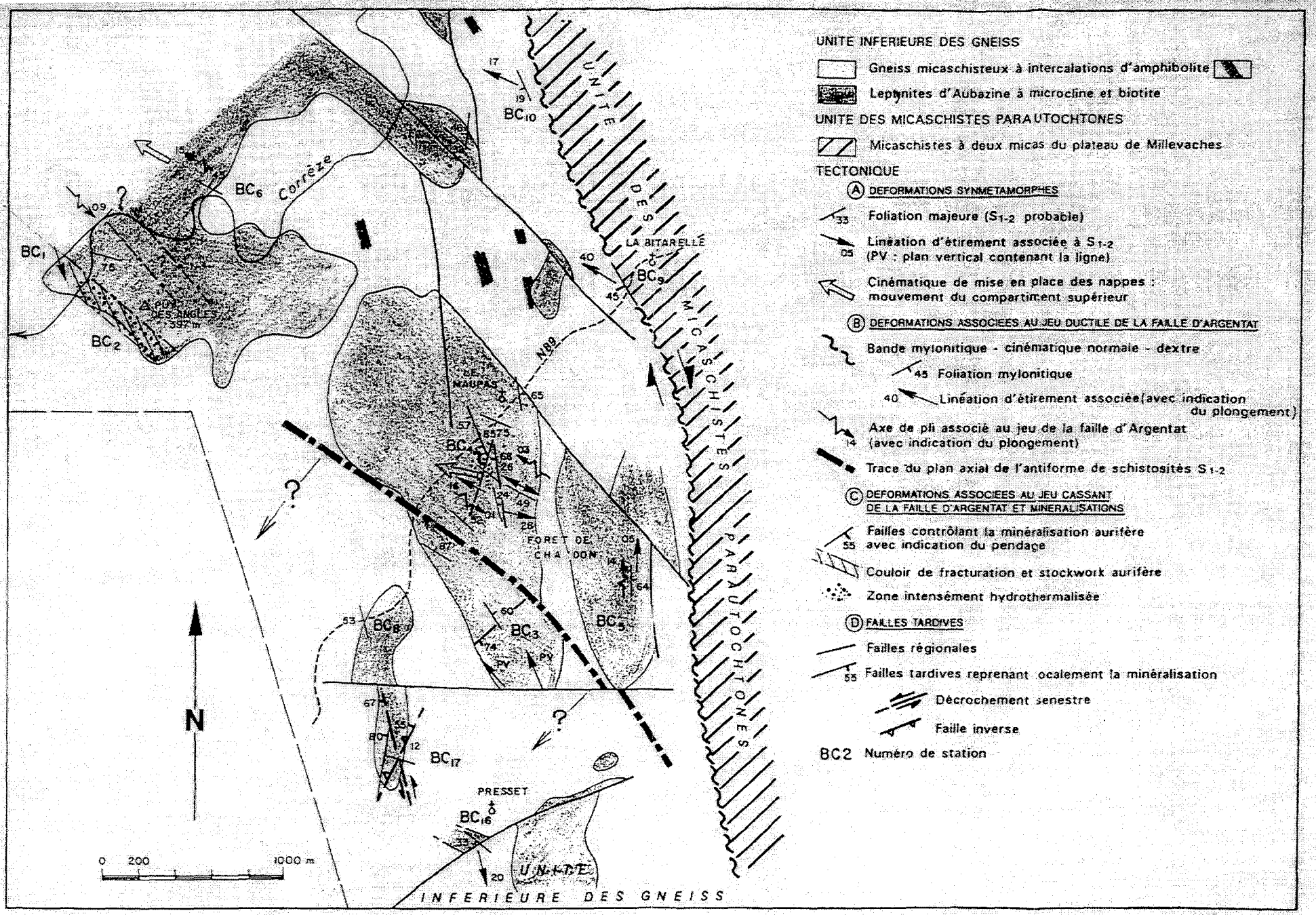


Fig. IV-3 - Schéma structural dans le secteur de Puy-des-Angles et du Maupas (document BRGM, comm. V. Bouchot)

(ii) après le développement des quartz Q_2, on observe partout la succession de deux épisodes (D1 et D2) de raccourcissement horizontal, de directions orthogonales, respectivement N05-10°E et N100-110°E, D1 étant N-S ; ces épisodes se marquent par :

- des ombres de pression autour des arsénopyrites et pyrites précoces (Fig. IV-5-g) ;
- des joints stylolithiques, particulierement bien visibles dans le quartz Q_2 (Fig. IV-5-b, d), qui se déforment ductilement (extinction ondulante);
-le jeu pénécontemporain de cisaillement N140-150°E senestre (Fig. IV-4), avec néoformation de veinules de quartz (Q_3) dans la direction de raccourcissement de D2 ;

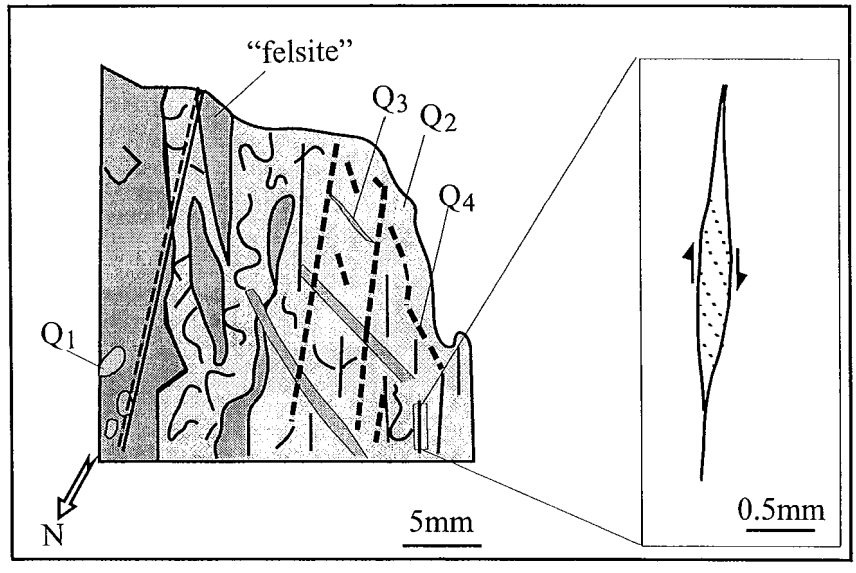


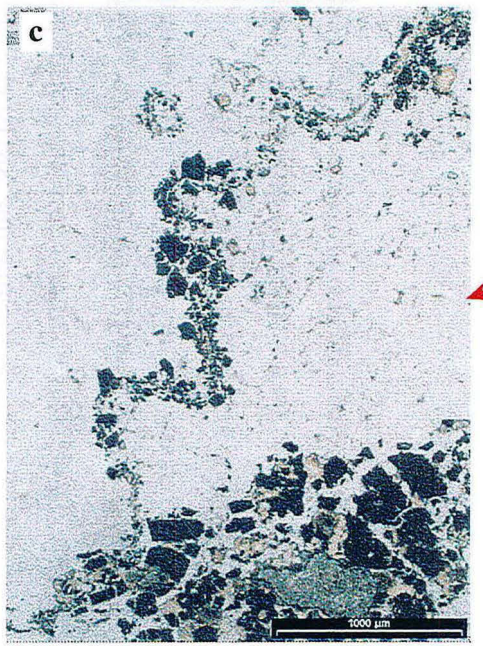
Fig. IV-4 - Schéma de la lame épaisse SM10 (plan horizontal), montrant les différentes générations de quartz

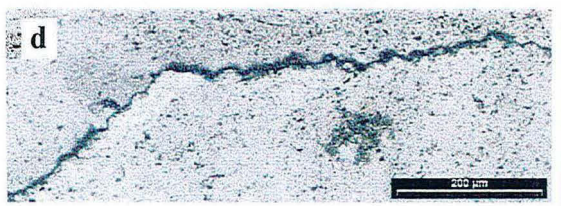
(iii) un réseau de veinules et de plages de phengites se développent aussi selon la direction N140-150°E ; ces phengites, qui se développent préférentiellement autour des sulfures précoces (Fig. IV-5-f, g), sont apparemment dans l'intervalle D1-D2 puisque :

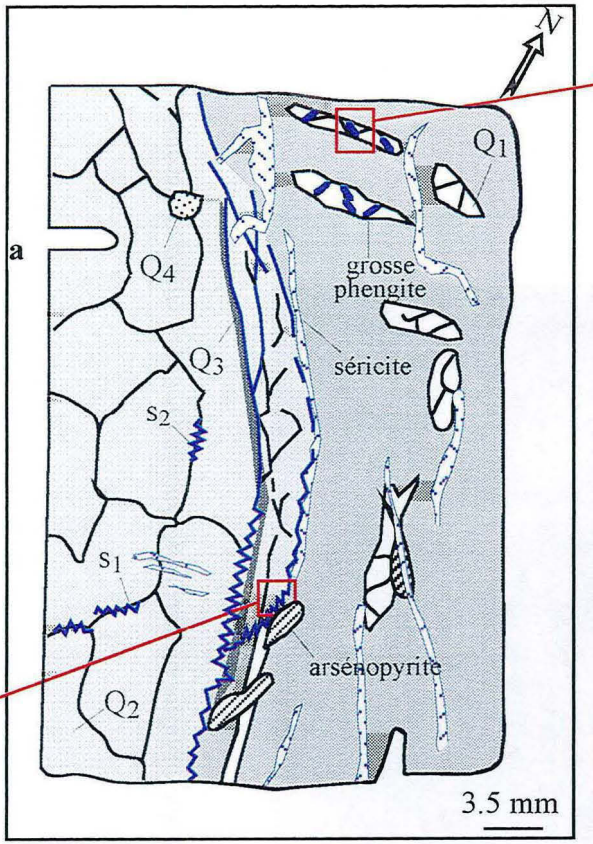
- les phengites ne semblent pas affectées par D1 et paraissent même remplacer les fibres de quartz syn-D1 des ombres de pression ;

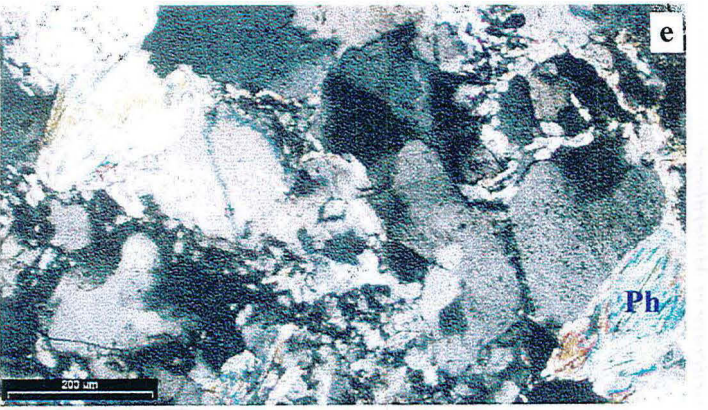
- mais elles sont nettement affectées par le raccourcissement D2.

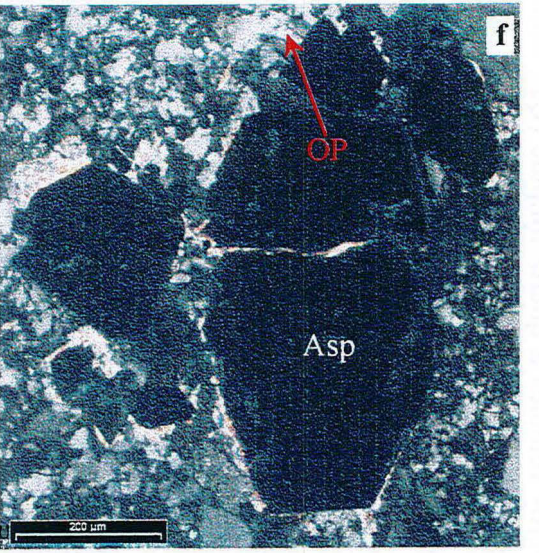












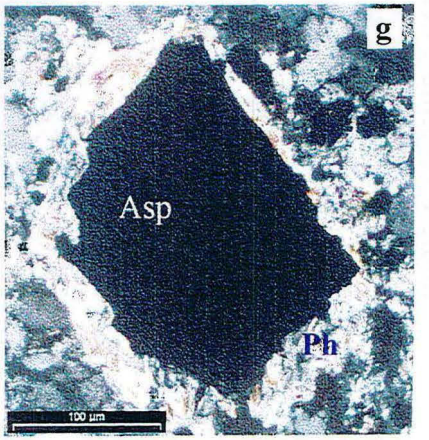


Fig. IV-5 - a. Schéma des différentes générations de quartz, phengites et stylolites dans la lame SM11 ;
b-g observations de détail :
b. exemple de stylolite s_2
c. exemple de stylolite avec imprégnation à arsénopyrite
d. exemple de joints de grain "stylolitique" dans Q_2 (s_2)
e. exemple de grosse phengite dans Q_1
f et g. détail de c.
Asp : arsénopyrite ; OP : ombre de pression ; Ph : phengite

(iv) Un réseau tardif de micro- veinules à quartz limpide (Q_4), accompagné de sulfures, oblitère l'ensemble des manifestations précédentes (Fig. IV-6) ; ce réseau affecte une direction principale à N160-165°E, interprétée comme une direction de cisaillement, avec une direction mineure à N10-20°E, interprétée comme la direction de raccourcissement (Fig. IV-4). Cet épisode se traduit aussi par des "blanchiments" en joints de grains, également accompagnés de sulfures (chalcopyrite, galène) dans les quartz Q_2 déformés.

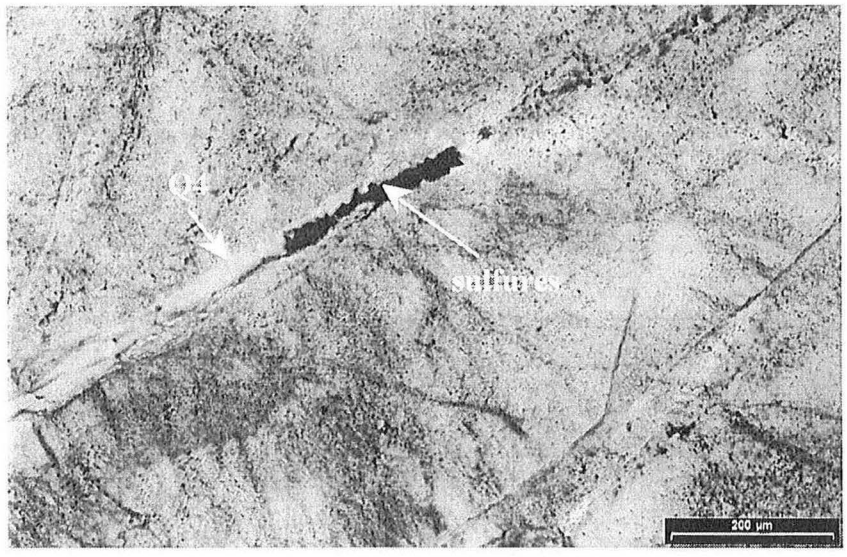


Fig. IV-6 - Photographie au microscope optique montrant le quartz Q_4 et les sulfures associés (lame SM10).

II. 2. 1. 3- Etude minéralogique

II. 2. 1. 3. 1- Les micas

Les micas blancs analysés dans ce site proviennent des veines de quartz gris (SM9 et SM11). Dans l'échantillon SM11, on a analysé les gros micas dans le quartz Q_1 (Fig. IV-5-c) et des phengites "emballant" une arsénopyrite (Fig. IV-5-g).

SM9 comporte un réseau de quartz stérile (Q_1 ou Q_2) découpant une roche à quartz-phengite, avec une séricitisation fine (< 50 µm) (ancienne leptynite, altérée), et quelques grosses paillettes (≥ 200 µm) (Fig. IV-7). Des phengites sont également présentes, dispersées, dans le quartz. L'ensemble est déformé (même logique que SM10 et SM11 : deux jeux orthogonaux

de stylolites "N-S" et "E-W", quartz à extinction roulante, les plus gros micas souvent kinkés). On a analysé les séricites, et les "grosses paillettes"(déformées ou pas).

Les compositions sont variables (Fig. IV-8), sans que se dessine une tendance nette, sauf pour les phyllites déformées, enrichies en Fe, probablement en partie sous forme de Fe^{3+} (écart à la substitution phengitique) et en Na (les autres en étant pratiquement dépourvues).

II. 2. 1. 3. 2- Les sulfures

La première paragenèse métallique qui se dépose dans ce site est constituée par de grands cristaux d'arsénopyrite et pyrite.

Les cristaux d'arsénopyrite présentent une zonation très marquée (Fig. IV-9-A), avec un cœur et une bordure (surcroissance ?) bien contrastés en imagerie MEB.

Les bandes sombres sont enrichies en soufre (34.6-36.2 a.%) aux dépens de l'arsenic, qui est plus abondant des les cœurs clairs (32.4-33.8 a.%) (tableau 1), et en (0.03-0.11 a.%). En général, les cœurs clairs sont plus proches de la stœchiométrie que les bordures sombres.

Les cristaux de pyrite sont de grande taille (> 100 µm), affectés, au même titre que les arsénopyrite, par des dissolutions /oxydation (?) qui se développent sur les bordures des cristaux ou le long des fractures (Fig. IV-9-B). Il s'agit de pyrite arseniée (0.07-0.4 a.%), avec quelques traces de nickel (0.02-0.05 a.%).

La paragenèse tardive, dans ce site, est constituée essentiellement par la chalcopyrite, sous forme de grands cristaux, qui peuvent atteindre 100 µm de taille (Fig. IV-9-C) ; mais aussi de la galène qui se dépose en couronne autour des cristaux de chalcopyrite et en inclusion dans cette dernière (Fig. IV-9 C). Leurs compositions chimiques respectives sont proches de la stœchiométrie (tableau 2), avec toutefois un déficit fer (<25 a.%) dans la chalcopyrite et un léger excès de Pb dans la galène (tableau 2).

II. 2. 1. 3. 3- Les monazites

La monazite, qui accompagne probablement la première paragenèse métallique (arsénopyrite-pyrite), se présente sous forme de grands cristaux, dont la taille peut atteindre 100 µm. Elle est généralement corrodée (Fig. IV-9 D, E). L'imagerie en électrons retrodiffusés, révèle la présence de cristaux isotropes (Fig. IV-9-E) et des cristaux de grande taille avec une zonation légère et très hétérogène (Fig. IV-9-D). Une tentative de datation de monazite, par des analyses à la sonde électronique, a été entreprise, mais le résultat n'était pas très concluant au vu la rareté de cette phase.

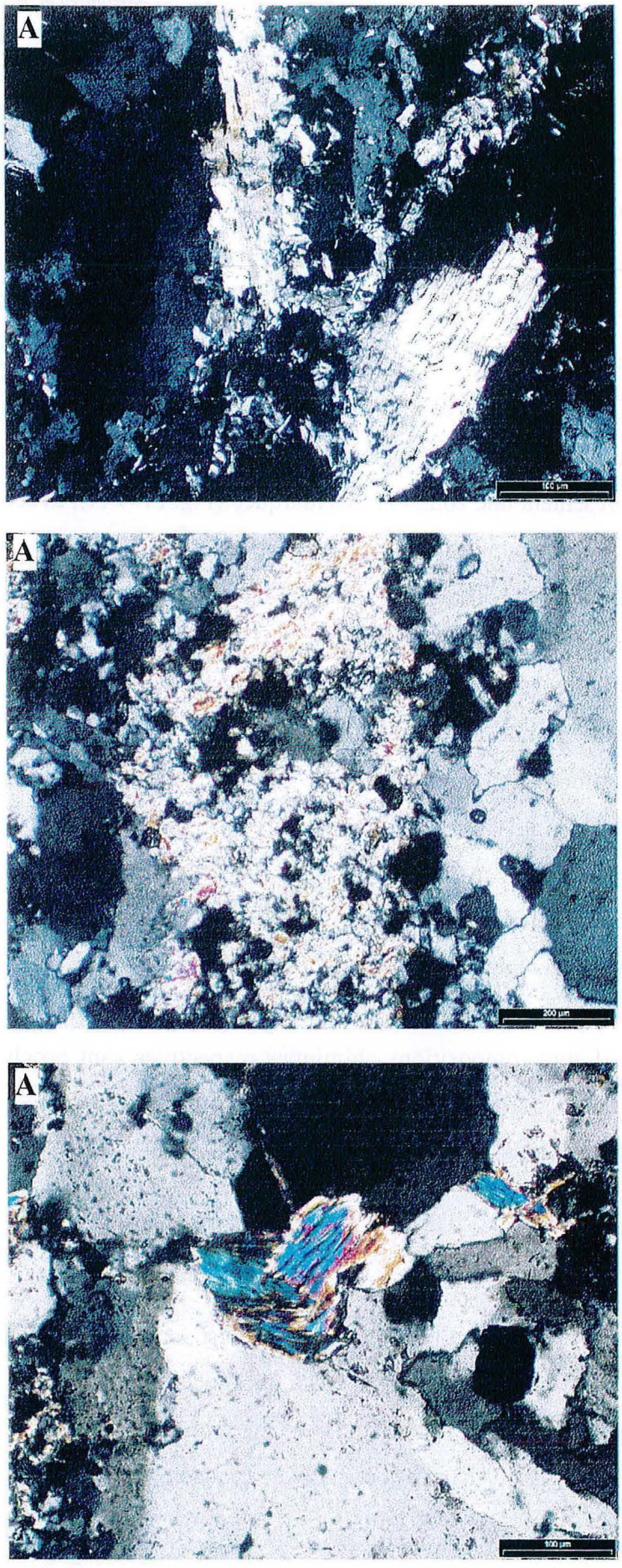


Fig. IV-7 - Les différents types de phyllites (LP) dans l'échantillon SM9 (site de Puy-des-Angle).
A. et C. grosses paillettes de micas déformées
B. phyllite (produit d'altération)

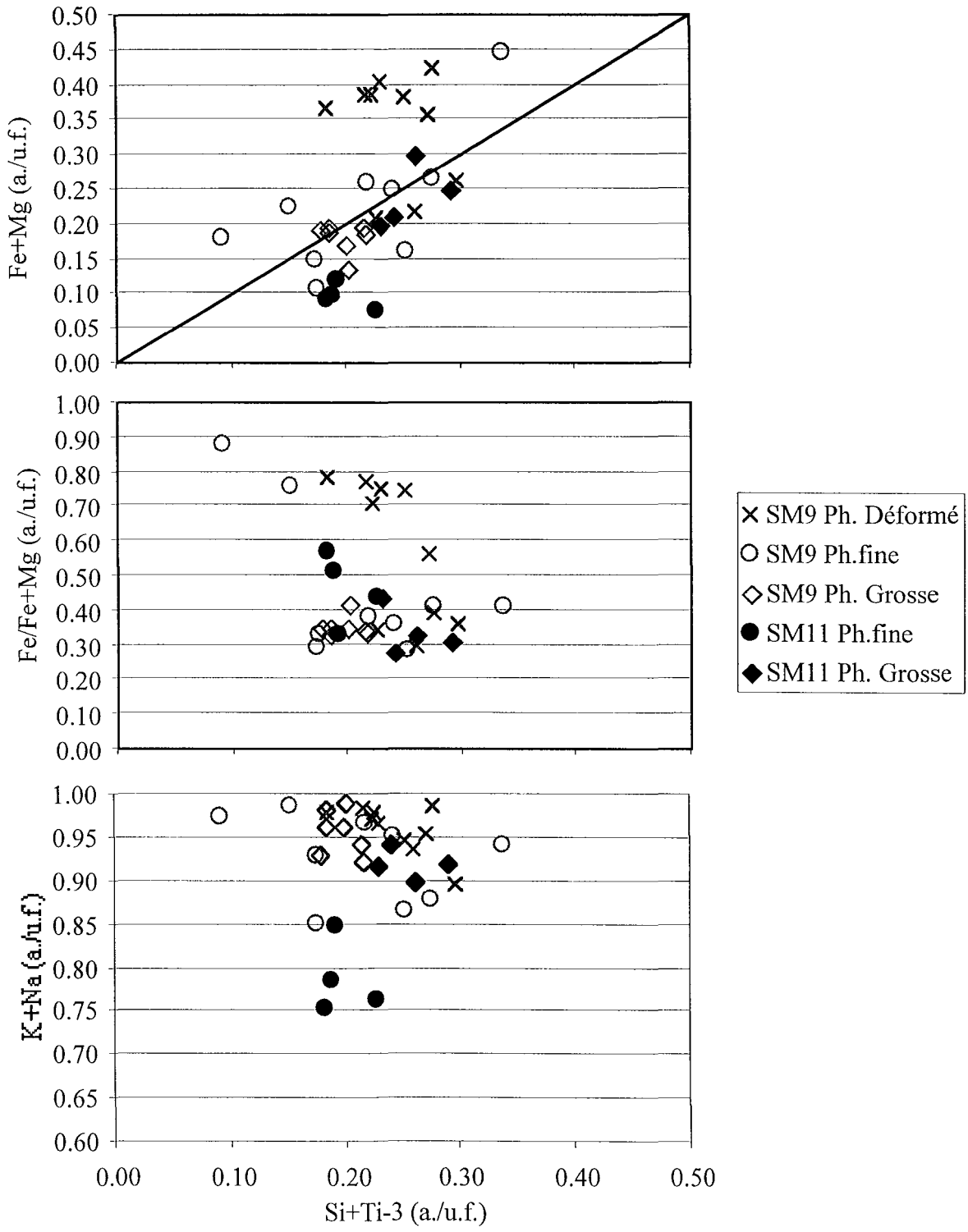


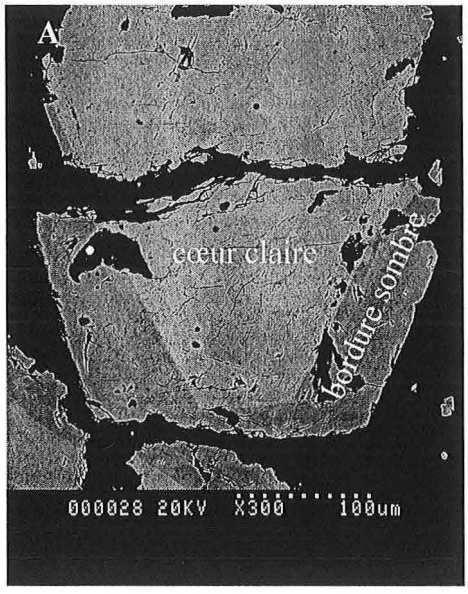
Fig. IV-8 - diagrammes de composition chimique des différentes phyllites du site de Puy-des-Angles.

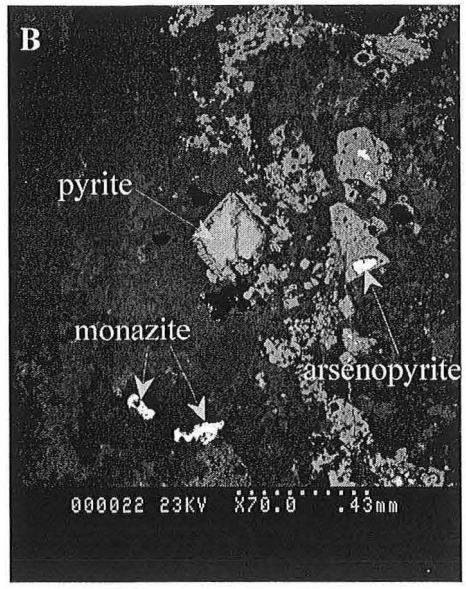
	Arsénopyrite- bordures sombres			Arsénopyrite- cœurs clairs		
w. %	1	2	moyenne	3	4	moyenne
S	20.31	21.60	20.85	19.25	20.60	19.71
Fe	33.84	34.34	33.76	33.43	34.12	33.63
Co	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01
Ni	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
Cu	0.00	0.00	0.01	0.02	0.04	0.01
Zn	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
As	44.21	42.91	43.81	45.97	45.10	45.62
Sb	0.11	0.03	0.06	0.04	0.00	0.02
Pb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
total (w%)	98.47	98.88	98.53	98.72	99.86	99.06
a. %						
S	34.61	36.19	35.32	33.11	34.62	33.64
Fe	33.10	33.03	32.84	33.01	32.91	32.97
Co	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01
Ni	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
Cu	0.00	0.00	0.01	0.02	0.04	0.01
Zn	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
As	32.24	30.77	31.77	33.84	32.43	33.34
Sb	0.05	0.01	0.03	0.02	0.00	0.01
Pb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
total (A%)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

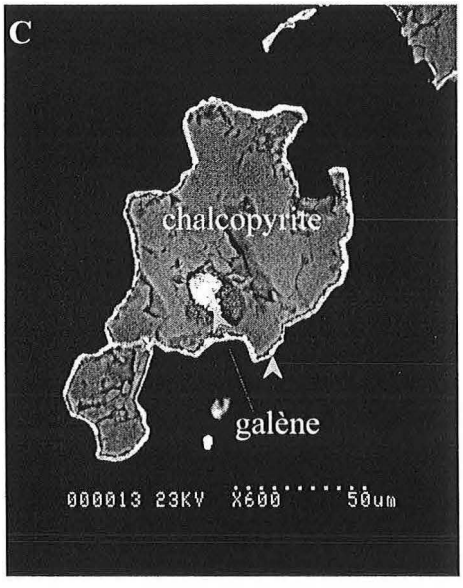
Tableau 1- Composition chimique des arsénopyrites en % poids (w %) et % atomique (a %).

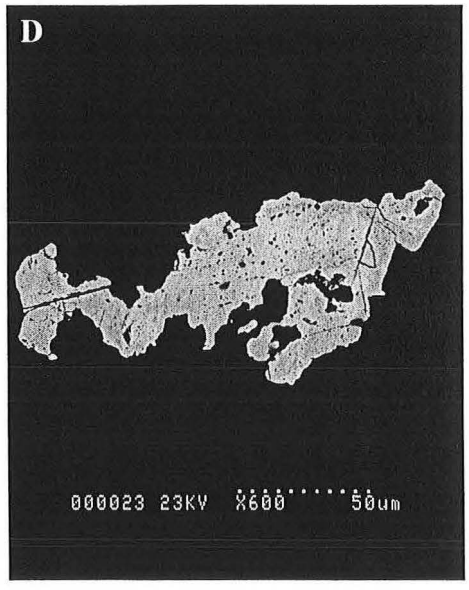
	Pyrite		Chalcopyrite		Galène	
S	49.96	50.96	33.42	33.09	12.91	12.75
Fe	44.75	44.94	27.82	27.98	0.00	0.00
Co	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
Ni	0.03	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00
Cu	0.00	0.06	34.10	33.70	0.00	0.00
Zn	0.00	0.07	0.06	0.00	0.00	0.00
As	0.70	0.12	0.00	0.09	0.00	0.00
Sb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Pb	0.00	0.00	0.00	0.00	85.08	83.24
total (w%)	95.46	96.24	95.42	94.87	98.00	96.00
S	65.76	66.25	50.15	49.98	49.51	49.74
Fe	33.82	33.54	23.97	24.27	0.00	0.00
Co	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Ni	0.02	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00
Cu	0.00	0.04	25.82	25.69	0.00	0.00
Zn	0.00	0.04	0.05	0.00	0.00	0.00
As	0.40	0.07	0.00	0.06	0.00	0.00
Sb	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Pb	0.00	0.00	0.00	0.00	50.48	50.25
total (A%)	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Tableau 2- la composition chimique en % poids (w %) et % atomique (a %) de la pyrite, la chalcopyrite et la galène dans le site de Puy-des-Angles. Les totaux inférieurs à 100 % s'expliquent probablement par la forte porosité des cristaux corrodés.









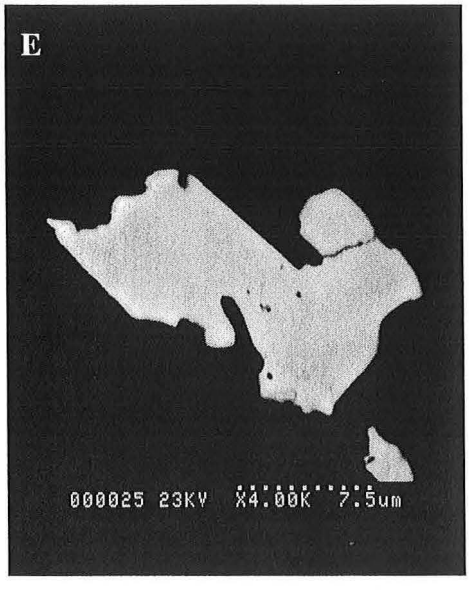


Fig. VI-9 - Imagerie en électrons rétrodiffusés (microscope électronique à balayage) (SM11) :

A : détail de La zonation des arsénopyrites
B : transformation de la pyrite et l'arsénopyrite
C : relation chalcopyrite- galène
D : monazite corrodée, avec une legère zonation (augmentation de la teneur en Th dans les zones blachies)
C : monazite de composition homogène

II. 2. 2 - Site du Maupas

II. 2. 2. 1- Caractères généraux

La carrière du Maupas expose des leptynites plus ou moins œillées ("leptynites sodiques" ; Tempier *et al*, 1978), à foliation généralement redressée (autour de N95-110°E 80°S), sauf dans la partie SE où cette foliation est plissée par des trains de plis décamétriques, d'axe E-W et à vergence Sud.

- Ces plis, à plan axial faiblement penté (20-30°) au Sud, ont valeur de faille normale E-W, d'autant plus que leurs flancs plats sont laminés par des failles normales d'abord ductiles, puis fragiles, de direction globalement E-W et de pendage comparable.
- Ils reprennent des quartz très précoces, bleutés (Q_0), proches de la foliation des leptynites.

Localement, dans ces leptynites, s'observent plusieurs manifestations hydrothermales :

(i) petits réseaux de fente à quartz (Q_1), d'épaisseur centimétrique, et ≤10 cm en longueur, les unes grossièrement perpendiculaires à la foliation (N15°E verticale à N0°E 60-70°E), les autres (apparemment synchrones), sont plutôt à N70°E 65°S (veines N-S dans l'échantillon SM6) ;

(ii) fentes à quartz (Q_2) plus ou moins arsénopyrite, ou fente à arsénopyrite seule qui se développent selon la direction N70-100°E 20-30°S, et qui recoupent le quartz Q_1 (SM5) ;

(iii) réseau anastomosé de veinules contournées à arsénopyrite seule, selon la direction N90-100°E 50-60°S (échantillons SM7/BC4G) ;

(iv) d'apparence plus tardive, enfin, une zone faillée à N25°E 70°E, qui bréchifie du quartz laiteux, est remplie d'un quartz "noir", chargé de sulfures.

II. 2. 2. 2- Etude microstructurale

L'étude de quatre échantillons dont trois orientés (SM5 à 7), étudiés dans des sections horizontales (Fig. IV-10), permet de reconnaître une série d'événements hydrothermaux et tectoniques plus ou moins imbriqués :

(i) L'événement le plus précoce consiste en une intense mylonitisation des leptynites, oblitérant totalement la foliation macroscopique, avec des structures C1- S1 caractéristiques ; la composante est senestre dans le plan horizontal (Fig. IV-10-A), avec une direction à N110°E ; ces structures sont interprètées en faille normale senestre ductile, par référence aux seuls cisaillements ductiles

que l'on observe macroscopiquement dans le SE de la carrière ; on reconstitue donc une composante dextre dans le plan vertical (Fig. IV-10-B).

(ii) Ces mylonites sont affectées successivement par :

- des cisaillements ductiles dextres (C2) à N60-75°E (Fig. IV-10-A) avec une direction de raccourcissement E-W (schistosité S2 associée à N10°E : SM6) ;
- de petites failles normales fragiles (C3) cataclastiques (BC4G), équivalent probable de celles que l'on observe macroscopiquement dans le SE de la carrière.

(iii) L'arsénopyrite, associée à du rutile et un peu de pyrite, forme des disséminations le long des structures C1 à C3 pré-existantes, auxquelles elle est cependant nettement postérieure (Fig. IV-11-A).

(iv) Succession de deux épisodes (D1 et D2) de raccourcissement horizontal, marqués par :

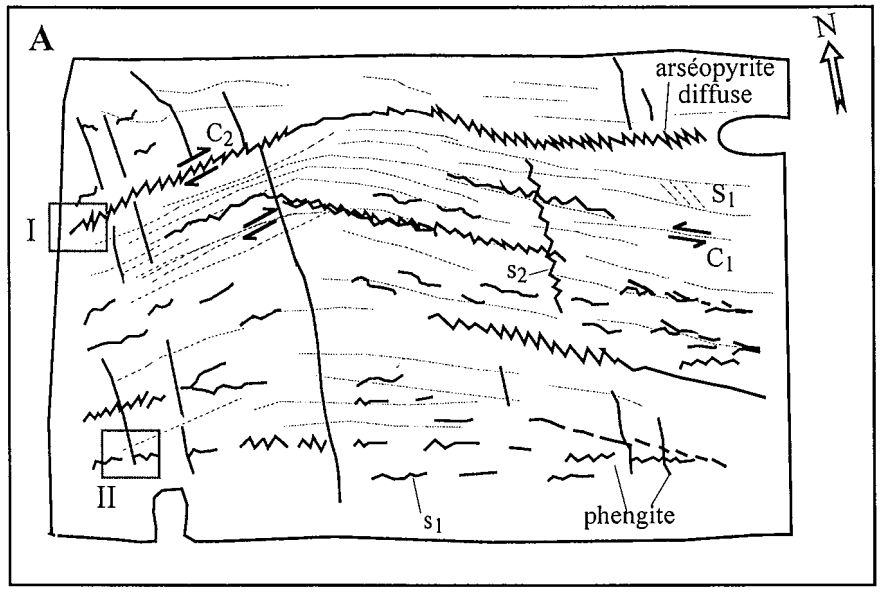
- des joints stylolitiques sub-horizontaux à N85-90°E et N165-175° (Fig. IV-10-A), le raccourcissement N-S (stylolites E-W) étant le plus précoce ;
- l'aplatissement des fentes de quartz Q1 (SM6).
- la stylolitisation affecte, de plus, les joints C1 et C2.

Il faut noter que la stylolitisation, comme le montre la figure IV-11-A, affecte les imprégnations à arsénopyrite.

(v) De la phengite s'installe pendant l'événement D1 puisque l'on observe un réseau de veinules N-S interconnectées à des veinules E-W qui subissent la stylolitisation (Fig. IV-11-B), et que ces veinules sont à leur tour stylolitisées (D2). La phengite suit aussi les structures C1 et C3 précédentes, particulièrement là où se sont développées les arsénopyrites, qu'elle enveloppe ; elle est clairement plus tardive.

(vi) Un épisode tardif à arsénopyrite est suggéré par l'étude de l'échantillon SM7, qui montre un réseau de pseudo-veinules (imprégnation de micro-cataclasites) en "queue de cheval" (Fig. IV-11-C), de N140° à N170°E, qui paraissent recouper les dissémination antérieures.

(vii) Une carbonatation microfissurale, très tardive, avec dissolution du quartz, se développe le long de tous les types de joints pré-existants.



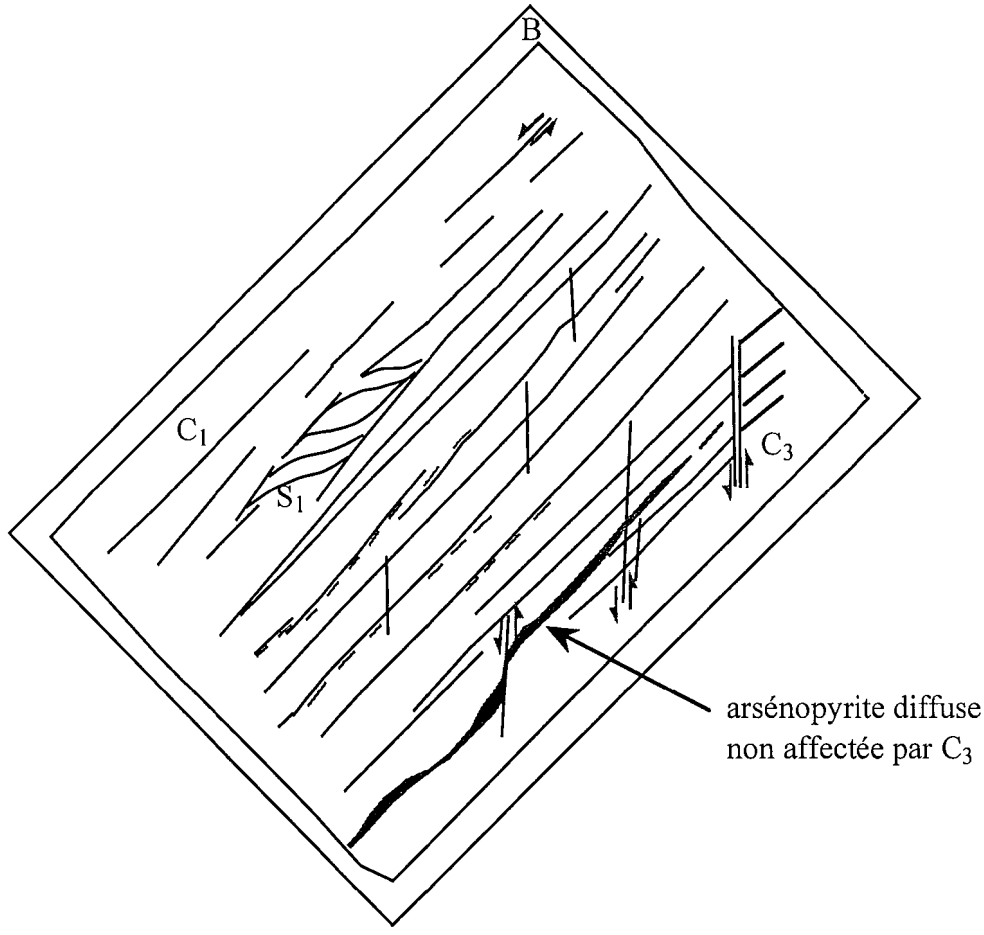


Fig. IV-10 - Schéma de lames épaisses du site du Maupas ;
(A) plan horizontal de l'échantillon SM5
(B) plan vertical perpendiculaire à la schistosité mylonitique dans l'échantillon BC4G (l'échantillon n'est pas orienté, mais sachant que les "veines" à arsénopyrite plongent à N50°S, il possible de restituer l'orientation de la figure).
I et II correspondent aux endroits où ont été prises, respectivement, les photographies A et B de la figure IV-11.

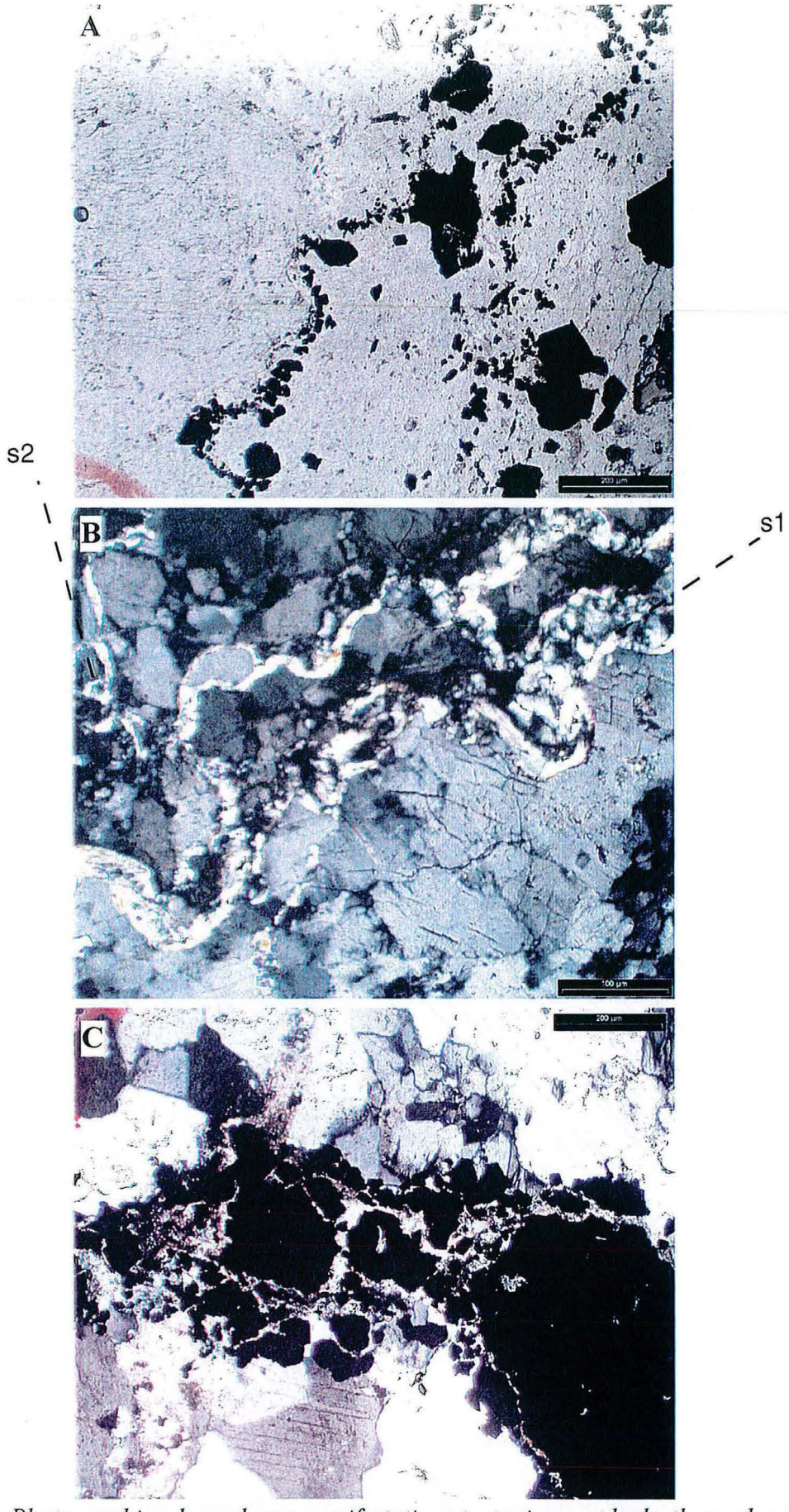


Fig. IV-11 - Photographies de quelques manifestations tectoniques et hydrothermales dans le site du Maupas :
(A) Imprégnation à arsénopyrite selon C2 et stylolitisation (SM5)
(B) stylolites à phengite interconnectés (SM5)
(C) imprégnation tardive à arsénopyrite et carbonates (SM7)

II. 2. 2. 3- Etude minéralogique des sulfures

La paragenèse métallique est constituée par des disséminations de pyrite et d'arsénopyrite :

(i) L'arsénopyrite est représentée par des cristaux de petite taille (< 30μm), qui se développent au contact de grandes plages de pyrite (Fig. IV-12-A). L'imagerie en électrons rétrodiffusés au microscope électronique à balayage à révélé la présence de petites bandes de surcroissance dans les grains d'arsénopyrite (Fig. IV-12-B, C).
Leur analyse à la microsonde électronique a donné des compositions chimiques très contrastées (Fig. IV-13). En passant des cœurs aux bordures, les arsénopyrites s'appauvrissent en arsenic et s'enrichissent en soufre, le fer restant constant, avec des teneurs en dessous de la stœchiométrie (32.5-32.9 a.%). Il s'agit du même comportement que celui des arsénopyrites de Puy-des-Angles.

(ii) La pyrite se présente sous forme de grandes plages (> 200 μm), dans les mêmes joints que l'arsénopyrite. Les compositions sont relativement homogènes (tableau 3), avec des traces d'arsenic (0.04-0.06 a.%) et de cobalt (≤0.05 a.%).

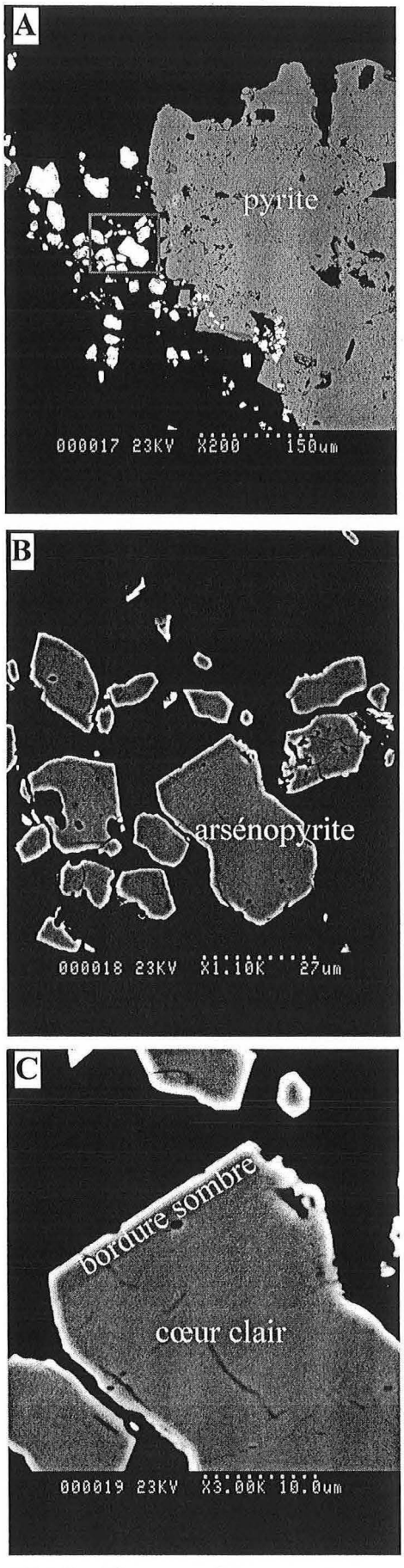


Fig. IV-12 - Photographies au microscope élctronique à balayage (électrons rétrodiffusés), montrant :
(A) relation pyrite-arsénopyrite
(B) et (C) différents agrandissements des grains d'arsénopyrites.

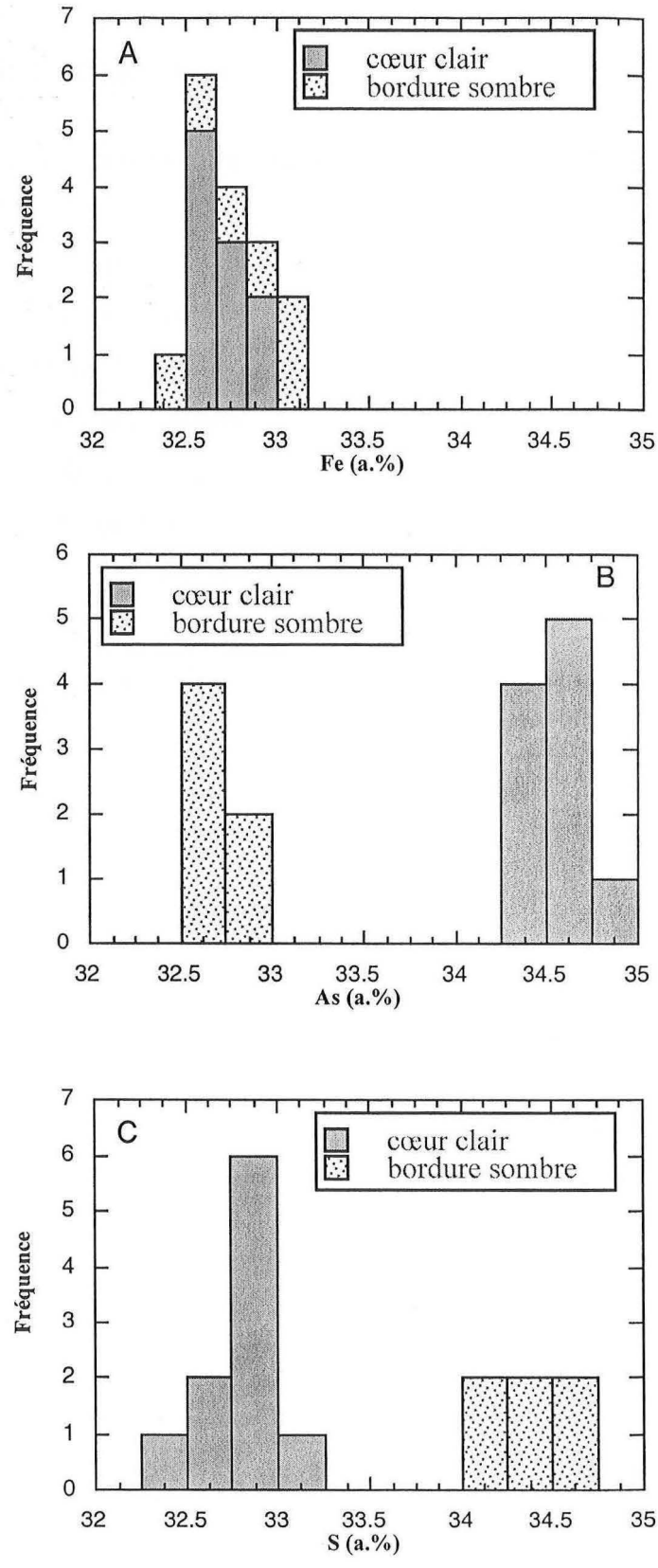


Fig. IV- 13 - Composition chimique des arsénopyrites dans le site du Maupas ;
A : histogramme de la teneur en Fer,
B : arsenic et C : soufre.

	Pyrite		
No	60	61	67
S	51.42	51.37	51.22
Fe	45.10	45.17	45.68
Co	0.00	0.07	0.05
Ni	0.02	0.00	0.00
Cu	0.02	0.06	0.00
Zn	0.02	0.00	0.02
As	0.07	0.10	0.10
Sb	0.00	0.00	0.00
Pb	0.00	0.00	0.00
total (w%)	96.65	96.77	97.07
S	66.45	66.36	66.07
Fe	33.47	33.50	33.83
Co	0.00	0.05	0.03
Ni	0.01	0.00	0.00
Cu	0.02	0.04	0.00
Zn	0.01	0.00	0.01
As	0.04	0.06	0.06
Sb	0.00	0.00	0.00
Pb	0.00	0.00	0.00
total (A%)	100.00	100.00	100.00

Tableau 3- Composition chimique en % poids (w %) et % atomique (a %) de la pyrite dans le site du Maupas.

II. 2. 3- Conclusion

La comparaison des évolutions tectoniques et hydrothermales des deux sites de Puy-des-Angles et du Maupas met en évidence d'importantes similitudes :

- les deux sites enregistrent les événements D1 et D2 ;
- dans les deux sites, l'arsénopyrite, précoce, est affectée par les phases de déformations D1 et D2 ;
- dans les deux sites, le développement de la phengite est pénécontemporain de D1-D2 ; elle est, cependant un peu plus précoce au Maupas (tardi-D1), qu'à Puy-des-Angles où elle est inter D1/D2.

Des différences importantes existent, cependant, entre les deux sites :

- le site du Maupas enregistre un événement distensif N-S majeur, avec des failles normales d'abord ductiles, puis fragiles, de direction E-W ; cet épisode précède l'hydrothermalisme dans ce site ; cet événement n'a pas été vu à Puy-des-Angles, qui est plus septentrional : il s'agirait donc d'un couloir E-W, analogue possible de celui que l'on observe, par exemple, sur la RN20.
- à l'inverse, le site de Puy-des-Angles enregistre d'importantes circulations fluides (dans les quartz Q1 et Q2) pendant les événements de raccourcissement, notamment E-W, qui précède D1 et D2, mais sont postérieurs à l'arsénopyrite.
- de même, ce site montre une circulation tardive à minéralisation polymétallique qui semble manquer au Maupas.

Au total, il semble possible de restituer une séquence tectono-hydrothermale synthétique pour l'ensemble des deux sites (Fig. IV-14), caractérisée par la succession de deux épisodes majeurs de déformation à l'échelle méso- à microscopique :

(i) un premier épisode en extension de direction N-S, à l'origine de failles normales E-W, d'abord ductiles puis fragiles ;

(ii) un deuxième épisode en raccourcissement, caractérisé par l'alternance de directions de raccourcissements E-W et N-S (permutation des directions X et Z) ; la déformation est soit en failles inverses, soit en décrochements (permutation des directions X et Y). Cet épisode voit se succéder trois phases hyrothermales, avec le dépôt de l'arsénopyrite, de la phengite et des sulfures polymétalliques.

Régime	direction	Puy-des-Angles		Maupas	
Distension : failles E-W ductiles puis fragiles	N-S		-		+
Raccourcissement horizontal	E-W précoce	Q2	arsénopyrite	?	arsénopyrite
	N-S (D1)	+	phengite	+	phengite
	E-W tardif (D2)	Q3		+	
	N-S tardif	Q4	chalcopyrite galène		? arsénopyrite

Fig. IV-14 - Régimes de déformation et hydrothermalisme associé dans le sites de Puy-des-Angles et du Maupas

II. 3 - SITE AR109 (RN20): STRUCTURES E-W

II. 3. 1- Structures

Dans cette zone, la RN 20 recoupe, sur 200 m environ, un couloir de failles normales globalement E-W, hydrothermalisées, à pyrite. Ces failles recoupent des structures antérieures, affectant les gneiss gris.

Au Sud de la zone, un faisceau serré de failles normales de direction comprise entre N80°E et N95°E et de pendage Nord variant de 60 à 70° décalent sur quelques cm une bande de cisaillement précoce, silicifiée, N65°E 55N à N40°E 40W, fonctionnant en décrochement dextre (Fig. IV-15). Un petit décrochement dextre à N135°E, "sec", affecte l'une de ces failles normales.

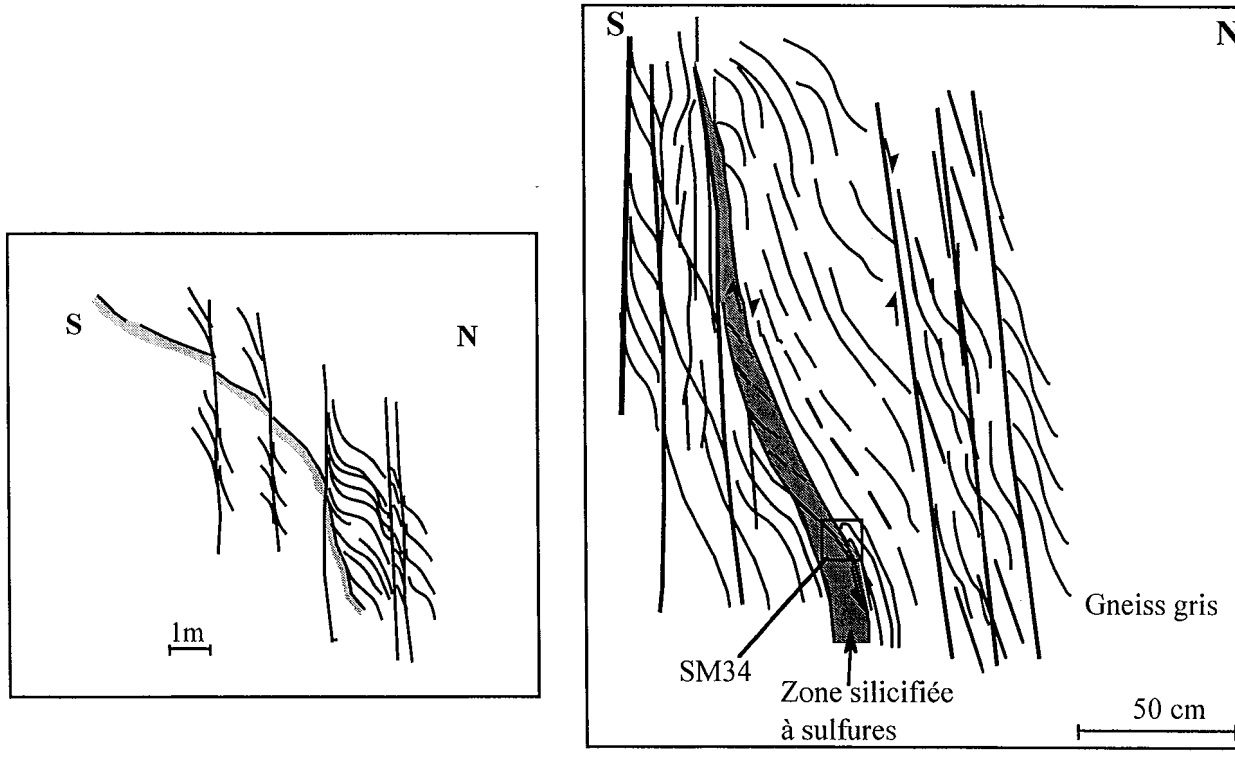


Fig. IV-15 - Coupe N-S dans le site de la RN20, montrant les couloirs de failles normales E-W minéralisées, recoupant un chevauchement précoce silicifié.

Au Nord de la zone, un faisceau plus lâche de failles normales à N135°E 80N recoupe des fentes à quartz d'aspect calcédonieux, riches en sulfures, qui dessinent un système de

fentes de tension de 10-15 cm d'épaisseur sur 1-2 m de longueur à 140°-160°E, en relais dextre dans la direction N135°E (SM36). L'allure de ces quartz évoque fortement les structures minéralisées en antimoine du gisement de Naves (Bril, comm. orale).

II. 3. 2- Paragenèses

II. 3. 2. 1- L'échantillon SM36

L'échantillon SM36 montre une évolution complexe, subdivisable en plusieurs étapes :

(i) des noyaux de quartz ± phengite (Fig. IV-16-A), où le quartz (Q_0) est à extinction roulante, recoupé de couloirs microcristallins à phengite, et où la phengite, parfois orientée (Fig. IV-16-B), est le plus souvent isotrope ; représentent le matériel le plus ancien. Dans ces phengites fines sont noyées de "grosses" phengites. Ces noyaux évoquent beaucoup le matériel de SM34 (voir plus loin) ;

(ii) ces noyaux plus ou moins arrondis, sont "cimentés" de quartz microcristallin engrené (Q_1), avec des phengites interstitielles (Fig. IV-16-A) ;

(iii) cette matrice est envahie de façon irrégulière par de la pyrite (Py1) (Fig. IV-16-A), en petits cubes (~50 μm) ; en même temps, la phengite disparaît, et le grain du quartz microcristallin (Q_2) qui cimente les pyrites augmente (Fig. IV-16-B) ;

(iv) l'ensemble est recoupé de veines à quartz microcristallin en petits prismes bacillaires enchevêtrés (Q_3) ; ce même quartz imprègne de larges portions des structures Q_0-Q_1 (avec dissolution de la pyrite (Py1) ??) ; de petits prismes de stibine lui sont associés (Fig. IV-16-C, D) : mais cette stibine est presque totalement pyritisée en même temps que se développent de très petits cubes de pyrite (Py2, ~50 μm) qui "saupoudrent" le quartz Q_3 ;

(v) enfin, des veinules à quartz "subfibreux" recoupent la totalité du dispositif précédent, elles semblent stériles (Fig. IV-16-E).

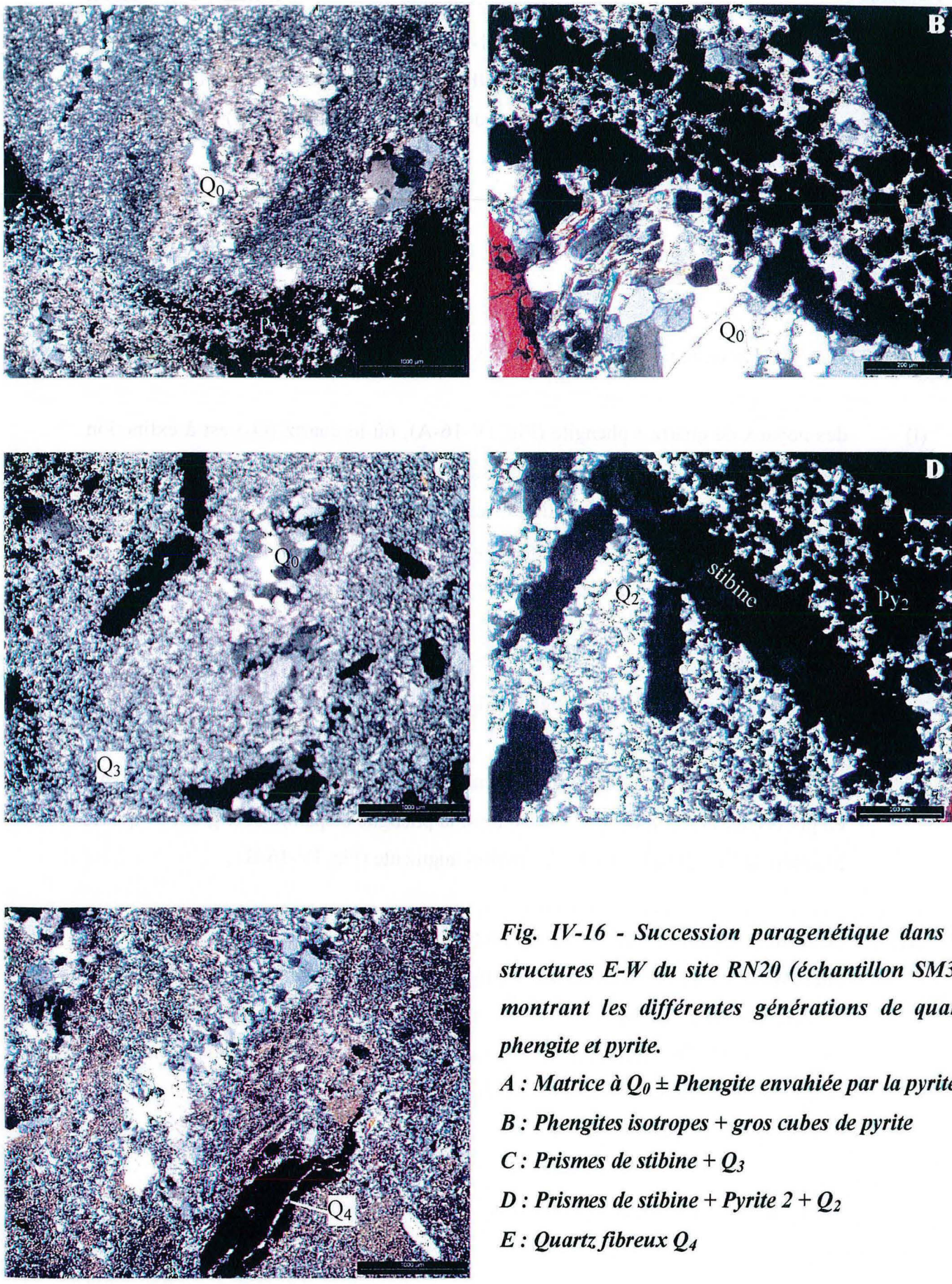


Fig. IV-16 - Succession paragenétique dans les structures E-W du site RN20 (échantillon SM36), montrant les différentes générations de quartz, phengite et pyrite.

A : Matrice à Q_0 ± Phengite envahiée par la pyrite.

B : Phengites isotropes + gros cubes de pyrite

C : Prismes de stibine + Q_3

D : Prismes de stibine + Pyrite 2 + Q_2

E : Quartz fibreux Q_4

II. 3. 2. 2- L'échantillon SM34

L'échantillon SM34 a une histoire plus simple, mais corrélable à la précédente :

(i) L'essentiel de l'échantillon est constitué de quartz à extinction roulante (Q_0) et de plages de phengite microcristalline (Fig. IV-17-A, B), avec quelques grosses phengites ; l'ensemble témoigne d'une déformation ductile avec des structures C/S, et représente donc l'encaissant silicifié du décrochement ductile. Le long de ces structures C/S se développe du rutile (Fig. IV-17-C, D).

(ii) Un épisode de pyritisation se marque par la transformation d'une partie des rutiles en pyrite et le développement de porphyroblastes (Py_1) dans le quartz (Q_0). Cet épisode se corrèle avec la pyrite 1 de l'échantillon SM36, puisque les porphyroblastes sont recoupés par des veinules à quartz microcristallin avec quelques stibines, transformées en pyrite (Py_2), avec aussi des cubes de pyrite oblitérant ce quartz, qui est donc corrélable au quartz Q_3 de l'échantillon SM36. Il est à noter que ces pyrites sont relativement homogènes, avec une zonation moins évidentes que dans l'échantillon SM36.

II. 3. 3- Etude minéralogique

II. 3. 3. 1- Les micas

Dans ce site, les minéraux phylliteux des échantillons SM36 et SM34 ont fait l'objet d'une analyse à la sonde électronique.

Les phyllites de SM36 (de grosse taille : $\geq$ 200 µm et fine : 50 µm, cf. Fig. IV-17-B) sont des phengites (Fig. IV-18), tandis que les phyllites de SM36 sont à la fois des phengites et des illites (K+Na entre 0.78 et 0.89 a/u. f.) (Fig. IV-18).

Les compositions sont variables, sans autre loi nette qu'une différence inter-échantillon. On note le caractère titanifère (0.06-0.09 a/u. f.) et magnésien de ces micas.

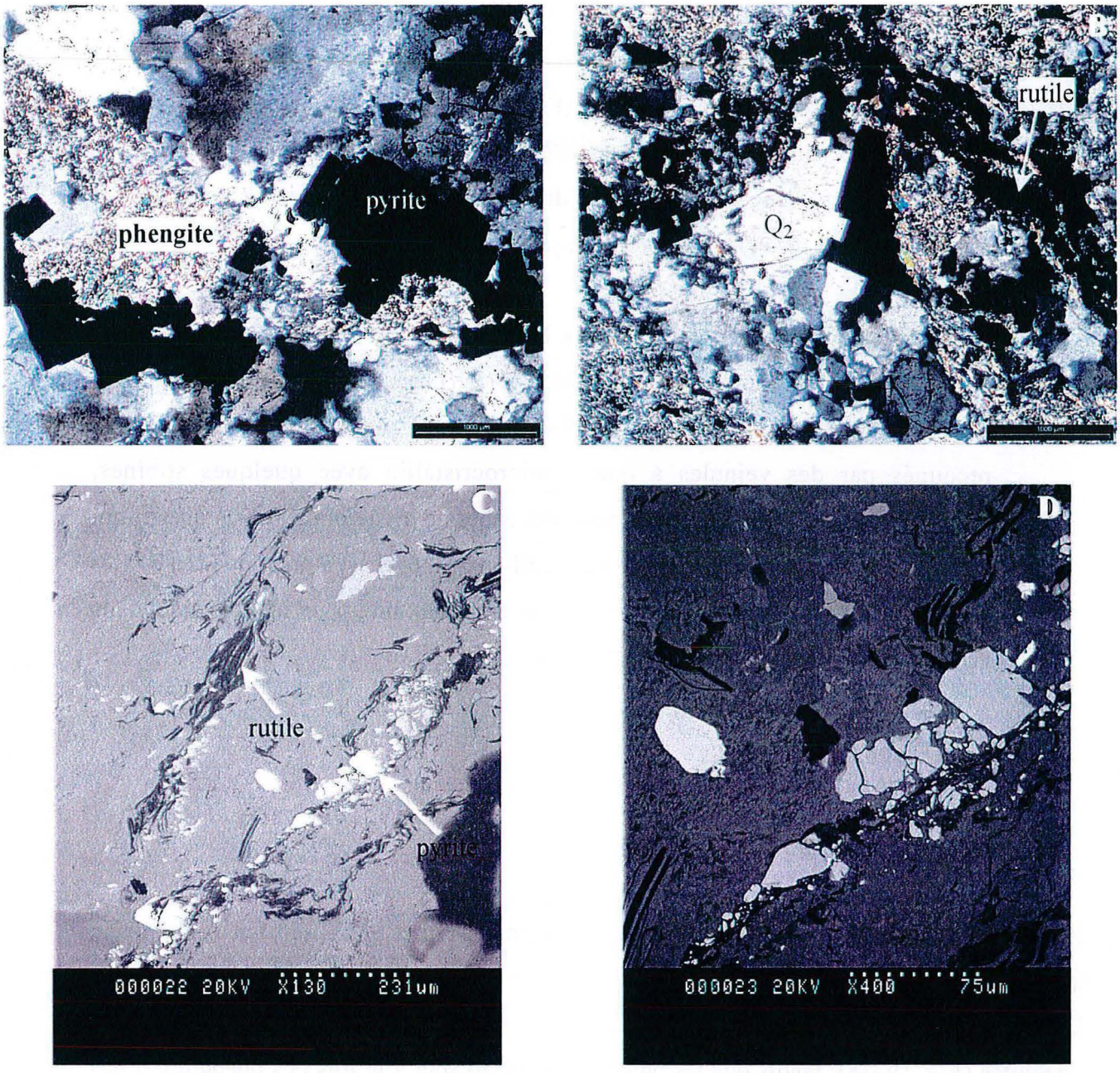


Fig. IV- 17 - Photographies de la paragénèse et les structures dans l'échantillon SM34,
A et B photographies au microscope optique (LP) montrant les cubes de pyrite oblitérant le quartz Q_2 et le développement de la phengite fine
C photographie au microscope électronique à balayage illustrant les structures C/S (les plans S sont constitués par la phengite et le rutile)
D est un agrandissement de C.

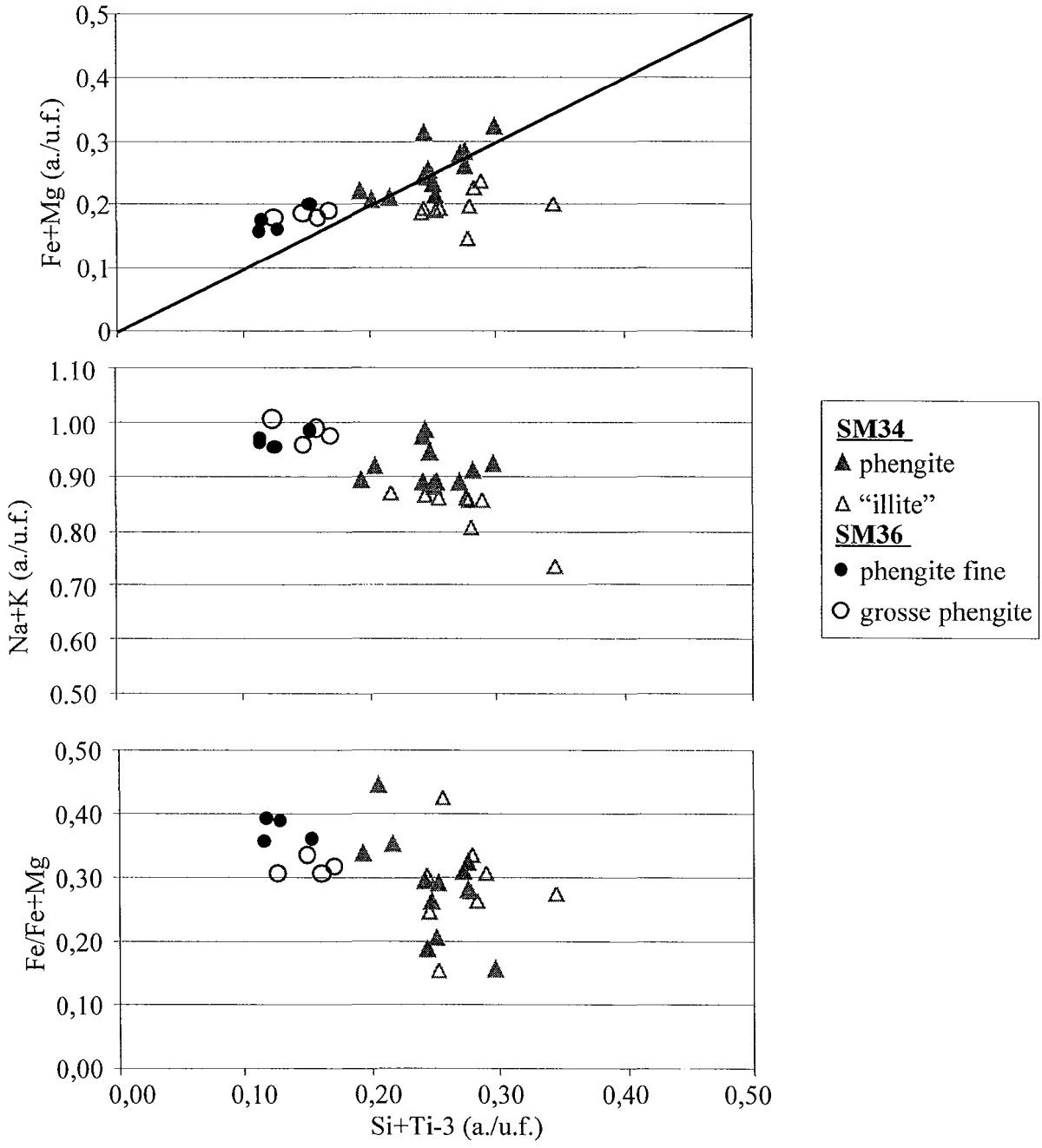


Fig. IV-18 - Diagrammes de variation de la composition chimique des phengites dans le site RN20.

II. 3. 3. 2- Les sulfures

Comme on l'a vu précédemment, dans ce site la paragenèse métallique est essentiellement représentée par la pyrite, qui a été analysée dans deux échantillons.

II. 3. 3. 2. 1- L'échantillon SM36

Les pyrites, de taille variable (Fig. IV-19), présentent une structure zonée avec des corrosions très importantes qui se développent préférentiellement le long des zones de croissances (Fig. IV-19).

Cette zonation traduit une variation de la composition chimique des pyrites, avec des teneurs en soufre et fer variables respectivement entre 65.7 et 66.7 a. % et entre 33.1 et 34 a. %. Les traversées réalisées dans quelques cristaux zonés (Fig. IV-19, B, D, E, F) ont permis de déterminer la composition chimique des structures zonées. En effet les bandes claires sont enrichies en arsenic (jusqu'à 1 a. %) (Fig. IV-20) par rapport aux bandes sombre où la teneur en As correspond à un bruit de fond autour de 0.1 a. %. En général les points enrichis en As contiennent moins de fer (Fig. IV-20) ce qui suggère une substitution As ↔ Fe, mais dans certains points on voit plutôt une anticorrélation As-S, correspondant à une substitution As—S.

II. 3. 3. 2. 2- L'échantillon SM34

Dans cet échantillon, les pyrites sont également automorphes, mais elles ne présentent pas la belle zonation des pyrites de l'échantillon SM36. Cependant, des différences de compositions sont perceptibles au MEB ("patchy zoning" : Fig. IV-21 A ; zonation grossière : Fig. IV-21 B) ce que confirme leur analyse à la microsonde électronique qui révèle des variations de compositions similaires à celles de l'échantillon SM36. En effet, elles contiennent entre 65.5 et 66.7 a. % de soufre, 33 à 34 a. % de fer et des teneurs en arsenic qui atteignent 0.7 a %. Il est à noter que ces variations de la composition sont observées à l'échelle du grain, alors qu'elles restent du même ordre de grandeur dans les différents cristaux, comme dans le cas de l'échantillon SM36.

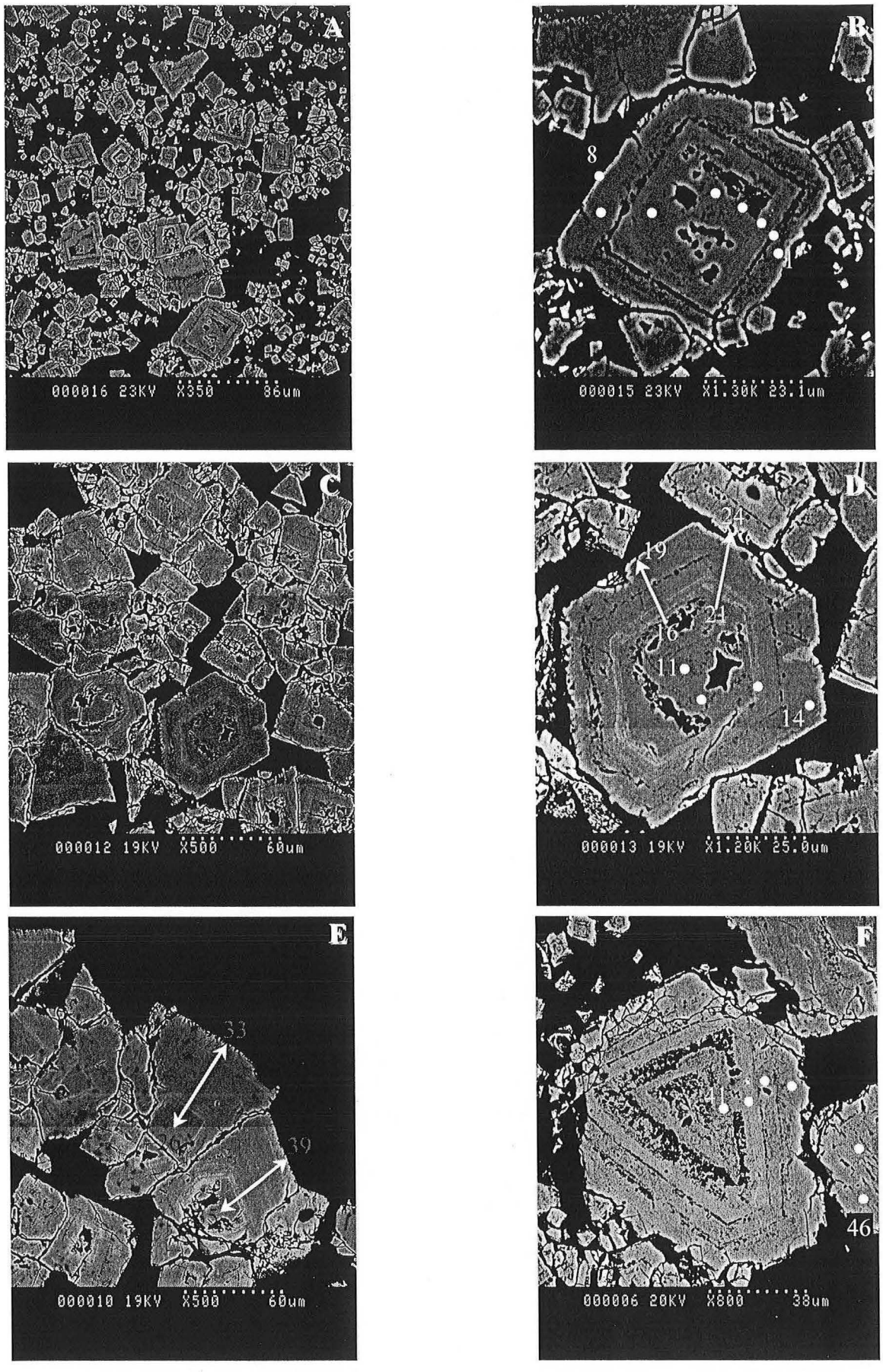


Fig. IV-19 :Zonation des pyrites de l'échantillon SM36 (site RN20), les cercles et les flèches correspondent aux points d'analyse et aux traversées.

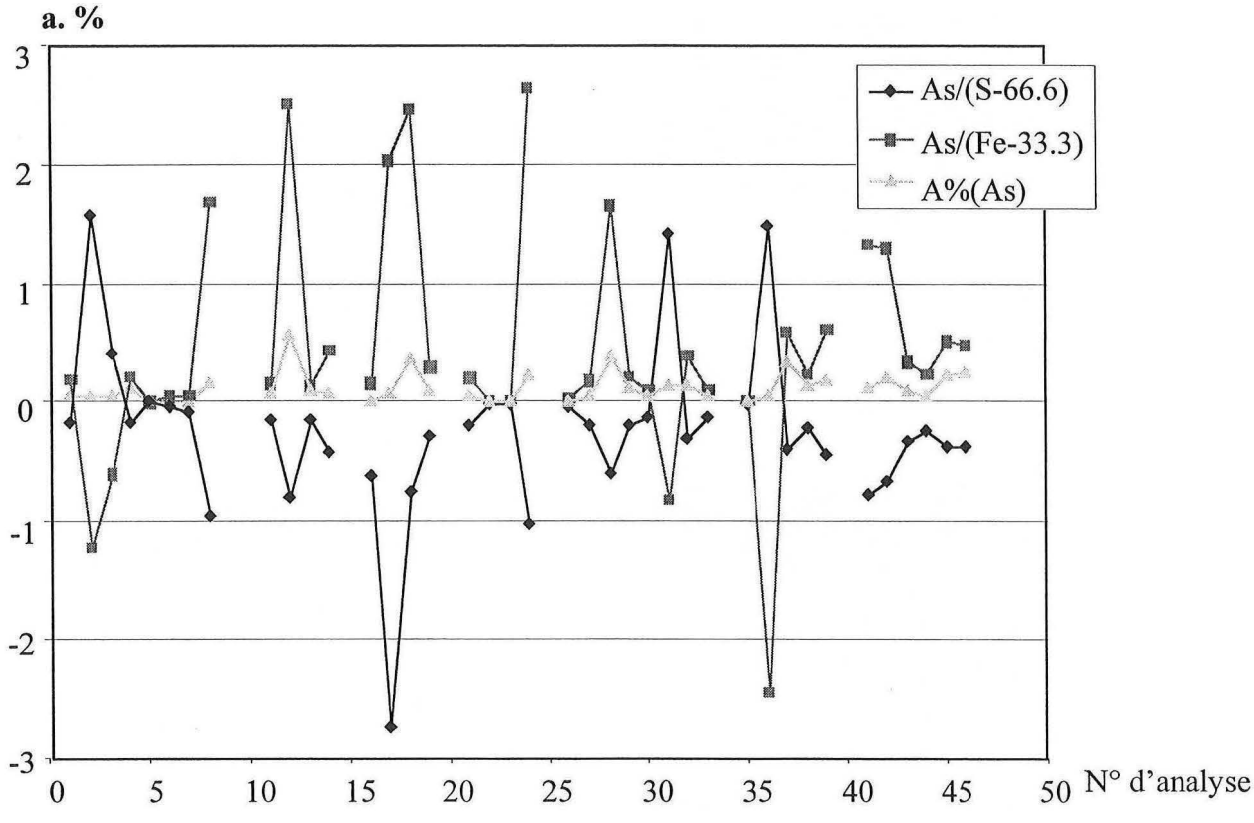


Fig. IV-20 - Variation de la composition chimique dans les pyrites de l'échantillon SM36. Chaque analyse correspond à un point localisé sur la Fig. IV-19.

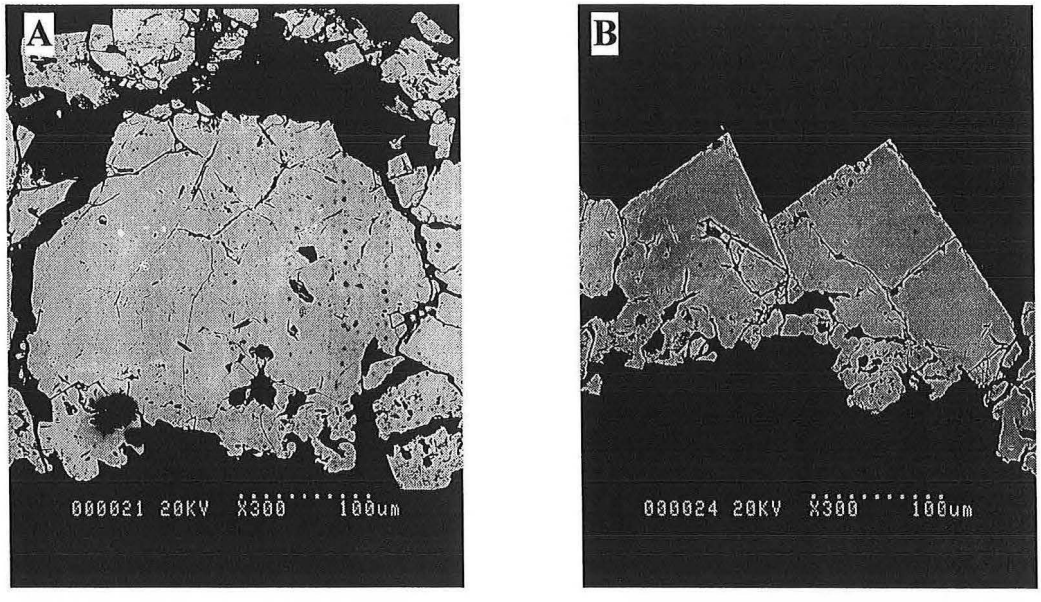


Fig. IV-21 - Photographies au microscope électronique à balayage, montrant les différentes zonation dans les pyrites de l'échantillon SM34, avec (A) "patchy zoning" et (B) zonation grossière.

II. 3. 3. 2. 3- Discussion

Dans l'ensemble, les données des échantillons SM34 et SM36 sont comparables avec, dans les deux cas, des teneurs en soufre et en fer inférieures à 66.6 et 33.3 a. % respectivement. Comme on le peut le voir sur le diagramme qui relie le S et le Fe (Fig. IV-22 A) un grand nombre de points se trouvent en dessus de la droite de corrélation Fe-S, ce qui correspond à un déficit qui sera compensé par l'arsenic (Fig. IV-22 B). les bandes claires sont beaucoup plus arseniées que les bandes sombres (ce qui est généralement le cas).

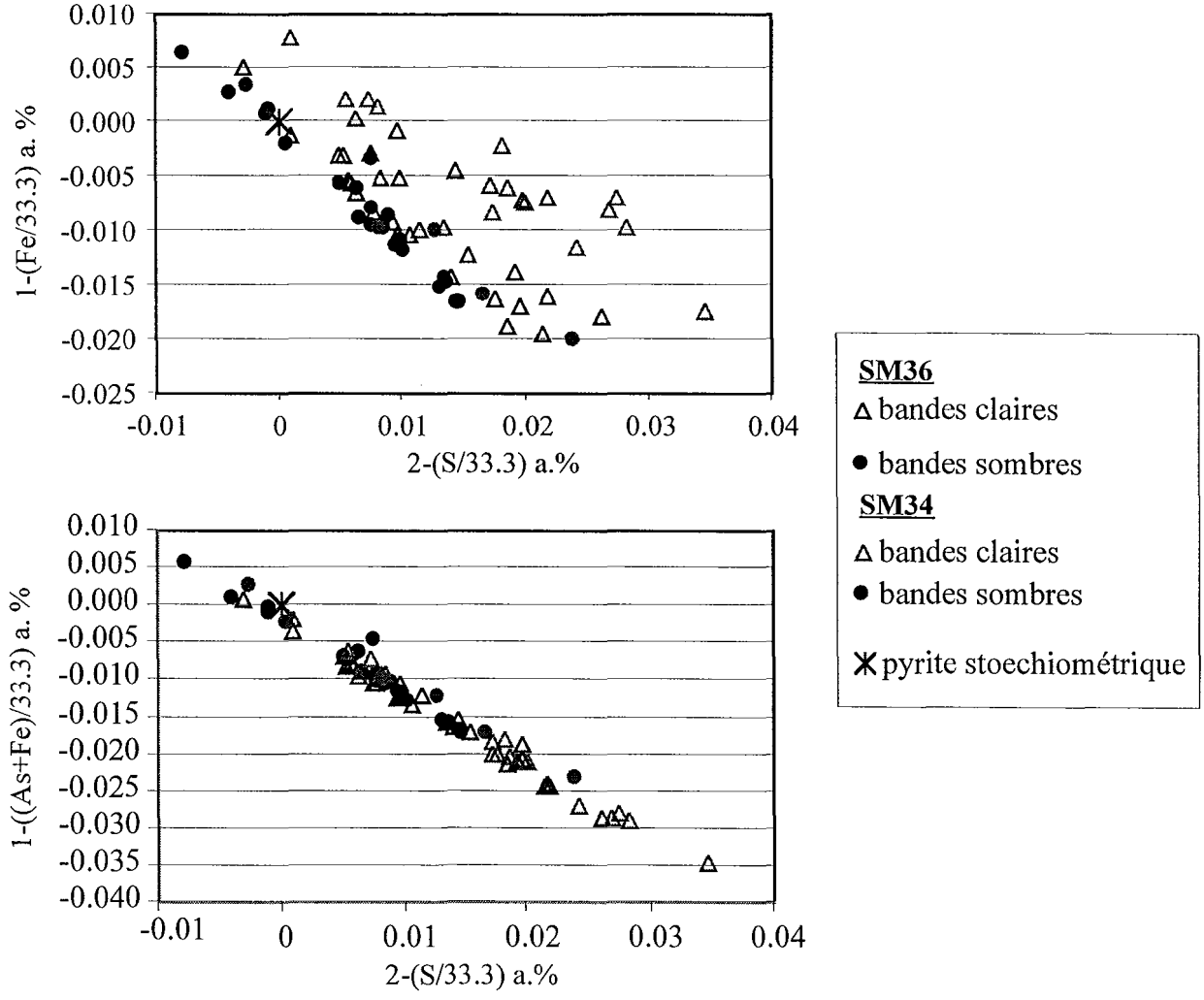


Fig. IV-22 - Variation de la composition chimique des pyrites dans les structures E-W du site RN20 et comparaison entre les deux échantillon (SM34 et SM36).

II. 3. 4- Conclusion

Des données précédentes, il ressort que le site de la RN20 a connu une succession d'événements tectoniques et hydrothermaux, dans des contextes alternativements compressifs et extensifs (Fig. IV-23).

(i) Un premier épisode en raccourcissement s'exprime par le chevauchement ductile orienté N40-60°E, soit une direction de raccourcissement proche de N140°E ; il s'accompagne de la transformation des gneiss gris en assemblages à quartz-phengite.

(ii) Cet épisode est suivi d'un épisode en extension de direction N-S, marqué par des failles normales E-W, de style encore partiellement ductile (transition ductile- fragile) et qui s'accompagne d'une minéralisation disséminée en pyrite.

(iii) Un deuxième épisode en raccourcissement, de direction autour de N150°E, s'exprime par des décrochements fragiles à N135°E dextre, et s'accompagne d'une nouvelle silicification accompagnée d'une minéralisation en stibine.

(iv) enfin, un dernier épisode en extension, de direction N40°E, s'exprime par un faisceau de failles normales à N130°E, et s'accompagne d'une deuxième phase de minéralisation disséminée en pyrite qui déstabilise la stibine.

régime	direction	manifestations tectoniques	hydrothermalisme
raccourcissement	~N140°E	chevauchement ductile (N140°E)	Q_1 phengite rutile
extension	N-S	failles normales E-W	Q_2 pyrite phengite
raccourcissement	~N150°E	décrochement fragile (N135°E)	Q_3 stibine
extension	N40°E	failles normales (N130°E)	pyrite

Fig. IV-23 - Synthèse des régimes de déformation, et des manifestations tectoniques et hydrothermales associées, dans le site de la RN20.

III- LE SECTEUR CENTRE : Argentat s. s.

Plusieurs indices d'activité hydrothermale ont été examinés dans ce secteur au cours de ce travail. Trois d'entre eux sont spatialement associés au passage de failles "cartographiques" de direction voisine de N70°E (Fig. IV-24), le quatrième (le Tindex) étant proche de la faille d'Argentat elle-même.

III. 1- LE SITE AR116

III. 1. 1- Les structures

Ce site est localisé sur la D33 vers Mercour à 2.5 km au Nord de l'intersection de la D33 et de la RN120. En ce point, les micaschistes (avec des lentilles de quartz), qui contiennent des intercalations métriques d'amphibolites, ont une disposition globalement monoclinale (schistosité à N0-15°E 30-40°W). Ces micaschistes montrent les traces de deux structurations en distension :

(i) un ensemble de petites "marches d'escalier" à N0°E-75°W (avec des flexures métriques plus ou moins dégénérées en cisaillement) qui peut manifestement être rapporté au fonctionnement de la faille d'Argentat. De petits filonnets à quartz- tourmaline, initialement sécants sur la schistosité, sont fortement aplatis (Fig. IV-25) dans le sens vertical, ce que l'on peut vraisemblablement rapporter aussi à cet épisode

(ii) une série de petites failles normales "E-W" (N60° à N105°E) et effondrement au Sud (Fig. IV-25) recoupent ce premier ensemble. Ces failles sont silicifiées, montrent des structures bréchiques, et sont plus au moins riches en sulfures (pyrite, sphalérite, arsénopyrite, etc...). Le jeu initial de ces structures semble toutefois un peu ductile (Fig. IV-25).

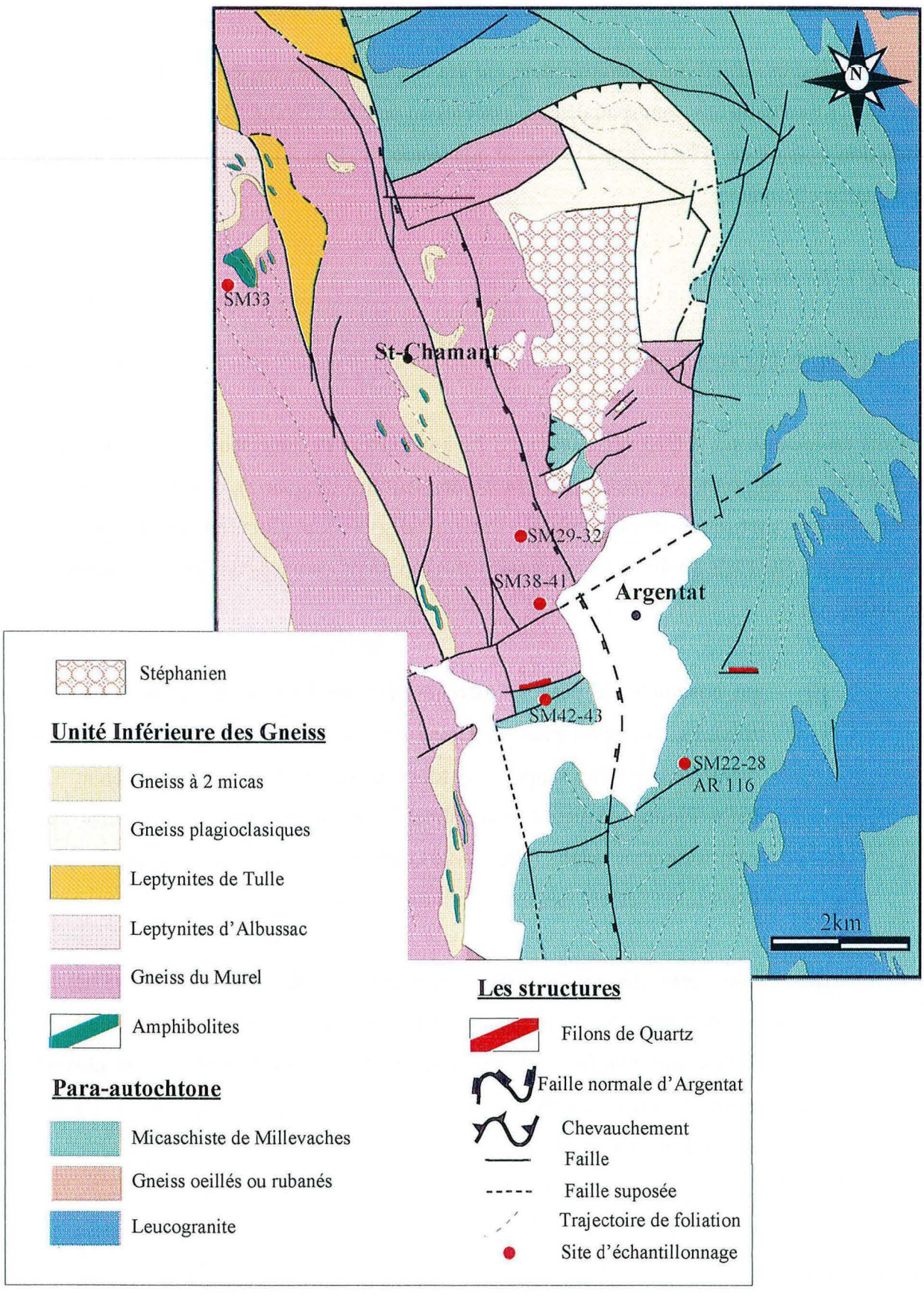


Fig. IV-24 - Carte géologique simplifiée du secteur centre (Argentat s. s.)

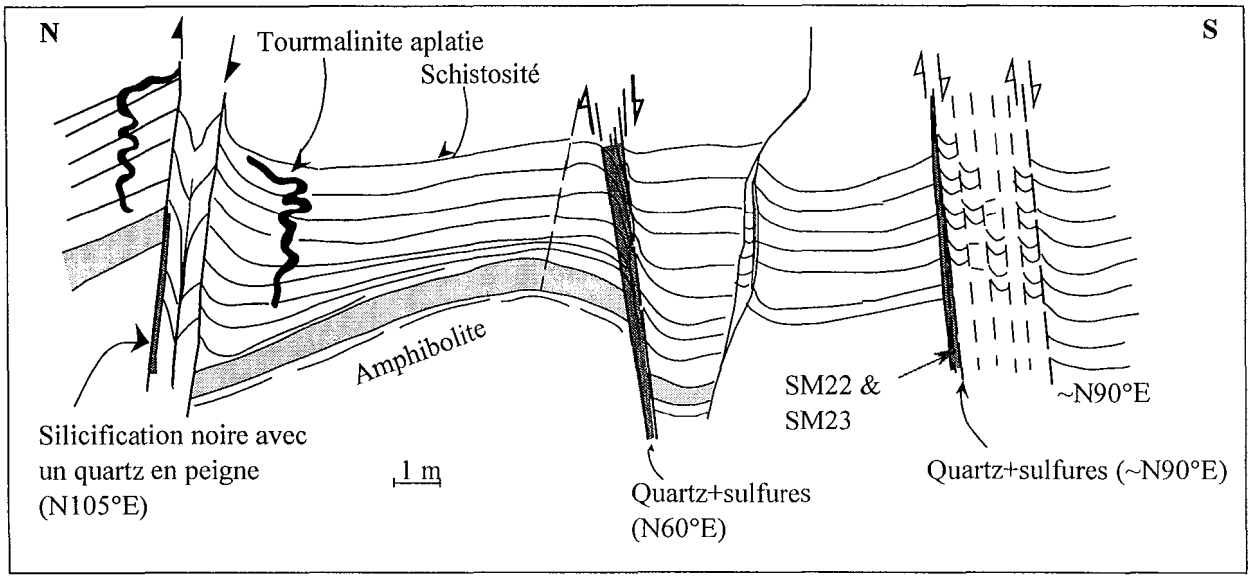


Fig. IV-25 - Coupe N-S dans les structures d'Argentat minéralisées (site AR116).

III. 1. 2- la succession paragénetique

L'étude détaillée de l'échantillon SM23, pris dans une faille à environ N90°E, permet de dégager la succession paragénétique suivante :

- une matrice à quartz microcristallin (Q_0) et nombreuses phengites (Fig. IV-26a). Ces phengites ont des tailles variables (50-500 µm), elles sont orientées selon deux directions orthogonales (N40°-50°E et N130°-140°E). L'ensemble Q_0-phengite représente l'encaissant silicifié.

- deux épisodes où se développe dans cette matrice un quartz stérile : le premier épisode correspond à l'ouverture de veinules selon des directions aléatoires (Fig. IV-26b), dans un contexte de fracturation hydraulique. Ces veinules sont remplies par un quartz palissadique (Q_1), avec des tailles de l'ordre de 200 µm (Fig. IV-26b). Le deuxième épisode correspond à des veines qui recoupent les veinules à quartz Q_1, elles se développent essentiellement dans la direction E-W. Ces veines sont remplies par un quartz palissadique Q_2 (Fig. IV-26c) de grande taille (~1 mm).

- un stade de minéralisation : durant ce stade se dépose l'essentiel de la minéralisation sulfurée avec en première étape, le développement d'un quartz Q_3 soit en surcroissances sur le quartz Q_2 (Fig. IV-26d) soit par réouverture des veines du quartz Q_2. La paragenèse métallique à ce stade est constituée principalement par la sphalérite apparemment associée à un dépôt ponctuel de galène et chalcopyrite (Fig. IV-27a). La deuxième étape correspond à un dépôt massif de la pyrite, soit dans des microfissures (Fig. IV-26d et IV-27b) découpant le quartz Q_2 et parfois Q_3, soit dans des grandes plages, décollant la sphalérite et la remplaçant au contact des Q_3 (Fig. IV-26c et IV-27a).

-stade tardif : silicification microcristalline (Q_4) à l'origine de grandes plages de dissolution/remplacement des stades précédents (la pyrite étant plus résiduelle que la sphalérite), et d'un réseau de veinules à quartz fibreux dilacérant la pyrite (figure de "crack-seal") (Fig. IV-26c, d). A ce quartz Q4 est associé un épisode arsenié, avec le dépôt de l'arsénopyrite et des surcroissances arseniées dans la pyrite (cf. infra). En ultime étape se dépose une galène tardive qui succède à l'arsénopyrite.

L'étude au microscope électronique à balayage des différents sulfures a révélé en outre l'existence de phases supergènes :

(i) un arséniate de plomb (Pb, O, As) prismatique qui peut probablement être de la mimétite ($PbSCl[AsO]_3$), que l'on retrouve également en microfissures, il représente apparemment le principal produit d'oxydation.

(ii) un sulfate de plomb qui se développe dans des fissures de la sphalérite, il s'agit vraisemblablement de l'anglésite ($PbSO_4$).

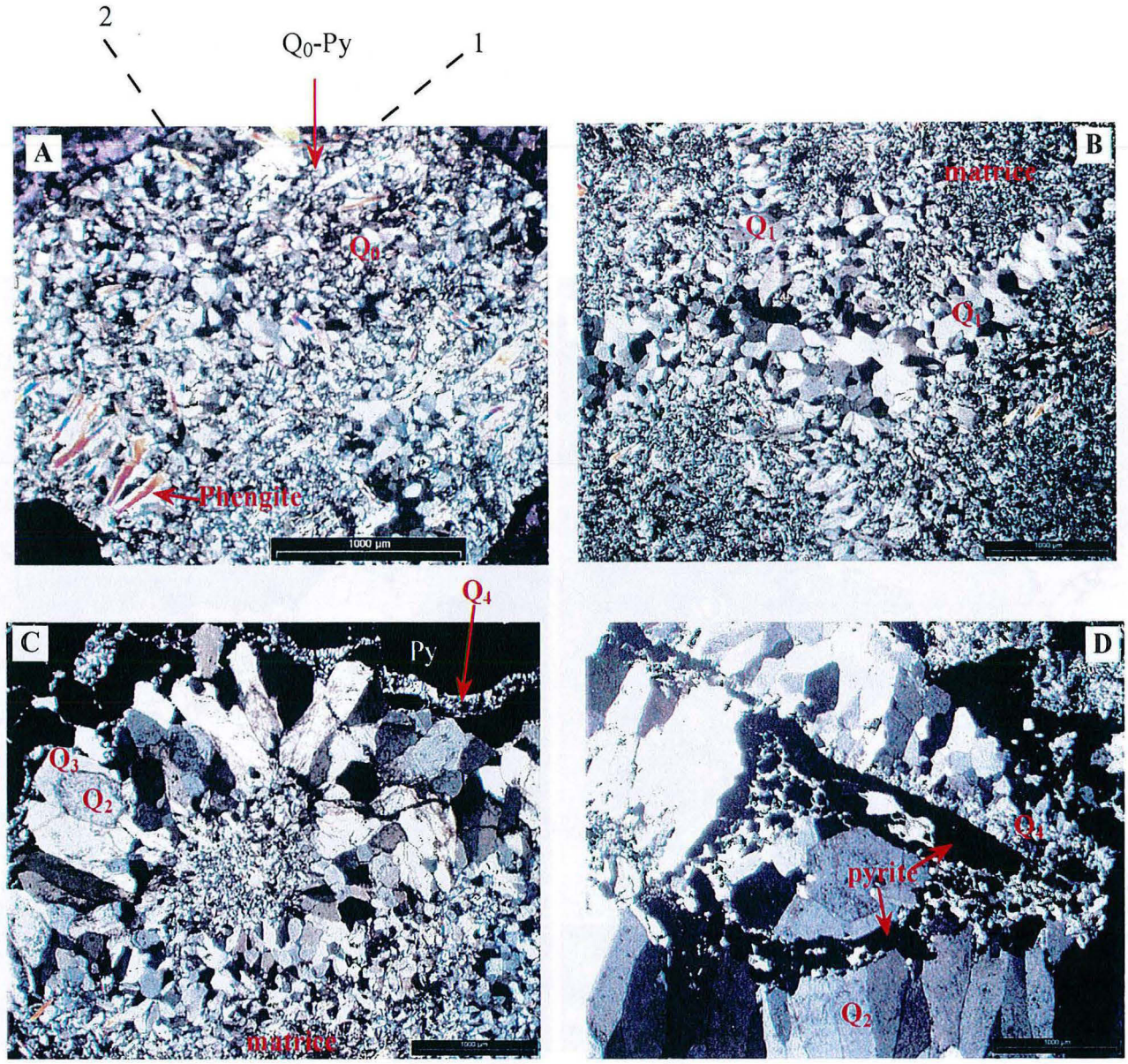


Fig. IV-26 - Photographies en microscopie optique (LP), illustrant la succession paragenétique dans l'échantillon SM23 (site AR116) (voir texte)

A : "Q_0" 1, 2 les deux directions orthogonales des phengites

B : veines "Q_1"

C : "Q_2-Q_3/ Py/ Q_4" La pyrite décolle la sphalérite (non visible sur la photographie) ; elle est à son tour recoupée par le quartz Q_4

D : Fissures à pyrite recoupant le Q_2 ; Q_4 plus tardif bréchifie la pyrite ou la décolle des quartz Q_2

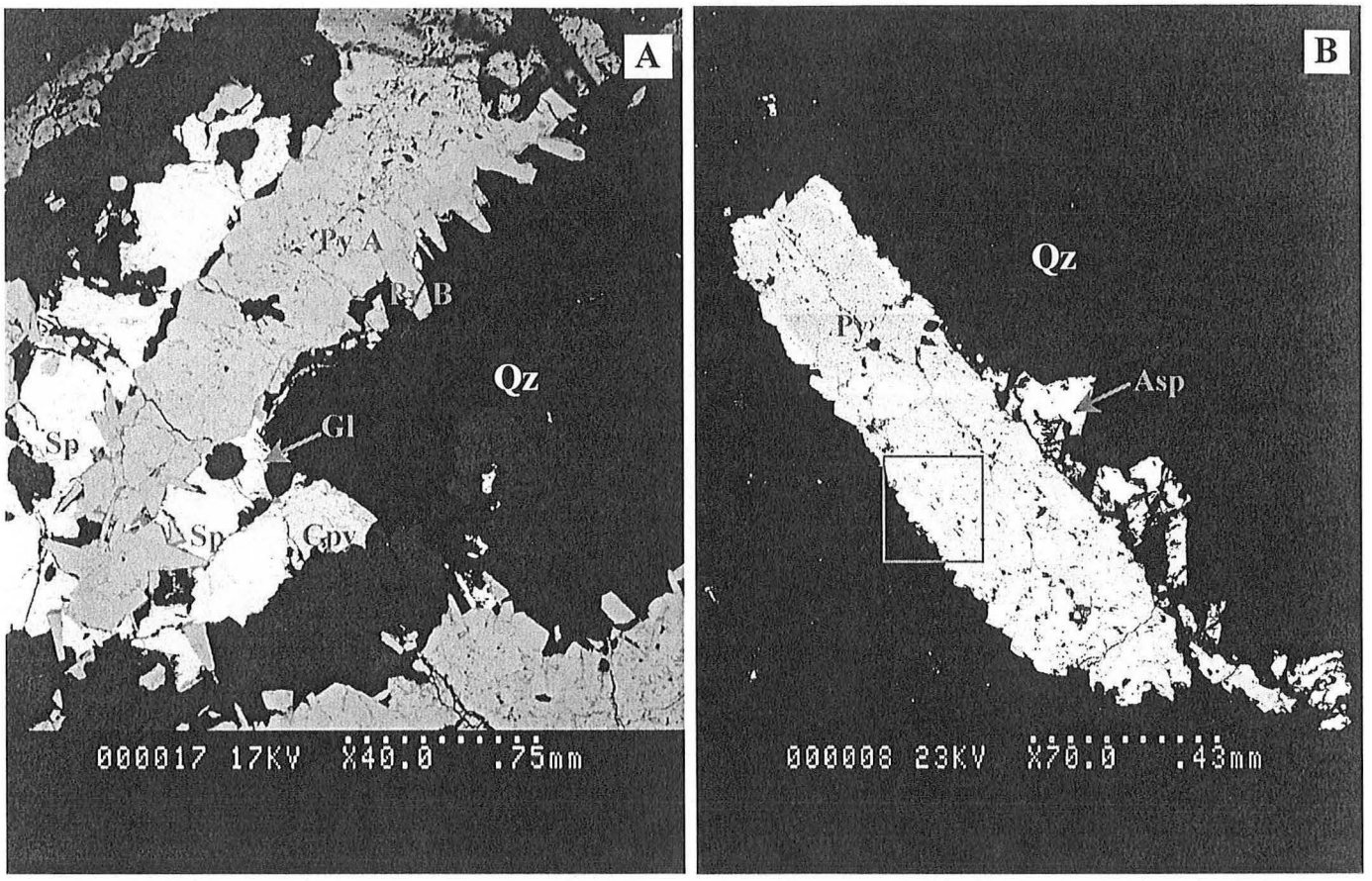


Fig. IV- 27 - Photographies MEB des sulfures de l'échantillon SM23, montrant les relations entre les différentes phases ; Asp : arsénopyrite ; Cpy : chalcopyrite ; Gl: galène ; Sp : sphalérite ; Py : pyrite avec PyA corespondant au cœur et PyB des surcroissances en aiguilles sur le bord ; Qz : quartz.
Le cadre correspond à l'endroit où la photographie de la figure IV-29 a été prise.

III. 1. 3- L'étude minéralogique

III. 1. 3. 1- Les phengites

Les micas blanc analysés dans ce site sont très homogènes, ils correspondent à des phengites fibreuses de taille variable (50-500 μm), qui proviennent de l'encaissant silicifié.

Les analyses à la microsonde électronique ont révélé une composition chimique très homogène (Fig. IV-28). Elles sont plus magnésienne que ferrifère (Fig. IV-28A), avec un rapport moyen Fe/Fe+Mg entre 0.4 et 0.45. Le site interfoliaire contient 0.7 à 0.8 a./u.f de potassium et 0.15 à 0.2 a./u.f. de sodium, il s'agit donc de phengites, comme le montre le bon alignement parfaitement sur la droite de substitution (Fig. IV-28B), mais qui restent proches des muscovites.

III. 1. 3. 2- La pyrite

La pyrite qui se développe en grande plage est constituée par de grands éléments, qui sont corrodés au cœur avec des surcroissances en aiguille sur les bords (Fig. IV-27B). Du point de vue chimique le cœur de ces pyrite contient un peu d'arsenic alors que le bord en est dépourvu (tableau 4). Les pyrites fissurales, sont de grande taille (environ 1 mm), elles sont caractérisées par un enrichisement en As (3.1 w %, 1.8 a %) le long de microfissures (Fig. IV-29) qui se développent sur les bords de la pyrite, cet enrichissement en arsenic se fait, essentiellement aux dépens du soufre (Fig. IV-29), lors de la mise en place de l'arsénopyrite.

De façon générale, les pyrites de cet échantillon contiennent 64.7-66.8 a. % de soufre et de 33.1 jusqu'à 34 a. % de fer. La teneur moyenne en As, hors les zones enrichies, est d'environ 0.1 a.%.

La pyrite est dans l'ensemble pauvre en arsenic (~0.3 a.%), avec une tendance des surcroissances en aiguille (Fig. IV-27 B) a être légèrement plus pauvres (tableau 4). Cependant, en laison avec le stade Q_4 et la croissance d'arsénopyrite (Fig. IV-29), on observe sur le bord des pyrites concernées, des remaniements (microfissures) avec un net enrichissement en arsenic (jusqu'à 3.1 w. %, soit 1.8 a. %) qui se substitue au soufre (Fig. IV-28). On note, toutefois, qu'une deuxième phase de croissance d'une pyrite pauvre en As semble avoir suivi (Fig. IV-29).

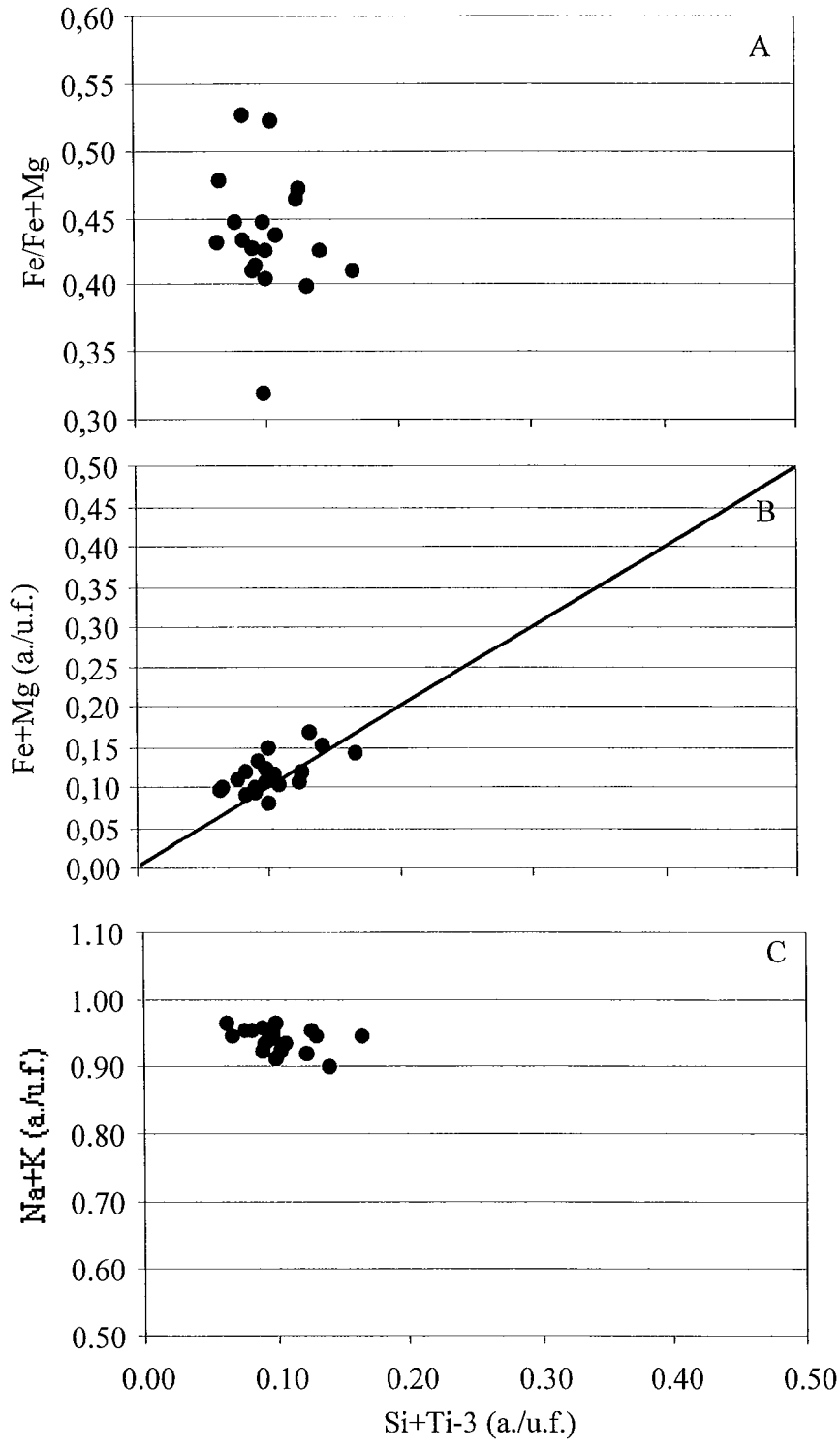


Fig. IV-28 - Composition chimique des phengites du site AR116 (échantillon SM23).

	Sphalérite		Chalcopyrite		Pyrite cœur (Py-A)		Pyrite bord (Py-B)		Pyrite arséniée	
	W %	A %	W %	A %	W %	A %	W %	A %	W %	A %
S	33.34	50.35	34.87	50.39	52.68	66.04	52.96	66.01	49.2	64.83
Fe	0.31	0.27	29.82	24.75	46.89	33.75	47.04	33.67	44.09	33.35
Co	0.0	0.0	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.0	0.04	0.03
Ni	0.0	0.0	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.0	0.05	0.03
Cu	0.08	0.06	34.06	24.84	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00
Zn	66.56	49.30	0.00	0.00	0.05	0.03	0.05	0.03	0.00	0.00
As	0.00	0.00	0.01	0.01	0.32	0.17	0.55	0.29	3.11	1.75
Sb	0.0	0.0	0.00	0.0	0.00	0	0.00	0.0	0.00	0
Pb	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0	0.00	0.0	0.00	0
Total	*100.0*	*100.0*	*98.77*	*100.0*	*99.96*	*100*	*100.6*	*100.0*	*96.5*	*100*

Tableau 4- Analyses représentatives des sulfures de SM23

III. 1. 3. 3- L'arsénopyrite

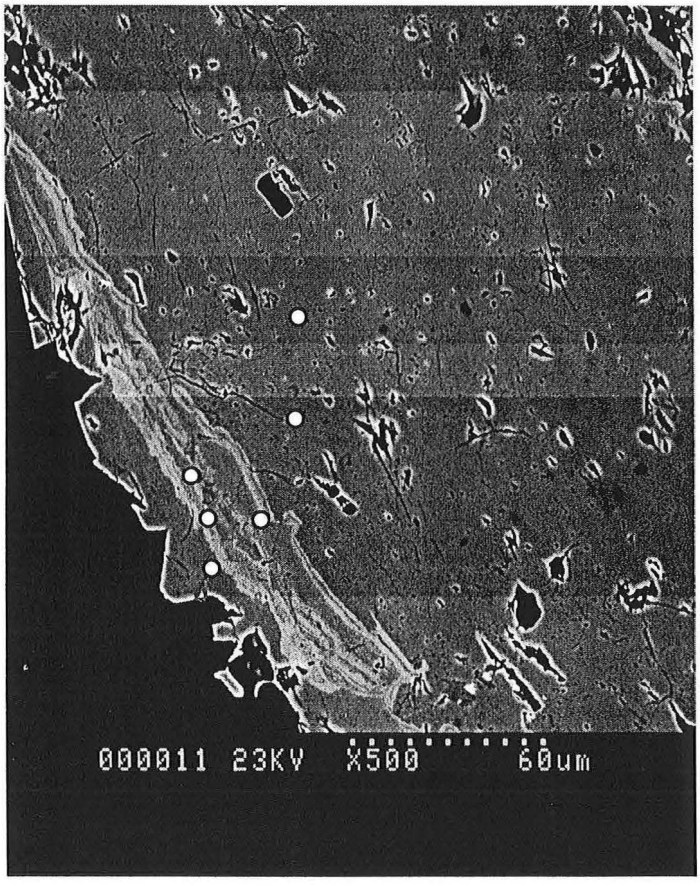
L'arsénopyrite se développe, essentiellement au contact de la pyrite recoupée par Q_4 ; elle se présente sous forme de petits cristaux automorphe (environ 100 µm). Examinées au MEB, ces arsénopyrites présentent des hétérogénéités difficiles à interpréter : syncroissances (?) lamellaires (Fig. IV-30A) ; corrosion (?) dentelliformes (Fig. IV-30C, D), à l'intérieur de cristaux grossièrement zonés (Fig. IV-30B).

Les deux types de cristaux ainsi associés se distinguent par leurs teneurs en As (Fig. IV-31), le contenu en fer restant plus ou moins constant (32.3-33 a.%) ; les plages sombres des images MEB sont enrichies en soufre (38.2 a.%, contre 28.6 a.% d'arsenic) et sont les plus riches en antimoine (environ 0.2 a.%), tandis que les plages claires sont proches de la stœchiométrie.

III. 1. 3. 4- Les autres sulfures

La sphalérite est très pauvre en fer (0.31 w. % soit 0.27 a. %).

La chalcopyrite est pratiquement stœchiométrique.



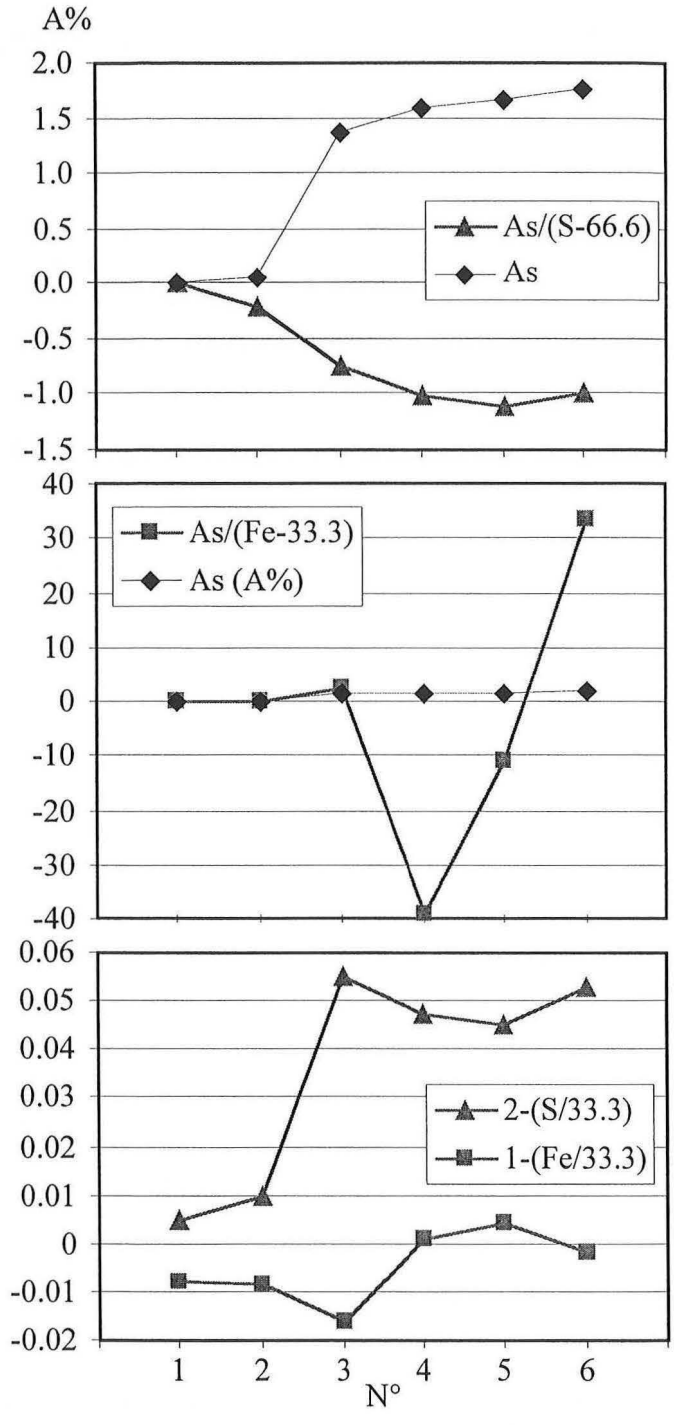


Fig. IV-29 - Photographie au microscope électroniqueà balayage montrant de la zonation dans un cristal de pyrite de l'échantillon SM23 (voir Fig. IV-27 B) et les graphiques de composition des différents points localisés sur la photographie

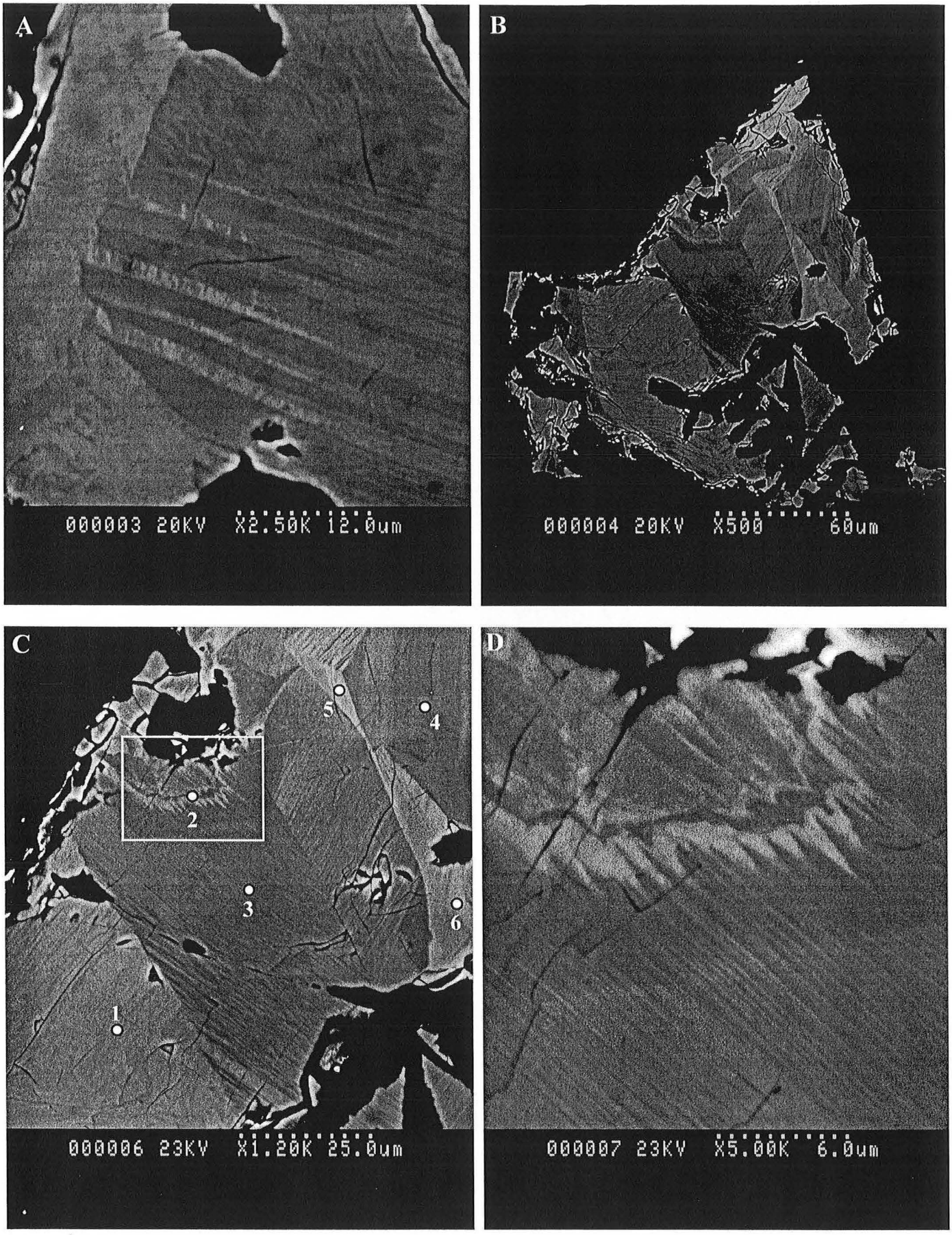


Fig. IV-30 - Photographies au MEB montrant les varaitions texturales dans les cristaux d'arsénopyrite de l'échantillon SM23 (site AR116); C et D étant les agrandissements de B, et (1-6) les points d'analyse (voir fig. IV-31)

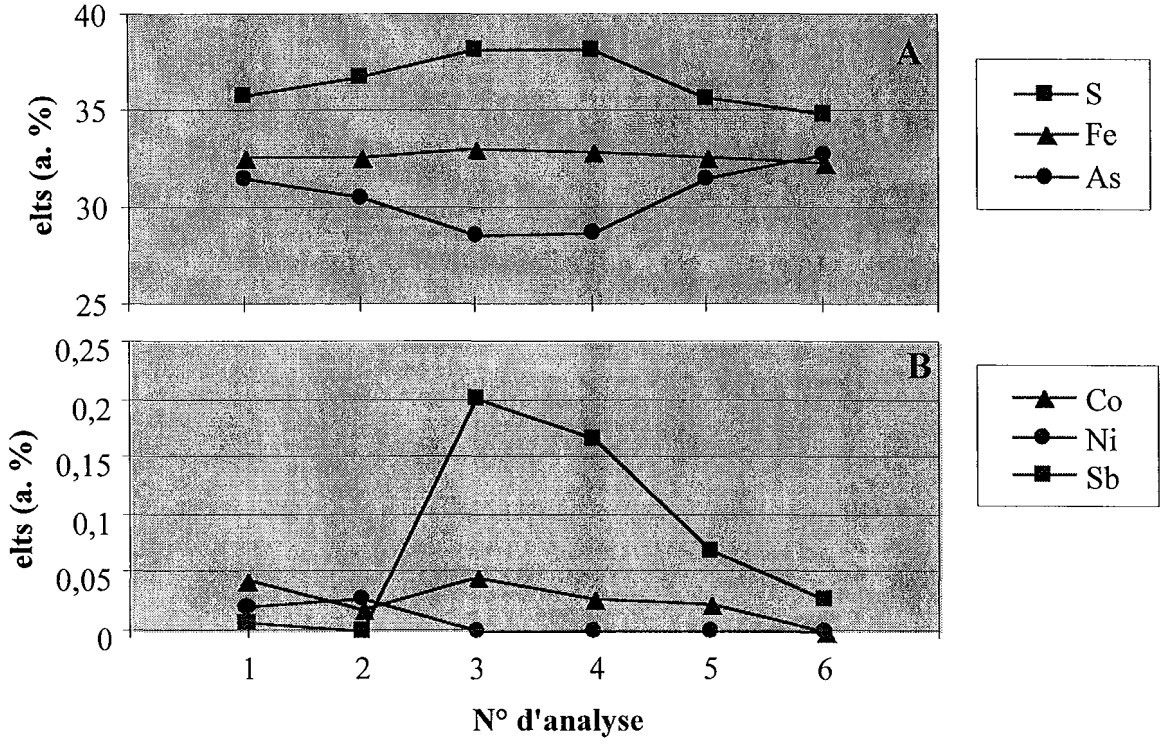


Fig. IV-31 - Variation de la composition chimique dans une arsénopyrite hétérogène (Fig. IV-30) dans l'échantillon SM23; A: éléments majeurs et B: éléments en trace.

III. 2- PUY-DU-TOUR

Sous ce nom se trouvent deux indices ;

(i) La "Déchetterie" (SM38-41) montre sur quelques m^2, dans des orthogneiss à foliation plate, légèrement ondulée selon un axe N-S (N160°E 15°W à N5°E 30°E), quelques fentes d'extension décimétrique, de direction N135°E, à quartz et / ou arsénopyrite, qui sont localement recoupées par une veinule d'arsénopyrite à N70°E, sur laquelle se branche une veinule à N105°E.

(ii) Sur l'Oppidum (SM42-43), à l'emplacement d'un site de décollage pour deltaplanes, où les gneiss sont redressés (N0°E vertical à N165°E 67°E), s'observent quelques occurrences sans lien évident :

- un réseau de veinules à arsénopyrite à N10°E 75°W recoupées par un réseau de veinules à quartz infra-millimétriques à N100°E 73°S ;

- une série de fentes à quartz selon la direction N95°E 65°N ;

- un réseau de veinules quartzeuses infra- millimétriques, à N5°E 75°W, recoupées par un cisaillement à N127°E 53°S, lui même rempli par une veinule à quartz- arsénopyrite.

III. 3- LE TINDEX (SM29-32)

Le site du Tindex correspond à des orthogneiss probablement mylonitiques, fortement silicifiés, localement avec des sulfures, et recoupés par des jeux de diaclases qui les découpent en blocs centi- à décimétrique ("cataclasite" au sens des géologues du BRGM).
Peu de manifestations hydrothermales selon des fissures réglées ont pu être observées, à l'exception d'un jeu de veinules à quartz - pyrite qui se développe selon la direction N85°E 70°N parallèlement à l'une des familles de diaclases.

IV- LE SECTEUR SUD : l'indice aurifère de Grand Fraud

IV. 1- LA STRUCTURE FILONIENNE (Fig. IV-32)

La structure aurifère du Grand Fraud, la plus importante de la faille d'Argentat, s'étend sur environ 10 km, avec une puissance moyenne de l'ordre de 20 m. Cette structure contient des indices à Au et des anomalies As-Sb (Fig. IV-33). Nous l'avons observée en deux points :

IV. 1. 1- Extension Nord (Fig. IV-33)

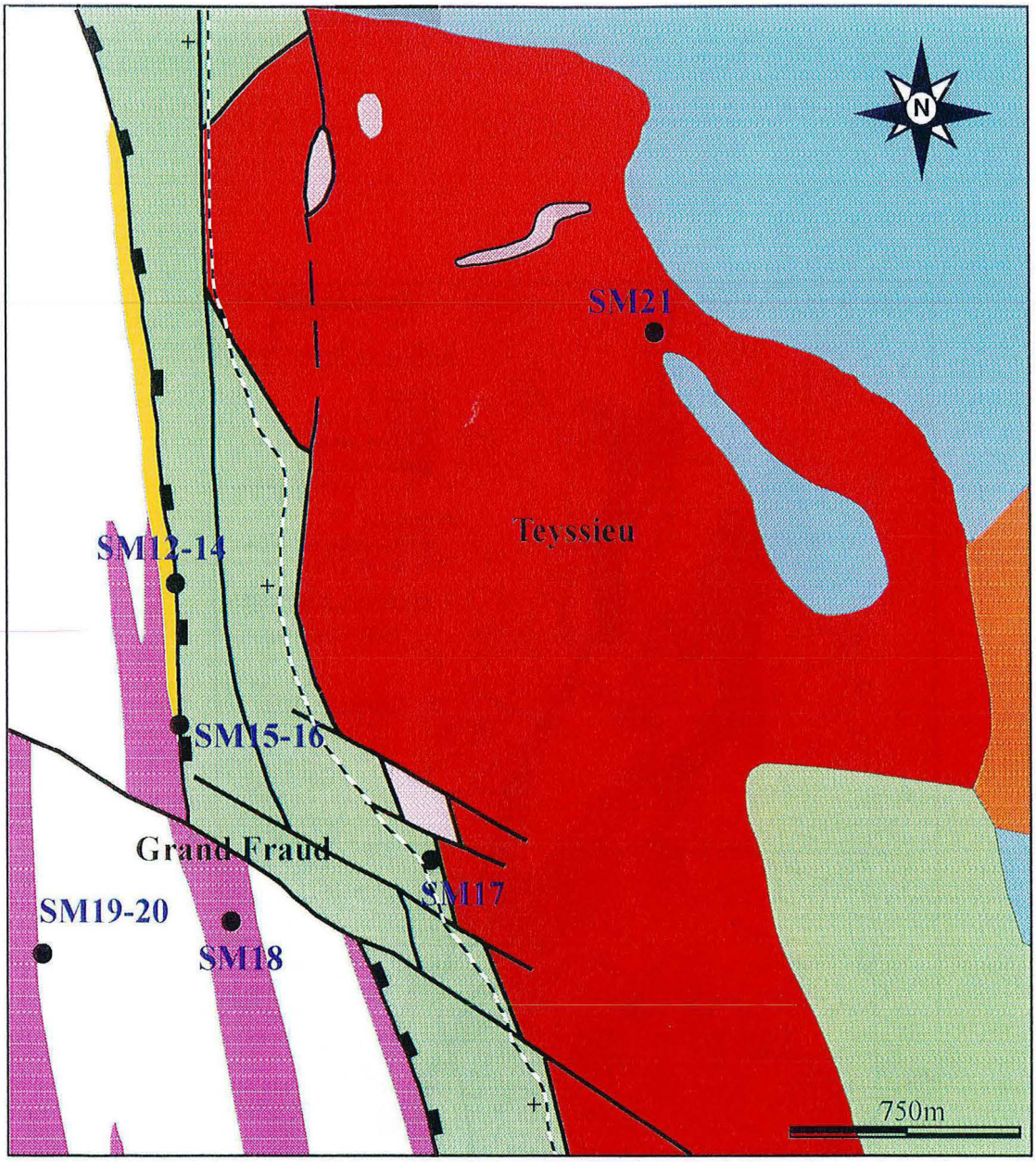
Le filon est penté à 70°W, avec une direction localement mesurée à N-S, il est encaissé dans des micaschistes. Au toit se développe un réseau serré de veinules centimétriques à 165°-175°E 50-60°W (SM13), connectées par des veinules d'orientation aléatoire, témoignant d'une ouverture par fracturation hydraulique. Au mur, un autre réseau, moins dense, est à N145°E, proche de la verticale. A l'intérieur de la structure, un faisceau réglé de veinules de quartz se développe selon la direction N160°E 75-80°W.

Dans le détail l'échantillon SM13 montre (Fig. IV-34) : des veinules macroscopiques, à N165-175°E (Q_{2a}), interconnectées par des veines à N120-130°E, qui sont à quartz palissadique (Q_{2b}) ; elles recoupent un jeu plus précoce de veinules N-S (Q_1), et sont elles mêmes recoupées : (i) par des microfractures à N165-175°E qui, dans l'encaissant, sont des veinules à remplissage de quartz (Q_3), mais, dans le quartz Q_2, sont des fractures cicatrisées, plus claires, et (ii) un jeu de de veinules "E-W" (N80-130°E), également remplies de quartz (Q_4). Il est à noter que tout ces quartz sont stériles.

De nombreux plans d'inclusions fluides (PIF) recoupent à la fois quartz Q2 et Q3, selon un direction E-W comme on peut le voir sur la figure IV-35, en effet sur un bruit de fond de directions aléatoires ressort nettement une famille privilégiée autour de N110°E 30°S.

IV. 1. 2- Clédy

Le filon est encore penté 60°W, avec ici une direction localement mesurée à N140°E. Au mur l'encaissant n'est pas visible, cependant, au toit, il est constitué par des micaschistes, où un réseau de veinules de quartz se développe selon une direction à N165°E 80°E. L'échantillon SM15 a été prélevé dans la structure quartzeuse elle-même, proche du mur, dans une zone où on voit macroscopiquement du quartz gris (contrastant avec la teinte généralement rose de la structure) d'aspect bréchique (réseau de silice "claire").



Stéphanien

Unité Inférieure des Gneiss

Gneiss plagioclasiques

Orthogneiss oeillés à biotite

Unité du Para-autochtone

Gneiss et micaschistes de Millevaches

Granitoïdes

Leucogranite monzonitique (Goulles)

Granodiorite à biotite (Calviac)

Granite à biotite et cordiérite (Teyssieu)

Site d'échantillonnage

Structures

Filon de quartz

Faille normale d'Argentat

Faille

Isograde de la rétromorphose dans la zone à chlorite

Fig. IV-32 - Carte géologique simplifiée du secteur Sud (Grand Fraud)

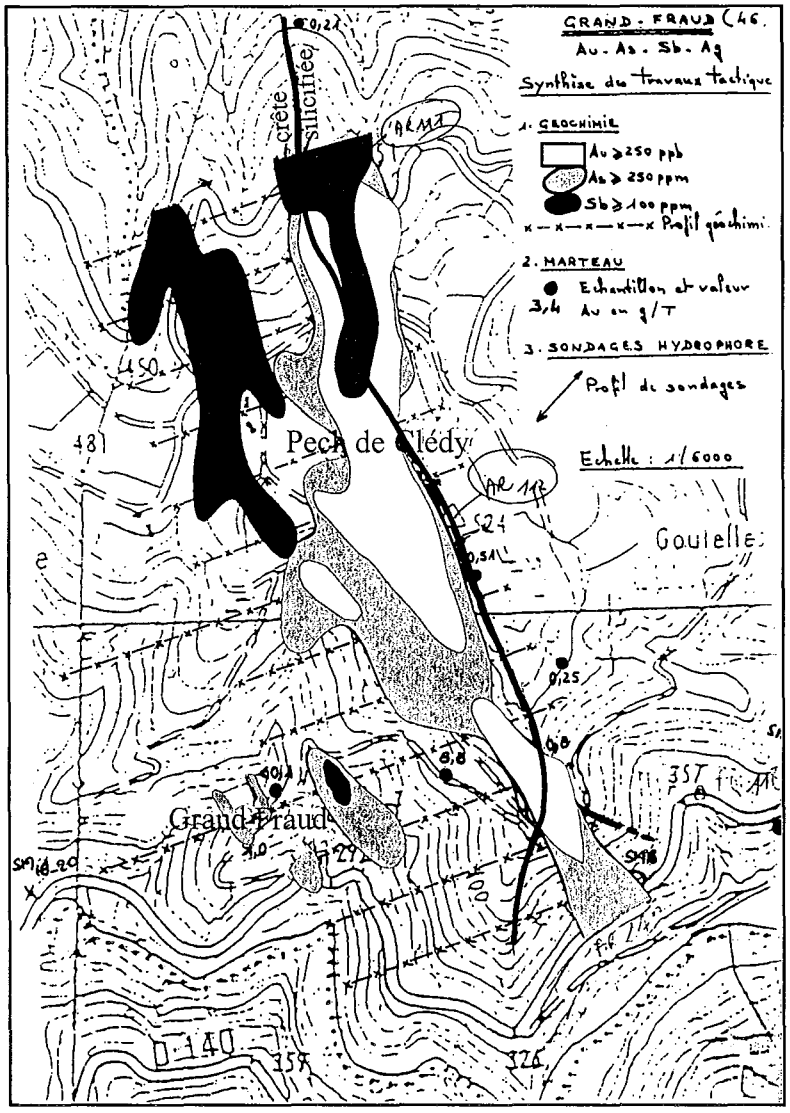


Fig. IV-33 - Cartographie des anomalies Au, As et Sb dans le secteur du grand Fraud (document BRGM, 1993, comm. V. Bouchot)

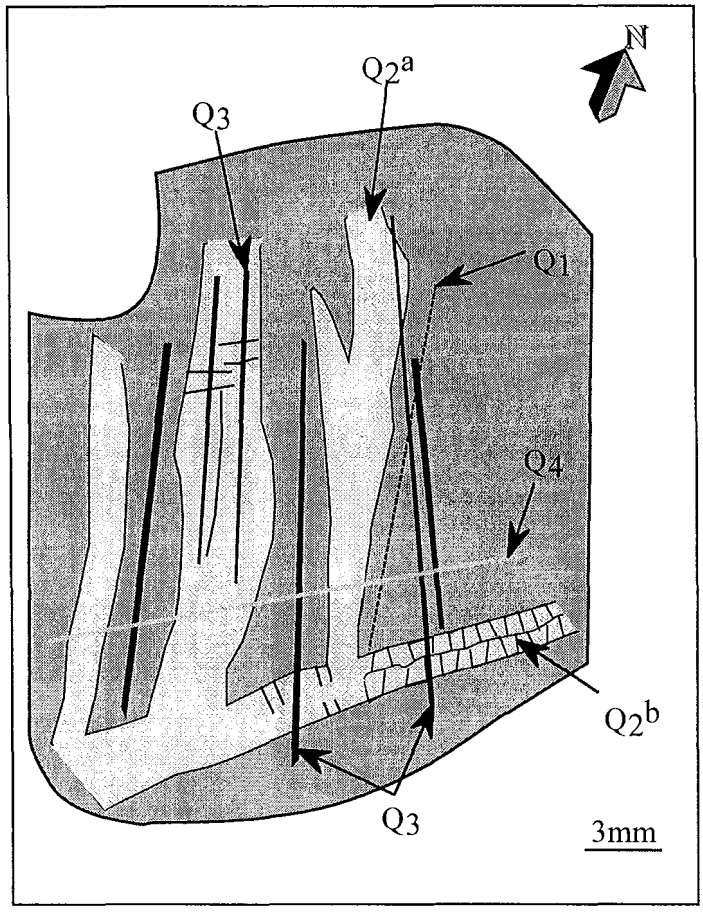


Fig. IV-34 - schéma de la lame épaisse SM13 (plan horizontal), montrant les différentes génération de quartz.

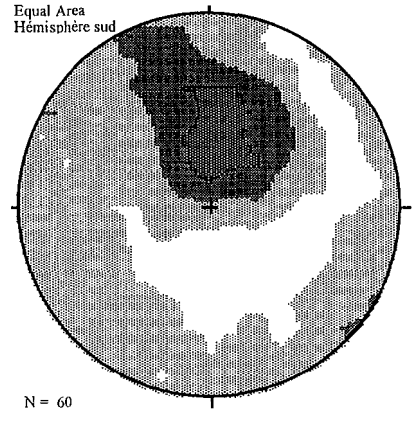


Fig. IV-35 - Stéréogramme des isodensités des PIF dans le quartz Q_2 de l'échantillon SM13.

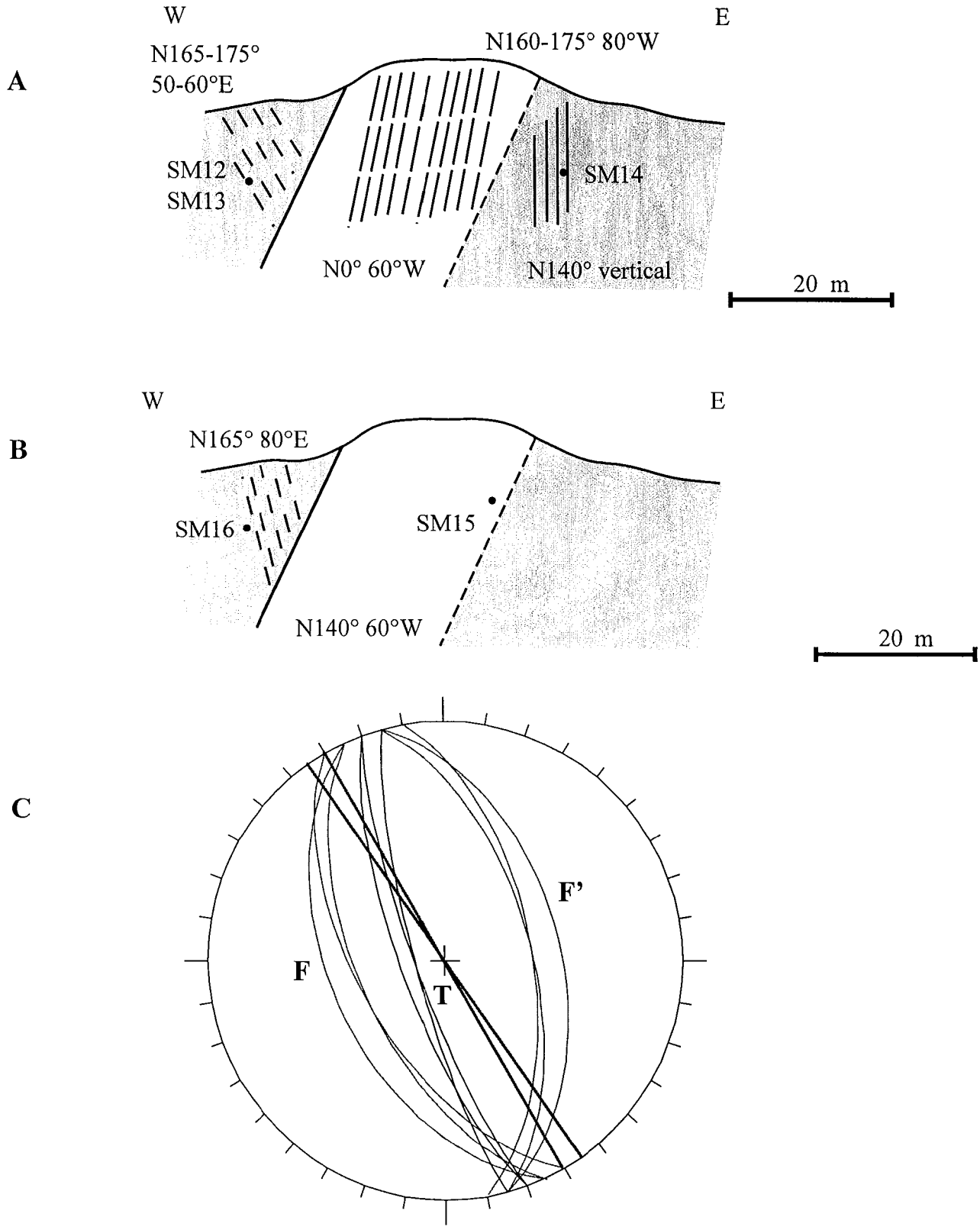


Fig. IV-36. Schéma des différentes structures macroscopiques observées dans la structure filonienne du Grand Fraud ; A. observations au Nord et B. au niveau de Clédy: C. interprétation des différentes structures et projéction de leurs traces cyclographiques (F et F' : failles normales et leur conjuguées, et T : joints de tension).

IV. 1. 3 - Interprétation

L'ensemble des ces observations (Fig. IV-36) s'interprète bien en contexte distensif ; les remplissages quartzeux majeurs occuperaient une faille normale à N150-160°E 60°W et les nombreuses veinules proches de la verticale auraient la valeur de fentes de tension.

IV. 2 - DEFORMATION ET MINERALISATION DANS LE QUARTZ FILONIEN : étude de SM15

La matrice quartzeuse de l'échantillon SM15 montre un quartz polycristallin en grands cristaux, engrenés, probablement palissadiques à l'origine, à extinction ondulante, qui semble témoigner d'un épisode de déformation plastique. Un épisode de bréchification s'y est superposé. Mais l'ensemble est largement oblitéré par une intense activité hydrothermale, traduite par des disséminations de pyrite et de nombreuses microfractures cicatrisées/ cimentées de quartz.

IV. 2. 1 - Étude détaillée de la fracturation

Une étude détaillée de la fracturation et des sulfures associés a été menée sur lame épaisse et polie, et a permis de distinguer trois types de structures :

IV. 2. 1. 1 - Des joints stylolithiques

Ces joints stylolithiques reprennent les fragment bréchiques précoces, ou sont néoformés ; ils sont souvent, dans le deuxième cas, imprégnés de sulfures (pyrite) (Fig. IV-37 A). L'étude de leur orientation révèle l'existence de trois familles (Fig. IV-37 B) ; (i) la direction la mieux marquée est à N60±10°E, riche en pyrite (S_1) ; (ii) à N150 ± 10°E, plus discrète et localisée ; (iii) E-W, beaucoup plus rare (S_3), mais elle contient aussi de la pyrite.

IV. 2. 1. 2 - Les veinules cicatrisées ("healed")

Il s'agit de veinules plus cicatrisées que remplies ("healed"), elles sont les plus nombreuses, de direction variable ; la plupart se recoupent sans déplacement (Fig. IV-38 A), suggérant qu'il s'agit de fentes de tension ; certaines, cependant, témoignent de jeux décrochants (Fig. IV-38 B). Sur la base des associations préférentielles et d'une statistique de leur orientation (Fig. IV-39A et B), deux famille de veinules cicatrisées peuvent être distinguées ; (i) veinules

à N150 ± 10°E, à valeur de fentes de tension (T_1) associées à des veinules à N120-130°E à valeur de cisaillement dextre (C_1) (voir Fig. IV-38 B) ; N60-70°E à valeur de fentes de tension (T_2) associée à N20-30°E à valeur de décrochement dextre (C_2).

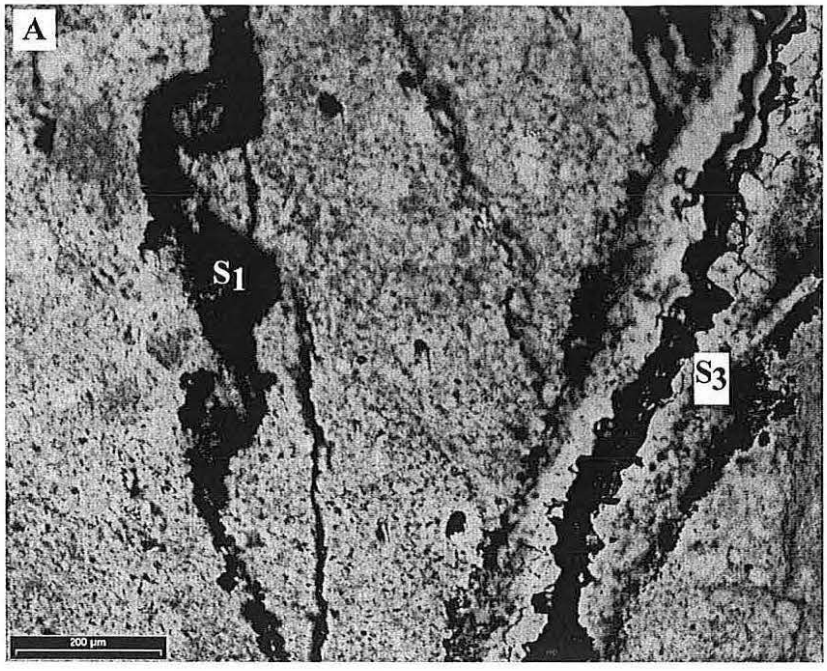
Il semble évident que les joints stylolithiques S_1 et S_2, qui sont orthogonaux respectivement aux familles de joints T_1 et T_2, leur sont génétiquement associés.

Les relations entre ces deux familles sont complexes : les joints T_2 à N60-70°E recoupent souvent les joints T_1 à N150 ± 10°E, mais on observe des cas de décalage en sens inverse (cf. Fig. IV-38 B), ou de dissolution d'un joint T_2 par un stylolithe S_1. Les joints T_1 sont, de loin, les plus fréquents.

IV. 2. 1. 3 - Les veinules colmatées ("sealed")

Ce sont des veinules ouvertes remplies par du quartz et des minéraux opaques (Fig. IV-40 A), elles sont de direction variable et recoupent systématiquement toutes les autres microstructures (Fig. IV-40 B).

Comme le montre la figure (Fig. IV-40 C), il s'agit aussi bien de fentes de tension que de joints de cisaillement, et, sur une base statistique (Fig. IV-40 D), on distingue donc : (i) des fentes de tension à N10 ± 10 (T_3) ; (ii) des cisaillement dextres (les plus fréquents) à N150 ± 10°E (C_{3a}) ; et (iii) des cisaillement conjugués, plus rares, à N70 + 10°E (C_{3b}). Il semble logique de rattacher à cette famille les stylolithes S_3, qui sont perpendiculaires à la direction des joints T_3.



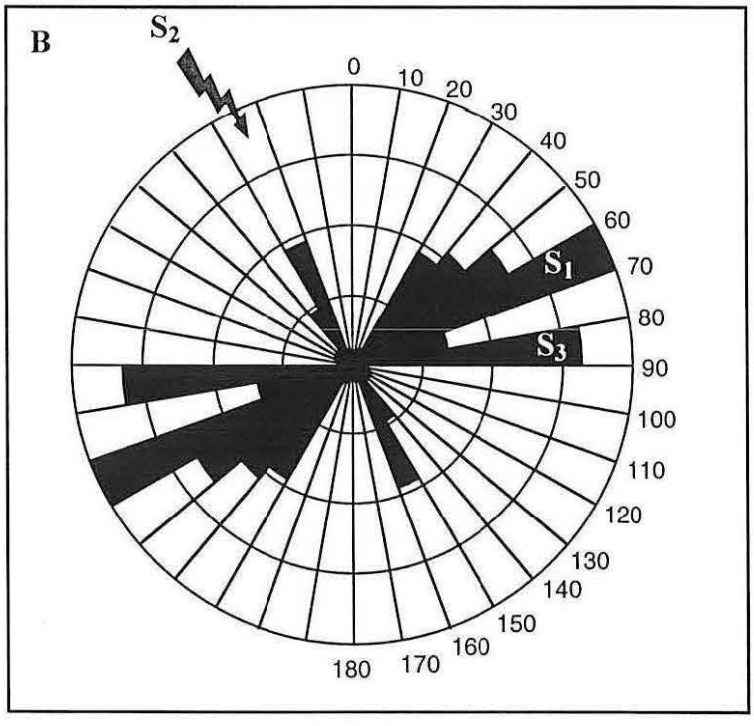


Fig. IV-37 - Photographie en lumière naturelle des joints stylolithiques dans l'échantillon SM15 (A) et la rosace de leur fréquence (B; 60 mesure), S_1 à S_3 : trois générations de veines (voir texte). Le joint stylolitique S_3 est réouvert par une veine de type "sealed" (voir Fig. IV-40 B)

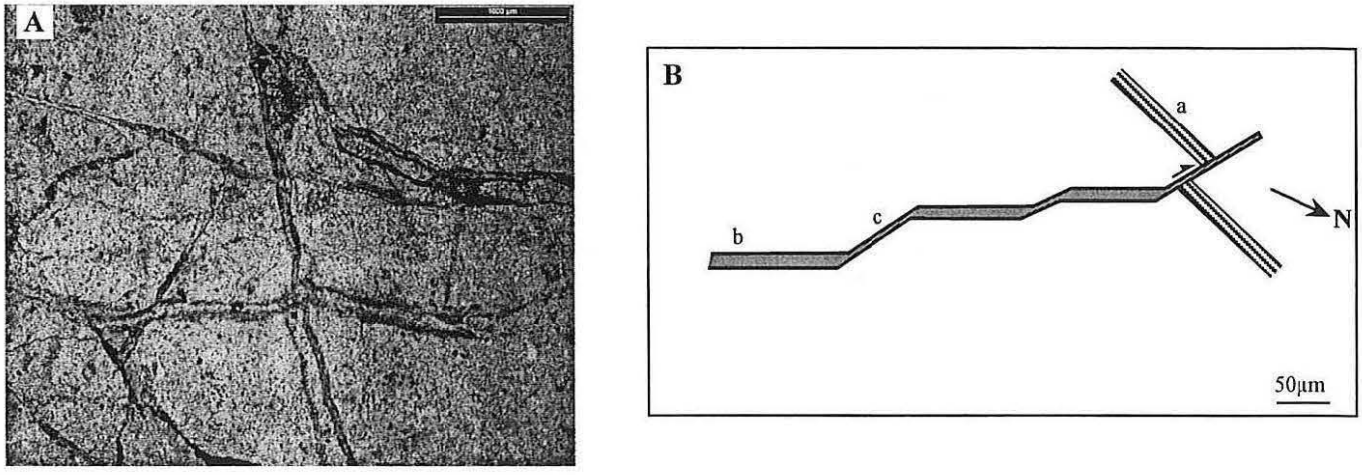


Fig. IV-38 - Illusttrations des veinules de type "healed" dans le filon du Grand Fraud:
A : deux réseaux intersectés sans déplacement
B : contact décrochant d'une veinule N20°E (a) par un système de veinule à N140°E (b) et de cisaillement en décrochement dextre à N120°E associé (c) ; b et c correspondent respectivement à T1 et C1, et a à C2, dans l'interprétation du texte.

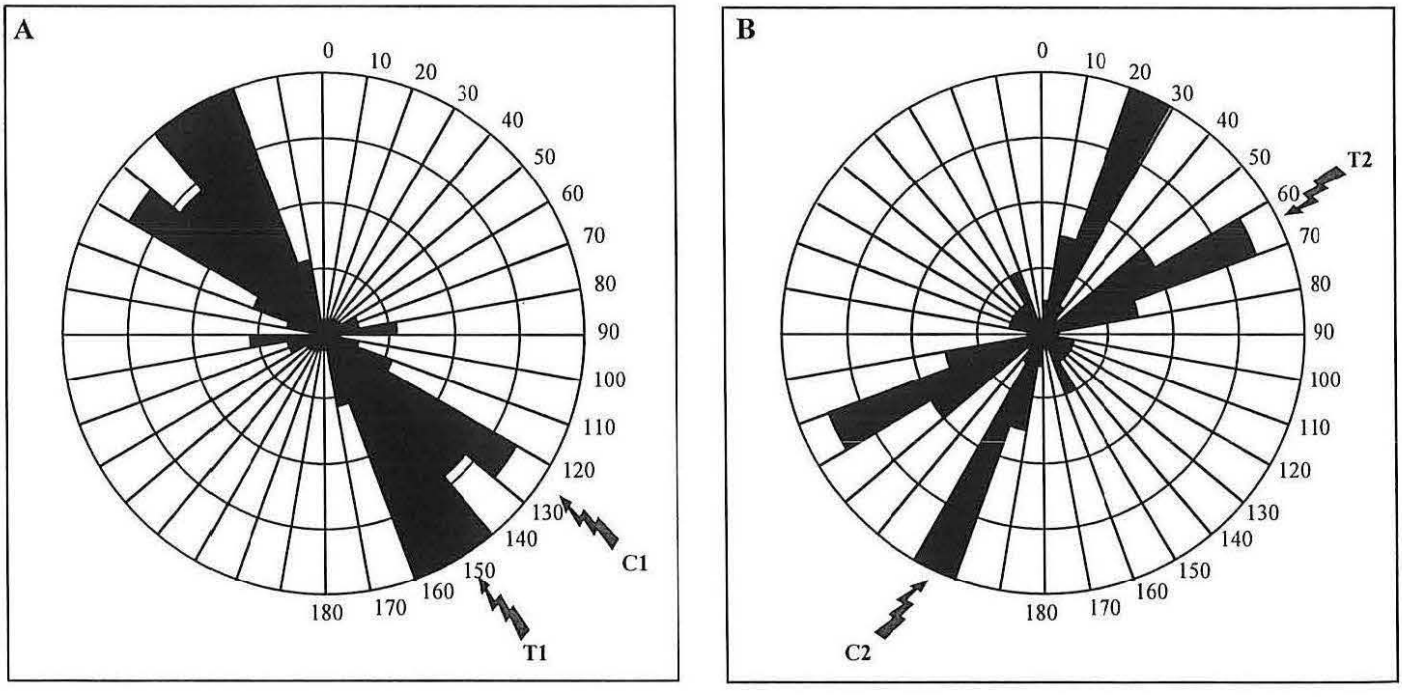


Fig. IV-39 - Rosaces de fréquence des différentes directions des structures de type "healed" dans le filon de quartz du Grand Fraud

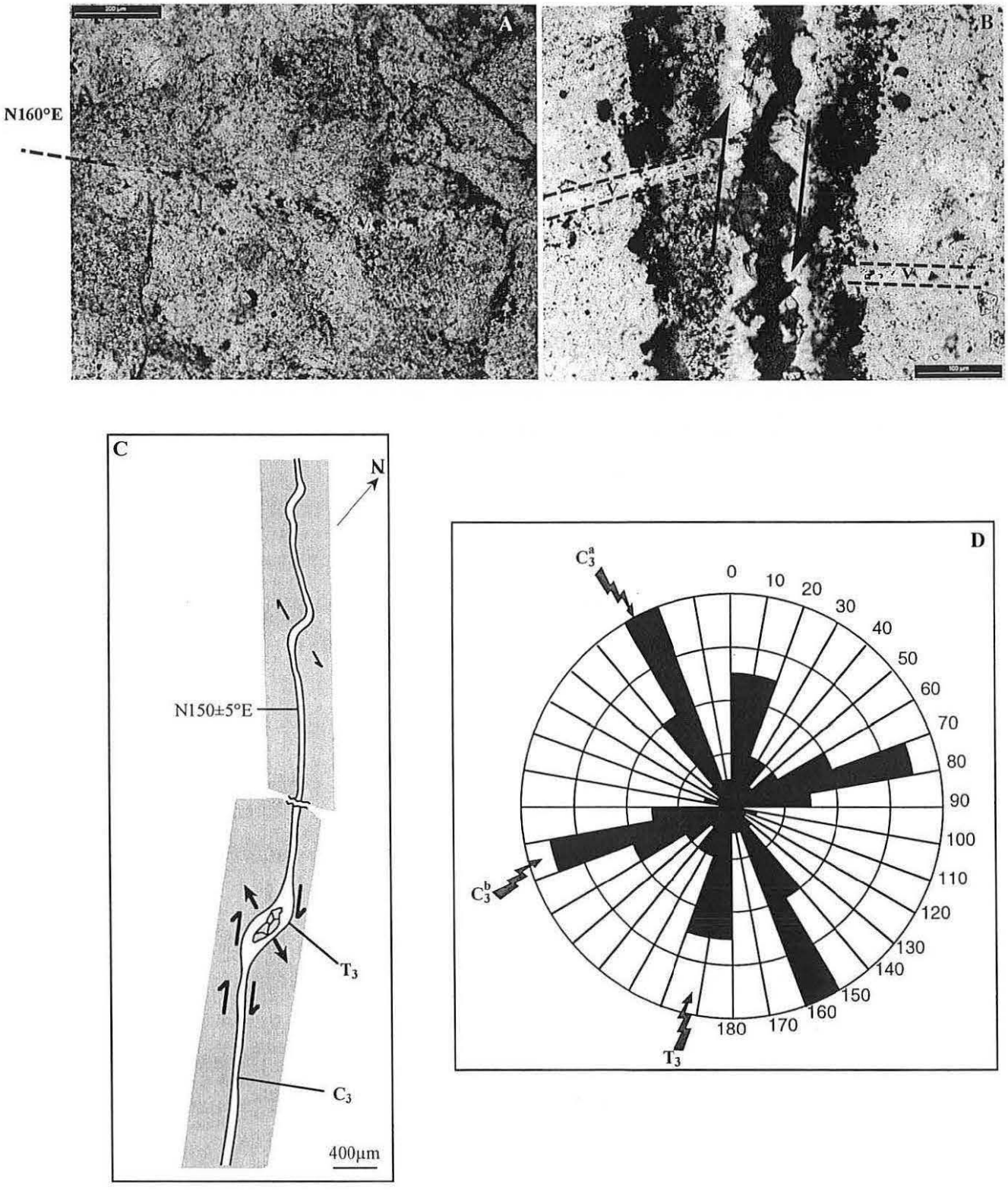


Fig. IV-40 - Les microstructures de type "sealed" (A, B, C) dans le quartz du filon du Grand Fraud (SM5) :

A. Exemple de veinule colmatée (V), en noir les sulfures (LP)

B. Le joint stylolitique à pyrite (S3) est recoupé par une veinule colmatée (V), avant d'être repris en cisaillement dextre avec colmatage par un quartz tardif.

C. Schéma du système C3-T3 associés aux veinules colmatées.

D. Rosaces de fréquence de direction des veinules colmatées.

IV. 2. 1. 4 - Synthèse microstructurale

Il ressort de cette étude que les circulations hydrothermales au sein de la structure quartzeuse du Grand Fraud sont liées à des fracturations en contexte de raccourcissement, en deux stades :

(i) Raccourcissement à N150°E (joints T1), associé à du décrochement dextre selon la direction N120-130°E. L'existence de la direction orthogonale T2 (et des cisaillements associés) et son caractère pénécontemporain de T1, peuvent être attribués à l'échange plus ou moins périodique des contraintes maximale et minimale. A ce stade, les circulations fluides ont essentiellement lieux aux joints de grains et le long des microfissures (cicatrisation= healing).

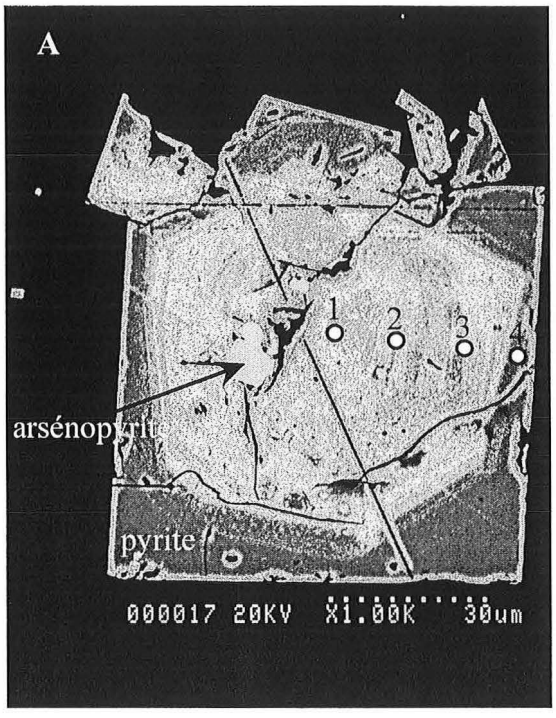
(ii) Raccourcissement à N10°E (joints T3), associé à du décrochement dextre selon la direction N150°E. Les circulations fluides sont plus localisées, les fractures sont ouvertes (fracturation hydraulique) et colmatées ("sealed").

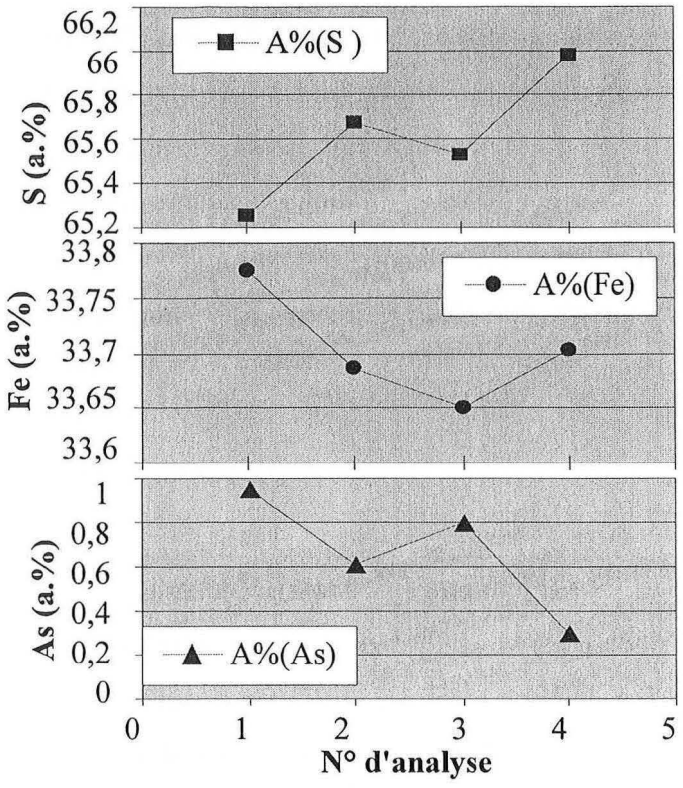
IV. 2. 2 - Place de la pyrite et de l'arsénopyrite

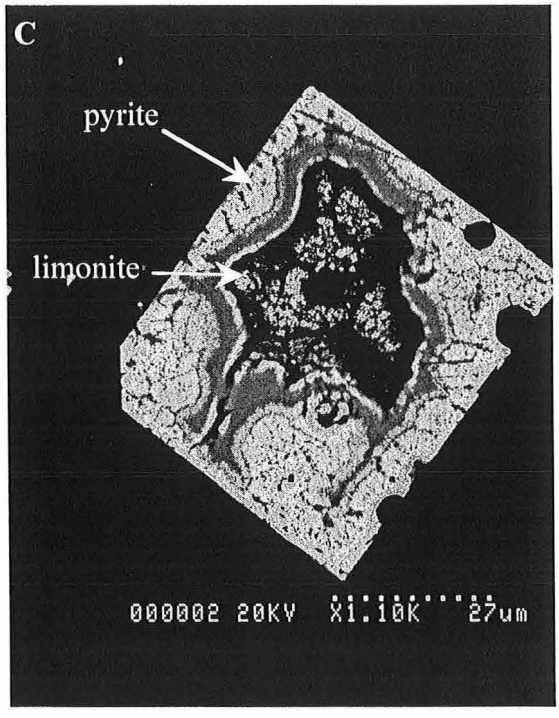
La pyrite est le plus souvent disséminée dans la matrice quartzeuse qui recristallise, sans liaison évidente avec les microfractures. Il semble néanmoins qu'on puisse considérer deux stades de minéralisation :

(i) un stade antérieur au raccourcissement N-S, correspondant au stade principal de minéralisation. En effet, on voit souvent les veinules du deuxième stade qui recoupent des amas disséminés de cubes de pyrite. Si l'on tient compte de l'abondance de la pyrite dans les stylolithes S1, on peut sans doute conclure que l'épisode pyriteux est pour l'essentiel précoce, plus ou moins contemporain du premier événement compressif.

(ii) cependant, l'existence de pyrite oblitérant des joints des familles 1 et 2, et les stylolithes S3 riches en pyrite, suggèrent qu'un deuxième épisode minéralisé, plus discret, accompagne le raccourcissement N-S.







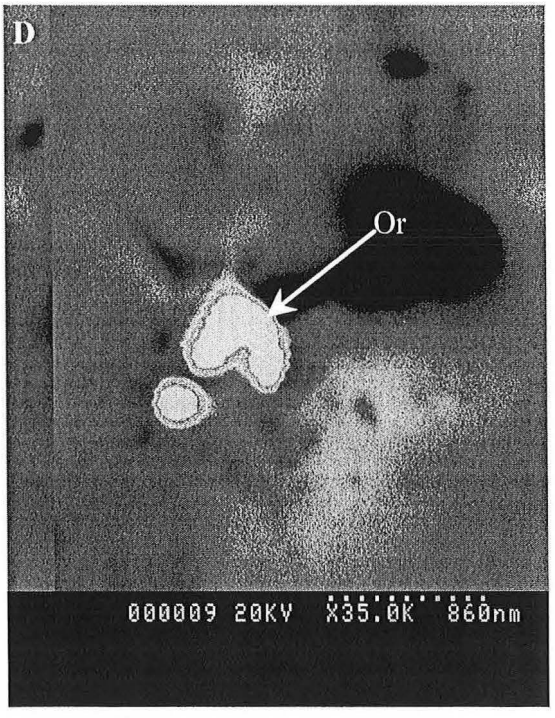


Fig. IV-41 - Détail de la zonation de la pyrite (A) correspondant à une variation de la composition chimique (B) ; l'oxydation de la pyrite en limonite (C) ; et une photographie MEB d'un grain d'or dans une pyrite oxydée.

L'arsénopyrite est généralement liée à la pyrite, mais semble un peu plus tardive. Cependant une liaison génétique est suggérée par le caractère arsenical de la pyrite : celle-ci est en effet généralement zonée (Fig. IV-41 : A, B) avec un cœur riche en As, dont la teneur atteint 1.8 w.%, soit 0.95 a.%. (Fig. IV-41 : B). La séquence pyrite riche en As- pyrite pauvre en As- arsénopyrite n'est pas sans rappeler le site 116 (cf. § B1. 3. 2)

La pyrite est généralement oxydée en limonite, avec des microcavités concrétionnées (Fig. IV-41C).

L'or n'a été observé qu'une fois, dans une pyrite oxydée, sous forme d'un grain infra micrométrique (Fig. IV-41 D).

IV. 3 - INFORMATIONS COMPLEMENTAIRES : STRUCTURES DANS L'ENCAISSANT PROCHE

L'échantillon SM17 (Fig. IV-32), constitué par une lentille de quartz dans des leptynites très feldspathiques, a montré une riche séquence d'événements, tant hydrothermaux que de nature tectonique. Des lames épaisses et polies ont été taillées dans le plan horizontal (orienté) et dans un plan N-S vertical, ce qui permet de reconstituer la succession suivante (Fig. IV-42) :

(i) Déformation plastique de la lentille de quartz (Q_0), affectée d'une schistosité pénétrative (S_1) N50°E 10°S ; les feldspaths de la leptynite sont également déformés avec une torsion de leurs macles. S_1 est plate (N50°E 10°S) et la direction de raccourcissement correspondante est donc proche de la verticale (tectonique distensive).

(ii) Un jeu pénétratif de PIF précoces (avec des inclusions fluides minuscules) recoupe S_1 dans le quartz ; il semble qu'on puisse attribuer une orientation moyenne à N115°E 45°S à cette famille, qui rappelle donc la famille de PIF "plats" post Q3 repérée dans l'échantillon SM13 de la structure du Grand Fraud.

(iii) Un ensemble de structures peu à très peu pentées (peu visible en section horizontale) recoupe nettement ces PIF, mais paraît antérieur aux autres manifestations.

Il s'agit de plans d'abord cataclastiques (dans la leptynite et le quartz Q_0), puis recirculés, "blanchis", dans le quartz Q_0, avec piégeage d'inclusions fluides décrépitées. Leurs orientations sont estimées autour de N50°E 20-30°E et N50°E 30-45°W. On peut envisager d'interpréter ces structures comme des cisaillements conjugués ("faille inverse" : notamment en section verticale le décalage du contact Q_0- leptynite par un de ces plans), en raccourcissement proche de N140°E.

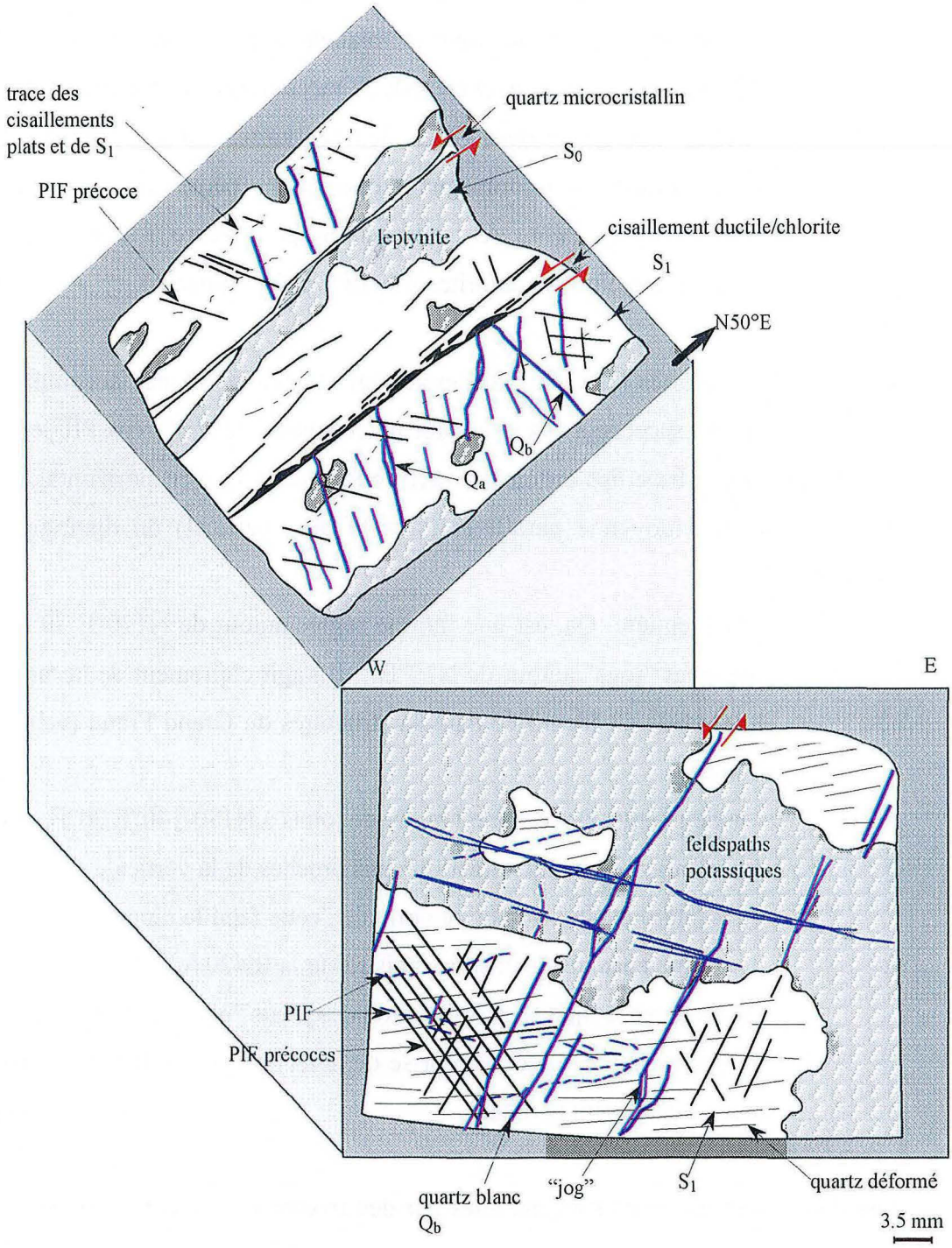


Fig. IV-42 - Reconstitution en 3D des différentes structures de l'échantillon SM17

Ces structures présentent encore deux particularités :

- elles sont affectées par une stylolithisation (dont il n'est pas clair, dans Q_0, qu'elle précède ou suive le "blanchiment" du quartz) ; il y a donc, ultérieurement, un nouvel épisode de raccourcissement vertical ;
- elles ont recirculées, dans les leptynites, et ont provoqué une chloritisation qui accompagne la dissolution (petites poches à gerbes de chlorite) (Fig. IV-43 A) ; elle semble postérieure à la stylolitisation, mais, néanmoins, les chlorites sont déformées (kinkées).

(iv) Des veinules ouvertes ("sealed") à remplissage de quartz "blanc" accompagné de minéraux opaques succèdent aux structures précédentes ; de nombreux PIF leurs sont parallèles. Sur la base des critères d'intersection (dans le plan horizontal, car les veinules sont en moyenne parallèles dans le plan vertical) on distingue deux générations ;

- la première, Qa, est une famille réglée autour de N170°E 70°E, avec quelques "jogs" autour de N10°E ; il s'agit clairement de la famille de joints C3- T3 identifiée dans la structures du Grand Fraud (échantillon SM15).
- la deuxième, Qb, est une famille de joints à N130-140°E 70°E, associée à des "jogs" de même direction mais proches de la verticale (Fig. IV-42), qui s'interprète donc en faille normale ; cette famille rappelle fortement le deuxième épisode distensif enregistré sur la RN20 (cf. §A. 3. 4).

On peut penser que la stylolitisation des joints "plats" de l'épisode (iii) est une conséquence de cette reprise de la tectonique en distension avec un raccourcissement vertical.

(v) Les derniers événements sont marqués par des fractures et des circulations fluides dans la direction N60°E :

- il y a d'abord un couloir chloriteux repris en cisaillement sénestre (?) encore ductile ; il s'agit vraisemblablement de l'épisode de chloritisation noté en (iii) ;
- vient enfin une veinule de quartz microcristallin, ayant apparemment valeur de fente de tension pour des cisaillements à N15°E qui seraient donc dextre (Fig. IV-43 B)

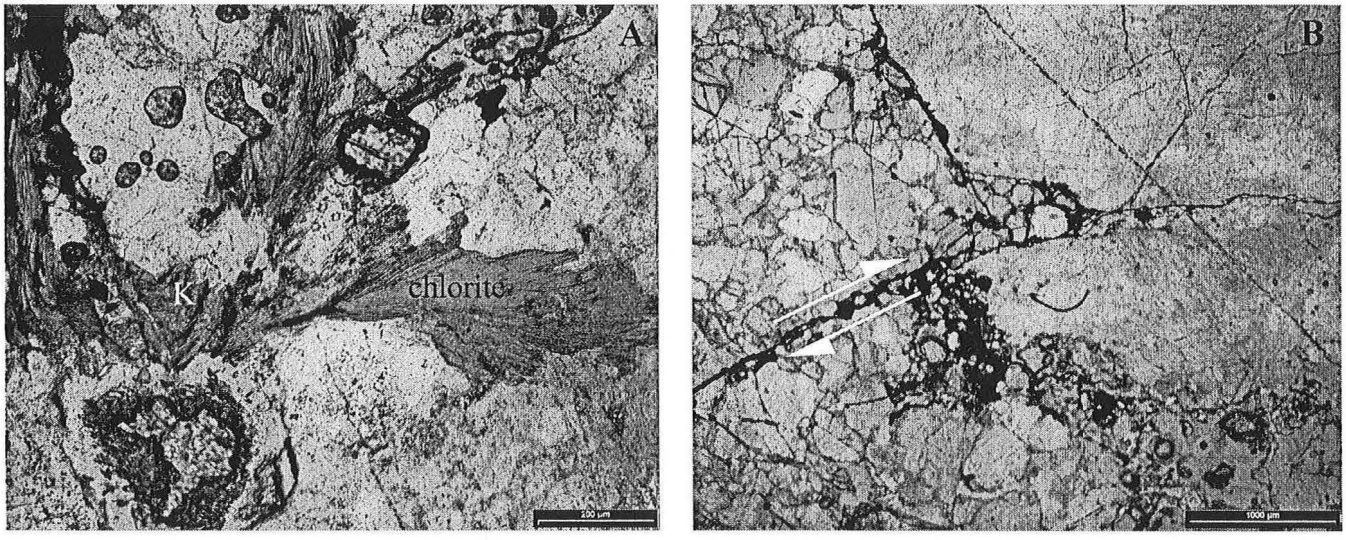


Fig. IV-43 - Détail dans l'échantillon SM17 (plan vertical) au microscope optique:

A. Gerbes de chlorite, noter les kinkées (k)
B. Exemple de cisaillement cataclastique plat dans la leptynite

IV. 4 - CONCLUSION

L'ensemble des observations précédentes s'ordonnent de façon cohérente selon une suite d'événements où alternent des épisodes d'extension et des épisodes de compression (raccourcissement) (Fig. IV-44) :

(i) un premier épisode d'extension à N50-70°E est responsable de la faille normale qui héberge le filon de quartz du Grand Fraud. Le filon de quartz se forme lui-même en conditions fragiles (fracturation hydraulique), mais certaines indications (déformation plastique précoce dans SM17, déformation plastique du quartz de SM15) suggèrent que le contexte est encore ductile.

(ii) Un premier épisode en raccourcissement, le mieux exprimé à l'échelle microscopique, se caractérise par des directions de raccourcissement alternativement selon N140-150°E et N50-60°E, et se traduit par des micro-décrochements (N120-130°E dextre ou N20-30°E dextre), ou par des micro- failles inverses à environ N50°E, et surtout par des réseaux de veinules en tension. Au premier épisode sont associées des minéralisations diffuses en pyrite puis arsénopyrite, très localisées.

(iii) Un deuxième épisode en raccourcissement, beaucoup plus discret, se caractérise par une direction de raccourcissement proche de N10°E, alternant avec N100-110°E ; il se manifeste essentiellement par des réseaux de veinules en extension, avec une minéralisation sulfurée discrète (sulfures polymétalliques probables).

(iv) Vient ensuite un deuxième épisode en extension, dans une direction proche de N40°E (micro-failles normales à N130°E), très peu exprimé.

(v) Un troisième épisode en raccourcissement termine la séquence, avec une direction de raccourcissement proche de N60°E ;il est également très peu exprimé, mais semble contemporain d'un épisode de chloritisation.

On constate, pour chaque épisode, une grande versatilité des directions principales de la déformation, qui paraissent permuter avec facilité : échange des directions X et Z, si caractéristiques des épisodes (ii) et (iii) ; échange des directions X et Y (décrochement, failles inverses) au cours de l'épisode (ii).

régime	manifestations	G. Fraud	SM17
Extension (N50-70°E)	Déformation ductile		+
	Faille normale (N140-160°E)	+	
Raccourcissement (N140-160°E et N50-60°E)	Décrochement dextre (N120-130°E)	+	
	Failles inverses (N50°E)		+
Raccourcissement (N10°E / N100-110°E)	Décrochement dextre (N150°E)	+	+
Extension (N40°E)	Failles normales (N130°)		+
Raccourcissement (N60°E)			+

Fig. IV-44 - Régimes de déformation et leur manifestation dans le secteur du Grand Fraud

V- CONCLUSION

V. 1 - SYNTHESE DES DONNEES MICROSTRUCTURALES

Certains événements, qui se corrèlent de site en site, permettent d'ébaucher une succession synthétique des régimes de déformation dans l'emprise de la faille d'Argentat.
Parmi ces événements :

- les failles normales à la limite ductile -fragile selon N140-150°E, connues au Nord et au Sud ;

- les failles normales E-W, observées au Nord et au centre ;

- les épisodes hydrothermaux à quartz -sulfures polymétalliques en raccourcissement N10-100°E, ubiquistes.

Le résultat (Fig. IV-45) montre une alternance de régimes d'extension et de compression sur toute la longueur observée de la faille d'Argentat.

V. 2 - DISCUSSION

V. 2. 1 - Validité de la synthèse

La reconstitution de la figure IV-45 repose sur l'hypothèse implicite que les microstructures observées correspondent à des champs de déformation d'extension régionale ; cette hypothèse semble réaliste au vu :

(i) de l'existence même des événements similaires qui fondent les corrélations effectuées ;

(ii) du fait que l'ordre d'apparition de ces événements reste le même de site en site, même quand il existe des lacunes d'enregistrement de certains événements intermédiaires.

Il est intéressant de noter que les observations isolées comme celles du Puy -du -Tour ou du Tindex trouvent normalement leur place dans ce schéma.

Ainsi :

- les réseaux à N135°E de la "Déchetterie" peuvent correspondre aux premiers épisodes de raccourcissement, tandis que les veines à N70-N110°E qui les recoupent sont cohérentes avec le deuxième épisode (raccourcissement N100°E et Décrochement N70°E associé) ;

- de même, sont également cohérentes avec ce deuxième épisode les réseaux N10° et N95-100°E de l'Oppidum ;

- les fentes à N80°E du Tindex peuvent s'interpréter comme des joints de tension pour les failles E-W.

Si cette hypothèse peut donc être admise, il reste que la reconstitution (Fig. IV-45) ne représente qu'imparfaitement la réalité, dans la mesure où elle ne s'appuie que sur un "corpus" réduit de points d'observation.

V. 2. 2 - Signification

La figure IV-45 intègre deux niveaux de réalité :

(i) d'une part, une succession de régimes de déformation exprimés du niveau microscopique au niveau mégascopique :

- au premier régime en extension correspond d'abord la grande faille normale ductile d'Argentat, imagée par les profils sismiques ;

- au premier régime en raccourcissement correspond le grand rejeu décrochant dextre de cette structure (Roig, 1997), induit par un raccourcissement autour de N50-60°E (cf. l'antiforme du Maupas).

On peut cependant observer qu'il existe un contraste avec l'expression micro- à méso-scopique de cet événement, où dominent les structures conditionnées par un raccourcissement à N140°E ;

- le deuxième régime en extension se marque par des couloirs de failles normales E-W ;

- le deuxième régime en raccourcissement se marque notamment par des plis cartographiques, qui affectent en particulier la grande faille normale plate.

(ii) d'autre part, lors des épisodes en raccourcissement, une grande versatilité des ellipsoïdes de déformation, marquée par des permutations fréquentes et aléatoires des trois directions principales.

Ce phénomène s'exprime à toutes les échelles (plis N-S et E-W dans la région d'Argentat), mais il caractérise surtout le niveau microscopique. Ce fait peut être mis en relation avec la nature des marqueurs de la déformation à cette échelle, qui sont essentiellement des fractures hydrothermales, et sont donc liées à la circulation plus ou moins pervasive de fluides dans le massif soumis à la déformation. On sait en effet qu'en présence de fluides la symétrie de l'ellipsoïde des contraintes se rapproche de celle d'une sphère.

V. 2. 3 - Relation des minéralisations avec la déformation

Comme le montre la figure IV-45, les circulations hydrothermales s'accompagnent de minéralisation dans tout l'intervalle de temps qui recouvre les deux épisodes en raccourcissement. Trois faits ressortent plus particulièrement :

(i) la minéralisation est très diffuse, très hétérogène et sporadique ;

(ii) elle ne montre pas de préférence pour un événement ou une direction particulière, mais, de façon surprenante, elle est surtout liée aux circulations dans des drains liés à la compression ; même si la distension N-S (et elle seule) se marque aussi par des manifestations importantes ; et *surtout*, si aucune minéralisation significative ne s'observe avant elle *là où elle est présente* ;

(iii) une évolution d'ensemble se dessine, avec une tendance pour l'arsénopyrite et la pyrite (souvent arsenicale) à être précoce et pour les sulfures polymétalliques à être tardifs.

L'or n'a pas été observé au cours de ce travail, et par conséquent, sa place dans ce schéma évolutif reste à préciser. Néanmoins, par référence au district de St -Yrieix, on peut penser qu'il accompagne la dernière minéralisation polymétallique (Fig. IV-45).

V. 2. 4 - Age de ces événements

Aucun élément de datation directe n'a été obtenu au cours de ce travail. Néanmoins, plusieurs données permettent de cerner un peu les ages :

(i) *comme à St -Yrieix, toutes les déformations observées sont plus jeunes que 340 Ma, âge $^{39}Ar/^{40}Ar$ de la plupart des micas blancs régionaux, qui correspond en plus, à l'âge de la faille normale ductile et qui est même plus jeune que 315 Ma (Roig et al., 1997 ; Roig, 1997) ;*

(ii) *le bassin stéphanien d'Argentat s'est développé concurrent avec la formation de la gouttière syn-forme d'axe N-S qui l'héberge (Genna et al., 1998) ; celle-ci étant liée à un épisode du deuxième régime de raccourcissement, celui-ci est donc un plus jeune d'âge stéphanien ;*

(iii) *des galets de leptynites aurifères et antimoinifères ont été trouvés dans les conglomérats de base de ce bassin (Bouchot et al., 1999), ce qui va dans le sens d'une liaison entre l'or et les sulfures polymétalliques comme suggéré ci-dessus.*

V. 2. 5 - Contraste N-S

Un certain nombre de caractères opposent plus ou moins nettement le Nord et le Sud du secteur étudié :

(i) *les déformations ont gardé un caractère ductile plus longtemps dans le Nord que dans le Sud ;*

(ii) *l'extension N-S (failles normales E-W) n'est vraiment marquée que dans le Nord, où elle prend un grand développement (couloirs du Maupas et de la RN20) ;*

(iii) *le Sud est nettement plus retravaillé par le premier épisode de raccourcissement (surtout à N140°E et plus accessoirement à N50°E), tandis que, dans le Nord, c'est le deuxième épisode (à N10° et surtout à N100°E) qui est le plus marqué ;*

(iv) *et, corrélativement, il semble que l'expression des sulfures polymétalliques soit plus fort dans le Nord (même si elle y reste très limitée) que le Sud (où ils semblent encore plus rares).*

V. 3 - CONCLUSION : COMPARAISON AVEC LE SECTEUR DE ST- YRIEIX

V. 3. 1 - Différences de l'intensité des circulation hydrothermales

Malgré les ressemblances certaines au niveau microscopique, essentiellement la remarquable concordance des directions des principaux groupes de microfractures à valeur de train dans les deux cas, les domaines d'Argentat et de St -Yrieix présentent de grandes différences :

(i) *la plus évidente réside dans la nature du contrôle structural majeur : une faille normale à N160°E peu silicifiée pour Argentat, un ensemble de chevauchements à N50-60°E (Nicaud et Floc'h, 2000) assez plats et fortement silicifiés à St -Yrieix (même si la mise en évidence par la sismique de l'existence d'une faille normale qui les recoupe à Lauriéras vient atténuer ce constat) ;*

(ii) *la déformation à l'échelle méso- à micro- scopique, créatrice des drains hydrothermaux, est à la fois plus hétérogène et moins pénétrative dans le domaine d'Argentat que dans le secteur de St -Yrieix ;*

(iii) *même dans les structures majeures de drainage (accidents mégascopiques), la minéralisation est dans l'ensemble beaucoup plus diffuse et irrégulièrement répartie dans le domaine d'Argentat ;*

(iv) *le stade sulfuré polymétallique (qui accompagne l'or à St -Yrieix) est très peu et mal exprimé dans le domaine d'Argentat.*

Au total, il semble que l'emprise de la faille d'Argentat ait été beaucoup moins efficace en terme de drainage des flux hydrothermaux que le système des "shear zones" du domaine de St -Yrieix.

V. 3. 2 - Interconnection des deux systèmes

Les failles normales E-W, et les joints en extension associés, représentent le lien potentiel le plus évident, en terme de circulations fluides, entre les systèmes de St-Yrieix et d'Argentat ; et ce d'autant plus que, dans le domaine de St-Yrieix, les épisodes minéralisateurs sont

précisément associés à des circulations fluides dans les drains E-W associés à de la distension (Essarraj, 1992).

De ce point de vue, trois faits semblent significatifs dans le domaine de la faille d'Argentat :

(i) *l'importance apparemment croissante du développement des couloirs de faille E-W quand on va vers le Nord, c'est à dire que l'on se déplace vers l'axe de l'antiforme de Meuzac, le long duquel se propage l'anomalie régionale en arsenic qui témoigne de la connection entre les deux systèmes (Roig et al., 1997). C'est une lacune du présent travail que de ne pas avoir poussé les investigations au Nord du secteur Gimel / Maupas, pour savoir si cette tendance se vérifie.*

(ii) *la relation qui semble exister, en un point donné, entre le développement des failles E-W et le début des circulations hydrothermales minéralisantes, avec des manifestations arseniées (arsénopyrite, pyrite arseniée). Si cette relation a bien le caractère général que nos observations semblent lui attribuer, cela signifie de plus que la connection St-Yrieix / Argentat n'est réalisée qu'à ce stade, c'est à dire que l'arsénopyrite de la faille d'Argentat se corrèle avec l'arsénopyrite II de St-Yrieix et non avec l'arsénopyrite I associée aux fluides les plus précoces (Essarraj, 1992 ; Essarraj et al., 2001).*

(iii) *les couloirs E-W, ou les microfractures associées, semblent absentes de la zone de la faille d'Argentat proprement dite (le couloir N160°E qui a fonctionné d'abord en faille normale "raide" puis décrochement). De sorte que si une connection s'est réalisée entre les deux domaines de St-Yrieix et d'Argentat, il est moins évident qu'elle se soit faite directement avec le drain spécifique que pouvait représenter la faille d'Argentat. Ici encore des observations complémentaires seraient nécessaires pour donner à cette donnée une valeur vraiment générale.*

Dans l'ensemble, les observations microstructurales effectuées au cours de notre étude ne vont pas dans le sens d'une focalisation d'importants flux hydrothermaux le long de la faille d'Argentat, d'où ils auraient diffusés dans le "réservoir" constitué par l'Unité des Gneiss inférieurs le long de l'antiforme de Meuzac, comme envisagé jusqu'ici (Bouchot *et al.*, 1997 ; Roig *et al.*, 1997). **Les données que nous avons rassemblées et interprétées vont plutôt dans le sens d'une liaison en sens inverse, depuis les zones minéralisées de St-Yrieix, vers le domaine de la faille d'Argentat.**

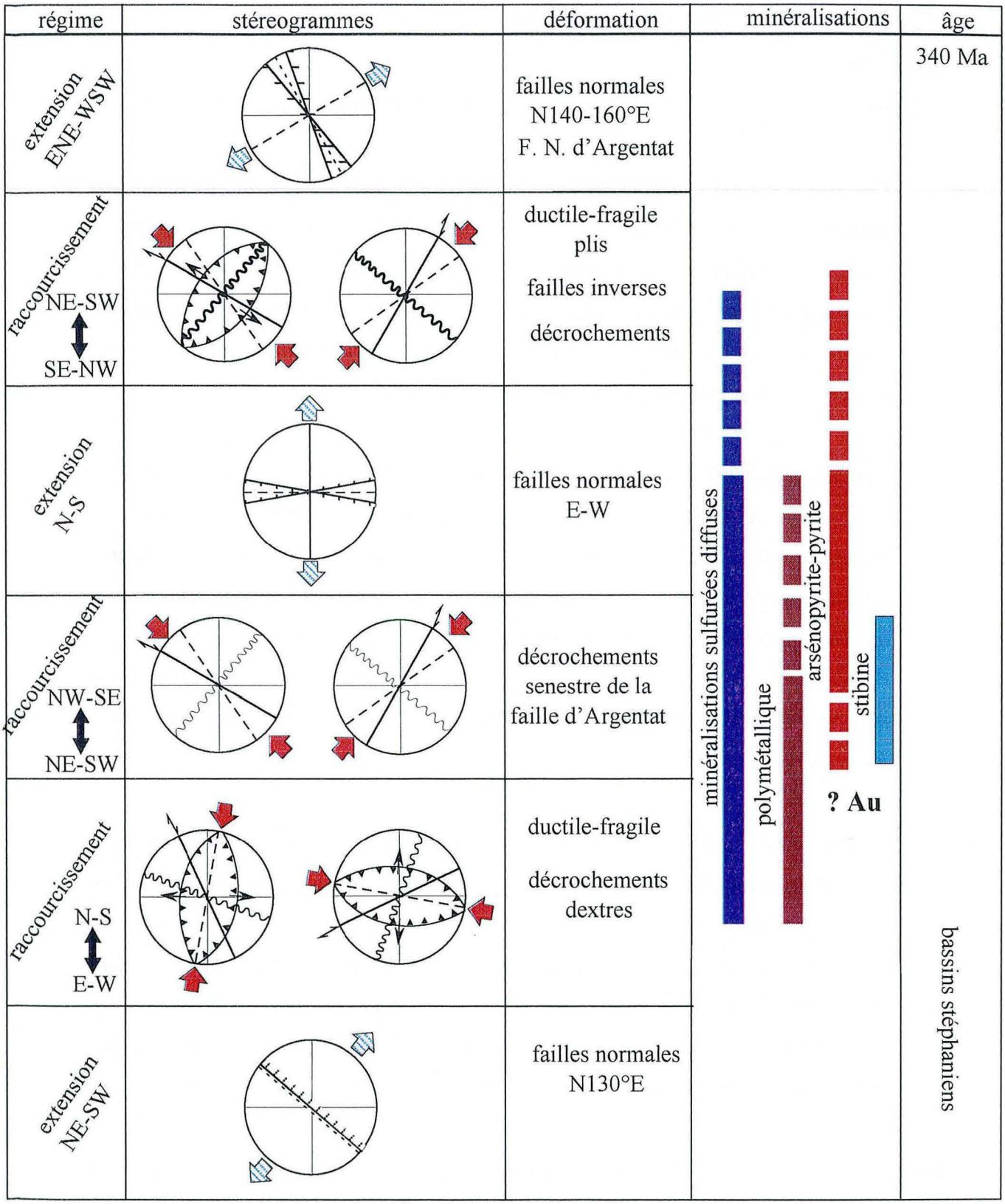


Fig. I-45 - Évolution temporelle des régimes de déformation dans l'emprise de la faille d'Argentat

failles normales

joints de tensions

décrochement avec le sens

chevauchements/failles inverses

stylolites

CHAPITRE V

ETUDE DES FLUIDES DANS LE DOMAINE D'ARGENTAT

INTRODUCTION

De façon générale, les inclusions fluides étudiables se sont révélées relativement peu nombreuses dans tout le domaine étudié. Dans ce qui suit, leur étude suivra le même plan que pour l'étude structurale, en commençant par le secteur Nord.

I- ETUDE MICROTHERMOMETRIQUE

Pour chaque secteur seront successivement présentés, pour chaque site et échantillon, la répartition et la typologie des inclusions fluides, puis les résultats de microthermométrie.

I. 1- SECTEUR NORD

I. 1. 1- Gimel -Cascade

Dans le secteur de Gimel, les remplissage quartzeux de la faille d'Argentat n'ont pas livré d'inclusions fluides étudiables. Les seules inclusions observables se trouvent dans l'encaissant granitique (SM54) (cf. Chap IV § A-1).

L'échantillon SM54 est un granite de Millevaches typique, avec cependant des figures de déformation et d'altération : fractures affectant les feldspaths, imprégnés de séricite ; grandes muscovites kinkées, recristallisant en phengite microcristalline sur leur bordure ; quartz cataclastique microcristallin, très limpide.

I. 1. 1. 1- La typologie des inclusions fluides

Dans l'échantillon SM54, les inclusions fluides se trouvent dans :

(i) les quartz globuleux (magmatiques), où elles se présentent de façon isolée ; se sont des inclusions biphasées aquo-carboniques, de deux types :

Vw-c : ce groupe est constitué par des inclusions aquo-carboniques biphasées homogénéisant en phase vapeur, elles sont de petite taille (6-12 μm), avec un fort remplissage (>50%), elles sont isolées dans la même plage que les inclusions Lw-c_1.

Lw-c_1 : inclusions aquo-carboniques biphasées homogénéisant en phase liquide ; elles sont de taille variable (6-12 μm), leur remplissage gazeux est de l'ordre de 20 à 40% ;

certaines de ces inclusions contiennent un cube de sel et un solide (un carbonate, peut être l'aragonite, avec une raie Raman à 1083 cm^{-1}).

(ii) les plages microcristallines, où elles se présentent sous forme de PIF selon de nombreuses directions (Fig. V-1), où se distinguent statistiquement :

- une direction N140°E caractérisée par des inclusions carboniques (**Lc**), ou plus rarement des triphasées aquo-carboniques (**Lc-w_1**), dans des PIF différents. Les Lc, arrondies et de petite taille (≤10 µm), ont un fort remplissage gazeux (≥ 50 %) ; les inclusions Lc-w_1 montrent également un fort remplissage volatil ;
- une direction N75°E, où se trouvent des inclusions triphasées aquo-carboniques (**Lc-w_2**) et des inclusions aquo-carboniques biphasées (**Lw-c_2**), coexistant dans les mêmes PIF, de taille variable (6-15 µm), de forme généralement sphérique, avec un remplissage gazeux très variable (20-60 %) ;
- une direction N-S très subordonnée, avec des inclusions aqueuses biphasées (**Lw**) ; il s'agit d'inclusions allongées, avec une taille moyenne de 15 µm, et un faible remplissage gazeux (<10%).

Les inclusions aqueuses sont tardives, mais la chronologie relative des inclusions aquo-carboniques n'a pu être établie.

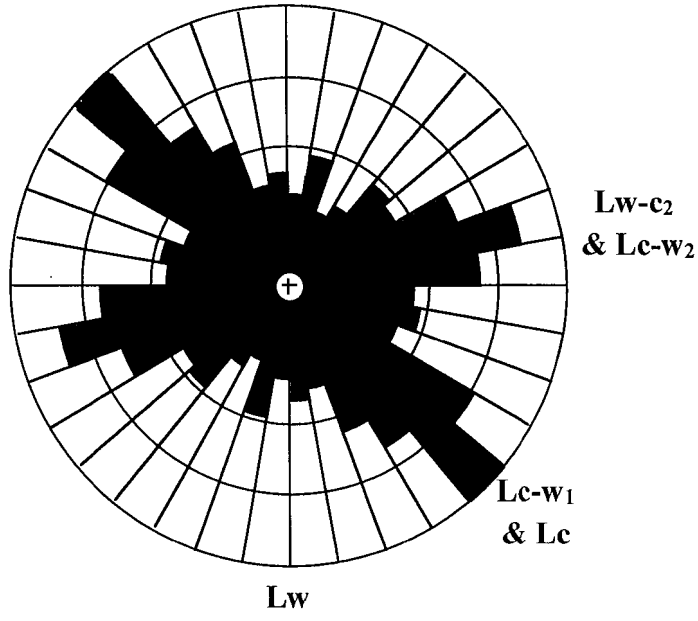


Fig. V-1 - Rosace des fréquences de la direction des plan d'inclusion fluide (208 mesures) dans le granite de Millevaches (SM54)

I. 1. 1. 2- Les inclusions aquo-carboniques

I. 1. 1. 2. 1- microthermométrie

Quelle que soit leur nature, les inclusions carboniques et aquo-carboniques présentent des températures de fusion de CO_2 très voisines avec un mode autour de -57.2°C (Fig. V-2A).
Les températures de fusion des clathrates sont un peu plus dispersées que les $TfCO_2$; elles varient, en effet entre 4 et 9.4°C (Fig. V-2B), les valeurs les plus élevées (9-9.5°C) correspondent aux inclusions Vw-c et Lw-c_1 ; les autres dessinent un mode autour de 6°C.
Toutes les homogénéisations de la phase volatile ($ThCO_2$) se font en phase liquide, dans une gamme étroite, comprise entre 21 et 26.6°C (Fig. V-2C).
Les températures de fusion de la glace mesurées dans ces inclusions sont très variables (Fig. V-2D) ; elles sont très élevées dans les inclusions de type Lc-w_1 (-1.8/-2), plus basses dans les inclusions Lc-w_2 et Lw-c_2 (autour de -10°C), alors qu'elles sont intermédiaires dans les inclusions Vw-c (-3/-5°C) et Lw-c_1(-4/-7°C).
Excepté les inclusions de type Lc-w_1 , où les Th n'ont pas pu être mesurées, vu la petitesse de leur taille et leur fort remplissage gazeux, les autres inclusions donnent des Th très dispersées (Fig. V-3), qui atteignent jusqu'à 450°C. Les vapeurs (Vw-c) et les liquides Lw-c_1 ont, généralement, des Th élevées (380-430°C) et assez comparables (Fig. V-3), quant aux inclusions Lc-w_2 et Lw-c_2, les Th sont très variable ; elles vont de 185° jusqu'à 450°C, avec les températures les plus fréquentes autour de 200°C, et un petit groupe à haute température (380-450°C).

I. 1. 1. 2. 2- Les données Raman

La microspectrométrie Raman (tableau 1), a révélé dans ces inclusions une forte teneur de CO_2 (> 92 mole %), et une teneur en N_2 plus élevée qu'en CH_4. Quelques inclusions de type Lc-w_2 contiennent des traces de H_2S (≤0.2 mole %). Les compositions sont très constantes en accord avec les données de $TfCO_2$ (Fig. V-2A).

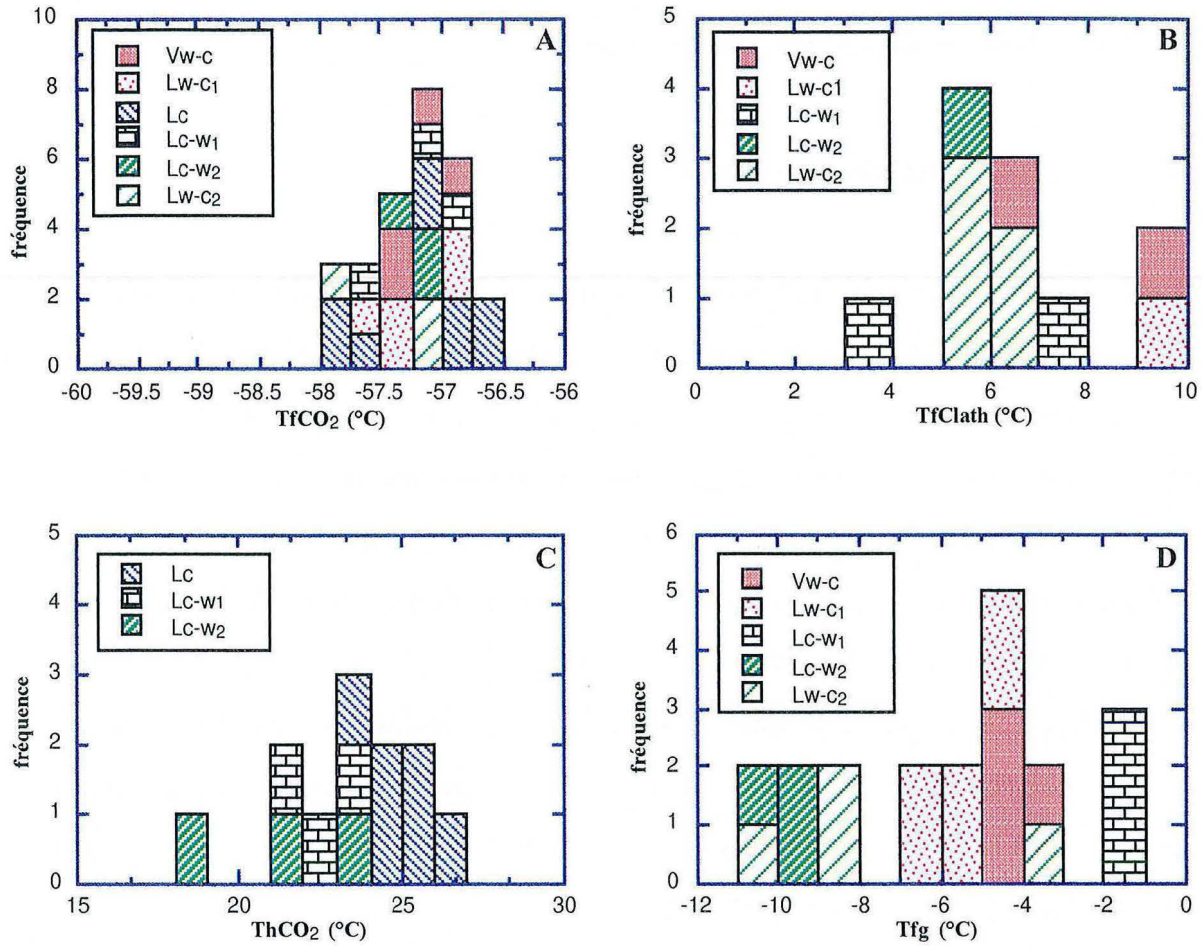


Fig. V-2 - Diagrammes de fréquence de $TfCO_2$ (A), TfClath (B), $ThCO_2$ (C) et de Tfg (D) dans les différents types d'inclusions aquo-carboniques de l'échantillon SM54.

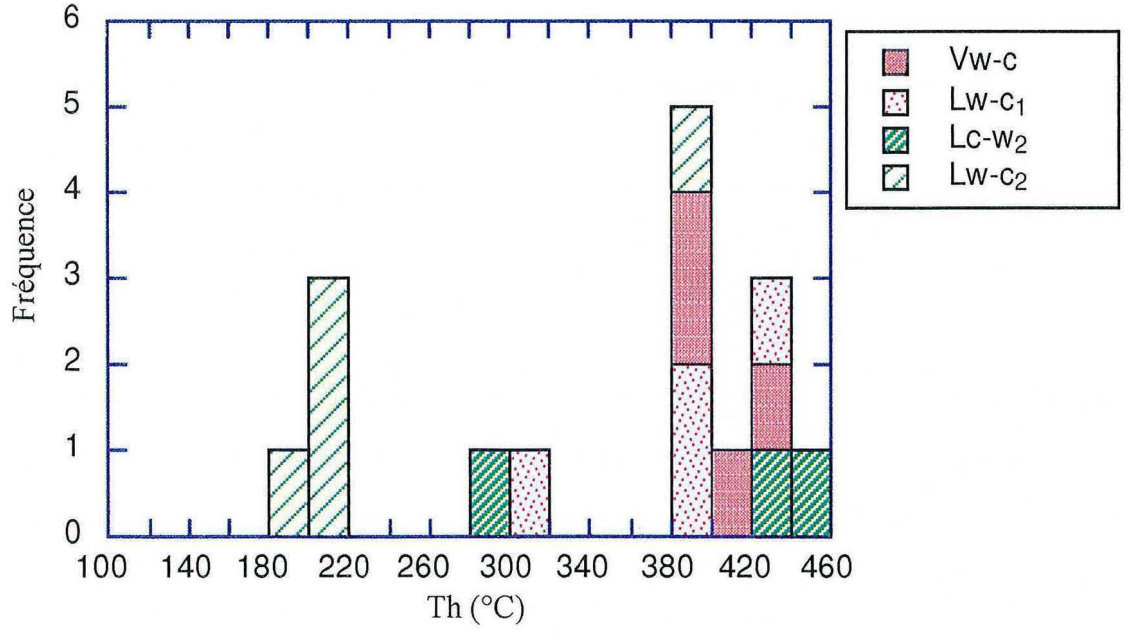


Fig. V-3 - Histogramme de fréquence des température d'homogénéisation totale dans les inclusions aquo-carboniques de l'échantillon SM54.

Typologie	N° I. F	CO_2 (mole %)	CH_4 (mole %)	N_2 (mole %)	H_2S (mole %)
Lc	2	94.7	1.8	3.5	
	3	94.3	2	3.7	
	4	93.7	2.4	3.9	
	5	94.9	1.8	3.3	
	6	93.4	2.3	4.3	
	7	94.8	1.9	3.3	
	8	96.3	1.7	2	<0.1
	9	95.1	1.9	2.8	0.2
	10	95	2	3	
$Lc\text{-}w_1$	13	92.6	2.6	4.8	
	14	93.5	2.5	4.1	
	15	96	2	2	
Vw-c	1	95.4	2	2.6	
	3	92.9	2.9	4.2	
	10	98.7	1.1	0.2	
$Lw\text{-}c_1$	7	95	1.4	3.6	

Tableau 1 - Composition de la phase volatile des inclusions carboniques et aquo-carboniques du granite SM54.

I. 1. 1. 3- Les inclusions aqueuses

I. 1. 1. 3. 1- Les températures de fusion de la glace

Les premières températures de fusion ont été mesurées dans ces inclusions à -52/-53°C, compatibles avec le système ternaire H_2O-NaCl-$CaCl_2$, d'autant plus que des températures de fusion de l'hydrohalite ont également été mesurées entre -25 et -32°C. Les mesures sont donc interprétées avec le diagramme de Vanko *et al.* (1988). Les températures de fusion de la glace dans les inclusions Lw montrent une répartition bimodale (Fig. V-6A), avec un groupe à basses températures (-11/-14.4°), avec des salinités de l'ordre de 18 % poids éq. NaCl et un rapport Na/Ca variable (moyenne autour de 1.5), et un groupe correspondant à des températures moyennes, comprises entre -3 et -7°C, avec des températures de fusions de l'hydrohalite entre -28 et -25°C, correspondant à des salinités d'environ 8 à 12 % % poids éq. NaCl, avec un rapport Na/Ca de l'ordre de 1.9 (Fig. V-4).

I. 1. 1. 3. 2- Les températures d'homogénéisation

Les températures d'homogénéisation dans les inclusions fluides aqueuses contrastent fortement avec les Th des inclusions aquo-carboniques ; en effet dans les inclusions aqueuses les Th sont très basses (Fig. V-5B), elles varient de manière générale entre 136° et 220°C, avec un mode principal autour de 150°C (Fig. V-5B), suivi par un petit groupe de Th autour de 200°C, qui rappelle le groupe de basse température dans les inclusions aquo-carboniques Lw-c_2 (Fig. V-3).

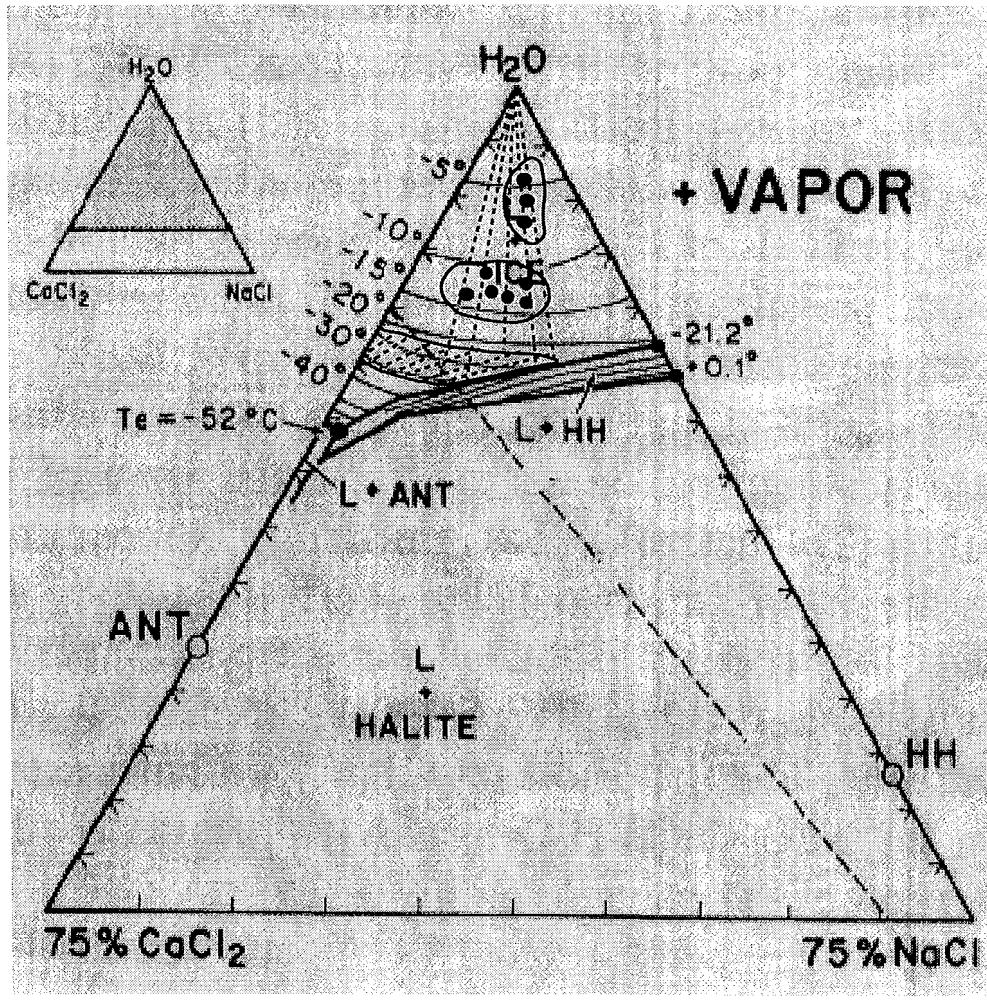


Fig. V-4 - Projection des données de microthermométrie des inclusions Lw de l'échantillon SM54, dans le diagramme ternaire NaCl-$CaCl_2$-H_2O (Vanko et al., *1988)*

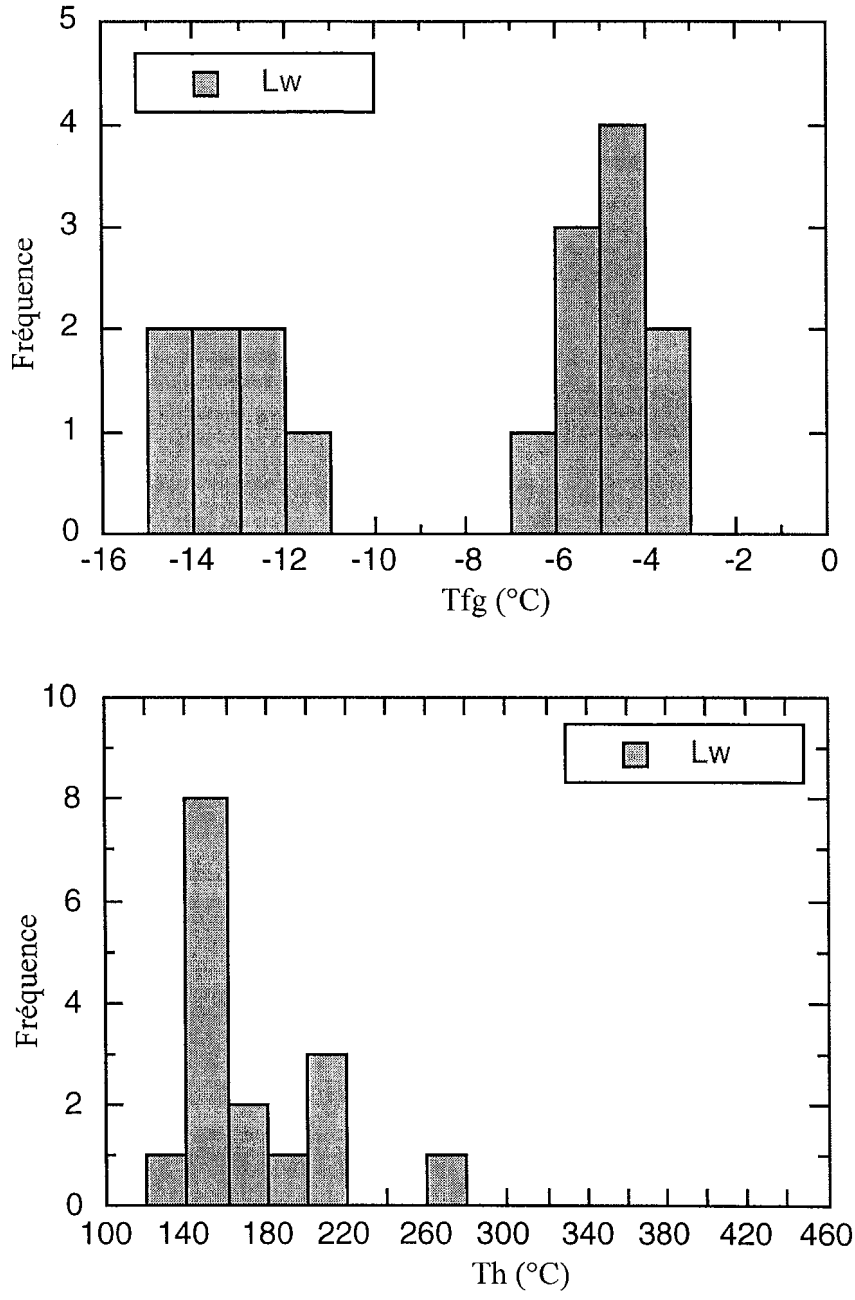


Fig. V-5 - Histogrammes de fréquence des Tfg (A) et des Th correspondantes (B) dans les inclusions aqueuses de l'échantillon SM54

I. 1. 2- Puy-des-Angles et le Maupas

Au Maupas, les seules inclusions fluides étudiables ont été trouvées dans un quartz très précoce, engagé dans la tectonique distensive ductile (Fig. V-6). A Puy-des-Angles, c'est dans le seul échantillon SM10 que la taille des inclusions fluides a permis une étude microthermométrique (cf. fig. IV-4).

I. 1. 2. 1- La typologie des inclusions fluides

Deux types d'inclusions fluides ont été observés :

(i) des inclusions fluides de type **Lw-c,** rencontrées dans les veinules tardive Q_4 de l'échantillon SM10 (cf. fig. IV-4), où elles semblent primaires ; elles sont toujours biphasées, avec une taille moyenne entre 10 et 15 µm et un fort remplissage volatil qui dépasse les 40 % ; mais elles montrent la fusion de CO_2 et des clathrates.

(ii) des inclusions fluides de type **Lw** ; il s'agit d'inclusions fluides biphasées purement aqueuses (test Raman). Elles sont caractérisées par une petite taille (<10 µm) et par un faible remplissage gazeux, de l'ordre de 10-20 %. A Puy-des-Angles, ces inclusions ont été mesurées dans le quartz sombre Q_2, où elles sont secondaires, mais semblent anté-Q_3. Au Maupas, ces inclusions sont dans des PIF tardifs qui recoupent le quartz déformé (mylonitisation correspondant à un cisaillement NE-SW à composante dextre).

I. 1. 2. 2- Les inclusions aquo-carboniques

Quelques inclusions de type Lw-c ont mesurées dans le quartz de Puy-des-Angles ; elles indiquent des températures de fusion de CO_2 entre -57°C et -58.7°C, avec des températures de fusion des clathrates relativement constantes (10-10.5°C) (tableau1). De même pour la température de fusion de la glace qui oscille entre -1.9 et -2.3°C (Fig. V-7). L'analyse Raman (tableau 2) indique la présence systématique de CH_4 et N_2 à côté de CO_2, dominant.

L'ensemble de ces inclusions homogénéisent en phase liquide dans une gamme de température très restreinte (Fig. V-8), comprises entre 215° et 238°C (tableau 2).

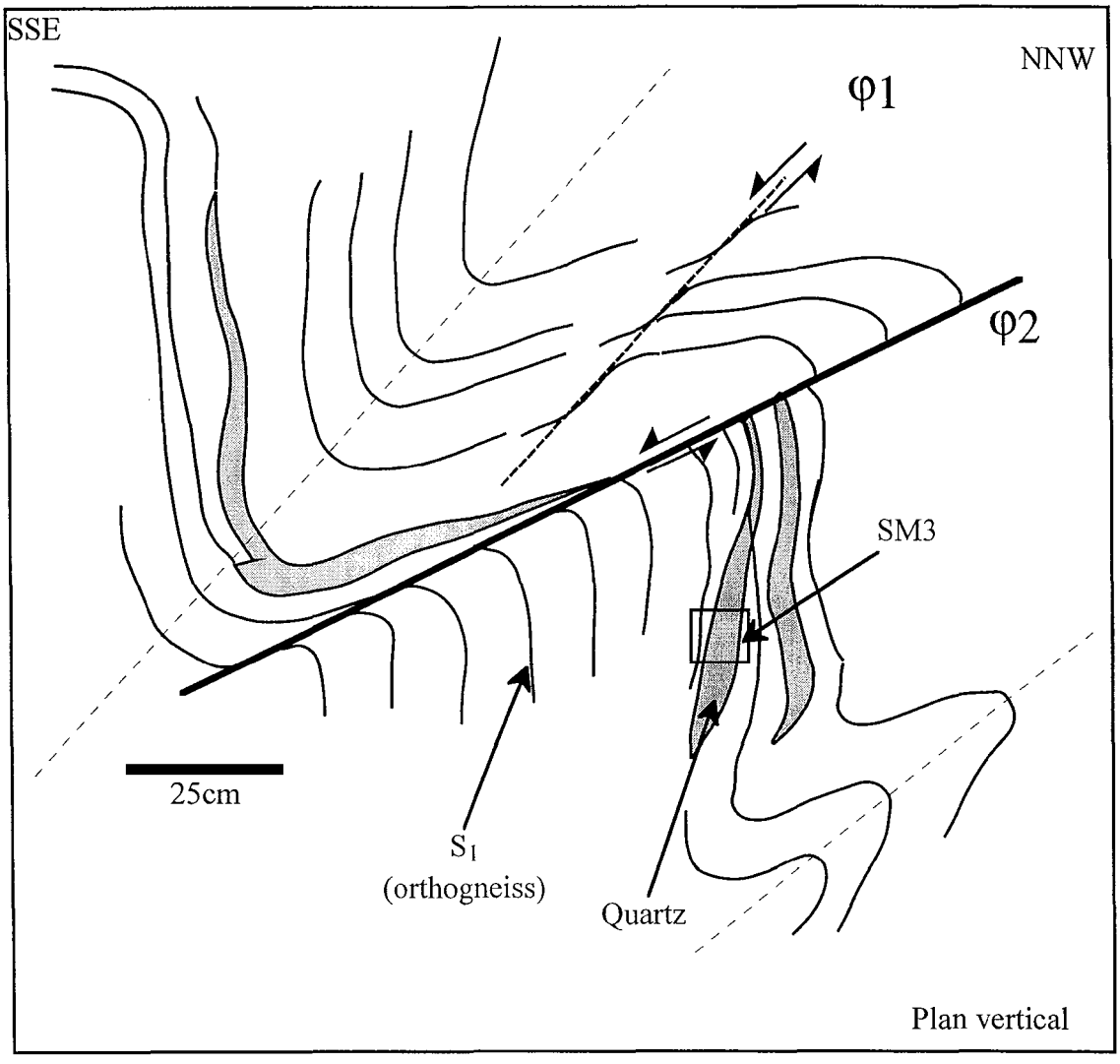


Fig. V-6 Schéma de la structuration du quartz précoce (SM3) au Maupas.
En gris les quartz bleus précoces sont pris dans le train de plis E-W qui affecte la schistosité des orthogneiss, et découpés par les failles normales (φ_1 faille normale ductile et φ_2 faille normale fragile à N70° 35°S)

I. F	$TfCO_2$ (°C)	Tfg (°C)	TfClath (°C)	Th (°C)	Composition Raman (mole %)			% vapeur
					CO_2	CH_4	N_2	
12	-56.8	-2.3	10.1	238	78.6	11.1	10.3	40
13	-57.1	-1.9	10	215	75.3	19.3	5.4	40
14	-58.7	-2.0	10.5	220	86.5	12	1.5	40

Tableau 2- Données microthermométriques et composition de la phase volatile des inclusions aquo-carboniques dans le quartz de Puy-des-Angles (SM10).

I. 1. 2. 3- Les inclusions aqueuses

I. 1. 2. 3. 1- Les températures de fusion de la glace

Les premières températures de fusion ont été mesurées autour de -21°C, et sont donc compatibles avec le système binaire H_2O-NaCl.

Les Tfg des inclusions Lw sont bien distinctes entre les échantillons du Maupas et de Puy-des-Angles (Fig. V-7), avec un mode à -4°C (6.5 % poids éq. NaCl) pour Puy-des-Angles et un mode à -2°C (3.4 % poids éq. NaCl) pour le Maupas, ce dernier mode coïncide avec les Tfg des inclusions fluides Lw-c de Puy-des-Angles. Les salinités sont ainsi comprises entre 3.2 et 7 % poids éq. NaCl à Puy-des-Angles et entre 0.5 et 4 % poids éq. NaCl au Maupas.

I. 1. 2. 3. 2- Les températures d'homogénéisation

Dans les deux sites, les températures d'homogénéisation sont comparables, mais restent très dispersées (Fig. V-8), elles varient entre 148° et 346°C. Pour les Lw, trois groupes se distinguent :

(i) des Th élevées (320-360°) qui ne paraissent pas dues à un "necking down" ;

(ii) un groupe de Th autour de 270°C ;

(iii) un dernier groupe, un peu plus étalé, avec un mode autour de 200°C, qui correspond aussi aux Th des inclusions Lw-c.

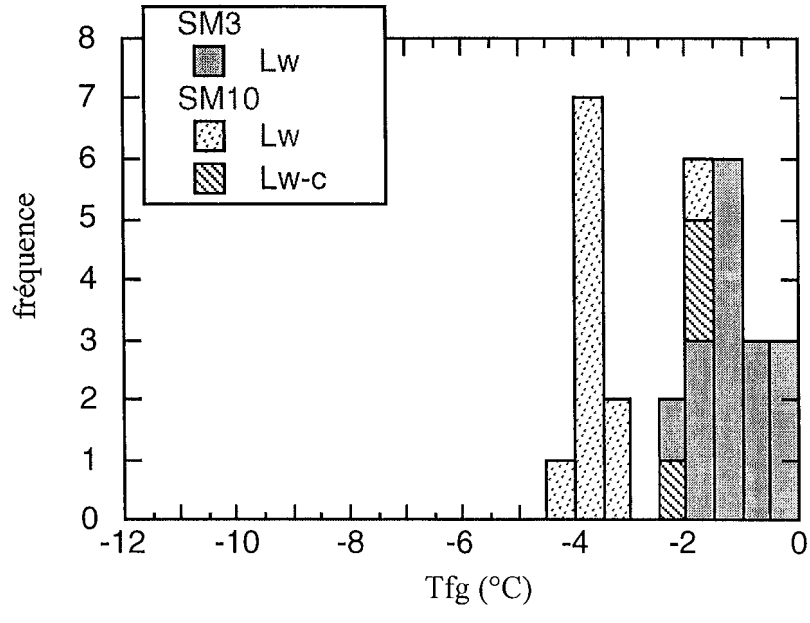


Fig. V-7 - Histogramme de fréquence des Tfg dans les inclusions aqueuses et aquo-carboniques du Maupas (SM3) et de Puy-des-Angles (SM10).

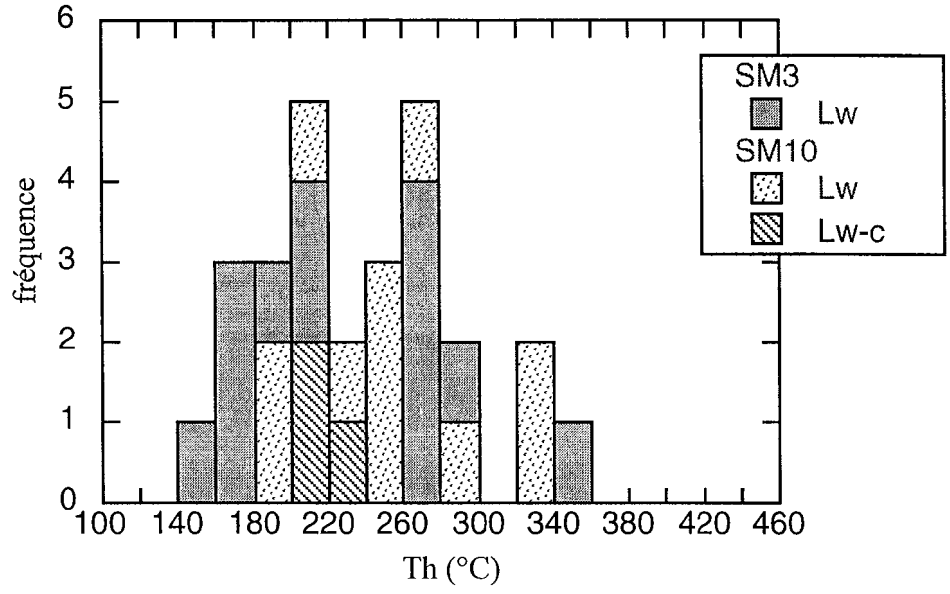


Fig. V-8 - Histogramme des fréquences des Th dans les inclusions du Maupas (SM3) et de Puy-des-Angles (SM10).

I. 1. 3- Micaschistes (SM60)

L'échantillon correspond à une intercalation de micaschistes au sein des gneiss gris du Limousin (cf. Fig. IV-1, P3), riche en lentilles de quartz "d'exudation". La foliation moyenne (S_1) est à N130° 70°W, mais elle est affectée de nombreux plis post-schisteux centimétriques, avec une foliation (S_2) de direction E-W (Fig. V-9A). Au microscope, c'est un micaschiste à staurotide-disthène, recoupé de fractures tardives à quartz microcristallin.

Les quartz sont recoupés par de très nombreux PIF d'orientation très variable, avec, statistiquement, des directions privilégiées à "N140°E", "N70°E" et "N-S" (Fig. V-9B). Malheureusement, il n'a pas été possible de mettre en relation les différents types d'inclusions fluides avec ces directions.

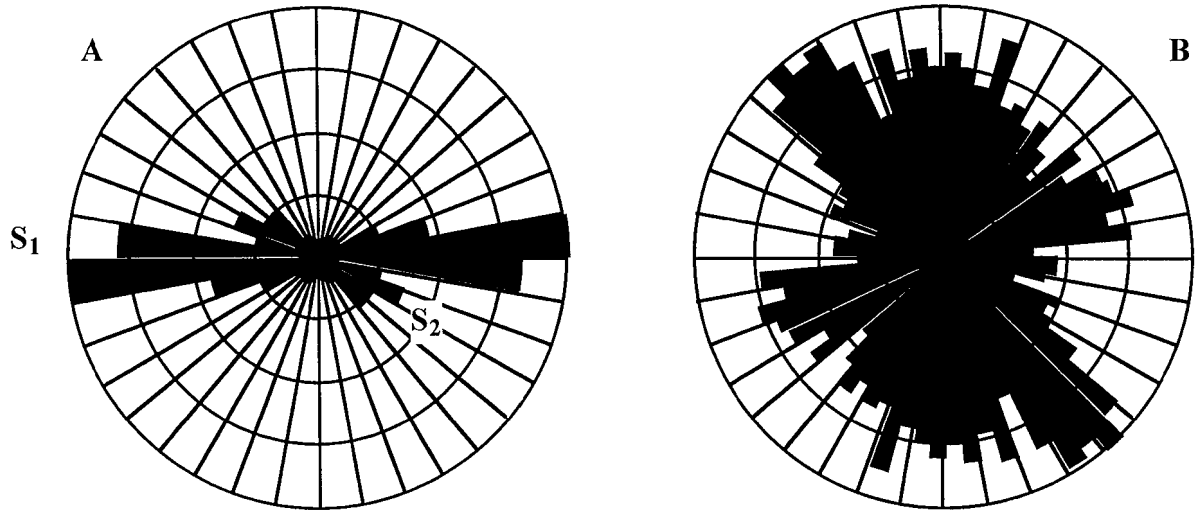


Fig. V-9 - Rosaces de fréquence de la direction de la schistosité (A, 34 mesure) et de PIF (B, 426 mesure) dans l'échantillon SM60.

I. 1. 3. 1- Typologie des inclusions fluides

Les inclusions fluides mesurées dans l'échantillon SM60, peuvent être réparties, selon leur nature, composition et taille, en trois groupes :

Lw-c : il s'agit d'inclusions fluides aquo-carboniques de taille très variable (5-15 μm), leur remplissage gazeux est de l'ordre de 20 à 40 %, elles sont généralement organisées dans des PIF ; elles y coexistent avec des inclusions fluides biphasées semblables, mais ne montrent aucun des changement de phase lié à la présence de volatils ; néanmoins, elles montrent la présence de traces au Raman : Lw-(c).

Lw_1 : il s'agit d'inclusions aqueuses biphasées, de taille moyenne (10-15 μm), avec un remplissage gazeux de 10 à 30 %, elles sont généralement de forme régulière et allongées.

Lw_2 : elles correspondent à des inclusions fluides très rares, disposées en plages isolées, et sont caractérisées par un faible remplissage gazeux (<10%), un contour onduleux et une taille de l'ordre de 20 μm.

I. 1. 3. 2- Les inclusions aquo-carboniques

I. 1. 3. 2. 1- Microthermométrie

Les températures de fusion des clathrates mesurées sont très peu variables (Fig. V-10), elles sont comprises entre 6.2-8.8°C, avec une température moyenne autour de 7.4°C ; quant à la glace, elle fond à des températures relativement constantes, entre -3.5 et -5°C (Fig. V-11).
L'ensemble des inclusions aquo-carboniques homogénéisent en phase aqueuse à des températures moyennes, comprises entre 210 et 280°C (Fig. V-12), avec un mode bien caractéristique autour de 250°C.

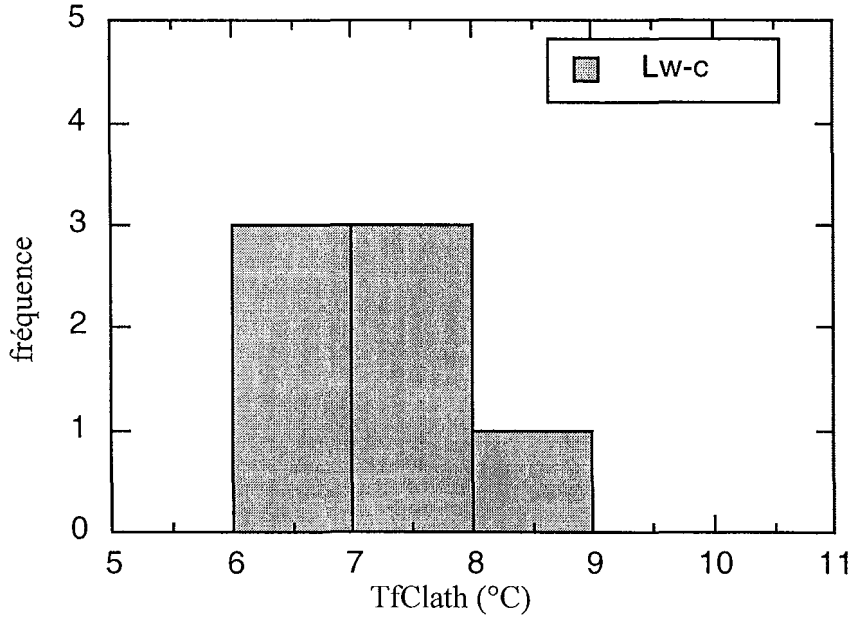


Fig. V-10 - Histogramme de fréquence de la température de fusion des clathrates dans les inclusions Lw-c dans l'échantillon SM60.

I. 1. 3. 2. 2- Les données Raman

Quelques inclusions aquo-carboniques (Lw-c) ont fait l'objet d'analyse en microspectrométrie Raman, elle montre une forte dominance du CO_2 dans la phase volatile avec $CH_4 > N_2$ subordonné (tableau 3). Il en va de même pour les inclusions Lw-(c).

Typologie		CO_2 (mole %)	CH_4 (mole %)	N_2 (mole %)	Remplissage vapeur (%)
Lw-c	4	87.5	8	4.5	20
	5	87.4	8	4.6	40
	15	90.7	6	3.3	20
Lw-(c)	13	92.8	5.7	1.5	20
	21	79	10	11	30
	22	88	6.8	5.2	30

Tableau 3 - Composition de la phase volatile dans les inclusions aquo-carboniques (Lw-c et Lw-(c)) de l'échantillon SM60, mesurée par microspectrometrie Raman.

I. 1. 3. 3- Les inclusions aqueuses

I. 1. 3. 3. 1- Les températures de fusion de la glace

Les températures de début de fusion sont de l'ordre de -21°C, suggérant le système H_2O-NaCl, où seront calculées, par la suite, les salinités. Dans les inclusions aqueuses les températures de fusion de la glace couvrent un intervalle de température qui va de -0.5° jusqu'à -5.1 °C (Fig. V-11), correspondant à des salinités comprises entre 1 et 8 % poids éq. NaCl.

Les inclusions Lw-(c) s'opposent nettement aux inclusions purement aqueuses par leurs Tfg beaucoup plus basses, comprises entre -3.4° et -5.1°C (salinité de l'ordre de 5.5-8 % poids éq. NaCl), avec un mode autour de -4.5°C, qui correspondent aussi aux Tfg dans les inclusions Lw-c.

Les inclusions aqueuses sont sensiblement moins salées, les inclusion Lw_1 se distinguent des Lw_2 par des Tfg légèrement plus basses (environ -1.5°C, correspondant à une salinité de l'ordre de 2.6 % poids éq. NaCl), les Lw_2 ayant des Tfg assez constantes, avec une moyenne autour de -0.8°C (1.4 % poids éq. NaCl)

I. 1. 3. 3. 2- Les températures d'homogénéisation

Les inclusions fluides homogénéisent en phase liquide, dans deux intervalles de températures différents (Fig. V-12) ; les inclusions Lw_2 homogénéisent aux températures les plus basses, en

moyenne à 125°C, alors que les autres homogénéisent à des températures un peu plus élevées, entre 200 et 260°C pour les inclusions Lw_1 et entre 226 et 270°C pour les inclusions Lw-(c).

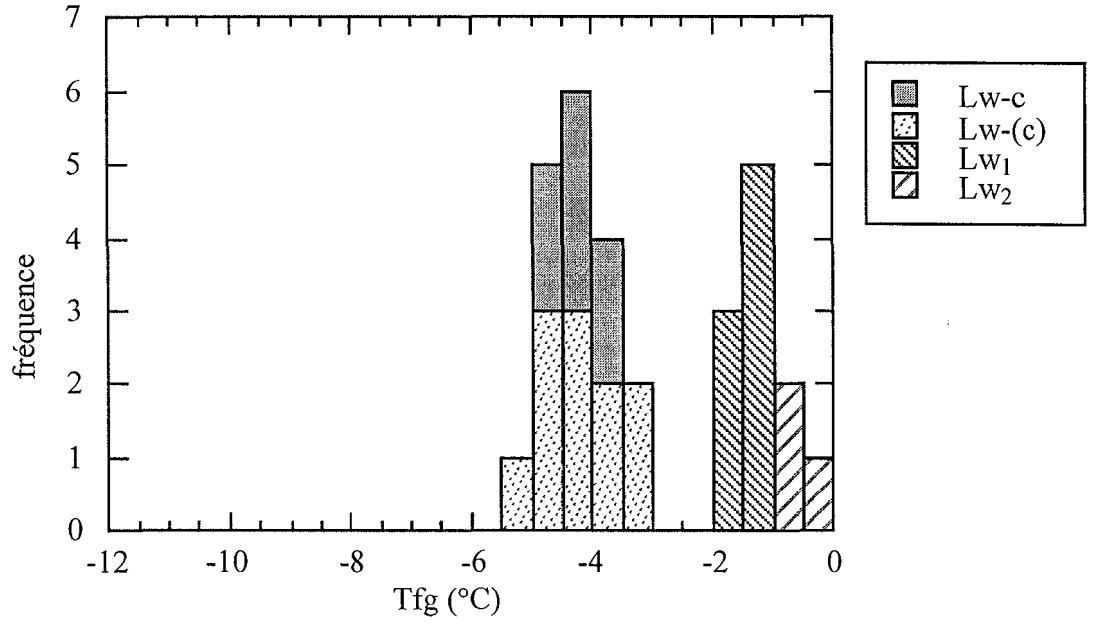


Fig. V-11 - Histogramme des Tfg des différents types d'inclusions dans l'échantillon SM60.

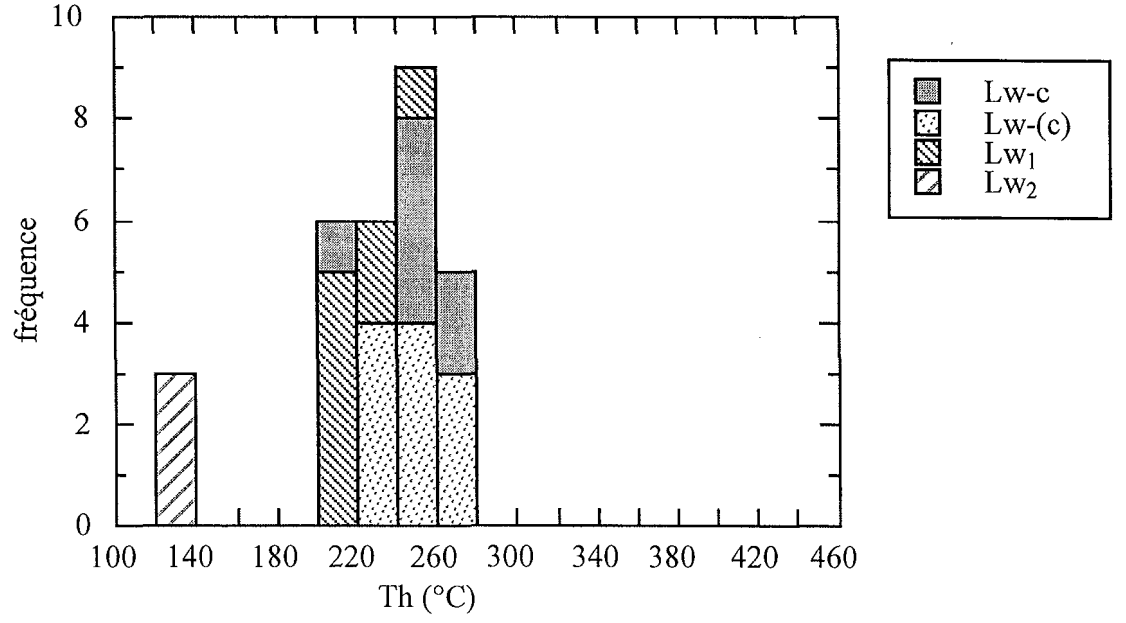


Fig. V-12 - Histogramme des températures d'homogénéisation des inclusions de l'échantillon SM60.

I. 1. 4- Transect II

Les échantillons SM44, 46 et 48 proviennent d'un profil "E-W" d'une dizaine de km de long (cf. fig. IV-1), effectué le long de la route D978.

I. 1. 4. 1- Description des échantillons

I. 1. 4. 1. 1- SM44 (leptynites de Tulle de l'UIG)

Au point de prélèvement, les leptynites, à foliation moyenne N0° 65°E, sont affectées de plis métriques à plans axiaux proches de l'horizontale (tectonique en distension probable).
L'échantillon est une leptynite très riche en quartz d'exsudation, où la biotite est remplacée par la chlorite, très abondante, le long de la schistosité qui est principalement E-W (Fig. V-13). Les plagioclases sont également très altérés avec apparition de phengites fines. Cependant on note la présence de petites sphérules de quartz bien préservées, il s'agit probablement du quartz primaire.
Trois types d'inclusions fluides sont identifiés dans le quartz, et seront cités par ordre décroissant d'abondance :

Le premier type correspond à des inclusions fluides aqueuses monophasées très abondantes, isolées ou organisées en PIF, parfois elles jalonnent les limites des joints de grains. Ce sont des inclusions tardives.

Le deuxième type correspond à des inclusions fluides aqueuses biphasées (**Lw**) organisées en PIF de direction moyenne N140°E (Fig. V-13).

Le troisième type, correspond à des inclusions fluides aquo-carboniques (**Lw-c**) de taille moyenne et de forme régulière, très rares et organisées en PIF dont la direction varie entre N160°E et N180° (Fig. V-13). Ce sont les inclusions les plus précoces.

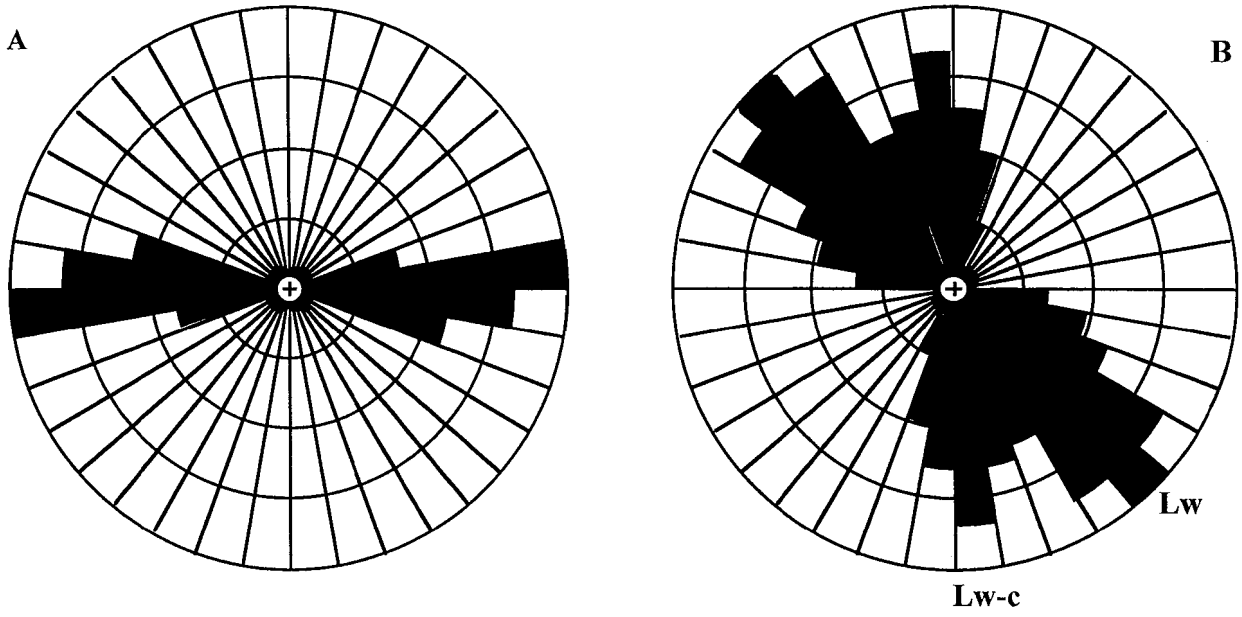


Fig. V-13 - Rosaces des fréquences de la direction de la schistosité (A, 13 mesures) et de la direction des PIF (B, 92 mesures) dans SM44.

I. 1. 4. 1. 2- SM46 (Tonalite foliée)

Cet échantillon a été prélevé dans des tonalites foliées qui s'injectent parallèlement à la schistosité (N05° 70W) dans les gneiss gris du Limousin. On sait d'un arrêt précédent (Fig. V-14) que ces tonalites s'injectent en fait parallèlement au plan axial de plis N-S post-schisteux affectant les gneiss gris, et développant une deuxième foliation : ces tonalites sont donc en réalité vraisemblablement syn-cinématiques pour ce deuxième épisode.

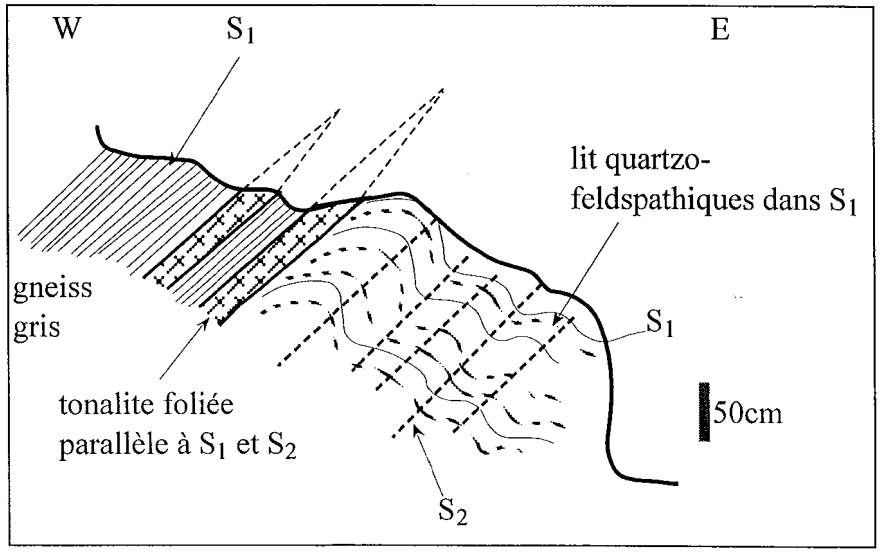


Fig. V-14 - Coupe E-W dans les gneiss gris montrant les schistosités et la structuration des tonalites, affleurement sur la D978 au niveau du Pt2 (cf. Fig. IV-1)

L'échantillon est très altéré, les plagioclases et les feldspaths potassiques sont imprégnés de séricite. Le quartz se présente sous forme de gros cristaux globuleux et en rubans microcristallins soulignant la déformation (Fig. V-15).

Les inclusions fluides s'observent :

(i) dans les quartz reliques où elles paraissent suturer des sous-grains : inclusions fluides biphasées aqueuses de grande taille ;

(ii) en PIF tardifs, ne contenant que des inclusions aqueuses monophasées.

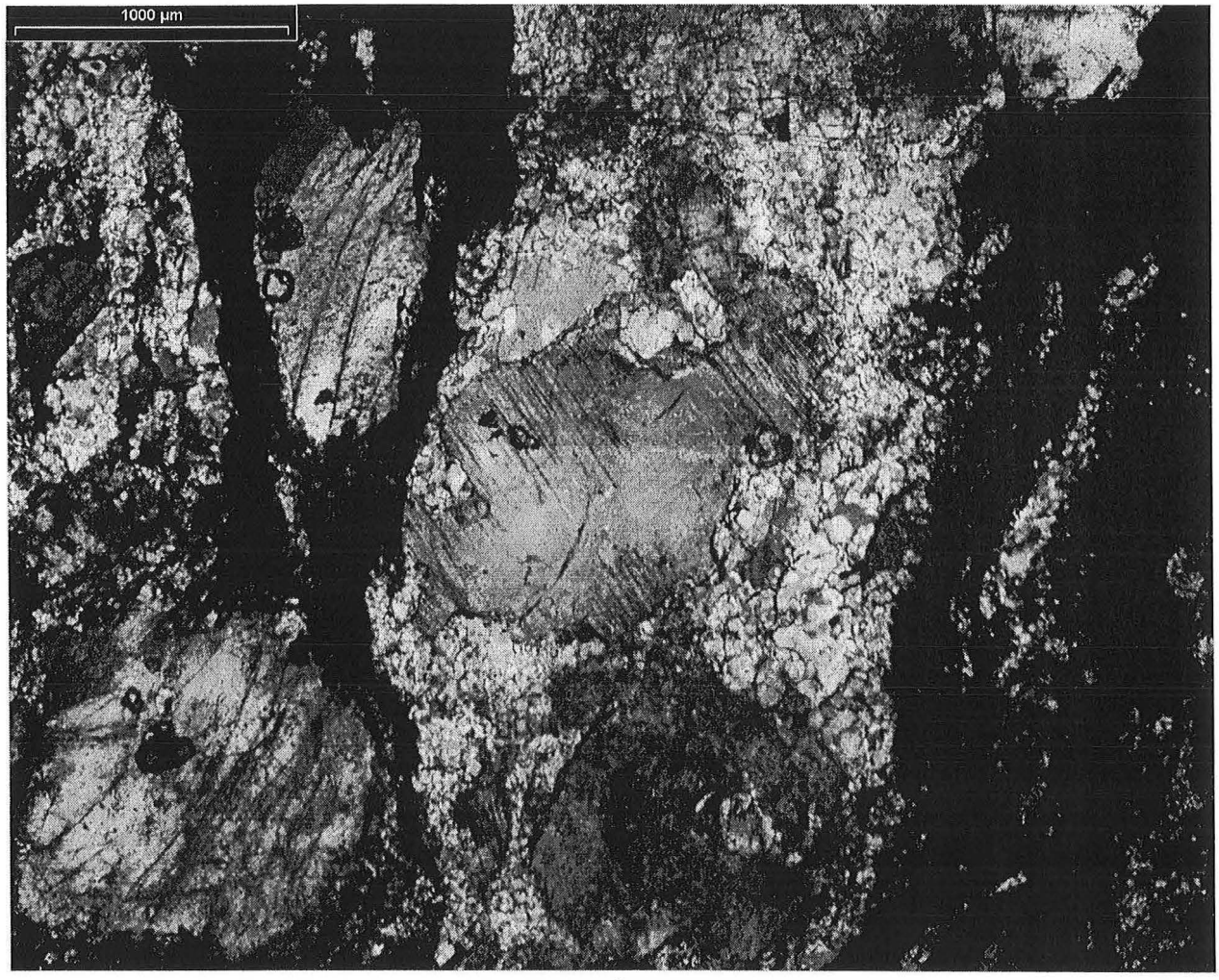


Fig. V-15 - Photographie au microscope optique montrant la structuration et la minéralogie de la tonalite SM46 (lumière polarisée)

I. 1. 4. 1. 3- SM48 (leptynites sodiques de l'UIG)

L'échantillon est prélevé dans des leptynites fines monoclinales (rubanement à N90° 45°N), riches en lits quartzo-feldspathiques, à proximité immédiate du passage cartographique de la

faille ductile d'Argentat. Vue au microscope, cette "leptynite" est une mylonite à rubans de quartz (Fig. V-16). Dans ce quartz les inclusions fluides sont très rares et leur taille est très petite (< 2 µm). Par contre dans les inclusions solides des feldspaths (apatite ou quartz) les inclusions fluides sont un peu plus grandes avec des contours réguliers (probablement des inclusions primaires?).

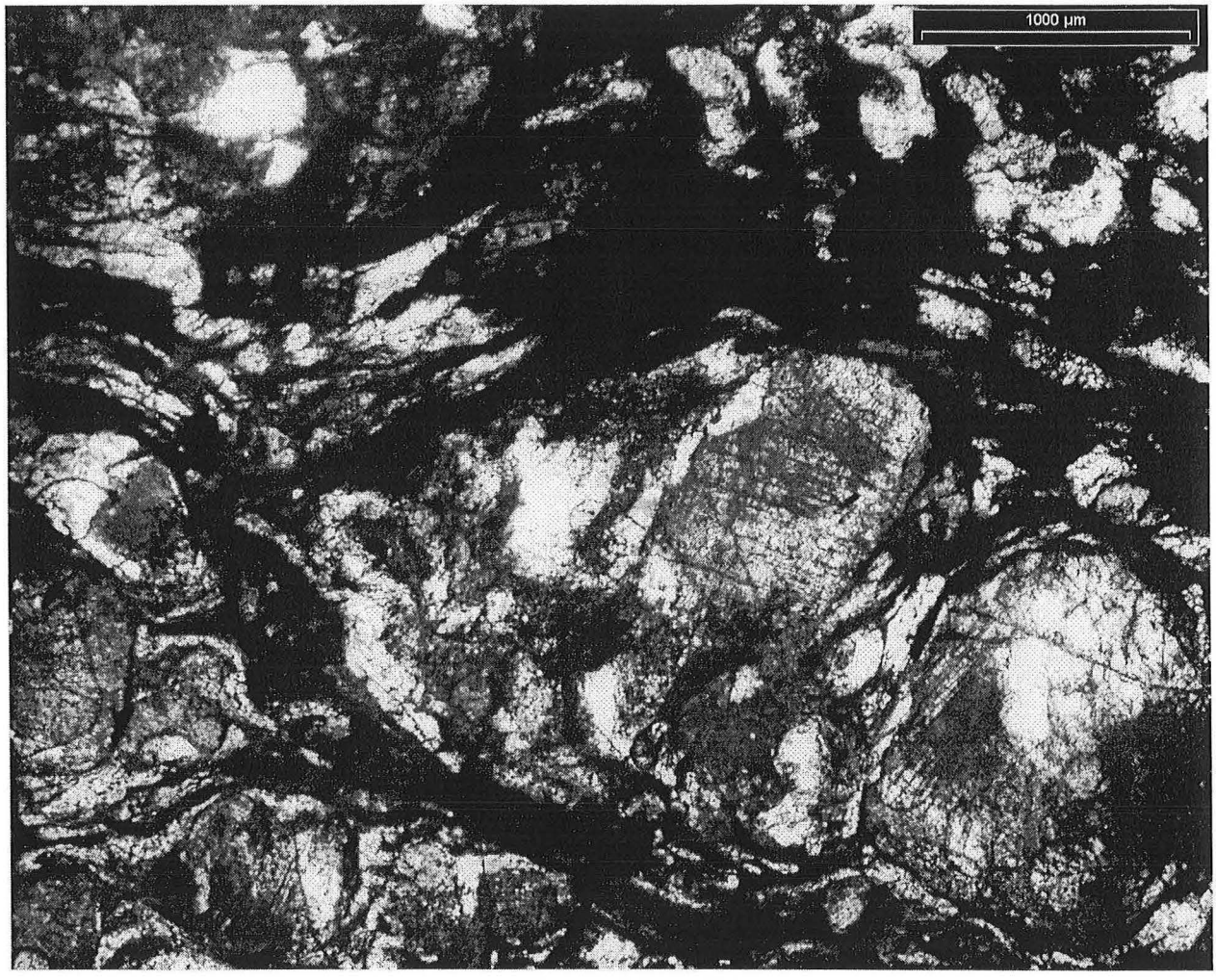


Fig. V-16 - Photographie au microscope optique de la leptynite SM48, montrant le rubanement des mylonites.

I. 1. 4. 2- Typologie des inclusions fluides

Deux types d'inclusions fluides ont été observés :

(i) **Lc-w** et **Lw-c**, il s'agit des inclusions aquo-carboniques rencontrées dans l'échantillon SM44 (PIF N0°-N160°E), toutes caractérisées par de forts remplissages volatils (≤ 80 % du volume de l'inclusion), de taille très variable (5-15 µm), et de forme plus ou moins régulière.

De rares inclusions apparaissent triphasées (**Lc-w**), mais dans la plupart il n'a pas été possible d'observer l'homogénéisation L-V dans la phase volatile.

(ii) **Lw**, inclusions biphasées aqueuses, présentes dans les trois échantillons (SM44, 46 et 48) ; elles sont le plus souvent caractérisées par leur petite taille (< 10μm) et leur remplissage gazeux faible et homogène (10-30 %). Leur forme est très variable, mais elles sont généralement allongées.

Dans l'échantillon SM44, les inclusions Lw (PIF à N140°E) ont été divisées en deux groupes :

Lw_1 : inclusions fluides biphasées de petite taille (6-8 μm), avec un remplissage de 10 à 20 %, le plus souvent allongées ;

Lw_2 : inclusions fluides biphasées, de forme très variable (généralement avec un contour irrégulier), un peu plus grande (leur taille va de 6 à 10 μm) et de remplissage gazeux variable (10 à 40%) dans le même PIF, ce qui est suggestif d'un "necking down".

I. 1. 4. 3- Les inclusions aquo-carboniques

Dans l'ensemble des inclusions fluides aqueuses et aquo-carboniques, les températures de début de fusion de la glace n'ont pas été observées, et comme les premiers glaçons ne sont visibles qu'à des températures élevées (≥ -21°C), le sel prédominant est probablement le NaCl.

I. 1. 4. 3. 1- Les températures de fusion

Toutes les inclusions aquo-carboniques (Lw-c) donnent des températures de fusion de CO_2 très homogènes (Fig. V-17A), dans un intervalle restreint entre -56.7 et -57.3°C, où elles dessinent une répartition unimodale à -57°C.

Les températures de fusion des clathrates sont hétérogènes (Fig. V-17B), en effet, elles varient entre 6.5° et 9.8°C. Les Tfg, qui ont pu être mesurées, varient entre -1.2° et -7°C ; avec une nette dominance des Tfg comprises entre -4° et -7°C (Fig. V-18A).

I. 1. 4. 3. 2- Les température d'homogénéisation

Deux inclusions de type Lc-w montrent une homogénéisation de CO_2 en phase gazeuse à 28 et 32°C (?).

L'ensemble des inclusions aquo-carboniques homogénéisent en phase liquide à des températures allant de 240° jusqu'à 350°C ; si on met de côté l'inclusion à Th la plus élevée (350°C), le reste des inclusions donnent des Th, plus restreintes (240-300°C), avec un mode autour de 260°C (Fig. V-18B).

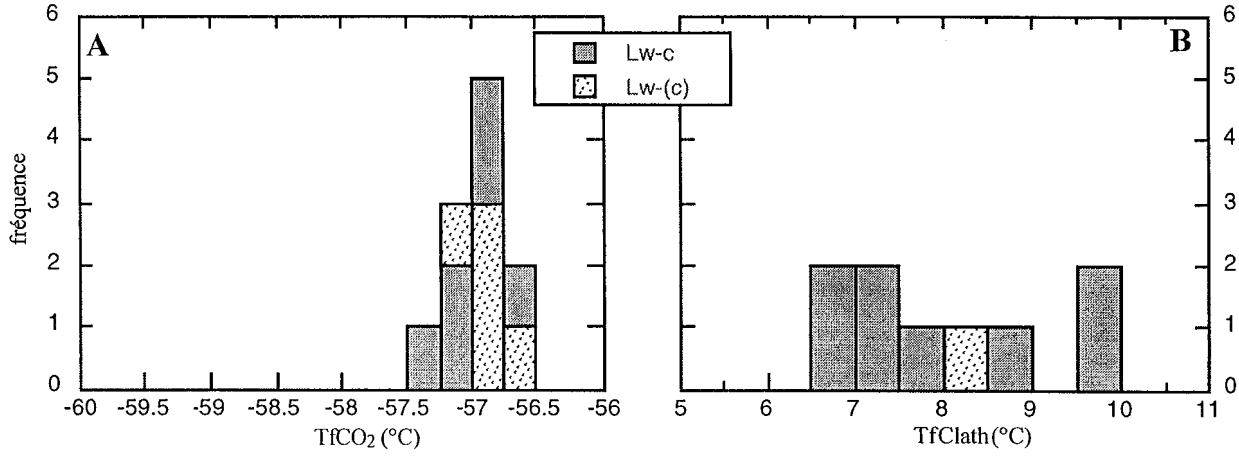


Fig. V-17 - Histogramme des fréquences des Tf CO_2 (A) et TfClath (B) des les inclusions Lw-c de l'échantillon SM44.

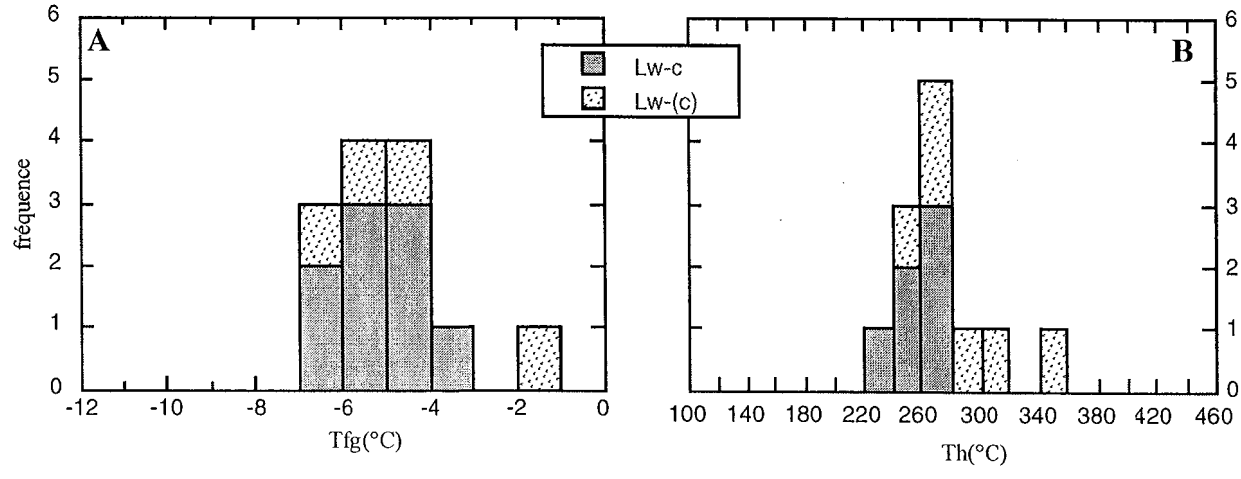


Fig. V-18 - Histogramme des fréquences des Tfg (A) et Th (B) dans les inclusion aquo-carboniques dans l'échantillon SM44.

I. 1. 4. 4- Les inclusions aqueuses

I. 1. 4. 4. 1- Les températures de fusion de la glace

Dans l'échantillon SM44, les températures de fusion de la glace varient entre -0.8 et -3.5°C (Fig. V-19), correspondant à une salinité entre 1.4 et 5.7% poids éq. NaCl ; dans les inclusions Lw_1 la glace fond à deux températures différentes (autour de -1°C et à -3°C) ; dans les inclusions Lw_2 les Tfg sont beaucoup plus restreintes par rapport aux précédentes (Lw_1) ; elles varient entre -0.8 et -1.5°C (salinité entre 1.4 et 2.6% poids éq. NaCl), avec principalement des Tfg autour de -1°C (Fig. V-19).

Dans l'échantillon SM46, les températures de fusion de la glaces sont relativement basses (Fig. V-19), elles varient entre -3.5 et -6.7°C, soit des salinités allant de 5.7% jusqu'à environ de 10% poids éq. NaCl) ; alors qu'elles sont comprises entre -2 et -4.8°C dans l'échantillon SM48, ce qui correspond à des salinités entre 3.4 et 7.6% poids éq. NaCl, avec essentiellement des températures comprises entre -2 et -4°C (Fig. V-19).

De façon générale chaque échantillon a une gamme des Tfg assez caractéristique (Fig. V-19) ; en effet, l'échantillon SM44 est caractérisé par des Tfg plus élevées, elles sont comprises entre -0.5 et -2° (0.9 et 3.4% poids éq. NaCl), l'échantillon SM46 est caractérisé par des Tfg plutôt basses, elles varient entre -4 et -5.5° (6.5 et 8.6% poids éq. NaCl), alors que les Tfg de l'échantillon SM48 sont intermédiaire entre les deux autres échantillons, elles sont généralement comprises entre -2 et -4 (3.4 et 6.5% poids éq. NaCl).

I. 1. 4. 4. 2- Les température d'homogénéisation

Les températures d'homogénéisation dans l'échantillon SM44, couvrent un large intervalle (134-302°C) (Fig. V-20) ; des inclusions fluides Lw_1 homogénéisent à des températures autour de 270°C et basses (Fig. V-20), qui sont en moyenne de l'ordre de 140-150°C ; dans les inclusions de type Lw_2 les Th sont assez variable (195-291°C). De façon globale les Th dans SM44 constituent deux groupes ; un groupe basse température (150°C, Lw_1) et un groupe à température élevée (environ 260°C) constitué par les inclusions Lw_1 et Lw_2. Les inclusions mesurées dans l'échantillon SM46, ont des températures d'homogénéisation qui varient entre 170° et 235°C, avec un mode principal autour de 220°C (Fig. V-20), que l'on retrouve dans l'échantillon SM48, dont les inclusions homogénéisent entre 196° et 276°C.

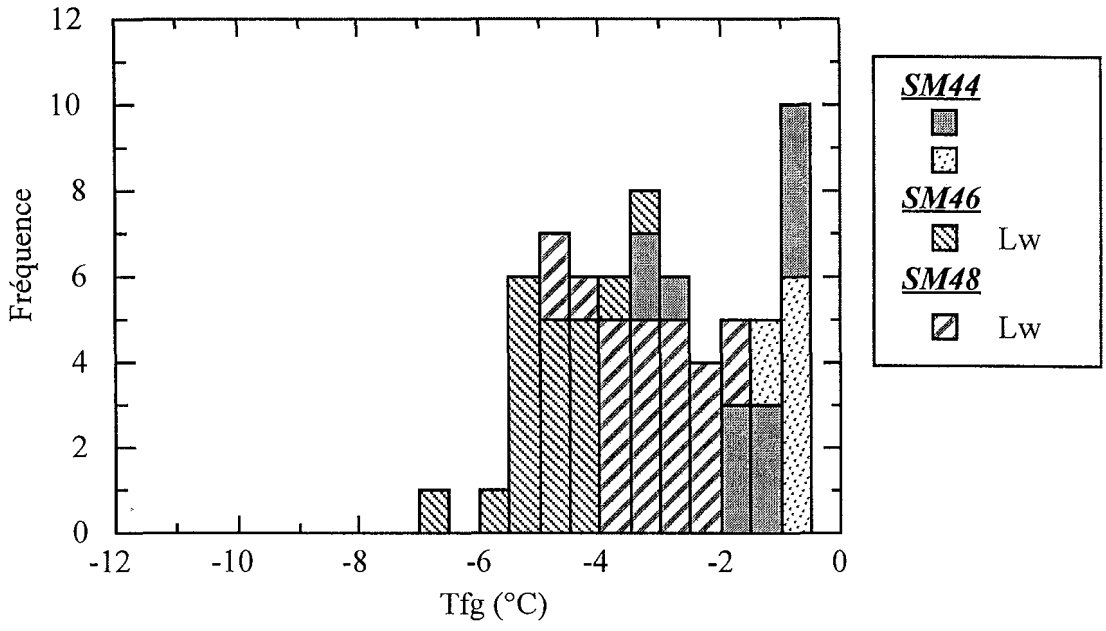


Fig. V-19 - Histogramme de fréquence des Tfg des inclusions aqueuses mesurées dans le transect II.

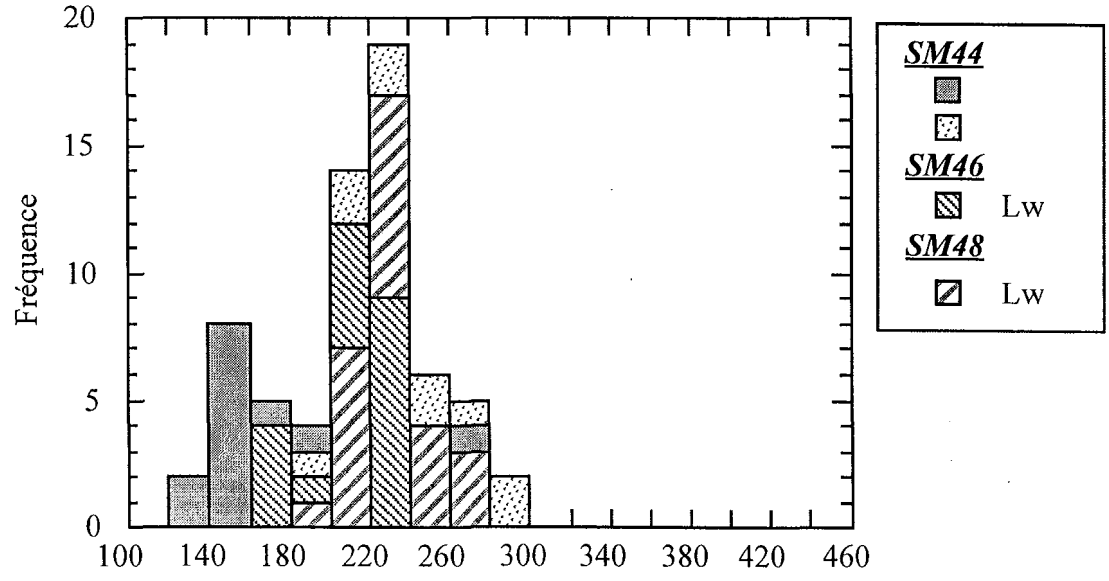


Fig. V-20 - Histogramme de fréquence des Th des inclusions aqueuses mesurées dans les échantillons du transect II.

I. 2- Secteur Centre : Argentat s.s.

Dans ce secteur, on n'a trouvé d'inclusions fluides étudiables que dans le site AR116 ; les inclusions fluides y ont été étudiées dans deux échantillons : SM23, pris dans la structure E-W, minéralisée à quartz et sulfures (cf. Chap. VI § B.1) ; et SM26, correspondant à une lentille de quartz dans la schistosité des micaschistes, qui constituent l'encaissant des structures minéralisées, à quelques dizaines de mètre plus au Nord. Le quartz y est déformé, avec la formation de quartz microcristallin.

I. 2. 1- Typologie des inclusions fluides

Trois types d'inclusions fluides ont été observés :

(i) des inclusions fluides de type **Lw-c** et **Vw-c**, rencontrées exclusivement dans les lentilles de quartz des micaschistes (SM26), où elles forment des PIF intra-cristallins de direction E-W dans les porphyroclastes. Il s'agit d'inclusions fluides aquo-carboniques biphasées, homogénéisant en phases liquide (**Lw-c**) ou vapeur (**Vw-c**), de forme arrondie, et de taille moyenne (9 à 20 µm), avec un taux de remplissage gazeux toujours très fort (> 40 %). Ces inclusions (liquides et vapeurs) peuvent coexister dans un même PIF avec certaines **Lw-cS**, qui contiennent un solide plus ou moins sphérique (carbonate, peut être l'aragonite, avec une raie Raman à 1083 cm^{-1}) et plus rarement le même solide avec un cube de sel. D'autres PIF "N-S" (N0° à N30°E), qui semblent assez précoces, contiennent des inclusions d'apparence biphasées, mais trop petites (≤ 5 µm) pour pouvoir être étudiées ;

(ii) des inclusions fluides de type **Lw** ; il s'agit d'inclusions fluides biphasées aqueuses, mesurées à la fois dans les structures minéralisées (SM23) et leur encaissant (SM26) :

- dans l'échantillon SM26 ces inclusions, limpides, à faible remplissage gazeux (10-20 %) et de très grande taille (15-30 µm) avec allure déformée (peut-être décrépitées ?) sont organisées dans des PIF "plats" intracristallins, généralement E-W ; elles sont moins abondantes que les aquo-carboniques, auxquelles elles sont postérieures ;

- dans l'échantillon SM23, les inclusions aqueuses, rares, ne se trouvent que dans le quartz Q_3 associé à la sphalérite (cf. Fig. IV-26) ; de forme irrégulière, de petite taille (6-20 µm), elles jalonnent les zones de croissance du Q_3 ; leur remplissage gazeux est très variable (5-40 %), probablement dû au "necking down" ;

(iii) des inclusions fluides de type **Vw** ; il s'agit d'inclusions fluides aqueuses biphasées à température ambiante, rencontrées dans l'échantillon SM23, étroitement associées aux inclusions Lw_1 (necking down ?) ; elles sont très rares, caractérisées par leur remplissage gazeux (>50 %) et leur taille (15 à 20 µm), et par leur homogénéisation en phase vapeur.

I. 2. 2- Les inclusions aquo-carboniques (SM26)

I. 2. 2. 1- Microthermométrie

Les inclusions aquo-carboniques ont été étudiées dans deux PIF E-W, l'un, raide, avec les trois familles (Lw-c, Lw-cS, Vw-c) et l'autre exclusivement à Lw-c, plus plat. Elles donnent toutes des températures de fusion de CO_2 comprise entre -58°C et -60°C (Fig. V-21A) pour les inclusions de type Lw-c, et entre -59°C et -60°C (Fig. V-21A) pour les Vw-c, avec toutefois un mode autour de -59°C pour les deux types.

La TfClath est très étalée (Fig. V-21B), elle varie entre 5.3°C et 9.2°C, scindée en deux modes ; avec un premier mode autour de 8.5°C, correspondant aux inclusions Lw-c sensu stricto et Vw-c, et un deuxième mode à 5.5°C, constitué en effet par les inclusions Lw-cS.

Toutes les inclusions du plan à fort pendage montrent un "eutectique" bas (Te à -43 / -44°C), cohérent avec la présence de carbonate dans les inclusions Lw-cS. On y observe une série de fusions, parfois difficiles à appréhender :

- autour de -24°C (Tf1) ;
- entre -4 et -6.7°C (Tf2) ;

et dans les inclusions de type Lw-cS :

- fusion de la halite autour de 23°C (2 mesures)

- fusion du carbonate, dans une inclusion sans halite à 370°C (1 mesure), avant l'homogénéisation totale dans ce cas (voir infra).

Dans le plan à faible pendage, la première fusion visible est autour de -21°C, et un solide fond entre -2.7 et -2.9°C.

Les Th, assez élevées, sont peu variables pour l'ensemble des inclusions aquo-carboniques (Fig. V-24) ; cependant les inclusions Vw-c homogénéisent entre 330 et 385°C ; intervalle plus restreint que celui des inclusions Lw-c (313-402°C) ; pour les inclusions Lw-cS, on note que l'homogénéisation liquide-vapeur se fait soit après la dissolution du carbonate, soit (le plus souvent) avant ; il est donc probable que le carbonate résulte en fait d'un piégeage hétérogène.

On peut alors essayer d'interpréter ces mesures en se plaçant dans le système H_2O-NaCl-$CaCl_2$ (Vanko *et al.,* 1988) en considérant que Tf1 représente la fusion de la glace (mais elle aurait été surestimée, au moins pour les inclusions à halite) et Tf2 celle de l'hydrohalite ; il en résulte un nuage de points peu dispersés dans le diagramme H_2O-NaCl-$CaCl_2$ (Fig. V-22), correspondant à des salinités totales de l'ordre de 25 à 28 % poids éq. NaCl avec un rapport atomique Na/Ca de l'ordre de 5.2.

Il n'a malheureusement pas été possible de tester de tester cette hypothèse au LIBS, à cause de la trop petite taille des inclusions. Il faut noter que ces estimations sont, de toute façon, biaisées par la présence de la halite et la phase volatile.

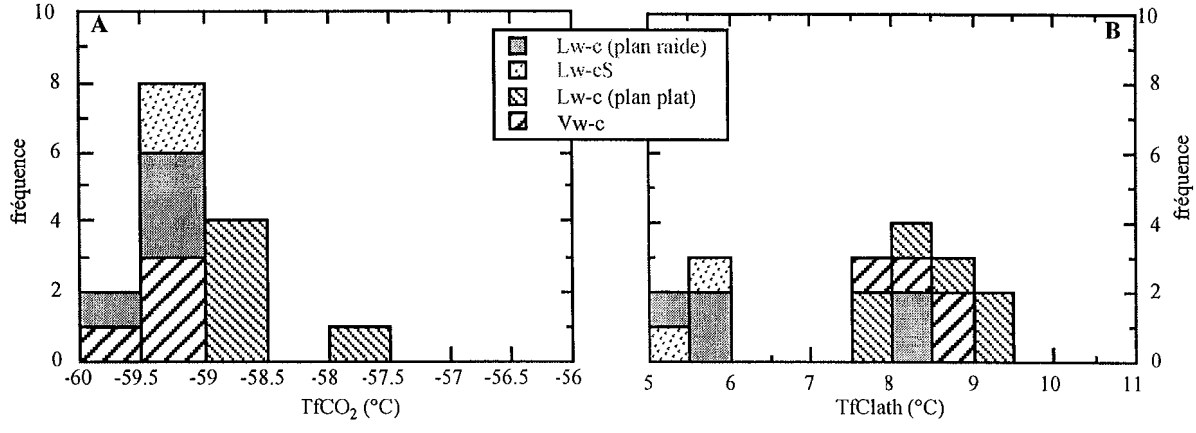
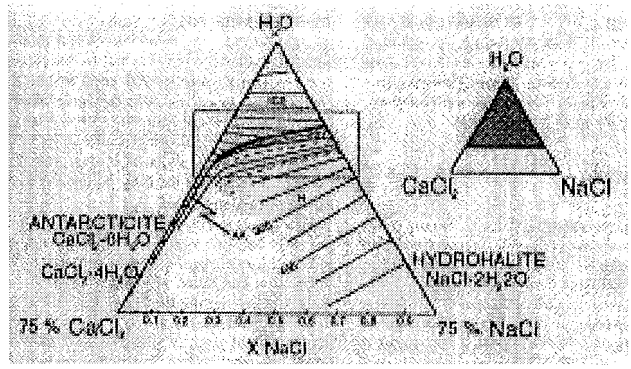


Fig. V-21 - Histogramme des fréquences de $TfCO_2$ (A) et des TfClath (B) dans les inclusions aquo-carboniques de l'échantillon SM26.



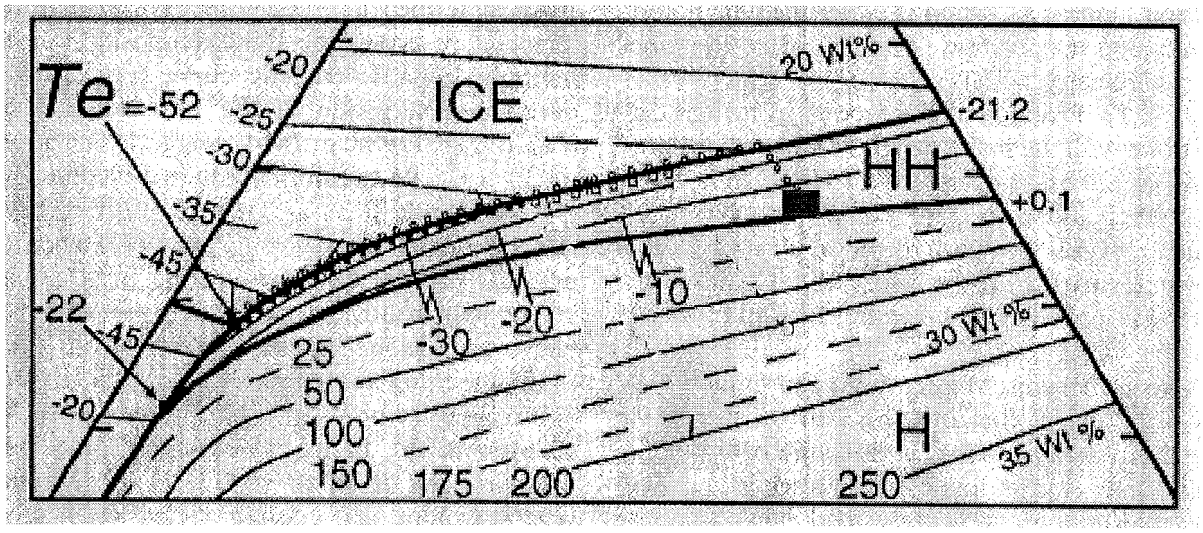


Fig. II-22 Projection des données de microthermométrie des inclusions Lw-cS (S : halite) de l'échantillon SM26, dans le diagramme ternaire NaCl-$CaCl_2$-H_2O (d'après Oakes et al., 1990 ; Williams-Jones et Samson, 1990 ; Vanko et al., 1992).

Correspond au domaine où se projètent nos données

I. 2. 2. 2- La composition Raman

L'analyse Raman de certaines inclusions aquo-carboniques Lw-c et Vw-c a montré une teneur en volatils assez variable (tableau 4), avec une forte dominance du CO_2 , la teneur en méthane restant élevée. L'inclusion Vw-c contient plus de CO_2 que les inclusions Lw-c, mais sa teneur en méthane est beaucoup plus basse.

Typologie	I. F	CO_2 (mole%)	CH_4 (mole%)	N_2 (mole%)
Vw-c	2	92.7	6.8	0.5
Lw-c	7	80.9	16.3	2.8
Lw-cS**	8	71.2	28.8	0
Lw-c*	3	69.9	26.2	3.9
	4	70.3	25	4.7

*Tableau 4 - Composition de la phase volatile dans les inclusions fluides Lw-c et Vw-c dans l'encaissant à Argentat (SM26) [** : inclusion avec halite et carbonate ; * : inclusions dans les PIF plats].*

I. 2. 3- Les inclusions aqueuses

Les caractéristiques microthermométriques des inclusions Lw_1 sont semblables dans la structure minéralisée et dans son encaissant (Fig. V-23 et 24).

I. 2. 3. 1- Les températures de fusion de la glace

Les premières températures de fusion observées sont comprises entre -37 et -39°C dans SM26 et autour de -40°C dans SM23.

Dans l'échantillon SM23, la Tfg est de l'ordre de -0.7°C (1.2% poids éq. NaCl) pour les vapeurs (Fig. V-23), et elle est comprise entre -0.6° et -0.9°C C (1.1-1.6% poids éq. NaCl) dans les liquides (Fig. V-23) ; alors qu'elle est un peu plus basse dans l'échantillon SM26, elle varie entre -0.9° et -1.4°C, correspondant à des salinité de l'ordre de 1.6 à 2.4 % poids éq.

NaCl. Si on interprète les "Te" comme des températures de fusion de l'hydrohalite, la figure V-22 b indique des rapport Na/Ca de l'ordre de 0.95.

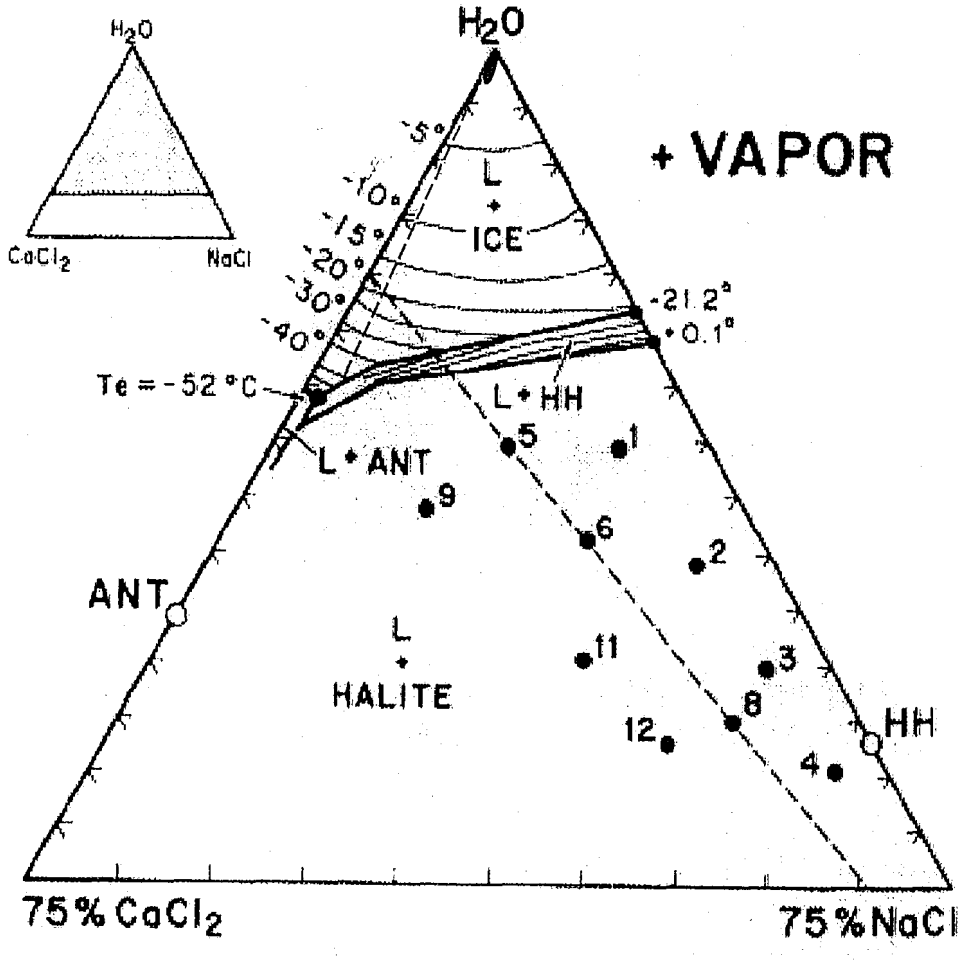


Fig. V-22 b - Diagramme ternaire H_2O-NaCl-$CaCl_2$ permettant le calcul de la composition des inclusions Lw dans l'échantillon SM26 (Vanko et al., *1988).*

I. 2. 3. 2- Les températures d'homogénéisation

Les températures d'homogénéisation, dans le cas des inclusions aqueuses, sont beaucoup plus étalées (153-440°C) que celles des inclusions aquo-carboniques (Fig. V-24).

Les Th sont réparties en deux groupes ; un premier groupe entre 153° et 278°C ; un deuxième groupe avec des températures élevées (307-376°C), groupe auquel appartiennent aussi les

inclusions de type Vw des structures minéralisées qui homogénéisent à des températures autour de 370°C (Fig. V-24).

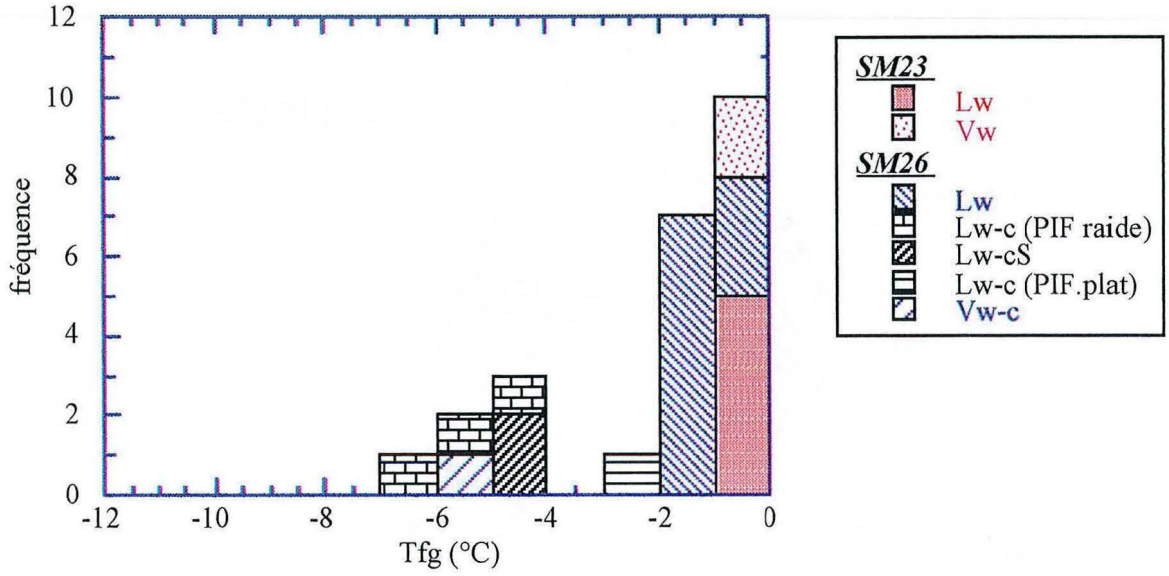


Fig. V-23 - Histogramme des fréquences des Tfg dans les inclusions aqueuses et aquo-carboniques dans le site AR116 (SM23 : quartz filonien ; SM26 : encaissant).

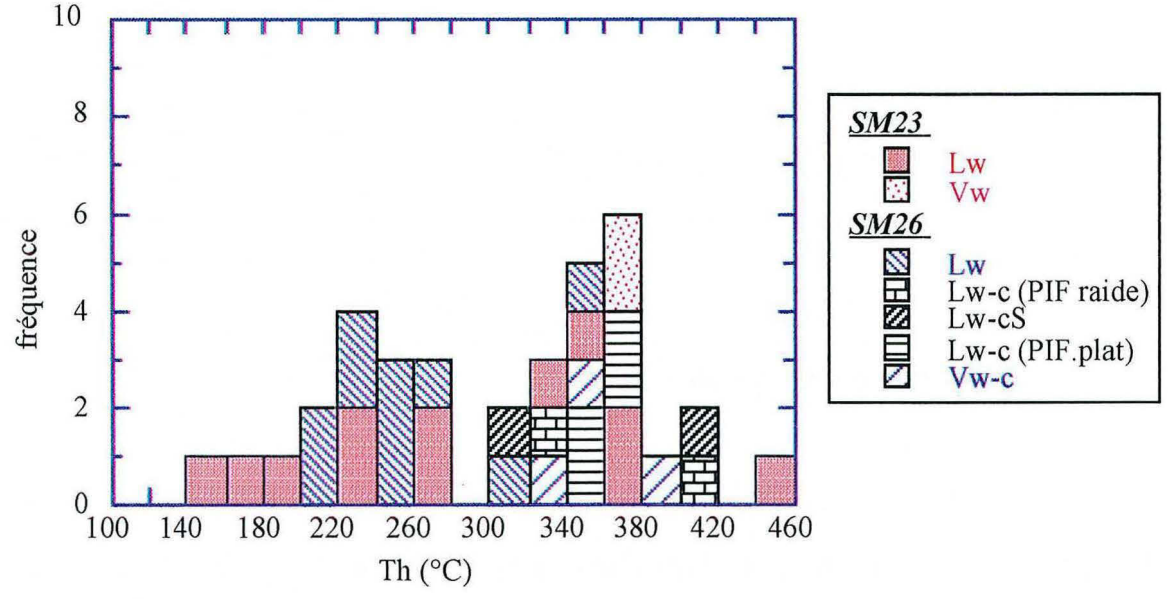


Fig. V-24 - Histogramme des fréquences des Th mesurées dans les différentes inclusions du site AR116 (SM23 : quartz filonien ; SM26 : encaissant)

I. 3- SECTEUR SUD : LE TRANSECT DU GRAND FRAUD

Aucune inclusion fluide n'a pu être mesurée dans le seul échantillon du filon de quartz du Grand Fraud (SM13) où s'observent des PIF. En revanche, des inclusions fluides ont pu être étudiées sur un transect "E-W" (cf. Fig. IV-32), comprenant d'Ouest en Est les échantillons SM19 et SM17 dans les roches métamorphiques et SM21 dans le granite de Teyssieu à moins de 3 km à l'Est.

I. 3. 1- Typologie

I. 3. 1. 1- SM19 (Pegmatite)

En ce point, des "sills" métriques de pegmatite, injectées dans la foliation (S_1) des paragneiss grauwackeux de l'UIG, sont affectés par des plis droits très serrés (plan axial vertical à N135°E, axe plongeant fortement de 45° vers l'Ouest). L'échantillon SM19, prélevé au niveau d'une charnière, et taillé dans le plan horizontal, montre, dans le quartz granoblastique, des inclusions biphasées aqueuses (**Lw**), de petite taille ($\leq$ 15 µm), à remplissage gazeux homogène (10 à 30%) et formes peu variables, assez régulières. Ces inclusions se trouvent en plages et en PIF (deux familles N-S et E-W), sans relations chronologiques nettes.

I. 3. 1. 2- SM17 (Lentille de quartz)

L'échantillon SM17 (lentille de quartz dans des leptynites) à été décrit en détail (Chap I § IV– 3). Les inclusions étudiées y sont aqueuses, biphasées (**Lw**). Elles se présentent :

(i) en "plages", avec des tailles très variables (10-30 µm) et un remplissage gazeux hétérogène (10-30 %).

(ii) en PIF E-W à faible pendage (considérés comme précoces : Chap I § C. 3), avec des inclusions de petite taille (6-10µm), de remplissage homogène (environ 20 %), avec des formes plus ou moins régulières.

(iii) en PIF à N130-140°E, renfermant des inclusions fluides de taille moyenne (10-18 µm), caractérisées par un fort remplissage gazeux (40-50 %) et par une

forme plus ou moins régulière ; ces PIF sont considérés comme des joints de tension d'un épisode distensif (Chap IV § C. 3).

I. 3. 1. 3- SM21 (Le granite de Teyssieu)

Le granite de Teyssieu est un granite à biotite et cordiérite (Guillot *et al.*, 1992), allongé dans la direction structurale de la faille d'Argentat qu'il borde du coté Est. Ce granite se serait mis en place vers 345 Ma, nettement plus tôt que le granite de type "Goulles" (332 ± 6.5 Ma) (Monier, 1980). Au point d'échantillonage, le long de la route D40 au lieu-dit "Girou", le granite contient des fentes pegmatitiques décimétriques (N7 à 18° 35°W), dont l'une a été prélevée (SM21).

Dans cet échantillon la cordiérite se présente sous forme de prismes automorphes altérés selon les plans de clivage, et avec des inclusions de zircon. La biotite est chloritisée et la muscovite est peu abondante. Les feldspaths potassiques sont automorphes avec des tailles variables, alors que les plagioclases sont petits avec des altérations en phengite. Le quartz est constitué par des grains globuleux isolés ou en plages polycristallines.

Les inclusions fluides sont de taille moyenne (10-15 µm) avec des formes variable. Elles se trouvent dans le quartz en plages isolées et en PIF, ces derniers de plusieurs directions : N-S (à pendage 15-45°S) ; E-W ; autour de N140°E (Fig. V-25).

- dans les plages isolées et les PIF E-W, ce sont des inclusions biphasées aqueuses à faible remplissage gazeux (**Lw_1**)

-dans les PIF N-S à faible pendage, ce sont des inclusions aqueuses biphasées à fort remplissage gazeux, de l'ordre de 50 %, (**Lw_2**)

- dans les PIF à "N140°E", enfin, ce sont aussi des Lw_2 à fort remplissage gazeux (de l'ordre de 50 %), associées de plus à des inclusions aqueuses à très fort remplissage gazeux (≤ 80 %), homogénéisant en phase vapeur (**Vw**).

Aucune chronologie relative n'a pu être mise en évidence entre ces différentes familles.

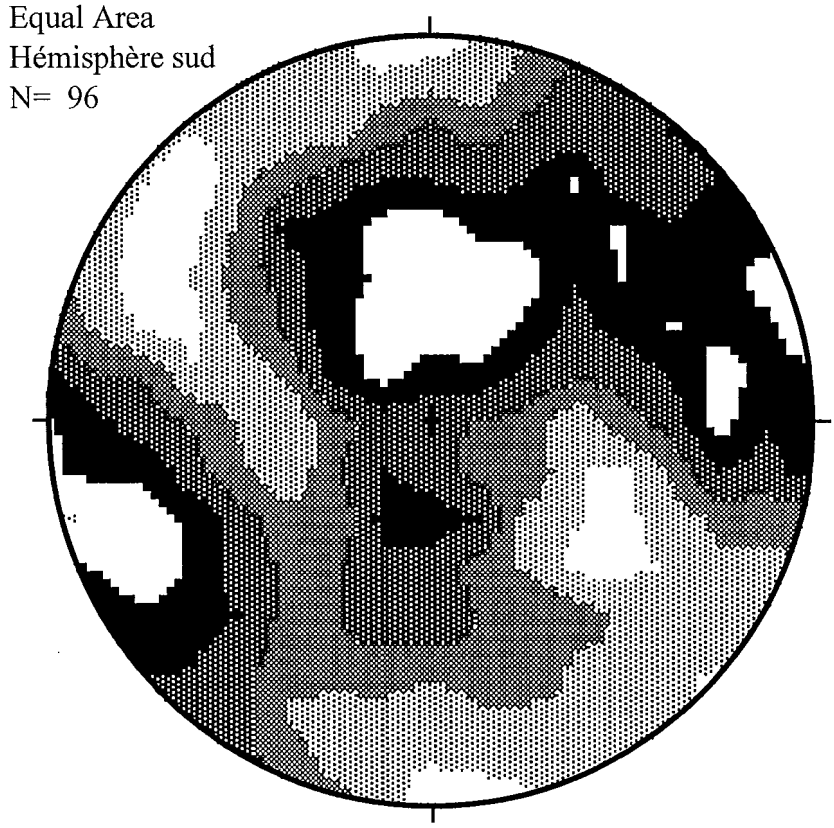


Fig. V-25 - Stéréogramme des isodensités de direction des PIF dans l'échantillon SM21.

I. 3. 2- Les températures de fusion de la glace

Toutes les inclusions aqueuses de ce transect montrent des Te élevées compatibles avec l'eutectique du système H_2O-NaCl, qui servira donc à les modéliser.

I. 3. 2. 1- SM19 (Pegmatite plissée)

PIF N-S : la température de fusion de la glace est comprise entre -1.6 et -4.8°C (Fig. V-26), correspondant à une salinité de 2.7 à 7.6 % poids eq. NaCl, avec la température la plus fréquente autour de -3.7°C (6 % poids éq. NaCl) (Fig. V-26).

PIF E-W : La température de fusion de la glace est plus restreinte, elle varie entre -2 et -3.6°C (salinité de 3.4 à environ 6 % poids éq. NaCl).

La température de fusion de la glace dans le cas des inclusions isolées couvre, de façon générale, le même intervalle de température que les inclusions des PIF N-S, elle est comprise entre -1.6 et -4.3°C (2.7-6.9 % poids éq. NaCl) (Fig. V-26).

I. 3. 2. 2- SM17 (Lentille de quartz)

Les inclusions fluides isolées (plage) ont des températures de fusion de la glace comprises entre 0.0 et -4°C (Fig. V-26), correspondant à des salinités allant jusqu'à 6.5 % poids éq. NaCl, avec les Tfg entre 0.0 et -1.7 enregistrées dans des inclusions de grande taille (20-30 μm) ; alors que les inclusions des PIF ont des Tfg plutôt basses, comprises entre -4.1° et -4.7°C (Fig. V-26), soit des salinités entre 6.6 et 7.5 % poids éq. NaCl.

I. 3. 2. 3- SM21 (Le granite de Teyssieu)

Dans cet échantillon la température de fusion de la glace varie très peu (Fig. V-26), en effet, elle est comprise entre -0.3 et -1.6°C (salinité entre 0.5 et 2.7 % poids éq. NaCl). Elle varie entre -0.5 et -1.2°C (0.9-2.1 % poids éq. NaCl) dans les inclusions de type Vw, alors qu'elle est plus élevée dans les inclusions de type Lw dans les PIF de la même direction (-0.3 à -0.5°C ; 0.5 à 0.9 %poids éq. NaCl). Dans les PIF N-S, la Tfg est comprise entre -1.1 et -1.4°C (2-2.4 % poids éq. NaCl) contrastant de peu avec les PIF E-W, où elle varie entre -0.6 et -1.1°C (1.1-2 % poids éq. NaCl).

I. 3. 2. 4- Synthèse

L'ensemble des Tfg mesurées dans les trois échantillons dessine une répartition bimodale bien caractérisée (Fig. V-26), avec un mode à -3.5/-4°C constitué pour l'essentiel par les inclusions fluides de la pegmatite, et un deuxième mode autour de -1°C, qui caractérise principalement les inclusions fluides du granite.

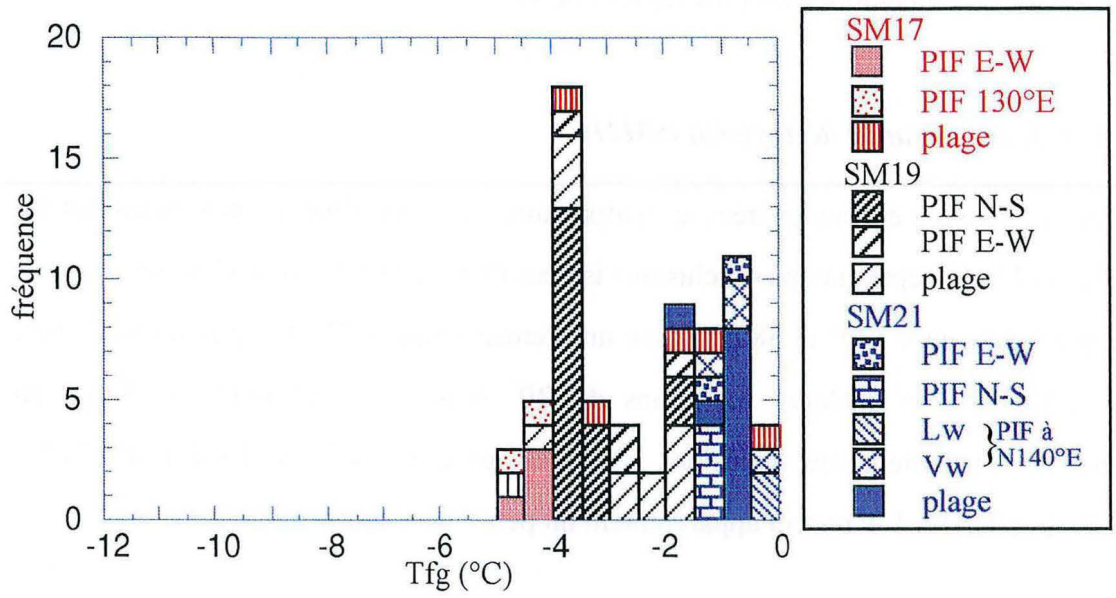


Fig. V-26 - Histogrammes de fréquence des Tfg dans les différents échantillons étudiés dans le transect du Grand Fraud.

I. 3. 3- Les températures d'homogénéisation

I. 3. 3. 1- SM19 (Pegmatite plissée)

Les températures d'homogénéisation sont assez comparables entre les différents types d'inclusions (PIF E-W et N-S et les inclusions isolées), elles couvrent la même gamme de température qui va de 140°C jusqu'à environ 230°C, avec toutefois un mode bien caractérisé entre 220 et 220°C (Fig. V-27).

I. 3. 3. 2- SM17 (Lentille de quartz)

Dans cet échantillon, les inclusions fluides homogénéisent en phase liquide à des températures très variables (Fig. V-27). Les Th les plus élevées (supérieure à 235°C) sont enregistrées dans les inclusions fluides appartenant au PIF E-W et dans quelques inclusions isolées (Fig. V-27). Quant aux inclusions du PIF à N130-140°E, leur Th est un peu plus basse, elle est comprise

entre 178.5 et 230°C. Les inclusions fluides isolées, dont la taille atteint 20 à 30 µm, homogénéisent aux températures les plus basses (143-177°C).

I. 3. 3. 3- Le granite de Teyssieu (SM21)

Dans cet échantillon ont été enregistrées les températures les plus élevées ; elles dépassent les 300°C (Fig. V-27). Excepté quelques inclusions isolées (Th < 220°C), l'ensemble homogénéise à des températures entre 320° et 380°C, avec un premier mode à 370°C dans les inclusions Vw (PIF à N140°E) et quelques inclusions du PIF N-S, et un deuxième à 330°C qui correspond, principalement, aux inclusions isolées et aux inclusions Lw des PIF à N140°E (Fig. V-27). Les Th des Vw restent apparemment un peu sous-estimées.

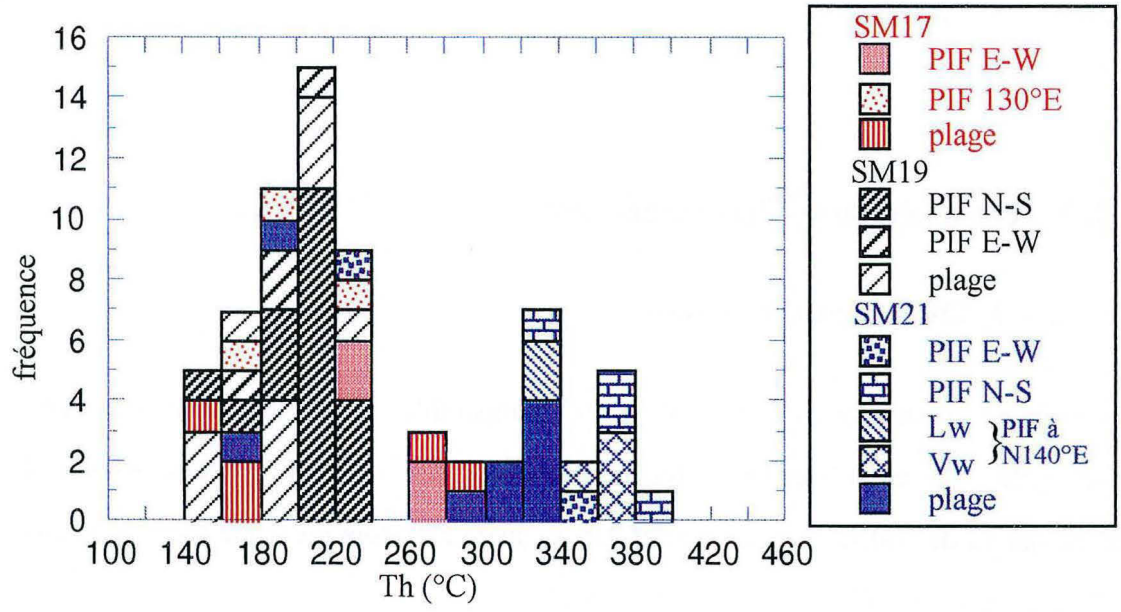


Fig. V-27 - Histogramme des Th des inclusions fluides dans les échantillons du transect du Grand Fraud.

I. 3. 3. 4- Synthèse

L'ensemble des Th, mesurées dans ce transect, est reparti en deux groupes ; un premier groupe basse température (Th<240°C) constitué par la lentille de quartz (SM17) et la

pegmatite (SM19), et un deuxième groupe, plutôt à Th élevée (Th > 280°C), constitué par les inclusions fluides du granite (SM21).

II- LA COMPOSITION DES FLUIDES

II. 1- LA COMPOSITION DE LA PHASE VOLATILE : RAMAN

La microspectrométrie a permis d'identifier, dans un certain nombre d'inclusions aquo-carboniques, les constituants de la phase volatile (CO_2, CH_4, N_2, H_2S) et de les quantifier.

Dans l'échantillon de Puy-des-Angles (SM10), les inclusions Lw-c contiennent 75 à 87 mole % de CO_2, entre 10 et 20 mole % de méthane et moins de 10 mole % d'azote (cf. tableau 2), cependant la phase volatile dans une inclusion de type Lw-(c) est constituée uniquement par le méthane.

Les inclusions aquo-carboniques de la lentille de quartz du site AR116, ont des compositions un peu plus dispersées (Fig. V-28 ; tableau 4), avec une teneur en CO_2 élevée dans l'inclusion Vw-c (93 mole %) par rapport aux inclusions Lw-c qui en contiennent 70 à 81 mole % ; cette tendance est inversée dans le cas de CH_4, qui est beaucoup exprimé dans les Lw-c (16-29 mole %) que dans Vw-c (<7 mole %) ; cependant la teneur en azote est similaire dans les deux types d'inclusion, où elle est inférieure à 5 mole %.

Les deux types d'inclusions aquo-carboniques identifiés auparavant (Lw-c_1, Lw-c_2) dans le granite de Millevaches (SM54), ne montrent pas de différences significatives de la composition de leurs phases volatiles (Fig. V-28 ; tableau 1) ; elles sont caractérisées par une forte dominance du CO_2 (>92 mole %), une teneur en méthane très constante (~2 mole %) et un peu plus faible que l'azote dont la teneur atteint 5 mole %.

Dans les inclusions de l'échantillon SM60, la composition de la phase volatile est relativement proche de celle des inclusions du granite de Millevaches, avec une léger enrichissement en méthane (6-10 mole %) au dépens du CO_2 (autour de 90 mole %).

Dans l'ensemble, les fluides aquo-carboniques du domaine d'Argentat sont plus riches en méthane qu'en azote (Fig. V-28) ce qui contraste fortement avec les fluides du secteur de St-Yrieix (CO_2>>N_2>CH_4) qui dessinent un trend plutôt CO_2-N_2 (voir Chap. III § III-1.1). On remarque aussi:

(i) que les fluides les plus riches en méthane sont ceux dont la phase aqueuse est calcique ;

(ii) qu'en chaque points on semble avoir un mélange entre un fluide CH_4-N_2 et un fluide CO_2-CH_4 très riche en CO_2.

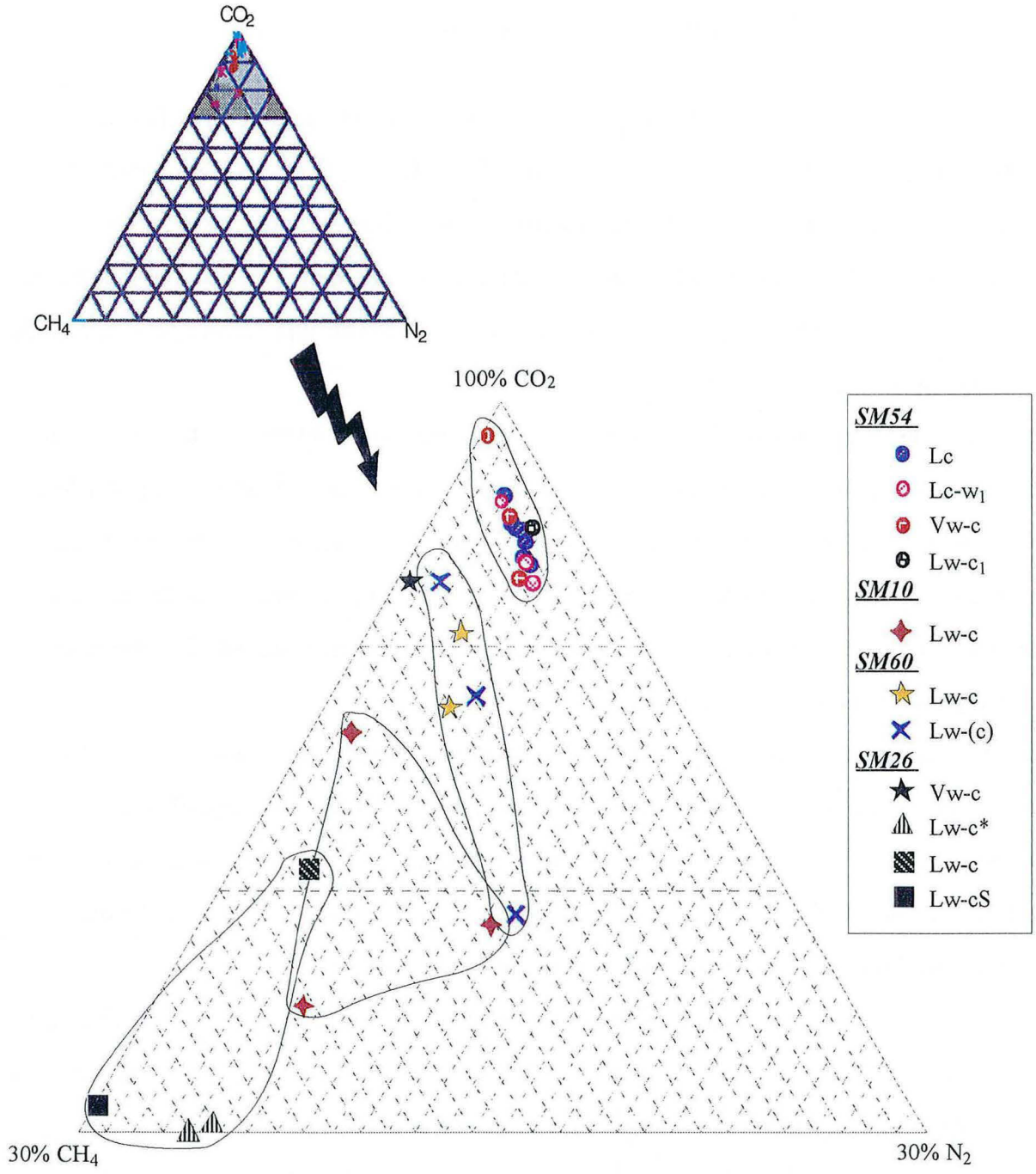


Fig. V-28 - Diagramme ternaire CO_2-CH_4-N_2 de la composition de la phase volatile obtenue par microspectrometrie Raman dans le domaine d'Argentat (: PIF plat)*

II. 2- LA COMPOSITION TOTALE

A partir des données de microthermométrie et des analyses en microspectrometrie Raman de la phase volatile, la composition totale des inclusions aquo-carboniques a été calculée en utilisant le programme "Ice" (Bakker, 1997) (Tableau 5, Fig. V-29)

Pour l'ensemble des inclusions fluides les teneur en CH_4 et N_2, sont inférieures à 2 mole % (Fig. V-29 A), et la salinité est faible (Fig. V-29 B, C) ; cependant la teneur en H_2O et CO_2 est relativement variable (Fig. V-29) :

Dans l'ensemble, ces fluides sont riches en eau ($X_{H2O} \geq 0.85$, mode autour de 0.95) et leur caractère hétérogène se verifie quand on examine les salinités (Fig. V-29 C), avec des fluides peu salés (SM54 : Lc-w_1 ; SM10), d'autres modérément salés (SM60), d'autres enfin à salinité variable (SM26).

Echantillon	typologie	H2O	CO2	CH4	N2	NaCl
SM54	Lc-w1	97.02	2.61	0.04	0.06	0.28
		95.32	4.34	0.06	0.10	0.18
	Lw-c1	88.75	10.20	0.11	0.28	0.66
	Vw-c	86.85	12.10	0.31	0.45	0.29
		90.74	8.23	0.12	0.15	0.77
SM60	Lw-c	94.72	3.69	0.11	0.06	1.43
		92.03	6.40	0.35	0.19	1.02
		95.00	3.43	0.07	0.04	1.47
	Lw-(c)	95.00	3.74	0.11	0.08	1.06
SM26	Vw-c	87.44	11.41	0.67	0.05	0.44
	Lw-c*	93.97	4.51	0.85	0.16	0.51
		93.66	4.67	0.96	0.14	0.57
	Lw-c	93.75	4.57	0.52	0.09	1.07
	Lw-cS	95.43	2.65	0.30	0.00	1.62
SM10	Lw-c	92.44	6.28	0.54	0.49	0.25
		93.37	5.44	0.80	0.22	0.17
		92.22	6.95	0.60	0.07	0.15

Tableau 5 - Composition totale des inclusions fluides aquo-carboniques du domaine d'Argentat (en mole %).

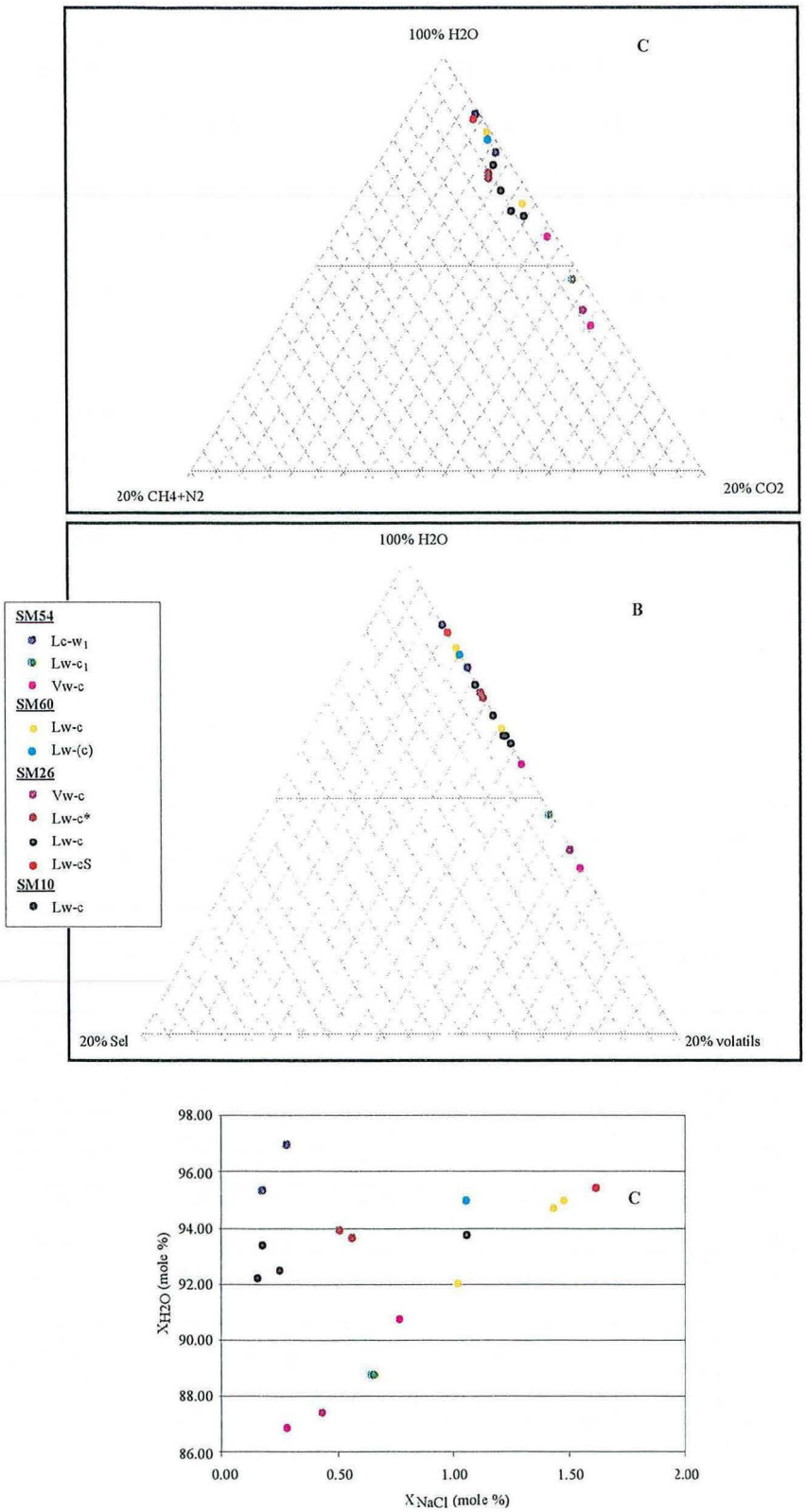


Fig. V-29 - Diagrammes ternaires H2O-CO2-CH4+N2 (A) et H2O-volatils-salinité (B), et le diagramme binaire X_{H2O}-X_{NaCl} de la composition totale des inclusions fluides aquo-carboniques (en mole %)

III- INTERPRETATION

Les diagrammes de corrélation Tfg-Th ont été établis site par site (Fig. V-30 à V-35), sans qu'il en ressorte de tendances aussi claires que pour les fluides de la région de St-Yrieix. Néanmoins, il semble possible de dégager des regroupements significatifs.

III. 1- LES FLUIDES AQUO-CARBONIQUES

Considérés tous ensembles, les fluides aquo-carboniques (Fig. V-36) se regroupent d'une façon très semblable à celles de leurs homologues de St-Yrieix, à l'exception notable, toutefois, des inclusions Lc-w_2 et Lw-c_2 du granite de Gimel (SM54). On peut donc proposer ici une interprétation analogue, en termes de dilution progressive par un fluide aqueux modérément salé, en accord avec les données sur la composition de ces fluides (cf. Fig. V-29).
De même, comme le montre la figure V-37, la distribution des isochores des inclusions aquo-carboniques de la faille d'Argentat est également compatible avec une interprétation en termes de chute de pression à température faiblement décroissante. De façon un peu plus précise :

(i) dans le secteur de Gimel (SM54, Fig. V-37), les inclusions Lw-c_1 et Vw-c sont trouvées ensemble, et leurs isochores ont pratiquement la même origine, ce qui est en faveur de leur interprétation en termes de démixtion d'un fluide aquo-carbonique homogène, qui en retour, fixe une pression et une température, respectivement, à 600 bar et 400°C, très comparable aux estimations faites dans le secteur de St-Yrieix. Notons, cependant, que les isochores les plus plats (Fig. V-37) suggéreraient que la chute de pression se soit poursuivie jusque vers 300 bar. D'un autre côté, en supposant que les inclusions Lc soit piégées à une pression supérieure à la pression lithostatique de démixtion, ce qui est possible, car on doit les considérer comme précoce dans une évolution par dilution, on voit donc, sur la figure. V-37 qu'elles auraient été piégées à des $P \geq 1.7$ kbar et $T \geq 420°C$;

(ii) dans l'échantillon SM26, au contraire, les inclusions Vw-c sont isolées au sein de PIF à Lw-c, ce qui suggère (comme pour les PIF à N110-130°E de l'échantillon CFM41 à St-Yrieix) un rééquilibrage partiel de ces PIF lors de la décompression. On voit sur la figure V-37, que pour l'une de ces inclusions Vw-c, d'une taille de 12 µm (soit une pression de décrépitation ≥ 1.5 kbar d'après l'équation de Vityk et Bodnar, 1995), cela signifierait qu'elle ait évolué à partir de conditions initiales à une pression supérieure à 2 kbar (Pmin, Fig. V-37) et une température supérieure à 400 °C, bien compatibles avec l'évolution P-T proposée ci-dessus.

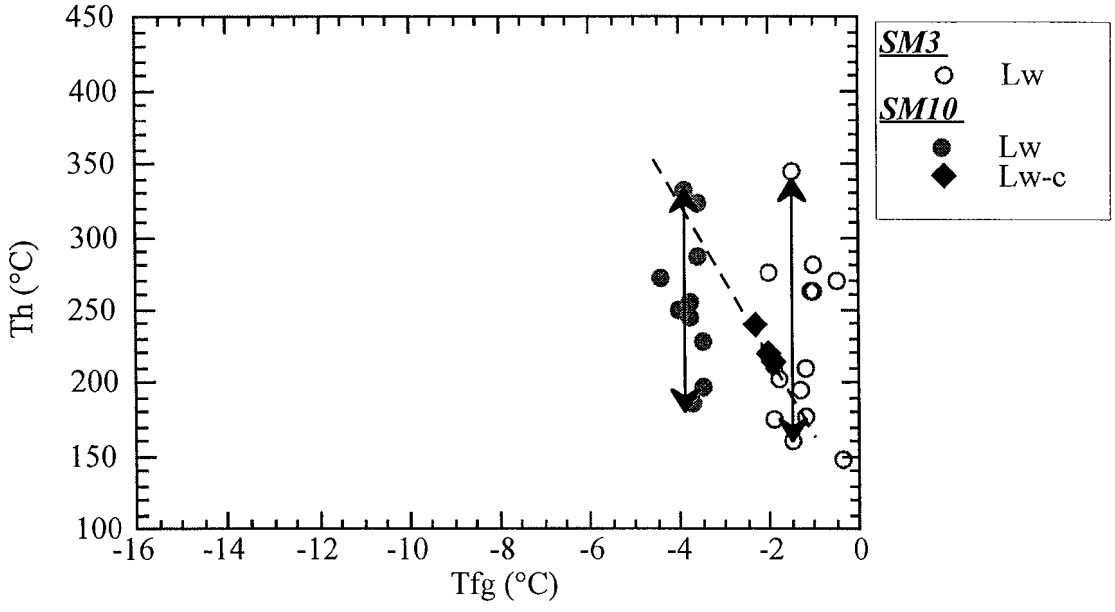


Fig. V-30 - Diagramme Tfg-Th des inclusions aqueuses et aquo-carboniques dans le secteur du Maupas (SM3) et de Puy-des-Angles (SM10)

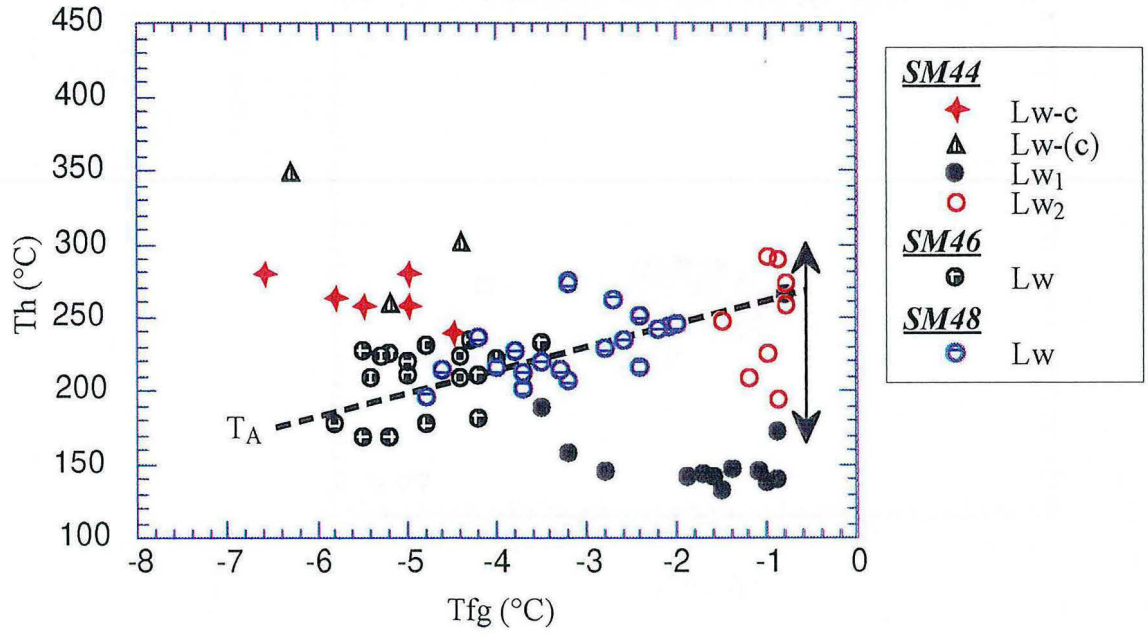


Fig. V-31 - Diagramme Tfg-Th des inclusions aqueuses et aquo-carboniques dans le transect II

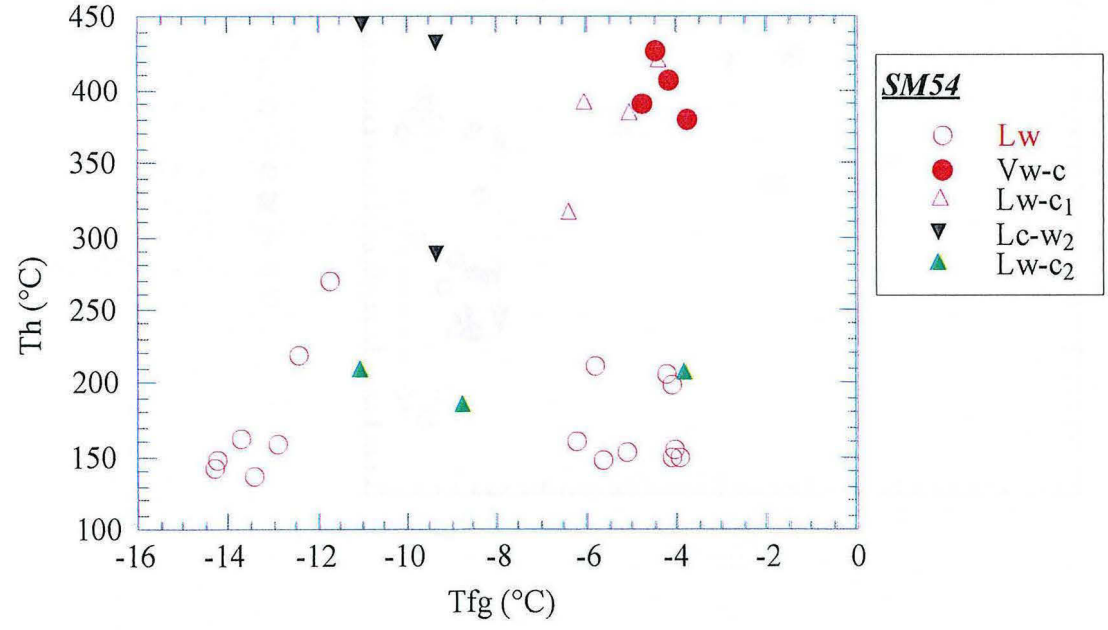


Fig. V-32 - Diagramme Tfg-Th des inclusions aqueuses et aquo-carboniques dans l'échantillon SM54 (secteur de Gimel)

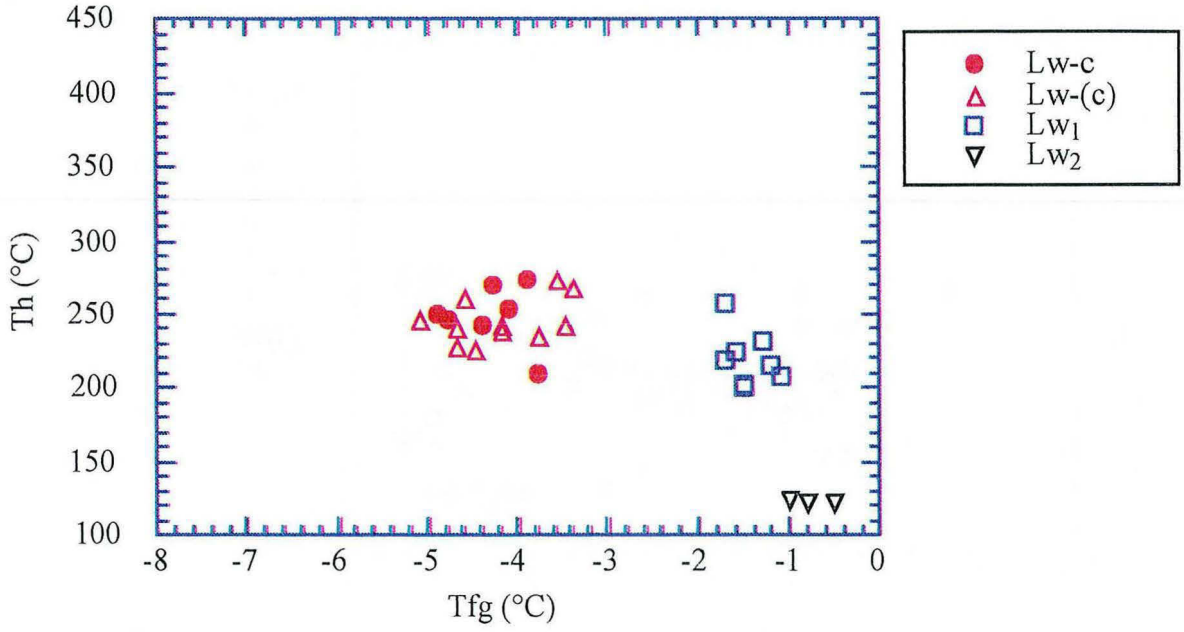


Fig. V-33 - Diagramme Tfg-Th des inclusions aqueuses et aquo-carboniques dans l'échantillon de micaschistes SM60

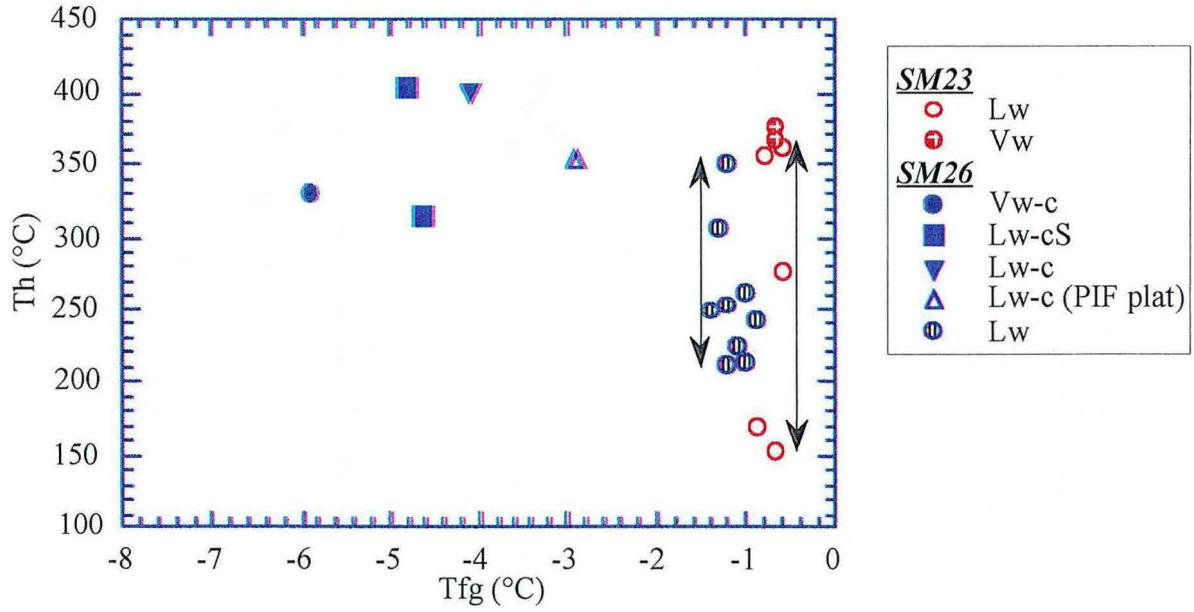


Fig. V-34 - Diagramme Tfg-Th des inclusions aqueuses et aquo-carboniques dans le secteur d'Argentat; structure minéralisée (SM23) et son encaissant (SM26)

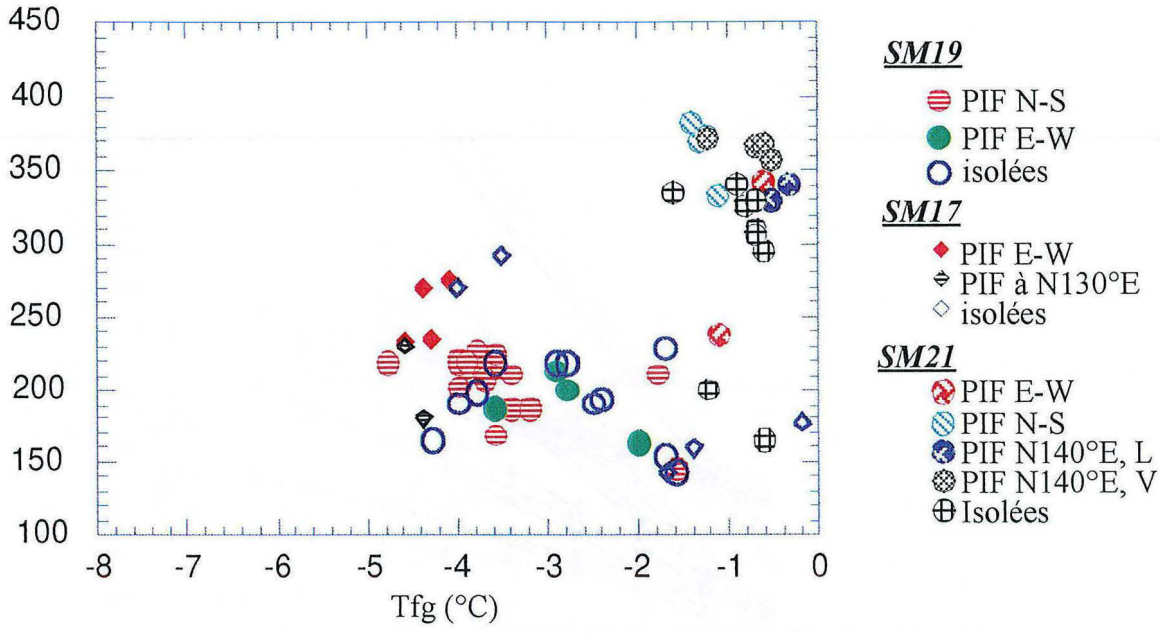


Fig. V-35 - Diagramme Tfg-Th des inclusions aqueuses des différents échantillons du transect du grand Fraud

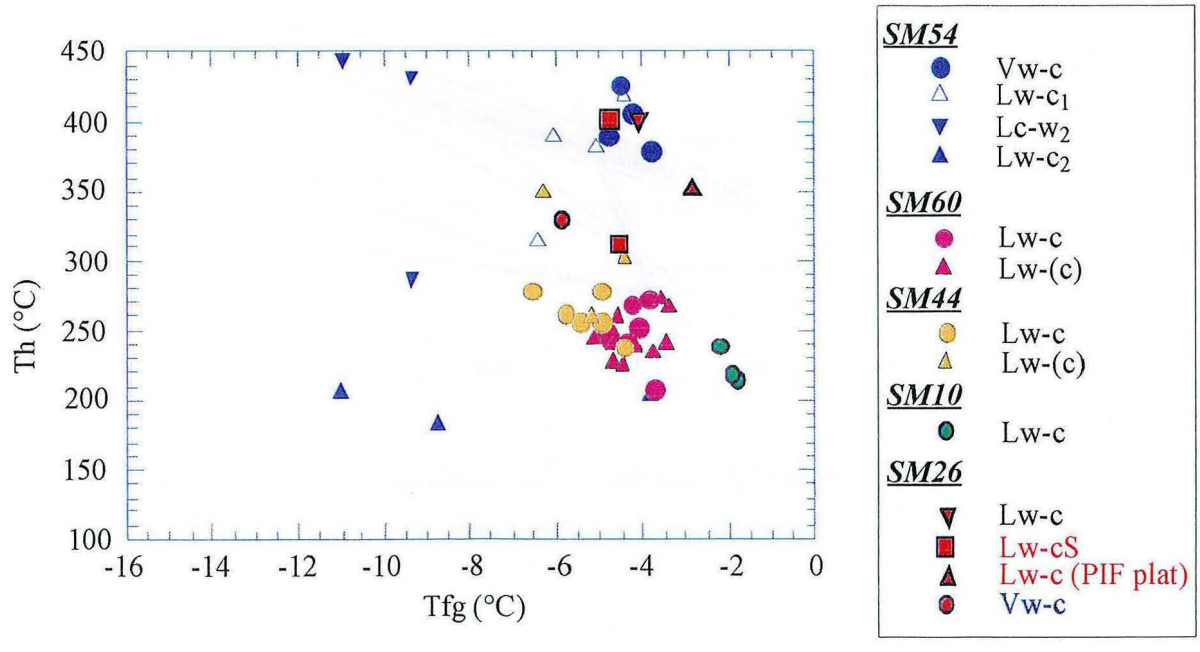


Fig. V-36 - Diagramme synthétique des Tfg-Th de l'ensemble des inclusions aquo-carboniques dans les différents échantillons

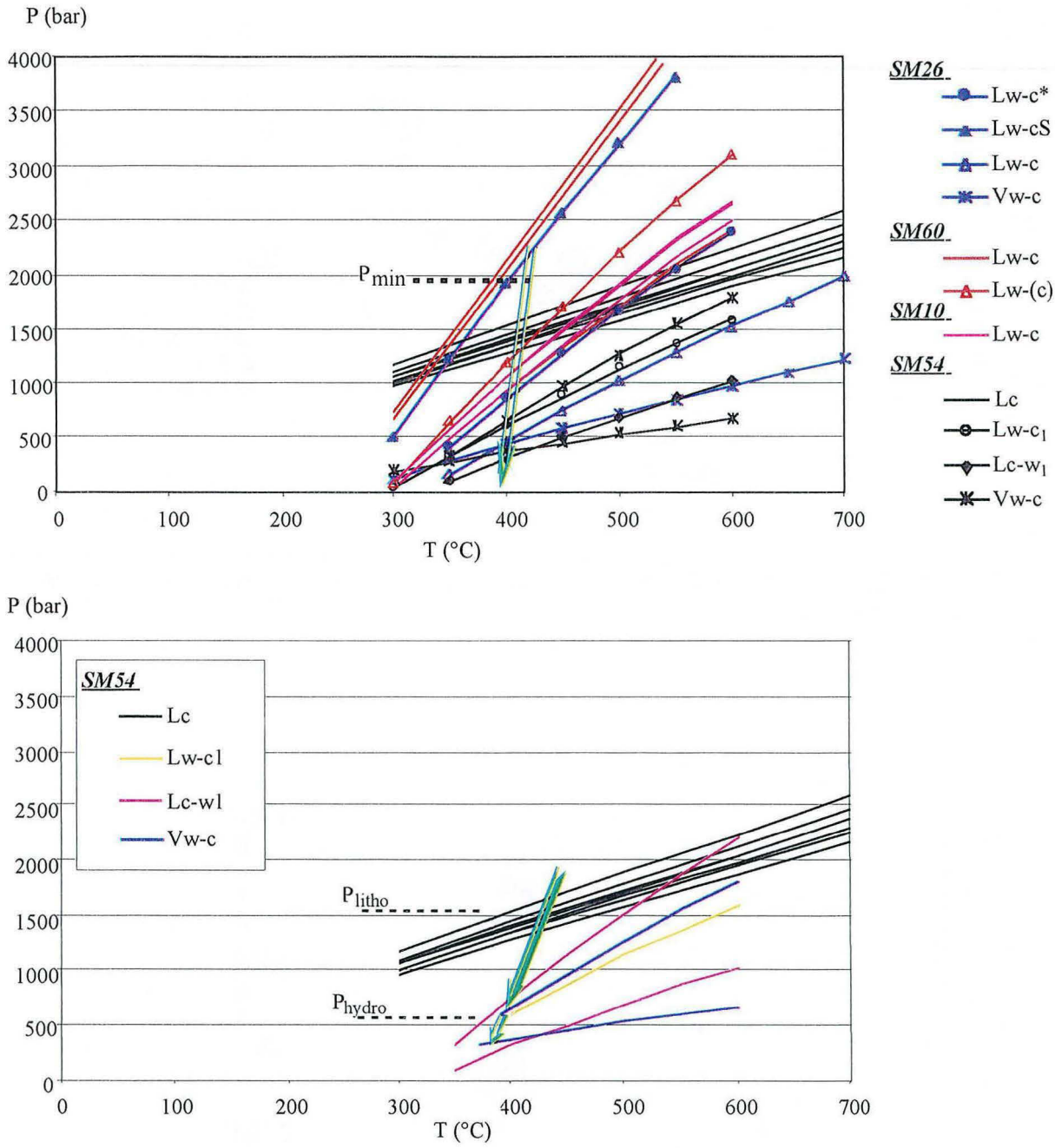


Fig. V-37 - Modèle d'interprétation des isochores des inclusions aquo-carboniques dans les différents échantillons

III. 2- LES FLUIDES AQUEUX

Il ressort des figures II-30 à II-35 que l'on peut regrouper les fluides aqueux d'Argentat en trois groupes :

(i) Le premier groupe bien visible (Fig. V-30), correspond aux fluides aqueux du Maupas (SM3) et, surtout, de Puy-des-Angles (SM10) ; qui dessinent un "trend" voisin de celui des inclusions aquo-carboniques (cf. Fig. V-36), et que l'on peu donc interpréter comme des homologues des fluides du "trend" T2 du secteur de St-Yrieix, ce qui paraît d'autant plus vraisemblable qu'à Puy-des-Angles (SM10), ces fluides aqueux paraissent plus précoces que des inclusions Lw-c. Ils prolongeraient donc, à Argentat comme à St-Yrieix, le "trend" évolutif" des fluides aquo-carboniques, à température décroissante.

(ii) La figure. V-31 montre l'existence d'un "trend" de mélange (T_A), entre un pôle à faibles Th et Tfg et un pôle à Th plus élevée et forte Tfg, qui est bien caractérisé dans les échantillons SM44, 46 et 48. Comme on peut le voir sur la figure V-38, ce "trend" semble bien réel à l'échelle du domaine d'Argentat, puisqu'il intègre plus de 75 % de l'ensemble des inclusions aqueuses observées, et en particulier, les inclusions Lw froides (Th ~ 150°C) et salées (Tfg de l'ordre de -14°C, soit une salinité d'environ 18 % poids éq. NaCl) du secteur de Gimel (SM54).

Ce "trend" ressemble beaucoup au "trend" T1 du secteur de St-Yrieix (cf. Partie St-Yrieix Chap II, Fig. V-28), à ceci près qu'il est inversé ; en particulier, comme à St-Yrieix, on observe une dispersion intrinsèque des Th dans une bande étroite, suggérant que le mélange des fluides froids et salés avec des fluides chauds de faible salinité s'est produit dans un contexte de pression fluctuante.

(iii) Le troisième groupe rassemble les résidus des regroupements précédents, il s'agit dans l'ensemble de fluides de faible salinité (Fig. V-38), dont certains ont des Th élevées (jusqu'à environ 330°C, en négligeant les effets d'un probable "necking-down") et d'autres au contraire, ont des Th très basses.

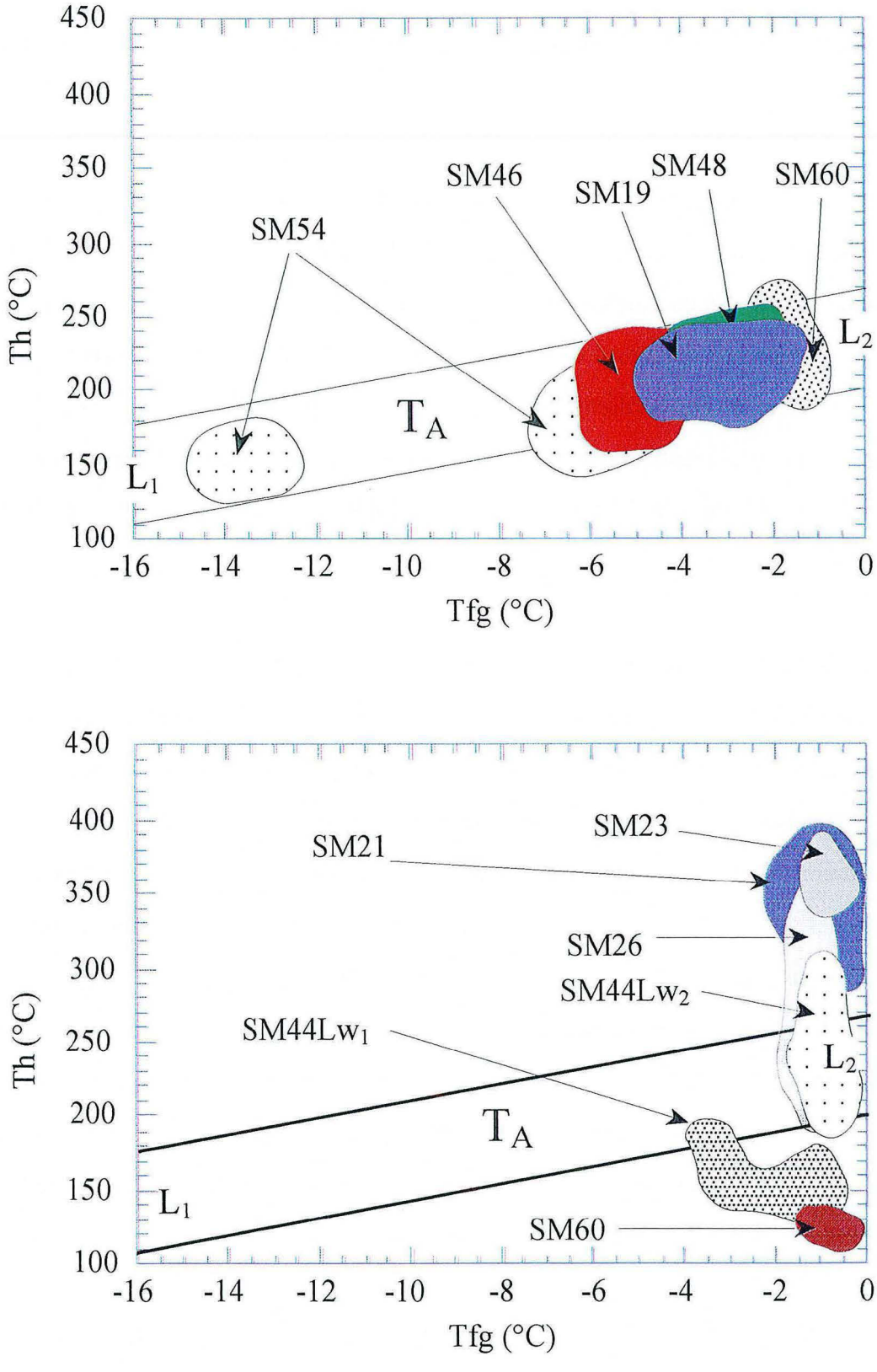


Fig. V-38 - Synthèse des données des Tfg-Th de l'ensemble des inclusions aqueuses, mettant en évidence le "trend" T_A (L1-L2) et un groupe de fluide de faible salinité hors ce "trend"

IV- CONCLUSION

Le domaine d'Argentat a vu circuler deux grandes familles de fluides :

1- ***Première famille*** : il s'agit d'un ensemble de fluides aquo-carboniques et aqueux riches en CO_2, mais contenant toujours du méthane et de l'azote, de salinité modérée ($\leq$ 8 % poids éq. NaCl), évoluant en contexte de décompression ("uplift") depuis des températures supérieures à 420°C et des pressions (lithostatiques) supérieures à 2 kbar jusqu'à 400°C et 0.6 kbar (ou même moins).

La tendance générale est à la dilution ou la perte de gaz de la composante aquo-carbonique, pour finir par des fluides aqueux, mais tout indique que les phénomènes sont plus complexes :

(i) *des fluides purement aqueux ont pu être piégés avant certains fluides aquo-carboniques (Puy-des-Angles : Lw et Lw-c dans SM10, cf § II-1) ;*

(ii) *il existe clairement deux lignées, avec d'une part des fluides à NaCl seul (ou dominant) et, d'autre part, des fluides où les cations non monovalents (probablement Ca) sont significativement présents.*

Les données disponibles sont trop éparses pour permettre une déconvolution des processus, mais suggèrent la récurrence des processus de dilution dans le système d'Argentat.

2- ***Deuxième famille*** : c'est un ensemble de fluides purement aqueux, à NaCl dominant, correspondant au mélange entre deux pôles hydrothermaux, l'un (L1) froid et relativement salé ($\geq$ 18 % poids éq. NaCl), l'autre (L2) chaud et très peu salé ($\leq$ 1.7 % poids éq. NaCl). Ce mélange anisotherme se produit à pression fluctuante, vraisemblablement entre des valeurs hydro- et litho- statiques, ce qui se traduit par une gamme de Th compatible avec les valeurs de la fin de l'évolution des fluides aquo-carboniques (0.6-1.6 kbar).

Ces deux familles se sont succédées dans le domaine d'Argentat :

(i) les fluides du premier groupe ont commencé à circuler précocement, dans les joints correspondant au début de l'évolution tectonique ;

(ii) les fluides du deuxième groupe sont essentiellement présents dans les joints correspondant aux régimes de raccourcissements alternativements "E-W" et "N-S".

(iii) la transition se fait tardivement, au cours de cette dernière phase, comme le montre le site de Puy-des-Angles (SM10), où des inclusions aquo-carboniques sont piégées dans des veinules de quartz (Q_4) créées dans les conditions de raccourcissement à N10°E (cf. Chap IV, § II. 2)

On remarque que, de même que les déformations les plus précoces caractérisent plutôt le Nord et le Centre de notre domaine d'étude, et les déformations tardives, la région méridionale ; de même, la circulation de fluides aquo-carboniques paraît s'être limitée au segment Nord-Centre, tandis que les fluides du "trend" L1-L2, bien que présents sur tout le domaine, semblent avoir surtout circulé au Sud.

Enfin, on observe que le premier épisode distensif (distension "N-S") s'est produit pendant la circulation des fluides aquo-carboniques : il semble donc possible d'attribuer une partie de la chute de pression observée à la tectonique en distension.

CHAPITRE VI

CONCLUSION GENERALE : COMPARAISON DES DOMAINES DE ST-YRIEIX ET D'ARGENTAT ; D'OU VIENNENT LES FLUIDES AURIFERES?

I- COMPARAISON DES DOMAINES DE ST-YRIEIX ET D'ARGENTAT

I. 1- LES POINTS COMMUNS : NATURES DES FLUIDES ET EVOLUTION P-T-t

De façon générale, les mêmes fluides ont circulé dans les domaines de St-Yrieix et d'Argentat, avec les mêmes caractéristiques d'ensemble et la même histoire :

(i) des fluides aquo-carboniques précoces ont circulé à haute température ($\geq$ 420-450°C) et pression, mais en contexte de décompression ("uplift"), depuis des profondeurs d'au moins 10 km (P>2 kbar) ;

(ii) en liaison avec une tectonique en extension, le régime de pression est passé de lithostatique à hydrostatique (ou plus exactement, à une alternance litho/hydro-statique) quand le Sud Limousin a atteint une profondeur de l'ordre de 5-6 km ; de façon corrélative, des fluides aqueux, d'origine superficielle (?) (en tout cas, très peu salés : < 2% poids éq. NaCl) envahissent les drains hydrothermaux et diluent les fluides aquo-carboniques ;

(iii) en continuité immédiate, et dans le même régime de pression, une deuxième phase de circulation hydrothermale se marque par des fluides aqueux de salinité et de température variables, car résultats d'un mélange anisotherme entre deux pôles de salinités très contrastés, un pôle L1 à plus de 18 % poids éq. NaCl, et un pôle très peu salé (< 2 % poids éq. NaCl).

Cependant, il existe ici une étonnante dissymétrie entre les deux domaines :

- à St-Yrieix, le pôle L1 est chaud (jusqu'à 420°C) et le pôle L2 est froid (< 200°C) ;
- tandis qu'à Argentat, c'est le contraire, avec le pôle L1 froid (<200°C) et le pôle L2 chaud (environ 300°C).

Rappelons que, dans le domaine de St-Yrieix, il a été démontré que L2 est un fluide à bas $\delta^{18}O$, typique d'une eau météorique plus ou moins échangée ; tandis que L1 a la signature (autour de + 9 ‰) d'un fluide profond et est probablement le vecteur de l'or (e.g., Boiron *et al.*, 2000 ; Fourcade *et al.*, 2000).

I. 2- LES DIFFERENCES : INTENSITE DU DRAINAGE

Malgré les ressemblances certaines au niveau microscopique, essentiellement la remarquable concordance des directions des principaux groupes de microfractures à valeur de drain dans les deux cas, les domaines d'Argentat et de St -Yrieix présentent de grandes différences :

(i) la plus évidente réside dans la nature du contrôle structural majeur : une faille normale à N160°E, dans l'ensemble peu silicifié, pour Argentat ; un ensemble de chevauchements à N50-60°E (Nicaud et Floc'h, 2000) assez plats et fortement silicifiés à St-Yrieix (même si la mise en évidence par la sismique de l'existence d'une faille normale qui les recoupe à Lauriéras vient atténuer ce constat) ;

(ii) la déformation à l'échelle méso- à micro- scopique, créatrice des drains hydrothermaux, est à la fois plus hétérogène et moins pénétrative dans le domaine d'Argentat que dans le secteur de St -Yrieix ;

(iii) même dans les structures majeures de drainage (accidents mégascopiques), la minéralisation est dans l'ensemble beaucoup plus diffuse et irrégulièrement répartie dans le domaine d'Argentat ;

(iv) le stade sulfuré polymétallique (qui accompagne l'or à St -Yrieix) est très peu et mal exprimé dans le domaine d'Argentat, et on sait bien que l'or n'y est présent qu'à l'état d'indice (Bouchot *et al.*, 1997)

Cette conclusion est renforcée par l'étude de la distribution des inclusions fluides : par rapport au système de St-Yrieix, les PIF porteurs des différentes générations de fluides sont beaucoup moins fréquents et beaucoup plus erratiques dans le domaine d'Argentat :

(i) comme à St-Yrieix, les fluides aquo-carboniques sont moins bien représentés dans l'encaissant d'Argentat que les fluides aqueux ; mais alors qu'à St-Yrieix ces fluides sont abondants dans les grandes structures de drainage, il n'en va pas de même à Argentat ;

(ii) le contraste est beaucoup plus fort pour l'épisode L1-L2 que l'on retrouve de façon pénétrative à St-Yrieix, aussi bien dans les structures minéralisées (stade aurifère) que dans l'encaissant régional, et qui reste marqué de façon épisodique et discontinue dans l'ensemble de la structure d'Argentat.

Au total, il semble que l'emprise de la faille d'Argentat ait été beaucoup moins efficace en terme de drainage des flux hydrothermaux que le système des "shear zones" du domaine de St -Yrieix.

II- INTERCONNECTION DES SYSTEMES DE ST-YRIEIX ET D'ARGENTAT

II. 1- REALITE DE L'INTERCONNECTION

Les failles normales E-W, et les joints en extension associés, représentent le lien potentiel le plus évident, en terme de circulations fluides, entre les systèmes de St-Yrieix et d'Argentat ; et ce d'autant plus que dans le domaine de St-Yrieix, les épisodes minéralisateurs sont précisément associés à des circulations fluides dans les drains E-W associés à de la distension (Essarraj, 1992).

De ce point de vue, trois faits semblent significatifs dans le domaine de la faille d'Argentat :

(i) l'importance apparemment croissante du développement des couloirs de faille E-W quand on va vers le Nord, c'est à dire que l'on se déplace vers l'axe de l'antiforme de Meuzac, le long duquel se propage l'anomalie régionale en arsenic qui témoigne de la connection entre les deux systèmes (Roig *et al.*, 1997). C'est une lacune du présent travail que de ne pas avoir poussé les investigations au Nord du secteur Gimel / Maupas, pour savoir si cette tendance se vérifie.

(ii) la relation qui semble exister, en un point donné, entre le développement des failles E-W et le début des circulations hydrothermales minéralisantes, avec des manifestations arseniées (arsénopyrite, pyrite arseniée). Si cette relation a bien le caractère général que nos observations semblent lui attribuer, cela signifie de plus que la connection St-Yrieix / Argentat n'est réalisée qu'à ce stade, c'est à dire que l'arsénopyrite de la faille

d'Argentat se corrèle avec l'arsénopyrite II de St-Yrieix et non avec l'arsénopyrite I associée aux fluides les plus précoces (Essarraj, 1992 ; Essarraj *et al.*, 2001).

(iii) les couloirs E-W, ou les microfractures associées, semblent absentes de la zone de la faille d'Argentat proprement dite (le couloir N160°E qui a fonctionné d'abord en faille normale "raide" puis en décrochement). De sorte que si une connection s'est réalisée entre les deux domaines de St-Yrieix et d'Argentat, il est moins évident qu'elle se soit faite directement avec le drain spécifique que pouvait représenter la faille d'Argentat. Ici encore des observations complémentaires seraient nécessaires pour donner à cette donnée une valeur vraiment générale.

Il existe donc de bonnes raisons géométriques de penser que les deux systèmes se soient interconnectés à un moment donné de leur histoire. Si l'on considère de plus que les fluides aqueux qui ont circulé sont *a priori* les mêmes (pôle L1 salé, en particulier), cette conclusion est renforcée.

II. 2- SENS DE L'INTERCONNECTION

Dans l'ensemble, les observations microstructurales effectuées au cours de notre étude ne vont pas dans le sens d'une focalisation d'importants flux hydrothermaux le long de la faille d'Argentat, d'où ils auraient diffusé dans le "réservoir" constitué par l'Unité des Gneiss inférieurs le long de l'antiforme de Meuzac, comme envisagé jusqu'ici (Bouchot et al., 1997 ; Roig et al., 1997).

Les données que nous avons rassemblées et interprétées vont plutôt dans le sens d'une liaison en sens inverse, depuis les zones minéralisées de St-Yrieix, vers le domaine de la faille d'Argentat. En particulier, dans la mesure où ce serait L1 (en tant que fluide potentiellement minéralisateur) qui devrait être drainé d'Argentat vers St-Yrieix, on comprend mal, dans ce modèle, que ce soit à Argentat que ce pôle L1 soit le plus froid, on attendrait volontiers l'inverse.

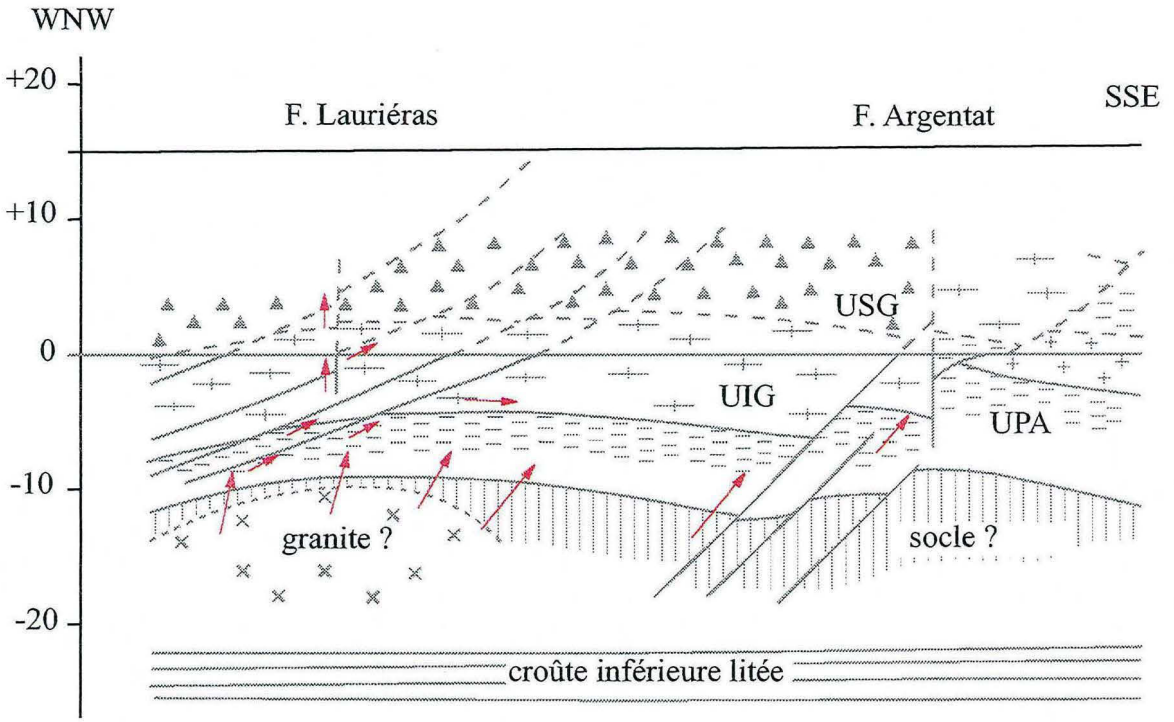
II. 3- VERS UN MODELE REGIONAL DE CIRCULATION DES FLUIDES

A partir des profils sismiques interprétés pendant le programme GeoFrance 3D (Bitri *et al.*, 1999 ; Truffert *et al.*,1999 ; Bellot *et al.*, 2000), il est possible, sur la base des données rassemblées dans ce travail, de proposer un schéma général de circulation des fluides dans le bâti Sud Limousin au carbonifère supérieur (voir aussi Marignac *et al.*, 2000) :

(i) au stade précoce de circulation des fluides aquo-carboniques (fig. VI-1), les fluides sont draînés par des structures majeures plus ou moins enracinées dans la croûte moyenne ; le drainage est beaucoup plus intense dans le secteur de St-Yrieix, suggérant que la source des fluides est plutôt localisée en profondeur sous le district, là où une "zone transparente" laisse penser à l'existence d'une vaste masse granitique (Bellot *et al.*, 2000) ;

(ii) suite aux premières manifestations de la tectonique distensive N-S (vers 305 Ma ?), un réseau de microfractures interconnectées se développe dans la croûte supérieure, et notamment l'Unité Inférieure des Gneiss, et autorise la circulation pervasive des fluides associés à la minéralisation aurifère (fig. VI-2). A la faveur de cette microfracturation, en effet, se produit le mélange entre deux réservoirs de fluides (Boiron *et al.*, 2000) : le réservoir "météorique" superficiel, pour lequel les voies d'accès naturelles sont, de nouveau, les structures majeures (failles normales et failles inverses réactivées) ; et un réservoir profond (fluide L1). Comme il a été démontré au cours de ce travail, le drainage de L1 est beaucoup plus efficace dans le secteur de St-Yrieix que dans le domaine d'Argentat, ce qui suggère, de nouveau, que la source principale de ce fluide salé est localisée sous le district aurifère.

Par rapport à ce modèle conceptuel, nos données relatives au domaine d'Argentat soulèvent, cependant un problème : on comprend que le fluide L1 qui, dans ce modèle, s'éloigne d'un "centre chaud", arrive dans le domaine d'Argentat à des températures beaucoup plus basse que dans les structures minéralisées de St-Yrieix, en revanche il est plus difficile d'expliquer que le fluide météorique L2 y soit le fluide le plus chaud. L'hypothèse la plus simple consiste à supposer que des fluides météorique percolent en profondeur, et après s'être réchauffés remontent rapidement le long de la faille ductile d'Argentat, comme il est représenté sur la figure VI-2. Nous manquons cependant de données au mur de la faille ductile pour confirmer ou infirmer ce modèle.



Structure à partir de l'interprétation des profils sismiques (d'après Bitri *et al.*, 1999)

→ Fluides "pseudo-métamorphique"

USG Unité supérieure des Gneiss

UIG Unité inférieure des Gneiss

UPA Unité du Para-autochtone

STADE I : c. 330 - c. 310 Ma

La fin de la collision varisque

Le niveau actuel était à c. 15 km de profondeur
Pression lithostatique

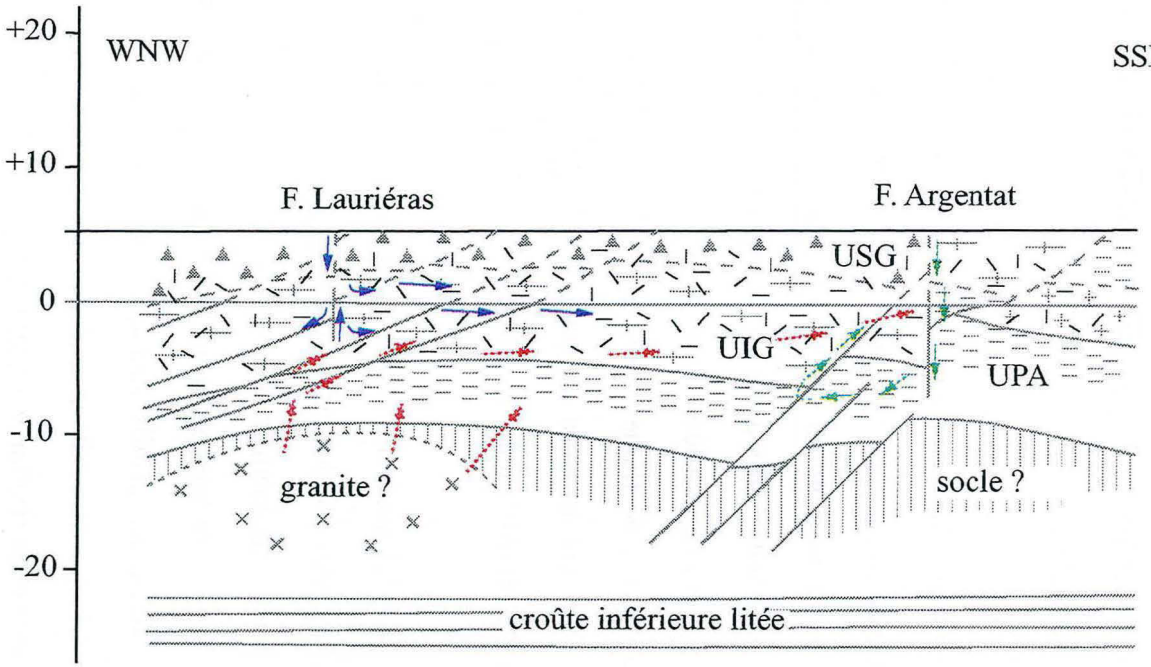
Les fluides sont drainés par des structures majeures ductiles

Les fluides sont aquo-carboniques (C-O-H-N), profonds :

- fluides "pseudo-métamorphiques", en équilibre avec le graphite à $T \geq 450\text{-}500°C$
- transport et dépôt As-S-Fe-(Sb)

Pas de minéralisation aurifère associée à ce stade.

Fig. VI- 1 : Modèle de circulation des fluides dans le bas Limousin à la fin de la collision varisque (stade I 330-310 Ma)



STADE II : c. 305 Ma ?

Résultat de l'extension au carbonifère supérieur

Le niveau actuel était à c. 5 km de profondeur

Transition lithostatique - hydrostatique

Circulation pervasive de fluides aurifères dans UIG à la faveur dans de la tectonique distensive

Deux types de fluides sont drainés par les microfractures :

- fluide "profond", chaud (≥250-300°C) et salé
- fluide météorique "froid" peu salé

Le mélange des deux fluides aboutit au dépôt des minéralisations aurifères

Structure à partir de l'interprétation des profils sismiques (d'après Bitri *et al.*, 1999)

USG Unité supérieure des Gneiss

UIG Unité inférieure des Gneiss

UPA Unité du Para-autochtone

microfracturation

fluides "profonds" (L1)

infiltration d'eau météorique superficielle (L2 St-Yrieix)

circulation du fluide météorique dans l'amprise de la faille d'Argentat (L2 Argentat)

Fig. VI-2 : Modèle de circulation des fluides dans le bas Limousin au stade II (c. 305 Ma)

III- SOURCE DES FLUIDES PROFONDS : UNE HYPOTHESE

Pour aller plus loin dans la compréhension des circulation fluides du Sud Limousin, il peut être utile de rappeler les résultat obtenus au cours du programme GéoFrance 3D dans un autre district aurifère du Massif Central, les Cévennes. Dans ce district :

(i) l'étude des inclusions fluides et des paragenèses (Nomade *et al.*, 1999) a montré que la nature des fluides, l'histoire de leurs circulations et les processus minéralisateurs étaient fondamentalement les mêmes que dans le Sud Limousin ;

(ii) l'étude du contexte structural (Charonnat, 2000) a montré que les indices et petits gisements aurifères étaient localisés dans de petites structures distensives, drainant les fluides profonds eux-mêmes focalisés par le massif granitique de la Borne, plus ancien.

Ces petites structures distensives peuvent être mise en parallèle avec l'épisode de distension généralisée qui accompagne/suit immédiatement, un peu plus au Nord, le grand batholite du Velay (Laumonier *et al.*, 1991). Ce batholite, daté autour de 305 Ma (Respaut *et al.*, 1996 ; Ait Malek, 1997), se surimpose à des migmatites carbonifères plus anciennes, et développe, autour de lui, une intense migmatisation à cordiérite (déstabilisation de la biotite) (Barbey *et al.*, 1999). Il est donc associé à la production de fluides (Dubois, 1992). Les migmatites à cordiérite existent plus au Sud, immédiatement au Nord du granite de la Borne (Weisbrod, 1969), ce qui laisse penser que le batholite vellave (ou des apophyses) se prolonge lui aussi en profondeur vers le Sud.

Il devient alors possible de proposer, pour les minéralisation des Cévennes, le modèle de la figure VI-3, qui attribue la source ultime des fluides profonds aurifères au dégazage du batholite du Velay (ce qui ne préjuge d'ailleurs aucunement de la source de l'or lui même).

On voit immédiatement qu'un tel modèle peut se transposer au Sud Limousin, si l'on admet que l'immense dôme granitique que révèlent les profils sismiques juste sous les districts aurifères s'est mis en place autour de 305 Ma (ce serait un analogue du batholite vellave) et non à 330-335 Ma comme supposé actuellement (Bellot *et al.*, 2000).

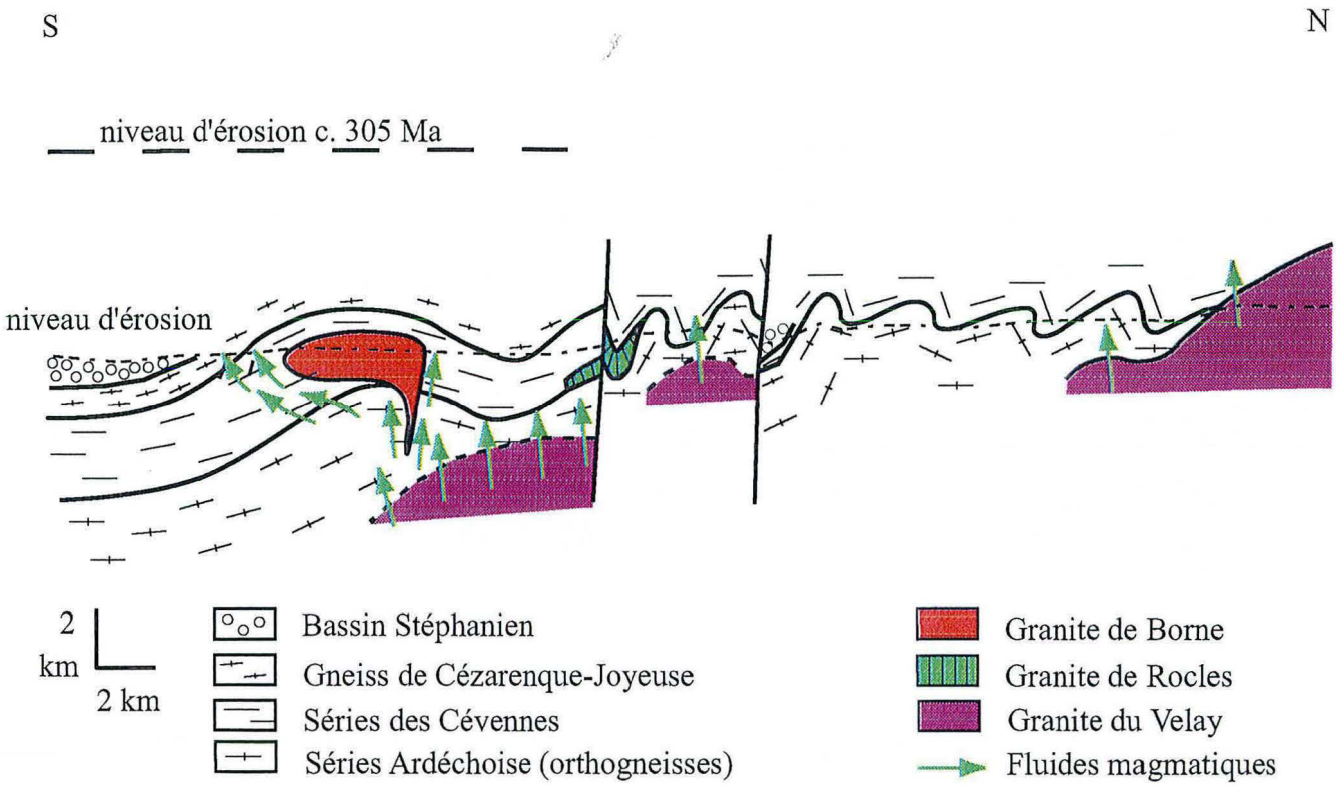


Fig. VI-3 : Modèle de la source des fluides aurifères: cas des Cévennes
(à partir des données de Macaudière *et al.*, 1990 ; Faure *et al.*, 1999 ; Charonnat, 2000)

REFERENCES BIBILOGRAPHIQUES

Ait Malek H. (**1997**) Pétrologie-géochimie et géochronologie U-Pb d'associations acides-basiques : exemple du SE du Velay (MCF) et de l'anti-Atlas occidental (Maroc). *Thèse Univ. INPL, Nancy*. 268p.

Alexandrov P. (**2000**) Géochimie U-Pb et Ar/Ar de deux segments de la chaîne varisque: le Haut Limousin et les Pyrénées orientales. *Thèse Univ. INPL, Nancy*. 186p.

André-Mayer A. S. (**2000**) Fluides et fracturations dans les gisements de type porphyre et épithermal. *Thèse Univ. Henri Poincaré, Nancy*. 340 p.

Arnaud F. (**1997**) 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. *Thèse Univ. INPL, Nancy* 351p.

Arnaud F., et Burg J. P. (**1993**) Microstructures des mylonites schisteuses : cartographie des chevauchements varisques dans les Cévennes et détermination de leur cinématique. *Comptes Rendus Académie des Sciences, Paris,* **317**, pp. 1441-1447.

Atkinson B. K., et Meredith P. G. (**1987**) The theory of subcritical crack growth with applications to minerals and rocks. In *Fracture Mechanics of Rocks* ed, pp. 111-166.

Autran A., et Cogné J. (**1980**) La zone interne de l'orogène varisque dans l'Ouest de la France et sa place dans le développement de la chaîne hercynienne. In Géologie de l'Europe.-26 C.G.I. *Mémoire BRGM*, **108**, pp. 90-111.

Bakker R. J. (**1997**) Clathrates: computer programs to calculate fluid inclusion V-X properties using clathrate melting temperature. *Computers and Geosciences*, **23**, pp. 1-18.

Bakker R. J. (**1999**) Adaptation of the Bowers and Helgeson (1983) equation of state to the H2O-CO2-CH4-N2-NaCl system. *Chemical Geology*, **154**, pp. 225-236.

Barbey P., Marignac C., et Jabbori J. (**1999**) Cordierite Growth Textures and the Conditions of Genesis and Emplacement of Crustal Granitic Magmas: the Velay Granite Complex (Massif Central, France). *Journal of petrology.*, **40**, pp. 1425-1441.

Bellot J. P., Roig J. Y., TRuffert C., Bouchot V., Bitri A., Courrioux, Ledru P., et Milési J. P. (**2000**). Relationschips between As-Au hydrothermal paleofield and crustal scale structures : the case study of the St-Yrieix gold field (Limousin French Massif Central). *"Geode-GeoFrance 3D Workshop". 7-8 Novembre*, Orléans, *Document BRGM,* **297**, pp. 68-67.

Bernard-Griffiths J. (**1975**) Essai sur la signification des âges au strotium dans une série métamorphique: le Bas Limousin (Massif Central français). *Thèse 3ème Cycle Clermont Ferrand.* 243 p.

Bernard-Griffiths J. D. G., M. Grünenfelder et M. Piboule, (**1985**) The tonalite belt of Limousin (French Central Massif): U-Pb zircon ages and geotectonic implications. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **1, 4**, pp. 459-622.

Berthelsen A. (**1992**). Mobile Europe. In *F. R. Blundell D., Mueller S.* (Eds.), A continent revealed. The European geotraverse. (pp. 11-32). *Cambridge University Press.*

Bitri A., Truffert C., Bellot J. P., Bouchot V., Ledru P., Milési J. P., et Roig J. Y. (**1999**) Imagerie des paleochamps hydrothermaux As-Au-Sb d'échelle crustale et des pièges associés dans la chaine varisque: sismique réflexion verticale (GéoFrance 3D: Massif central français). *Comptes Rendus Académie des Sciences, Sciences de la terre et des planètes*, **329**, pp. 771-777.

Bodnar R. J. (**1993**) Revised equation and table for determining the freezing point depression of H2O-NaCl solutions. *Geochimica Cosmochimica Acta*, **57**, pp. 683-684.

Bodnar R. J., Binns P. R., et Hall D. L. (**1989**) Synthetic fluid inclusions. VI. Quantitative evaluation of the decrepitation behavior of fluid inclusions in quartz at one atmosphere confining pressure. *Journal of Metamorphic Geology*, **7**, pp. 229-242.

Bodnar R. J., et Vityk M. O. (**1994**). Interpretation of microthermometric data for H2O-NaCl fluid inclusions. In *B. D. Vivo & e. M. L. Frezzotti* (Eds.), Fluid Inclusions in Minerals, Methods and Applications (pp. 117-130.). pub. by *Virginia Tech, Blacksburg, VA.*

Boiron M. C., Essarraj S., Sellier E., Cathelineau M., Lespinasse M., et Poty B. (**1992**) Identification of fluid inclusions in relation to their host microstructuraldomains in quartz by cathodoluminescence. *Geochimica Cosmochimica, Acta*, **56**, pp. 175-185.

Boiron M.-C., Cathelineau M., Banks D., Vallance J., Fourcade S., et Marignac C. (**2000**). Behaviour of fluids in Variscan crust during late Carboniferous: uplifting and fluid mixing, and their consequences on metal transfer and deposition. *"Geode-GeoFrance 3D Workshop". 7-8 Novembre*, Orléans, *Document BRGM*, **297**, pp. 56-57.

Bouchot V., Becq-Giraudon J. F., Bailly L., Le Goff E., et Milési J. P. (**1999**). Identification of paleoconglomerate-hosted gold-bearing pebbles in the stephanian Argentat bassin : geological implications (GéoFrance 3D). *EUG 10, Strasbourg*, March, **4**, p. 478.

Bouchot V., et Marroncle J. L. avec la coll. de Lagny Ph., Monthel J. (**1992**) Synthèse régionale Argentat-Châtaignerie. Inventaire des ressources minières du territoire métropolitain. *Document public, Rapp. BRGM* **R36060**, 44 p., 10 fig., 5 ann.

Bouchot V., Gros Y., et Bonnemaison M. (**1989**) Structural control on the auriferous shear zones of the Saint Yrieix district, Massif central, France : evidence from the Le Bourneix and Lauriéras gold deposits. *Economic Geology*, **84**, pp. 1315-1327.

Bouchot V., Lescuyer J. L., Milési J. P., Chantraine J., Autran A., Ledru P., Becq-Giraudon J. F., Feybesse J. L., et Viallefond L. (**1997**) Carte à 1/1000 000 des minéralisations aurifères de la France dans leur cadre géologique autour de 300Ma. *Chronique de la recherche minière,* **528**.

Bouchot V., Milési J. P., Lescuyer J. L., et Ledru P. (**1997**) Les minéralisations aurifères de la France dans leur cadre géologique autour de 300 Ma. *Chronique de la recherche Minière*, **528**, pp 13-62.

Boullier A. M. (**1999**) Fluid inclusion : tectonic indicators. *Journal of Structural Geology*, **21**, pp. 1229-1235.

Bowers T. S., et Helgeson H. C. (**1983**) Calculation of the thermodynamics and geochimical consequences of nonideal mixing in the system H2O-CO2-NaCl on phase relations in geoligical systems : equation of state for H2O-CO2-NaCl fluids at high pressures and temperatures. *Geochimica Cosmochimica Acta*, **47**, pp. 1247-1275.

Bowers T. S., et Helgeson H. C. (**1985**) Fortran Programs for generating fluid inclusion isochres and fugacity coefficients for the system H2O-CO2-NaCl at high pressures and temperatures. *Computers and Geosciences*, **11**, pp. 203-213.

Bozzo A. T., Chen H. S., Kass J. R., et Bardhun A. J. (**1973**) The properties of the hydrates of chlorine and carbon dioxide. *In : 4 th Internat. Sympo. on Fresh water from the sea*, **3**, pp. 434-451.

BRGM. (**1993**) Minéralisation aurifère liée à la dislocation d'Argentat : prospect de Deyroux, des Granges et de Grand Fraud (Lot). Inventaire des ressources minières du territoire métropolitain. *Document public, dec 1993*, note **DMM/DEX/93/064**, 33 p.

Brill H., Marignac C., Cathelineau M., Tollon F., Cuney M., et Boiron M. C. (**1994**). Metallogenesis of the french Massif Central : time-space relationships between ore deposition and tectono-magmatic events. In *K. (ed)* (Eds.), Pre-mesozoic geology in France and related area. (pp. 379-402). *Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.*

Brown P. E., et Hagemann S. G. (**1995**) MacFlinCor and its application to fluids in Archean lode-gold deposits. *Geochimica Cosmochimica Acta*, **59**, pp. 3943.

Brown P. E., et Lamb W. M. (**1989**) *P-V-T* properties of fluids in the system H2O-CO2-NaCl : New graphical presentations and implications for fluid inclusion stadies. *Geochimica Cosmochimica Acta*, **53**, pp. 1209-1221.

Cathelineau M., Boiron M. C., Holliger P., et Poty B. (**1990**) Metallogenesis of the French part of the Variscan orogen. Part II: Time-Space relationship between U, Au and Sn-W ore deposition and geodynamic events-mineralogical and U-Pb Data. *Tectonophysics*, **177**, pp. 59-79.

Cathelineau M., Lespinasse M. et Boiron M. C. (**1994**). Fluid inclusion planes : a geochemical and structural tool for the reconstitution of paleofluid migration. In *B. D. Vivo & e. M. L. Frezzotti* (Eds.), Fluid Inclusions in Minerals, Methods and Applications (pp. 117-130.). pub. by *Virginia Tech, Blacksburg, VA.*

Champenois M. (**1989**) Apport de l'analyse interactive d'images à l'étude de l'évolution structurale de zones déformées: application à une zone de cisaillement pana-africaine de l'Adrar des Iforas (Mali) et aux orthogneiss du massif du Grand Paradis (Alpes, Italie). *Thèse Univ. INPL, Nancy.* 210p.

Charonnat X. (**2000**)). Les minéralisations aurifères tardi-hercyniennes des Cévennes (Massif Central français). Cadre structural, gîtologie et modélisation. *Thèse Univ. Orléans.*

Chenevoy M., avec la coolaboration de Delbos R., et Vautrelle C. (**1990**) Notice explicative, carte géol.France, feuille Nexon (**712**)-Orléans: BRGM, 62p. Carte géologique par Chenevoy M., Berger J. P., Chalamet D., Granjux J.C., Kerrien Y. (1990). *BRGM.*

Costa S. (**1990**) De la collision continentale à l'extention tardi-orogénique : 100Ma d'années d'histoire varisque dans le Massif central français. Une étude chronologique par la méthode 40Ar/39Ar. *Thèse univ. Univ- Montpellier*. 441p.

Costa S. (**1992**) E-W diachronism of the collision stage in the french Massif Central : implication for the european orogen. *Geodinamica Acta*, **5**, pp. 51-68.

Delhaye P., et Dhamelincourt P. (**1975**) Raman microprobe and microscope laser excitation. *J. Raman Spectrosc.*, **3**, pp. 33-43.

Dhamelincourt P. (**1979**) Etude et rélisation d'une microsonde moléculaire à effet Raman. Quelques domaines d'application. *Thèse d'état Univ. Lille*.

Dhamelincourt P., Beny J. M., Dubessy J., et Poty B. (**1979**) Analyse d'iclusions fluides à la microsonde MOLE à effet Raman. *Bulletin de Minéralogie*, **102**, pp. 600-610.

Dubessy J. (**1984**) Simulation des équilibres chimiques dans le système C-O-H. Conséquences méthodologiques pour les inclusions fluides. *Bulletin de Minéralogie*, **107**, pp. 157-168.

Dubois M. (**1992**) Fluides crustaux : approches expérimentale et analytique. 1) Détermination du solvus des système H2O-MCl (M=Li, K, Rb, Cs) et , 2) caractérisation et dynamique des fluides des dômes thermiques sur l'exemple du diapir vellave (S-E Massif central français). *Thèse Univ. INPL, Nancy*. 229p.

Dubois M., et Marignac C. (**1997**) The H2O-NaCl-MgCl2 ternary phase diagram with special application to fluid inclusion studies. *Economic Geology*, **92**, pp. 114-119.

Engel W., Feist R., et F. W. (**1981**) Le Carbonifère anté-Stephanien de la montagne noire: rapport entre mise en place des nappes et sédimentation. *bulletin B.R.G.M.*, **I, 4**, pp. 341-389.

Essarraj S. (**1992**) Migrations des fluides, microfissuration et conditions de dépôt de l'or dans les veines de quartz aurifères. *Thèse Univ. INPL, Nancy*. 399 p.

Essarraj S., Boiron M. C., Cathelineau M., et Fourcade S. (**2001**) Multistage deformation of Au-quartz veins (Lauriéras, French Massif Central) : evidence for late gold introduction from microstructural, isotopic and fluid inclusion studies. *tectonophysics*, **336**, pp. 79-99

Fabre C. (**2000**) Reconstitution chimique des paléofluides par spectrométrie d'émission optique couplée à l'ablation laser: Applications aux fluides alpins et aux fluides de bassins. *Thèse Univ. Nancy I*. 281p.

Fabre C., Boiron M. C., Dubessy J., et Moissette A. (**1999**) Ion analysis in individual fluid inclusions by laser ablation - optical emission spectroscopy (LA-OES): development and applications to natural fluid inclusions. *J. Anal. At. Spectrom.*, **14**, pp. 913-922.

Faure M., Charonnat X., Chauvet A. (**1999**) Schéma structural et évolution tectonique du domaine para-autochtone cévenol de la chaîne hercynienne (Massif Central français). *Comptes Rendus da l'Académie des Sciences, Paris*, II, **328**, 401-407.

Faure M., Leloix C., et Roig J. Y. (**1997**) L'évolution polycyclique de la chaîne varisque. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **168**, pp. 695-705.

Floc'h J. P. (**1983**) La série métamorphique du Limousin central. *Thèse d'Etat, Univ. Limoges.* 445p.

Floc'h J. P., Santallier D., et Henry B. (**1984**) La série limousine : réflexion axée sur une synthèse géologique régionale et son utilisation pour la prospection de l'or. *Chronique de la recherche Minière*, **474**, pp. 5-10.

Fourcade S., Boiron, M-C., Cathelineau, M., Guerrot, C., Lerouge, C., Marignac, Ch., Martineau, F. & Vallance, J (**2000**). fluids and late Carboniferous Variscan gold minéralizations in the French Massif Central. The bearing of stable isotopes. *"Geode-GeoFrance 3D Workshop". 7-8 Novembre*, Orléans, *Document BRGM*, **297**, pp. 58-59.

Franke W. (**1989**) Variscan plate tectonics in central Europe: current ideas and open questions. *Tectonophysics*, **169**, pp. 221-228.

Friedrich M., Marignac C., et Floc'h J. P. (**1988**) Sur l'existence de trois chevauchement ductiles "Himalayens" successifs à vergence NW en Limousin. *Comptes Rendus Académie des Sciences, Paris*, **306**, pp. 663-669.

Genna A., Roig J. Y., Debriette P. J., et Bouchot V. (**1998**) Le bassin houllier d'Argentat (Massif central français), conséquence topographique d'un plissement de son substratum varisque. *Comptes Rendus Académie des Sciences, Paris*, **327**, pp. 279-284.

Guillot P. L., Astruc G. I., Humbert L., Lefavrais-Henry M., Lefavrais-Raymond A., Monier G., et Roubichou P. (**1992**) Carte géol. France (1/50000), feuille Saint-Céré (810). BRGM-Orléans.

Guillot P. L., Astruc I. G., Feix I., Humbert L., Lefavrais-Henry M., Lefavrais-Raymond D., Michard D., Monier G., et Roubichou P. (**1992**) Notice explicative carte géologique. France (1/50000), feuille Saint-Céré (810). *Document BRGM*, pp. 76.

Hubert (**1986**) Textures et inclusions fluides des quartz aurifères. Application au gîte de Cros gallet (haute Vienne, France) et au prospect de Sanoukou (District de Kinieba, Mali). *Document BRGM*, **114**, pp. 1-350.

Kowallis B. J., Wang H. F., et Jang B. A. (**1987**) Healed microcrack orientations in granite from Illinois borehole UPH-3 and their relationship to the rocks stress history. *Tectonophysics*, **135**, pp. 297-306.

Labernadière H., Le favrais-Raymond A., et Astruc J. G. (**1992**) Notice explicative, Carte Géol. France (1/50 000), feuille Argentat (786). *Document BRGM*, 66 p.

Lafon J. M. (**1986**) Géochronologie U-Pb appliquée à deux segments du Massif Central français: Le Rouergue oriental et le Limousin central. *Thèse Univ. Montpellier.*

Lapique F., Champenois M., et Cheilletz A. (**1988**) Un analyseur videographique interactif: description et application. *Bulletin de minéralogie*, **111**, pp. 676-687.

Laubach S. E. (**1989**) Paleostress directions from the preferred orientation of closed microfractures (fluid-inclusion planes) in Sandstone, East Texas basin, U.S.A. *Journal of Structural Geology*, **11, 5**, pp. 603-611.

Laumonier B., Marignac C., Cheilletz A., et Macaudière J. (**1991**) Relations entre tectoniques superposées, migmatisations et mise en place des granites du dôme Velay (région da Laviolle, Ardèche, France). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Paris), Série II*, **313**, pp. 937-944.

Ledru P., Autran A., et Santallier D. (**1994**). Lithostratigraphy of variscan terranes in the french Massif Central. A basis for paleogeographical reconstruction. In *J. D. KEPPIE* (Eds.), Pre-mesozoic geology in France and related areas. (pp. 276-288). *Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.*

Ledru P., Costa S., et Eechtler H. (**1994**). Structures in the Massif Central. In *J. D. KEPPIE* (Eds.), Pre-mesozoic geology in France and related areas. (pp. 305-323). Berlin, *Heidelberg: Springer-Verlag.*

Ledru P., Lardeaux J. M., Santallier D., Autran A., Quenardel J. M., Floc'h J. P., Lerougc g., Maillet N., Marchand J., et Ploquin A. (**1989**) Où sont les nappes dans le MassifCentral français?. *Bulletin de la Société géologique de France*, **V**, pp. 605-618.

Leroy J. (**1979**) Contribution à l'étalonnage de la pression interne des inclusions fluides lors de la décrépitation. *Bulletin de minéralogie*, **102**, pp. 584-593.

Lescuyer J. L., Bouchot V., Cassard D., Feybesse J. L., Marcoux E., Moine B., Piantone P., Tegyey M., et Tollon F. (**1993**) Le gisement aurifère de salsigne (Aude, France). Contexte lithostructural et modèle génétique d'une concentration syntectonique tardi-carbonifère. *Chronique de Recherche Minière*, **512**, pp. 3-73.

Lespinasse M. (**1991**) Les trainées d'inclusions fluides: marqueur structural des paléocontraintes et migrations des fluides. *Mémoire CREGU, N°19. Thèse univ. Nancy1.* 251p.

Lespinasse M. (**1999**) Are fluid inclusion planes useful in structural geology ?. *Journal of Structural Geology*, **21**, pp. 1237-1243.

Lespinasse M. et 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**, pp. 173-187.

Lespinasse M. et Pêcher A. (**1986**) Microfracturing and regional stress field : a stuidy of preferred orientations of fluid inclusion planes in the granite from the Massif Central, France, *Journal of Structural Geology*, **8**, pp. 169-180.

Macaudière J., Barbey P., Jabbori J. et Marignac C. (**1992**) Le stade initial de fusion dans le développement des dômes anatectiques : le dôme du velay (Massif Central Français). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Paris), Série II*, **315**, pp. 1761-1767.

Marignac C., Cathelineau M., Boiron M.-C., Fourcade S., Vallance J., et Souhassou M. (**2000**). The Q-Au lodes of W Europe : towards the definition of a variscan-type of shear-zone hosted gold deposits. *"Geode-GeoFrance 3D Workshop". 7-8 Novembre*, Orléans, *Document BRGM*, **297**, pp. 82-85.

Marignac C., et Cuney M. (**1999**) Ore deposits of the French Massif Central : insight into the metallogenesis of the Variscan collision belt. *Mineralium Deposita*, **34**, pp. 472-504.

Matte P. (**1986**) Tectonics and plate tectonics model for the variscan of Europe. *Tectonophysics*, **126**, pp. 329-374.

Milési J. P., et Lescuyer J. P. (**1993**) The Chessy Zn-Cu-Ba massive sulfide deposit and the devonian Brevenne volcano-sedimentary belt (Eastern Massif Central, France). *Document du BRGM*, **224**, pp. 1-250.

Monier G. (**1980**) Pétrologie des granitoïdes du sud-Millevaches (M.C.F.). Minéralogie, géochimie, géochronologie. *Thèse 3ème cycle, Univ. Clermont-Ferrant II.* 288p.

Monier G., et Robert J. L. (**1986**) Titanium in muscovites from two mica granites: substitutional mechanism and partition with coexsting biotites. *Neues Jahrbuch Miner. Abh.*, **153**, pp. 147-161.

Nicaud J., et Floc'h J. P. (**2000**). Structural control of gold bearing quartz veins forming in the Saint-Yrieix District (Massif Central, France). *"Geode-GeoFrance 3D Workshop". 7-8 Novembre*, Orléans, *Document du BRGM,* **297**, pp. 71-72.

Nivlet P. (**1997**) Analyse statistiques des réseaux de plans d'inclusions fluides : application a la reconstitution du tenseur de paleo-perméabilité a Soultz-Sous-Foret. *Mémoire de DEA, INPL-Nancy.* 64p.

Nogueira P., et Noronha F. (**1995**) "Planif" a computer program for the study of fluid inclusion planes. *Boletin de la Sociedad Espanol de Mineralogia*, **18-1**, pp. 162-163.

Nomade S., Chauvet A., Barbanson L., et Charonnat X. (**1999**) Les minéralisations aurifères des Cévennes (Massif central français) : étude comparative des filons d'Alteyrac/Pontde Rastel et du paléoplacer du Bulidou. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (Paris), Série II*, **328**, pp. 815-822.

Oakes C. S., Bodnar R. J., et Simonson J. M. (**1990**) The system NaCl-CaCl2-H2O. I. The vapor-saturated ice liquidus. *Geochimica Cosmochimica Acta*, **54**, pp. 603-610.

Pin C. (**1989**) Essai sur la chronologie et l'évolution géodynamoique de la chaîne hercynienne d'Europe. *thèse Université Blaise Pascal, 470 p.*

Pin C., et Peucat J. J. (**1986**) Age des épisodes de métamorphisme paléozoïques dans le Massif central et le Massif armoricain,. *Bulletin de la Société Géologique de France,* **(8), II, 3,** pp. 461-469.

Pin C., et Vielzeuf D. (**1988**) Les granulites de haute-pression d'Europe moyenne: témoins d'une subduction éo-hercynienne. Implications sur l'origine des groupes leptyno-amphiboliques. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **(8), 4**, pp. 13-20.

Poupon E. (**1990**) Les altérations hydrothermales associées aux amas sulfurés de Chessy et de sain Bel (serie de la Brévenne, Massif central français). *Thèse Univ. Paris IV. Document BRGM,* **177**, 214 p.

Ramboz C. (**1980**) Problèmes posés par la détermination de la compostion des fluides carboniques complexes, à l'aide des techniques micothermométriques. *Comptes Rendus Académie des Sciences, Paris*, **290**, pp. 499-502.

Ren X., Kowallis B. J., et BestT M. G. (**1989**) Paleostress history of the Basin and Range province in Western Utah and easten Nevada from healed microfracture orientations in granites. *Geology*, **17**, pp. 487-490.

Respaut J. P., Mougeot R., Ledru P., et Marignac C. (**1996**). Nouvelles données géochronologie U-Pb sur le massif du Velay et le problème de la limite du stéphanien. *16e Réunion des sciences de la terre*, Orléans, 10-12 Avril, pp. 59.

Roedder E. (**1984**) Fluid inclusions. In *Reviews in mineralogy* (*Mineral. Soc. America ed.*), **12,** 644 p.

Roger P. (**1979**) (coordination) Carte Géol. France (1/50 000), feuille Thiviers (**735**). *Document du BRGM*, Orléans.

Roig J. Y. (**1997**) Evolution tecto-métamorphique d'un ségment de la chaîne hercynienne. Rôle du plutonisme dans la caracterisation des tectoniques du Sud-Limousin (Massif Central français). *Thèse Univ. Orléans*. 287 p.

Roig J. Y., Calcagno P., Bouchot V., Maluski H., et Faure M. (**1997**) Modélisation 3D du paléochamp hydrothermal As+Au (330-300 Ma) le long de la faille d'Argentat (Massif central français). *Chronique de la recherche Minière*, **528**, pp. 63-69.

Santallier D., Briand B., Menot R. P., et Piboule M. (**1988**) Les complexes leptyno-amphiboliques (C. L. A): revue critique et suggestions pour un meilleur emploi de ce terme. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **(8), IV, 1**, pp. 3-12.

Santallier D., Lardeaux J. M., Marchand J., et Marignac C. (**1994**). Metamorphism. In *J. D. E. Keppie* (Eds.), "Premesozoic geology in France and related areas." (pp. 325-340). *Springer Verlag.*

Sibson R., Robert F., et Poulsen H. (**1988**) Hight-angles reverse faults, fluid-pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposits. *Geology*, **16**, pp. 551-555.

Soave G. (**1972**) Equilibrium constants from a modified Redlich-Kwong equation of state. *Chem. Eng. Sci.*, **27**, pp. 1197-1203.

Tempier P., Lameyre J., Labernadière H., et Scanvic J. Y. (**1978**) Carte Géol. France (1/50 000), feuille La Roche-Canillac (**762**). *Document du BRGM* -Orléans.

Touret J. L. R. (**2001**) Fluids in metamorphic rocks. *Lithos*, **55**, pp. 1-25.

Tuttle O. F. (**1949**) Structural petrology of planes of fluid inclusions. *Journal of Geology*, **57**, pp. 331-356.

Vallance J., Boiron, M-C., Cathelineau, M., Fourcade, S. & Marignac, Ch. (**2000**). Fluid migration and alteration in the granite hosting the Moulin de Cheni gold mineralization (Saint-Yrieix District, Limousin, France). *"Geode-GeoFrance 3D Workshop". 7-8 Novembre*, Orléans, *Document du BRGM*,**297**, pp. 73-74.

Vanko D. A., Bodnar R. J., et Sterner S. M. (**1988**) Synthetic fluid inclusion: vapor-satured halite solubility in part of the system NaCl-CaCl2-H2O , with application to fluid inclusions from oceanic hydrothermal systems. *Geochimica Cosmochimica Acta*, **52**, pp. 2451-2456.

Vanko D. A., Griffith J. D., et Erickson C. L. (**1992**) Calcium rich brines and other hydrothermal fluids in fluid inclusions from plutonics rocks, oceanographer Transform, Mid-Atlantic ridge. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, **56**, pp. 35-47.

Vanko D. A., Griffith J. D., et Knight C. L. (**1990**). Characteristics of calcium-rich brines trapped as inclusions in oceanic metagabbro, Oceanographer Transform, Mid-Atlantic Ridge. *program and abstract*, 93 p.

Vityk M. O., et Bodnar R. J. (**1995**) Do fluid inclusions in high grade metamorphic terranes preserve peak metamorphic density during retrograde decompression?. *American Mineralogist*, **80**, pp. 641-644.

Weisbrod A. (**1968**) Les conditions du métamorphique dans les cévennes Médianes (Massif Central français). *Comptes Rendus Académie des Sciences, Paris*, **266**, pp. 755-757.

Weisbrod A., et Leroy J. (**1987**) Comportement métastable des inclusions monophasées dans les minéraux des roches: Conséquences. *Comptes Rendus Académie des Sciences, Paris*, **305**, pp. 455-459.

Williams-Jones A. E., et Samson I. M. (**1990**) Theoretical estimation of halite solubility system NaCl-$CaCl_2$-H_2O : Applications to fluid inclusions. *Canadian Mineralogist*, **28**, pp. 299-304.

Wise D. U. (**1964**) Microjointing in Basement, middle Rocky mountains of Montana and Wyoming. *Geological society of American Bulletin*, **75**, pp. 287-306.

Zhang Y.-G., et Frantz J. D. (**1987**) Determination of the homogenization temperature and densities of supercritical fluids in the system NaCl-KCl-CaCl2-H2O using synthetic fluid inclusions. *Chemical Geology*, **64**, pp. 335-350.

Ziegler P. A. (**1986**) Geodynamic model for the palezoic crustal consolidation of western and central Europe. *Tectonophysic.*, **126**, pp. 303-328.

INSTITUT NATIO
POLYTECHNIC
DE LORRAI

AUTORISATION DE SOUTENANCE DE THESE
DU DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL
POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

o0o

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :
Monsieur DUBOIS Michel, Maître de Conférences, Université de Lille

Madame BOULLIER Anne-Marie, Directeur de Recherche, CNRS - Grenoble

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

Monsieur SOUHASSOU Mustapha

à soutenir devant un jury de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE, une thèse intitulée :

" Les circulations fluides dans le bâti Sud-Limousin à la fin du carbonifère : Relations entre les systèmes hydrothermaux de la faille d'Argentat et Saint-Yrieix ; conséquences pour la métallogénie de l'or ".

NANCY BRAB
2, AVENUE DE
FORET-DE-HA
BOITE POSTAL
F - 5 4 5 0
VANDŒUVRE CE

en vue de l'obtention du titre de :

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

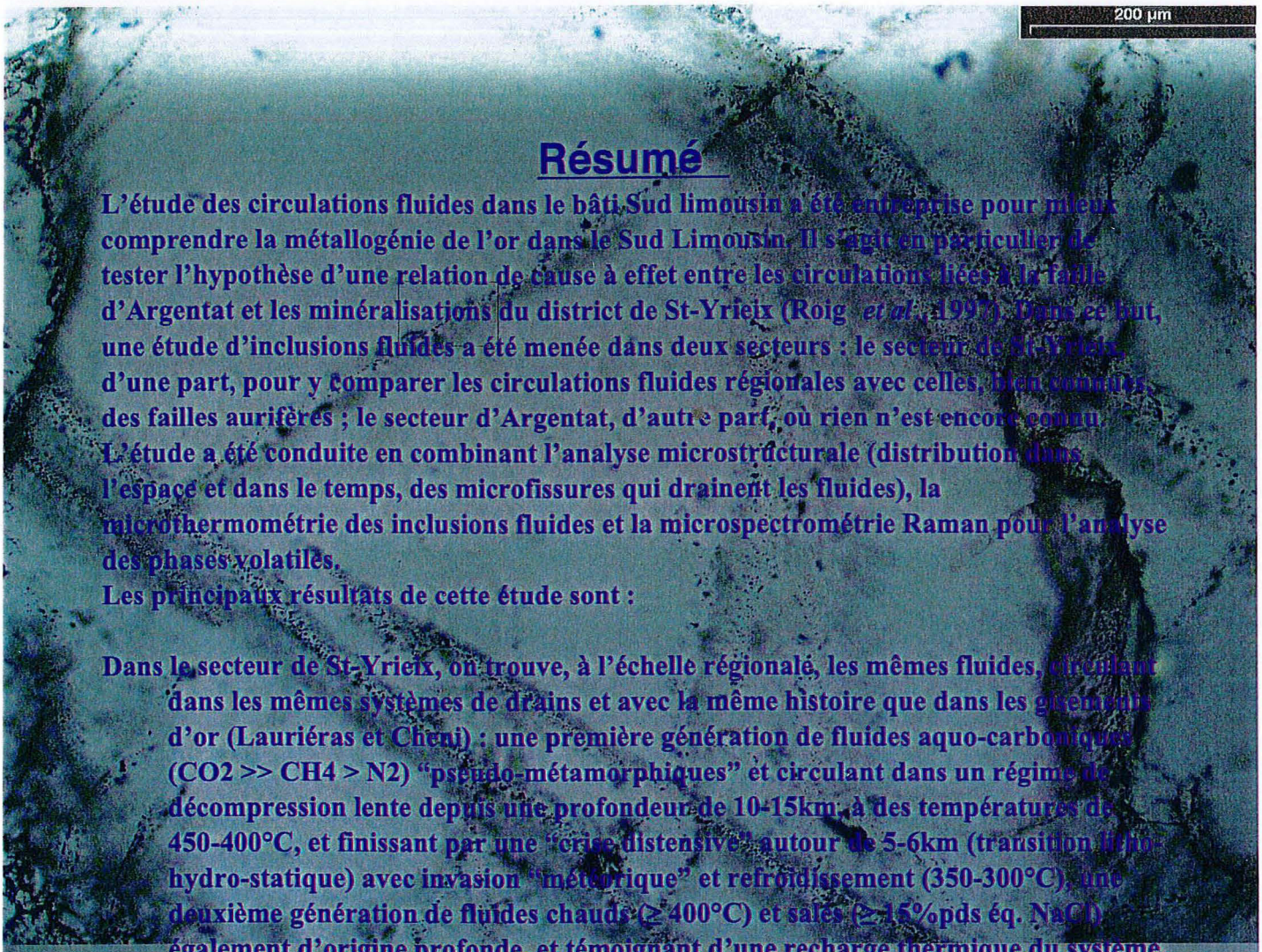
Spécialité : « **GEOSCIENCES** »

Fait à Vandoeuvre, le 21 juin 2001
Le Président de l'I.N.P.L.
J. HARDY

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE - NANCY -

Service Commun de la Documentation
INPL

TEL. 33/03.83.59.5
FAX. 33/03.83.59.5



Résumé

L'étude des circulations fluides dans le bâti Sud limousin a été entreprise pour mieux comprendre la métallogénie de l'or dans le Sud Limousin. Il s'agit en particulier de tester l'hypothèse d'une relation de cause à effet entre les circulations liées à la faille d'Argentat et les minéralisations du district de St-Yrieix (Roig *et al.*, 1997). Dans ce but, une étude d'inclusions fluides a été menée dans deux secteurs : le secteur de St-Yrieix, d'une part, pour y comparer les circulations fluides régionales avec celles, bien connues, des failles aurifères ; le secteur d'Argentat, d'autre part, où rien n'est encore connu.
L'étude a été conduite en combinant l'analyse microstructurale (distribution dans l'espace et dans le temps, des microfissures qui drainent les fluides), la microthermométrie des inclusions fluides et la microspectrométrie Raman pour l'analyse des phases volatiles.
Les principaux résultats de cette étude sont :

Dans le secteur de St-Yrieix, on trouve, à l'échelle régionale, les mêmes fluides, circulant dans les mêmes systèmes de drains et avec la même histoire que dans les gisements d'or (Lauriéras et Chéni) : une première génération de fluides aquo-carboniques ($CO_2 >> CH_4 > N_2$) "pseudo-métamorphiques" et circulant dans un régime de décompression lente depuis une profondeur de 10-15km, à des températures de 450-400°C, et finissant par une "crise distensive" autour de 5-6km (transition litho-hydro-statique) avec invasion "météorique" et refroidissement (350-300°C), une deuxième génération de fluides chauds (≥ 400°C) et salés (≥ 15%pds éq. NaCl), également d'origine profonde, et témoignant d'une recharge thermique du système, se mélangeant avec des eaux météoriques froides, provoquant le dépôt de l'or dans les zones minéralisées ;

Dans le secteur d'Argentat, les drains microfissuraux résultent de l'alternance (complexe) de (micro)-épisodes en compression et d'épisodes en extension ; les mêmes fluides que dans le secteur de St-Yrieix y sont reconnus, circulant dans les mêmes régimes P-T, mais avec deux grandes différences : (i) les circulations sont beaucoup moins pervasives ; (ii) les fluides de la deuxième génération montrent une inversion de température : les fluides salés sont froids (< 200°C) et les eaux "météoriques" sont chaudes (300°C).

Au total, la comparaison des résultats dans les deux secteurs conduit à infirmer l'hypothèse de départ, en inversant le sens des circulations régionales : la faille d'Argentat aurait été alimentée en fluides profonds (notamment au stade de dépôt de l'or) par une source que l'on peut envisager de situer dans la croûte moyenne, sous le district de St-Yrieix, et qui serait liée à la mise en place, autour de 305 Ma, d'un batholite granitique comparable à celui du Velay dans les Cévennes.