

Contrôle structural des circulations hydrothermales du Cézallier

Jean-Louis Feybesse*
avec la collaboration de Marc Lespinasse**

Mots-clés : Extension tectonique, Pliocène, Quaternaire, Fracture ouverte, Contrainte, Contrôle tectonique, Hydrodynamique, Eau thermale, Puy-de-Dôme, Cantal, Haute-Loire (Cézallier).

Résumé

L'analyse microstructurale a permis de démontrer que depuis le Pliocène la série du Cézallier est soumise à un régime tectonique distensif caractérisé par un axe d'extension N-S et que l'hydrothermalisme est synchrone de cette tectonique distensive. L'analyse de la genèse des conduits révèle que la répartition spatiale des fractures naturelles ouvertes qui drainent les fluides est déterminée par l'état de contrainte qui règne dans le bâti.

Abstract

Structural control of underground flows in the Cezallier geothermal system (French Massif central)

Based upon the Chassolle cored borehole, the fractures pattern of the Cezallier orthogneissic basement has been studied from a geometrical (relations between fractures), kinematic and chronological point of view, with an emphasis on brittle faults and apertures. Stress tensors have been computed.

These studies show that during the Plioquaternary period, the Cezallier domain is a distensive area in a general compressive context. The average minor principal stress during this period is N-S.

Normal faults apertures, relationships between hydrothermal minerals deposited at different times together with the chronology of these deposits reveal the following features :

- calcite and siderite infillings are contemporaneous with the Plioquaternary NS distensive phase ;
- the underground liquid flows are directly governed by the opened fractures pattern ;
- the fractures apertures are directly related to the NS distensive phase ;
- the widest and longest apertures are associated with the fractures which lie parallel to the tensile σ_1 - σ_2 plane. The strike of these fractures varies from N 60°E to N 130°E. We consider that they constitute the major drains for underground flow.

Introduction

L'un des objectifs du projet Cézallier est d'étudier le système hydrothermal actuel et en particulier de caractériser les circuits hydrauliques. A l'occasion du sondage G.P.F de Chassolle, il a été constaté que les fluides hydrothermaux circulent dans les fractures naturelles et en particulier à la faveur des ouvertures associées à ces dernières. **L'objet de cette note est de démontrer que l'individualisation des ouvertures est étroitement contrôlée par l'état de contrainte régnant dans le bâti.**

Cadre géologique

Les sources thermales émergent au sein de la série cristallophyllienne du Cézallier. Située au sud de la Grande Limagne de Clermont-Ferrand et à l'Est du massif volcanique du Cézallier (fig. 1) cette série est composée d'unités lithotectoniques dont la structuration remonte à l'époque dévonienne (400 à 350 Ma ; Burg 1983, Mathonnat, 1983).

* BRGM - Orléans

** CREGU - Vandœuvre les Nancy

Cadre structural général

Succédant aux déformations synmétamorphes du cycle varisque, une fracturation intense affecte le Massif central durant la **période westphalo-stéphanienne** (295 à 280 Ma). Cette phase, dite tardi-hercynienne, est marquée par de grands décrochements qui ont fortement morcelé le socle varisque (Arthaud *et al.* 1975, Bonijoly *et al.*, 1983).

Au cours de cette période, l'évolution tectonique est caractérisée par une rotation progressive de l'axe de raccourcissement, (Blès *et al.*, à paraître). Durant cette évolution, trois épisodes de compression marquant des périodes de paroxysme ont été reconnus (Bonijoly *et al.*, 1983) : ce sont les compressions N-S, NW-SE et E-W.

Postérieurement au Stéphanien, le Massif central a été soumis à une succession d'événements compressifs et distensifs.

Au Mésozoïque, les bordures du Massif central et les bassins sédimentaires environnants, ont été affectés par une succession de périodes distensives. Ce sont les distensions N-S permotriasique, E-W à NW-SE du Jurassique inférieur à moyen et N-S à NE-SW du Jurassique supérieur et du Crétacé (Bonijoly 1982, Blès *et al.*, à paraître).

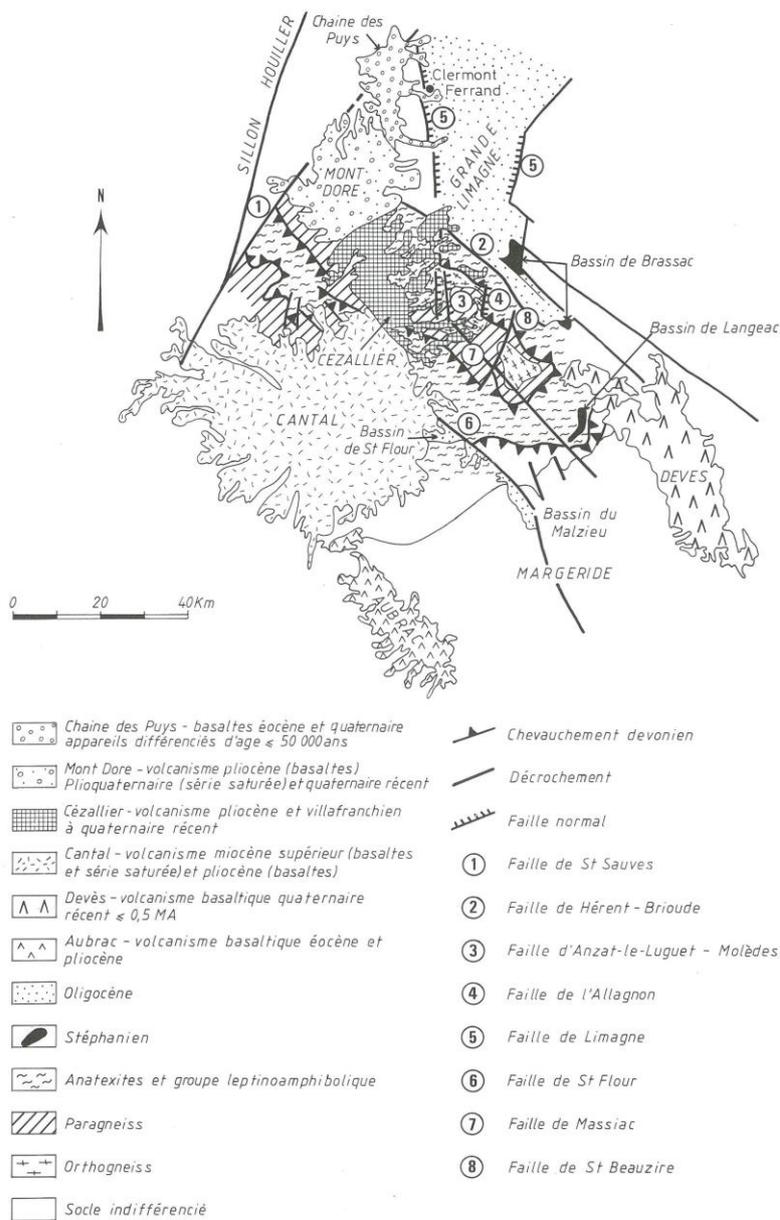


Fig. 1. — Cadre géologique.
Geological setting.

Au Cénozoïque, le Massif central est soumis à une succession d'événements compressifs et distensifs ; il s'agit :
— à l'Éocène moyen et supérieur (au cours de l'édification de la chaîne pyrénéenne) d'une compression NS (Arthaud in Mattauer et Mercier, 1980, Debrand et al. 1980, Bergerat, 1985, Blès et al., à paraître) ;
— à l'Éocène terminal et à l'Oligocène d'une distension E-W (Debrand et al., 1980, Bergerat, 1985, Burg et al., 1983) qui induit la création de fossés d'effondrement ;

— au Miocène supérieur d'une compression E-W à NW-SE dite phase alpine (Debrand et al., 1980 ; Tremolière, 1981 ; Bergerat, 1985).

Actuellement, la plaque européenne reste sous sollicitation tectonique en raison de la poussée vers le nord exercée par la plaque apulienne. Elle est, de ce fait, soumise à un régime compressif dont l'axe est NNW-SSE à NW-SE (Weber et al., 1980, Philip, 1983).

Mise en évidence d'un contrôle structural des circulations hydrothermales

1. — Le champ de fracturation

Il est admis de façon générale que les fluides hydrothermaux du Cézallier circulent à la faveur du réseau de fractures naturelles. Le champ de fracturation est de ce fait, le premier élément à définir pour mettre en évidence un éventuel contrôle structural des circulations hydrothermales.

Les directions des macrofractures et des microfissures qui affectent la série du Cézallier sont maintenant bien connues (tabl. 1, fig. 2, annexe 1 ; Feybesse, 1985). L'analyse microstructurale (Feybesse 1985) a montré que ce réseau de fractures est lié, pour l'essentiel, aux épisodes compressifs tardi-hercyniens (Feybesse 1985 ; tabl. 2) qui ont intensément fracturé la série du Cézallier.

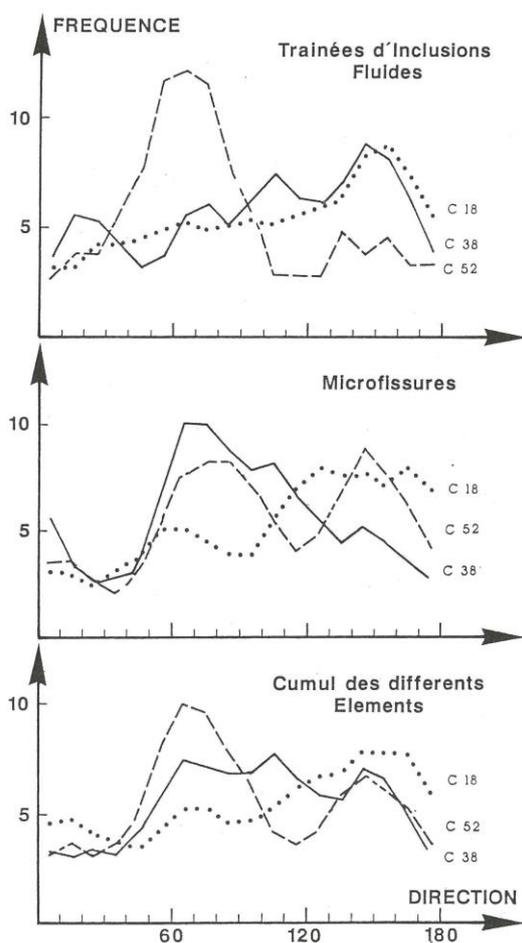


Fig. 2. — Histogrammes de fréquence des directions des microfissures et des traînées d'inclusions fluides.
Frequencies diagram of the microcracks and fluid inclusions trend.

FRACTURES A FORT PENDAGE (60 À 90 °)	FRACTURES A FAIBLE PENDAGE (< 60 °)
— NNW-SSE (N 170)	— NNW-SSE (N 170)
— NNE-SSW (N 25)	— ESE-WNW (N 105)
— NE-SW (N 50)	
— ENE-WSW (N 30)	
— WNW-ESE (N 110)	
— NW-SE (N 135)	

Tabl. 1. — Direction des familles de fractures (diaclasses, failles) représentées dans le Cézallier. Les valeurs indiquées représentent le maximum de fréquence ; les populations se répartissent en fait dans un intervalle de variation d'environ 30°.

ÉPISODE	SYSTÈME DE FAILLES ACTIF	AGE PROBABLE
Compression E-W	Décrochements dextres N 50 à 85	Stéphanien C moyen
	Décrochements sénestres N 95 à 120	
Compression NW-SE	Décrochements sénestres N 120 à 145	Stéphanien B sup. à C inf.
	Décrochements dextres N 95 à 110	
Compression N-S	Décrochements sénestres N 15 à 30	Westphalien D à Stéphanien B. inf.
	Décrochements dextres N 140 à 180	

Tabl. 2. — Principaux systèmes de failles actifs au cours de la phase tardi-hercynienne (pour plus de précision, voir Feybesse 1985).

À l'issue de la phase tardi-hercynienne, le socle du Cézallier présentait donc un réseau très complexe de fractures, compliqué encore par les fractures secondaires associées (relais, diaclasses en traction, fentes, fig. 3).

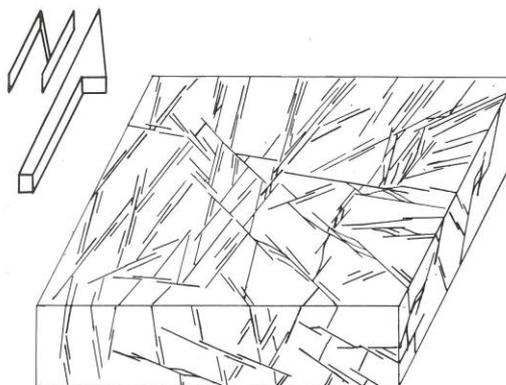


Fig. 3. — Représentation schématique de l'état de fracturation du socle du Cézallier à l'issue des épisodes compressifs tardi-hercyniens. Schematic block-diagram showing the Tardi-hercynian cracks pattern.

En fait, il est clair que dès cette époque, l'essentiel du champ de fracturation est acquis. Les phases ultérieures de fracturation s'exerceront sur un bâti préfracturé et ne feront donc que réutiliser le réseau de fractures préexistant, n'apportant que des retouches mineures.

2 — Les sollicitations tectoniques récentes exercées sur le bâti préfracturé du Cézallier (les phases tectoniques récentes)

La caractérisation des événements tectoniques récents fait appel aux techniques de l'analyse microstructurale.

Il s'agit de l'analyse des structures tectoniques de tous ordres et de toutes dimensions observées dans l'ensemble de la série du Cézallier et dans le sondage de Chassolle.

La définition de la géométrie et de la cinématique des éléments tectoniques permet de déterminer des systèmes de fractures mécaniquement cohérents et représentatifs d'épisodes tectoniques en compression ou en distension. La distinction et la séparation des épisodes reposent, pour partie, sur un calcul des paléo-tenseurs de contraintes par les méthodes de Carey (1979) ou d'Angelier et al (1980) effectué à partir des mouvements observés sur des plans de failles contemporaines.

La chronologie des épisodes est établie par l'observation des relations mutuelles entre éléments structuraux et par l'analyse de la superposition de mouvements distincts sur un même plan de faille.

La distension WNW-ESE éocène terminal à oligocène

La distension oligocène est la première phase tectonique de grande ampleur qui intervient après la phase tardi-hercynienne. C'est un événement déterminant pour la structuration finale de la région. En effet, elle induit la création d'importants fossés d'effondrement (grande Limagne, Limagne de Brioude). Ses manifestations sont très nombreuses dans toute la série du Cézallier où la plupart des grands décrochements N-S à N 30* tardi-hercyniens ont rejoué en faille normale (Feybesse, 1985).

Les calculs de tenseurs de contraintes effectués sur des populations de failles et de stries mesurées en divers points du Cézallier et dans le sondage de Chassolle indiquent un axe d'extension variant de N 75 à N 110 (N 100 en moyenne) (fig. 4).

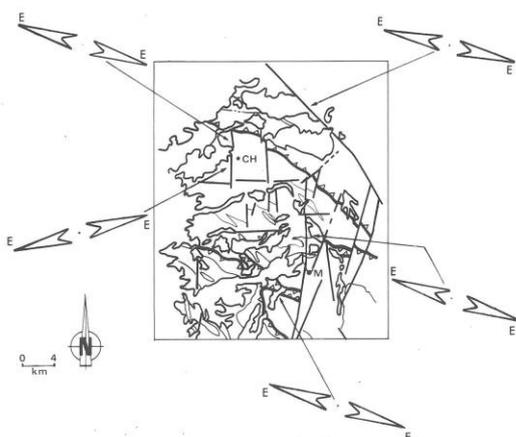


Fig. 4. — Distension WNW-ESE éocène terminal à oligocène : direction de la contrainte principale minimale (σ_3)
WNW-ESE Oligocene distensive phase :
minor principal stress (σ_3) direction.

* Toutes les unités de direction sont en degrés.

L'extension a été en majeure partie absorbée par une réactivation de certaines populations de fractures préexistantes qui, suivant leur disposition (direction, pendage) par rapport aux contraintes principales ont rejoué en failles normales, en failles normales décrochantes ou en failles décrochantes normales. Les populations de fractures engagées dans cette tectonique sont les suivantes :

- failles normales N 160 à 180 et N 000 à 035 ;
- failles normales sénestres N 50 à 95 ;
- failles dextres normales E-W ;
- failles sénestres normales N 70.

Parmi les grands accidents tardi-hercyniens qui rejouent à cette occasion, on citera :

- la faille bordière occidentale de la Grande Limagne dont les prolongements limitent, à l'ouest, le bloc de Rentières (Feybesse, 1985) où se situe le sondage de Chassolle,
- la faille N-S d'Ardes (Feybesse, 1985) qui limite à l'Est le bloc de Rentières,
- la faille N-S de Massiac,
- la faille normale dextre NW-SE de Saint-Hérent qui constitue la limite sud du mégabloc effondré de la Grande Limagne (fig. 5, Al Hasmi et al. 1985) et explique la forme du graben de Brioude.

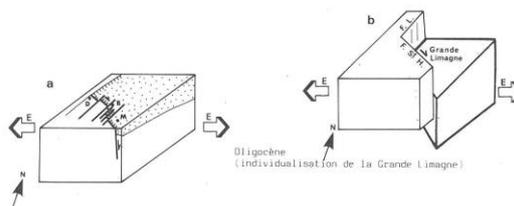


Fig. 5. — Blocs diagrammes schématiques de la région de Saint-Hérent illustrant la formation de la Grande Limagne. D : Dauzat-sur-Vodable ; B : Bard ; M : Madriat ; F.L. : faille bordière majeure de la Grande Limagne ; F.S.H.H. : faille de Saint-Hérent. Le bloc 3b est une représentation schématique du mécanisme d'effondrement.
Schematic block diagram of the Saint-Hérent area showing the Limagne graben development.

La distension N-S post-miocène à actuelle

Cet événement a été identifié aussi bien à l'échelle régionale qu'à celle du sondage de Chassolle.

Les calculs de tenseurs de contraintes effectués sur des populations de failles et de stries indiquent un axe d'exten-

sion variant de N-S à N005 (fig. 6). Le bâti préfracturé du Cézallier a donc été soumis à une traction sub-méridienne qui a provoqué le rejeu de certaines fractures du champ de fracturation. En fonction de leur disposition (direction et pendage) par rapport aux contraintes principales ces fractures ont rejoué en failles normales, en failles normales décrochantes ou en failles décrochantes normales; ce sont :

- failles normales N 55 à 130;
- failles N 000 à 35 et N 160 à 180 qui suivant la direction et l'importance de leur pendage ont joué en failles normales sénestres ou dextres et en failles dextres ou sénestres normales;
- failles normales dextres N 140.

L'essentiel des déplacements verticaux s'exprime le long des failles normales N 55 à 130. Ces jeux normaux s'observent sur des fractures préexistantes à pendage faible (30 à 60°) ou fort (70 à 90°). Mais il semble que lorsque ces deux catégories de fractures sont spatialement associées les déplacements verticaux interviennent préférentiellement selon les fractures les moins pentées, les fractures verticales réagissant à la sollicitation tectonique par une ouverture en fente de traction (fig. 7 et 8).

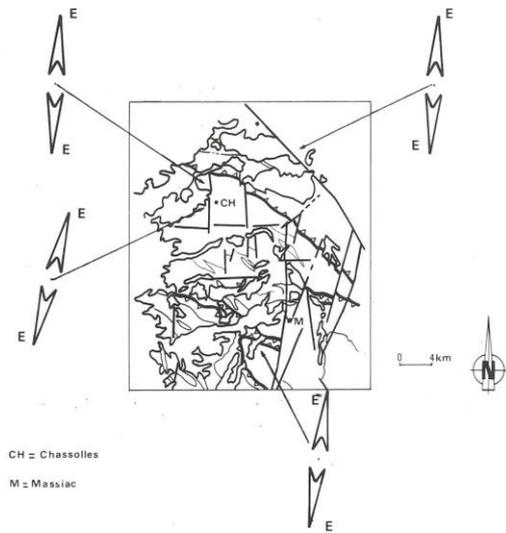


Fig. 6. — Distension N-S Plioquatenaire : direction de la contrainte principale minimale (δ_3).
N-S Pliocaternary distensive phase : minor principal stress (δ_3) direction.

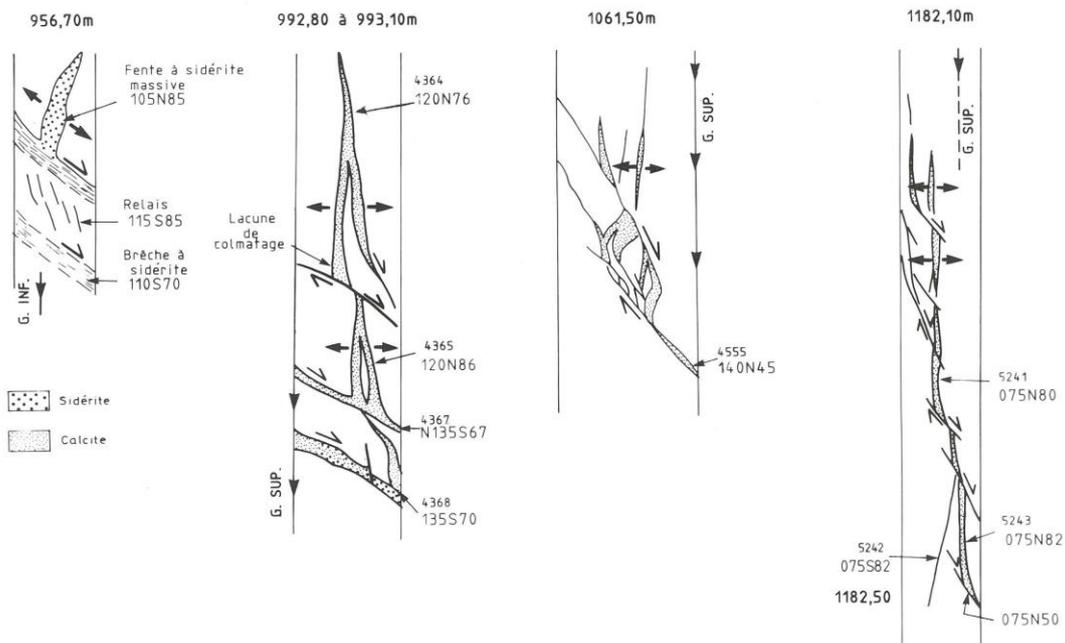


Fig. 7.— Failles normales de la distension N-S observées sur les carottes du sondage de Chassolle. Noter l'ouverture par traction des fractures subverticales préexistantes.
Normal faults relative to the N-S distensive phase.

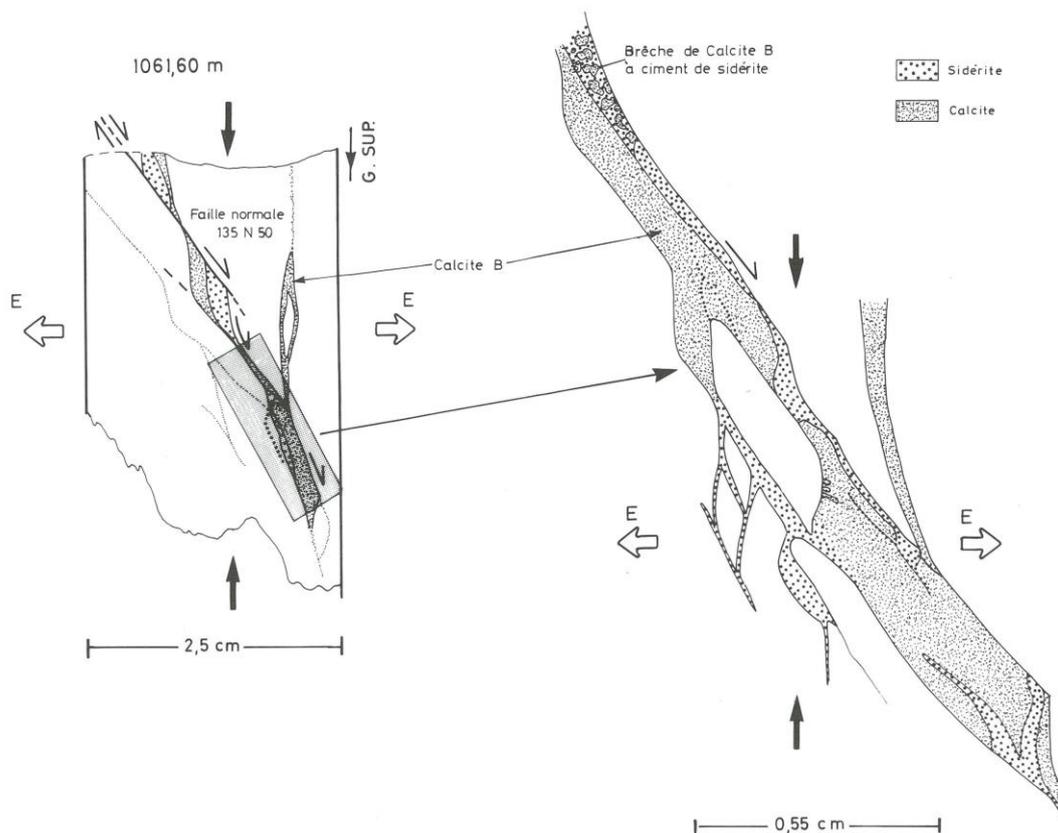


Fig. 8.— Faille normale de la distension N-S à jeu et à remplissage polyphasés (voir planche 3).
Normal fault relative to N-S distensive phase: multiphased movement and infilling.

L'ampleur des déplacements peut être déduite des décalages des structures recoupées par les failles (filonnets d'aplite, niveaux de métaaprites, fractures) ou de l'écartement des lèvres des zones abritées. Dans le sondage, de nombreuses observations indiquent un déplacement d'ampleur millimétrique à demi-centimétrique (rarement centimétrique).

L'âge de cet événement distensif peut être déduit par la prise en compte de divers éléments de chronologie.

Les failles de la distension N-S recoupent et décalent les failles normales oligocènes (Vallée de la Couze d'Ardes, sondage de Chassolle) et des stries liées à la distension N-S ont été observées sur un plan de faille porteur de stries liées à la distension WNW-ESE oligocène. Par suite, la distension N-S apparaît clairement postérieure à l'Oligocène.

Au Miocène, en France, l'avant-pays alpin est soumis à un raccourcissement NE-SW puis E-W à NW-SE (Bergerat, 1985) synchrone de l'édification de la chaîne alpine. Dans le Cézallier, cette compression se manifeste par des failles inverses NNW-SSE et NE-SW ou par des décrochements dextres inverses sub E-W antérieurs aux failles normales de la distension N-S. Cette dernière apparaît donc clairement postérieure au Miocène.

Durant la période plioquaternaire, la plaque européenne reste sous sollicitation tectonique en raison de la poussée vers le Nord exercée par la plaque apulienne. Elle est de ce fait soumise à un régime compressif dont l'axe, d'après les mesures de contrainte in situ et le calcul des mécanismes au foyer des séismes (Weber et al., 1980), est NNW-SSE à NW-SE. H. Philip, 1983, a montré que la France, en dehors des zones voisines de la chaîne alpine, est soumise à un régime compressif atténué. Dans ce domaine, des régimes en décrochement et en faille normale (fossés plioquaternaires) coexistent. C'est vraisemblablement dans ce contexte que s'inscrit la distension N-S définie dans le Cézallier. Celle-ci est donc selon toute vraisemblance à rapporter à la période plioquaternaire.

Des mesures de contraintes in situ effectuées dans le sondage du Cézallier (Feuga, comm. orale) révèlent que :

- Les contraintes horizontales sont inférieures au poids des terrains, et que par conséquent la contrainte principale maximale σ_1 est subverticale.
- La contrainte principale intermédiaire σ_2 est sub-horizontale et de direction sub E-W (jusqu'à une profondeur de 400 m)

— L'anisotropie des contraintes horizontales est relativement faible : dans ces conditions il suffit de peu de choses pour que les contraintes σ_2 et σ_3 s'inversent.

Ces faits confirment donc l'existence d'un régime distensif actuel dans le Cézellier et le fait qu'actuellement ce sont bien les fractures NE-SW à E-W sur lesquelles s'exerce la contrainte minimale, qui ont tendance à s'ouvrir.

De plus, ces mesures révèlent des valeurs de σ_1 et σ_2 très proches. Selon Philip (1983) cet état de contraintes, qui caractérise le domaine à régime compressif atténué (*cf. supra*), provoquerait une alternance de régimes distensifs et compressifs par permutation rapide des axes σ_1 et σ_2 . Dans le Cézellier, une telle permutation a dû intervenir car des micro-failles inverses sénestres (N 125) ou dextres inverses (N 85) décalant des failles normales de la distension N-S ont été observées dans le sondage (fig. 9).

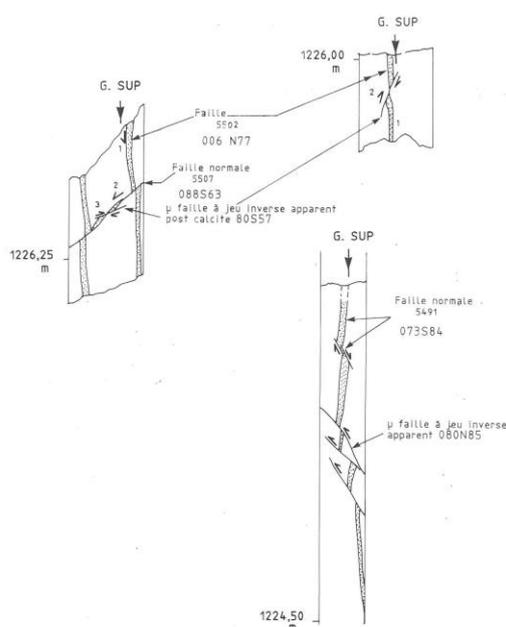


Fig. 9. — Microfailles à jeu inverse décrochant décalant les failles de la distension N-S. Noter que la faille N 006, dont l'histoire est complexe (jeu en faille normale à l'Oligocène, rejeu en faille normale dextre lors de la distension N-S), est décalée par la faille normale de direction N 88 de la distension N-S.
Reverse wrenching fault shifting the faults relative to the N-S distensive phase and N-S distensive phase fault (N 88 stricing) shifting the multiphased fault (N 006 stricing).

Il apparaît donc clairement que depuis le Pliocène, le bâti préfabriqué du Cézellier est soumis à un régime distensif dont il convient maintenant de déterminer l'incidence sur l'individualisation des conduits et sur les circulations hydrothermales.

3. — Contrôle structural de l'individualisation des ouvertures

Dans le sondage de Chassolle, environ trois pour cent des fractures présentent des ouvertures. Ces dernières peuvent être subdivisées en deux types principaux (fig. 10) : les ouvertures par traction (fentes) et les ouvertures par cisaillement (zones abritées et zones de relais). Deux cas peuvent être distingués en fonction de la direction des fractures préexistantes concernées et de leur position par rapport aux contraintes principales :

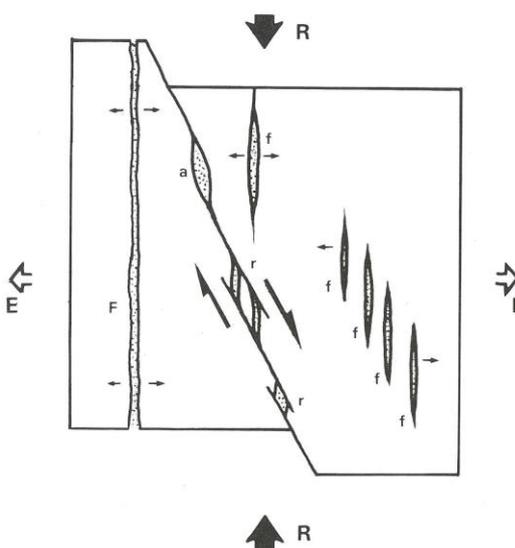


Fig. 10. — Principaux modes d'individualisation des ouvertures, par traction et par cisaillement : zones abritées (Za), relais (r), fentes (f), fracture préexistante ouverte par traction F.
Morphology of apertures in relation to a distensive stress system.

Les fractures NNE-SSW et NNW-SSE ont eu depuis l'Oligocène trois comportements différents. A l'Éocène terminal et à l'Oligocène, ces fractures étaient sub-orthogonales à la direction d'extension σ_3 , elles étaient donc dans une position propice à l'individualisation d'ouvertures par traction dans les fractures sub-verticales (sub-parallèles à σ_1 et sub-perpendiculaires à σ_3). Par contre, au Miocène, ces fractures ont été soumises à un régime compressif et les ouvertures ménagées à l'Oligocène ont été en grande partie refermées.

Lors de la distension N-S plioquaternaire à actuelle, ces fractures du fait de leur faible obliquité par rapport à l'axe d'extension σ_3 jouent en failles normales décrochantes, ou décrochantes normales. Ce jeu tendra encore à effacer les ouvertures individualisées à l'Oligocène. Par contre, il apparaît de nouvelles ouvertures liées au cisaillement (zones abritées, fig. 11).

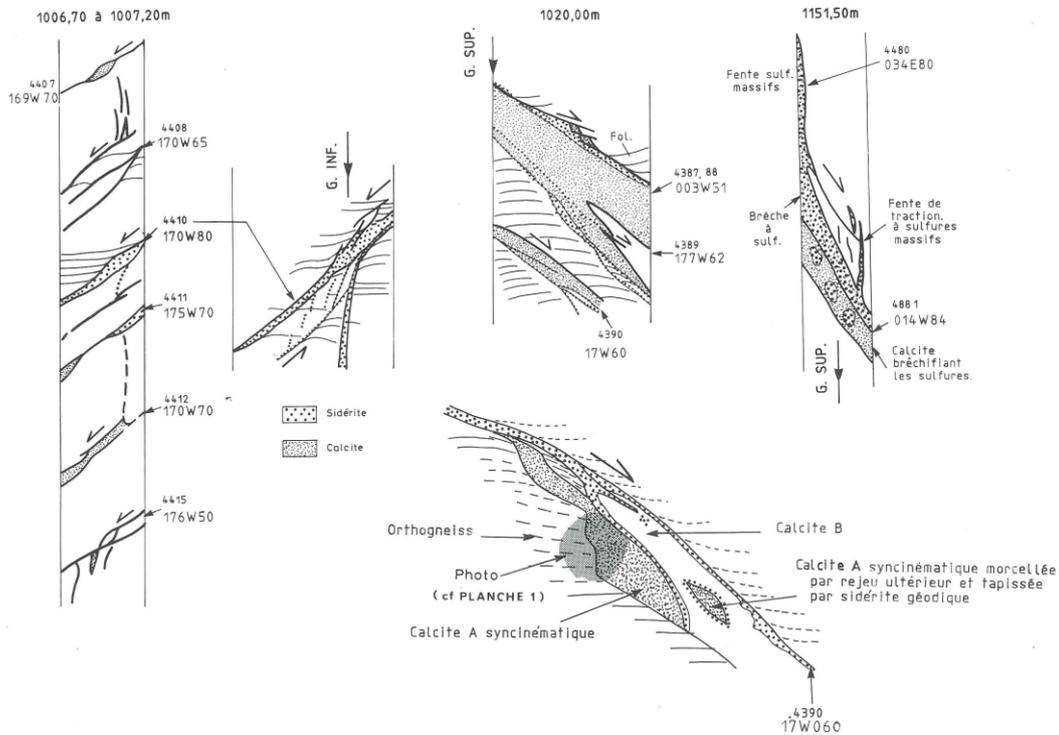


Fig. 11. — Failles normales subméridiennes à composantes décrochantes de la distension N-S. Noter que les ouvertures principales sont dans les plans de faille (ouverture par cisaillement : zones abritées et zones de relais). Dans la structure observée à 1 151,50 m, les sulfures sont antérieurs à la distension N-S : les sulfures sont bréchifiés et cimentés par la calcite.
Morphology of apertures in relation to N-S normal-transcurrent fault (N-S distension phase).

Les fractures N 60 à 130 ont joué en failles normales décrochantes ou décrochantes normales lors de la distension oligocène, elles n'ont donc pas été le siège d'ouvertures importantes. Dès le Miocène, elles ont été pro parte ouvertes. Mais c'est lors de la distension N-S plioquaternaire à actuelle que les ouvertures sont les plus importantes. En effet, ces fractures sont suborthogonales à la direction d'extension σ_3 , elles sont donc dans la position la plus propice à l'individualisation d'ouvertures. Selon les plans des failles normales pentées de 30 à 50°, les ouvertures seront liées à des zones abritées ménagées souvent à la faveur de zones de relais. Par contre les fractures sub verticales de même direction qui sont proches du plan de traction (σ_1 , σ_2) s'ouvriront par traction (fig. 7).

L'étude géostatistique des familles de fractures présentant des ouvertures (Loiseau, 1987) confirme les données issues de l'analyse morphocinématique des failles. En effet, statistiquement les familles de fractures à ouvertures n'ont pas toutes les mêmes caractéristiques.

Les familles de fractures N 60 à N 130 ont des ouvertures plus importantes et plus continues et présentent une organisation spatiale structurée : les variogrammes présentent des portées correspondant à la distance maximale de corrélation entre les données (pour plus de détails voir P. Loiseau : ce volume).

Par contre, les familles de fractures NNE-SSW et NNW-SSE ont des ouvertures, qui bien qu'aussi nombreuses sont beaucoup plus réduites en puissance et en extension. Ces

familles sont en outre caractérisées par une absence d'organisation spatiale (pas de structuration).

La majeure partie des ouvertures post-hercyniennes, et donc des conduits potentiels, est liée à la distension N-S plioquaternaire. De plus, les fractures susceptibles de drainer préférentiellement les fluides ont une direction N 60 à 130.

4. — Chronologie et contrôle structural de la répartition des remplissages

Il apparaît donc clairement que les fluides hydrothermaux circulent à la faveur des ouvertures créées par la distension plio-quaternaire NNE-SSW. Ces ouvertures sont pour la plupart remplies partiellement ou colmatées par de la calcite et/ou de la sidérite dont le dépôt est polyphasé. Un examen macroscopique et microscopique des remplissages a permis de les « caler » par rapport au fonctionnement des failles normales et d'établir la chronologie suivante :

1. — Calcite d'aspect fibreux (calcite A) (planche 1), cette calcite dont l'orientation des « fibres » est réglée par la direction d'extension est synchronisée d'un premier stade de fonctionnement des failles plioquaternaires ;
2. — Sidérite (planche 1 et 2) géodique. Cette phase minérale tapisse les ouvertures qui n'ont pas été totalement colmatées par la calcite A et constitue vraisemblablement le ciment des brèches à sidérites (planche 4) ;

3. — Calcite en mosaïque géodique 1 (calcite B1). Comme la sidérite 1, ce minéral est géodique, il moule la sidérite 1 (planches 1 et 2) et recoupe la calcite A (planche 2) ;
4. — Sidérite géodique 2. Comme la première, elle est en cristaux automorphes. Elle se dépose sur la calcite B (planche 1 et 2) et cimente les brèches à élément de calcite B (planche 3). Cette sidérite est vraisemblablement synchrone des microfailles normales à remplissage de sidérite qui affectent la calcite B et la première phase de brèche à sidérite (planche 3 et 4). On notera que l'existence de ces microfailles marque la pérennité des phénomènes distensifs pendant le dépôt des différentes phases minérales.
5. — Calcite en mosaïque 2 (calcite B2). Elle postdate la sidérite 2 sur laquelle elle se dépose (planche 2).

La répartition des remplissages en fonction de la direction des fractures peut être précisée par une étude structurale et isotopique conjointe des carbonates. L'étude des isotopes (Fouillac *in* Turpault, 1987) et des inclusions fluides (Turpault, 1987) confirme l'existence de deux phases de calcite : un type A déposé à une température de 150 à 200 °C et un type B déposé à une température inférieure à 150 °C. L'étude cinématique des fractures où les remplissages ont été prélevés, a mis en évidence que la calcite A a cristallisé préférentiellement dans les failles normales N60 à 130 soit dans les structures les plus actives. Par contre, la calcite B et la sidérite sont présentes dans les failles normales N60 à 130 et dans les failles décrochantes normales ou normales décrochantes de direction NNE-SSW et NNW-SSE. Il semble donc que lors du dépôt de la calcite A, c'est-à-dire vraisemblablement lors des stades les plus précoces de la distension, les structures méridiennes aient été peu actives. Mais par la suite la persistance du régime distensif a entraîné la création d'ouvertures dans ces structures subméridiennes et leur connection avec le réseau général, permettant ainsi le dépôt de la calcite B et de la sidérite.

Ces phases de remplissages se sont donc déposées au cours de la distension plioquaternaire N-S, il est donc probable qu'elles soient au moins en partie liées à l'hydrothermalisme actuel.

Conclusion

On démontre donc que depuis le Pliocène le socle du Cézallier est soumis à un régime tectonique distensif caractérisé par un axe d'extension N-S.

Les observations permettent de plus, d'affirmer que :
 — le dépôt des carbonates observés dans les fractures est synchrone de la tectonique distensive plioquaternaire ;
 — la circulation des fluides qui ont déposé ces remplissages est contrôlée par le réseau de fractures naturelles ouvertes ;
 — l'individualisation des ouvertures est liée en majeure partie à la distension N-S plio-quaternaire ;
 — les fractures N60 à 130, en raison de leur position suborthogonale à l'axe de traction σ_3 présentent les ouvertures les plus importantes et les plus continues et constituent de ce fait les drains où les fluides circulent préférentiellement.

Il est donc clair que la distension N-S exerce un contrôle déterminant sur la circulation des fluides hydrothermaux du Cézallier.

Références bibliographiques

- ANGELIER J., MAHOUSIS (1980). — Classification automatique et distinction des phases superposées en tectonique de faille *C.R. Acad. Sci. Fr., D*, **290** pp. 651-654.
- AL HASMI H., FEYBESSE J.L., LOISEAU Ph (1985). — Étude du système de failles contrôlant le contact entre le socle et les sédiments tertiaires de la Grande Limagne dans la région de Saint-Hérent (Cézallier, Massif central français). Documents du BRGM n° 95-10.
- ARTHAUD F., MATTE Ph. (1975). — Les décrochements tardi-hercyniens du SW de l'Europe. Géométrie et essai de reconstitution des conditions de la déformation. *Tectonophysics*, **25**, pp. 139-171.
- BERGERAT F. (1985). — Déformations cassantes et champs de contraintes tertiaires dans la plate-forme européenne. Thèse doct. État. Univ. P. et M. Curie, Paris VI, n° 85-07, 315 p.
- BLES J.-L., BONIJOLY D., CASTAING Ch., GROS Y. — Stress evolution on a continental shelf domain following the hercynian orogeny : the Massif Central and its borders (à paraître dans *Tectonics*).
- BONIJOLY D., CASTAING C., (1983). — Fracturation et genèse des bassins stéphaniens du Massif Central français en régime compressif. In « tectonique cassante en distension et en coulissement ». *Ann. Soc. Géol. Nord*, **103**, p.104-114.
- BONIJOLY D. (1982). — Inventaire des ressources nationales de charbon. Géologie prévisionnelle des charbons. Recherche de bassins houillers sous couverture sédimentaire dans le SW du Massif central. Rapport BRGM n° 82 SGN 401 GEO.
- BURG J.P. (1983). — Tectogenèse composée de deux segments de la chaîne de collision. Le sud du Tibet (suture du Tsangpo). La chaîne hercynienne en Europe (suture du Massif central). Thèse d'État USTL Montpellier.
- CAREY E. (1979). — Recherche des directions principales de contraintes associées au jeu d'une population de failles. *Rév. Géol. Dyn. Géogr. Phys.* **21**, pp. 57-66.
- DEBRAND-PASSARD S., GROS Y. (1980). — Fracturation de la Champagne berrichonne. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (7), **22**, n° 4, p. 647-653.
- FEYBESSE J.L. (1985). — La tectonique post-métamorphique du bloc de Rentières (Région d'Ardes, série du Cézallier). Les épisodes de fracturation tardi-hercyniens, oligocènes et quaternaires (MCF). Documents du BRGM n° 95-10.
- LESPINASSE M. (1984). — Contexte structural des gisements d'uranium de la Marche occidentale : fracturation, circulation fluide. *Géol. Géochim. Uranium*, Mém. Nancy, 1984, **8**, 200 p.
- LESPINASSE M., PECHER A. (1986). — Microfracturing and regional stress field ; study of the preferred orientation of fluid inclusion plans in a granite from M.C. France *Structural Geology*, **8**, n° 2, pp. 169- 180.
- LOISEAU Ph. (1987). — Relations entre les circulations des fluides et l'ouverture des fractures (ce volume).
- MATTAUER M., MERCIER J.L. (1980). — Microtectonique et grande tectonique. *Mém. hors. ser. Soc. Géol. Fr.*, n° 10, pp. 141-161.
- MATHONNAT M. (1983). — La série métamorphique du Cézallier (M.C.F). Lithologie et structure. Relations du groupe leptyn amphibolique avec les autres formations de la région. Thèse 3^e cycle U.E.R. Sciences exactes et naturelles. Univ. Clermont-Ferrand.
- PECHER A., LESPINASSE M., LEROY J. (1985). — Relation between fluid intrusion trails and regional stress field : a tool for fluid chronology. *Lithos*, **18**, pp. 229-237.
- PHILIP H. (1983). — Tectonique actuelle et récente dans le bassin méditerranéen et ses bordures ; ses relations avec la sismicité. Thèse État Montpellier II.
- TURPAULT M.P., FOUILLAC A.M., CATHELINÉAU M., LESPINASSE M., MEUNIER A., FEYBESSE J.L., LEROY J. (1987). — Circulations hydrothermales récentes et anciennes dans le Cézallier : les données des phases solides et fluides et des isotopes (ce volume).
- WEBER C., HIRN A., PHILIP H., ROCHE A. (1980). — Image géophysique de la France, in colloque C7, Géologie de la France. Mém. BRGM n° 107, p. 25-50.

PLANCHE 1

Photo 1 : Calcite syncinématique d'aspect fibreux (calcite A) dans une zone abritée (faille normale N80 observée à 979,70 m). Noter l'orientation des fibres par rapport au plan de la faille et à la direction d'extension. Le trait discontinu indique la position de la verticale. Echelle : x 25.

Synkinematic infilling (calcite A) inside a local aperture : normal fault sliding surface (N 80 striking; 979,70 m in depth).

Photo 2 : Calcite syncinématique d'aspect fibreux (calcite A) dans une zone abritée (faille normale décrochante N 17 observée à 1 020 m ; cf. figure 11). Noter la sidérite 1 déposée sur la calcite A et la calcite en mosaïque (calcite B) postérieure à la calcite A et à la sidérite. Le trait discontinu indique la position de la verticale. Échelle : x 25.

Wrenching normal fault (N 17 striking, 1 020 m in depth, see (fig. 11) ; multiphased filling :

- synkinematic calcite (CA)
- siderite 1 (Si)
- calcite B (CB).

Photo 3 (L.N) et 4 (L.P) : Calcite A en crêtes tapissées par de la sidérite 1 puis par du quartz automorphe. Le reste de l'ouverture est comblé par de la calcite en mosaïque (calcite B). Faille normale N88 observée à 1 226,50 m.

CA : calcite A, Si : sidérite, CB : calcite B. Échelle : x 25.

Normal fault (N 88 striking ; 1 226,50 in depth) ; multiphased infilling :

- calcite A (CA) – Quartz
- Siderite (Si) – Calcite B (CB).

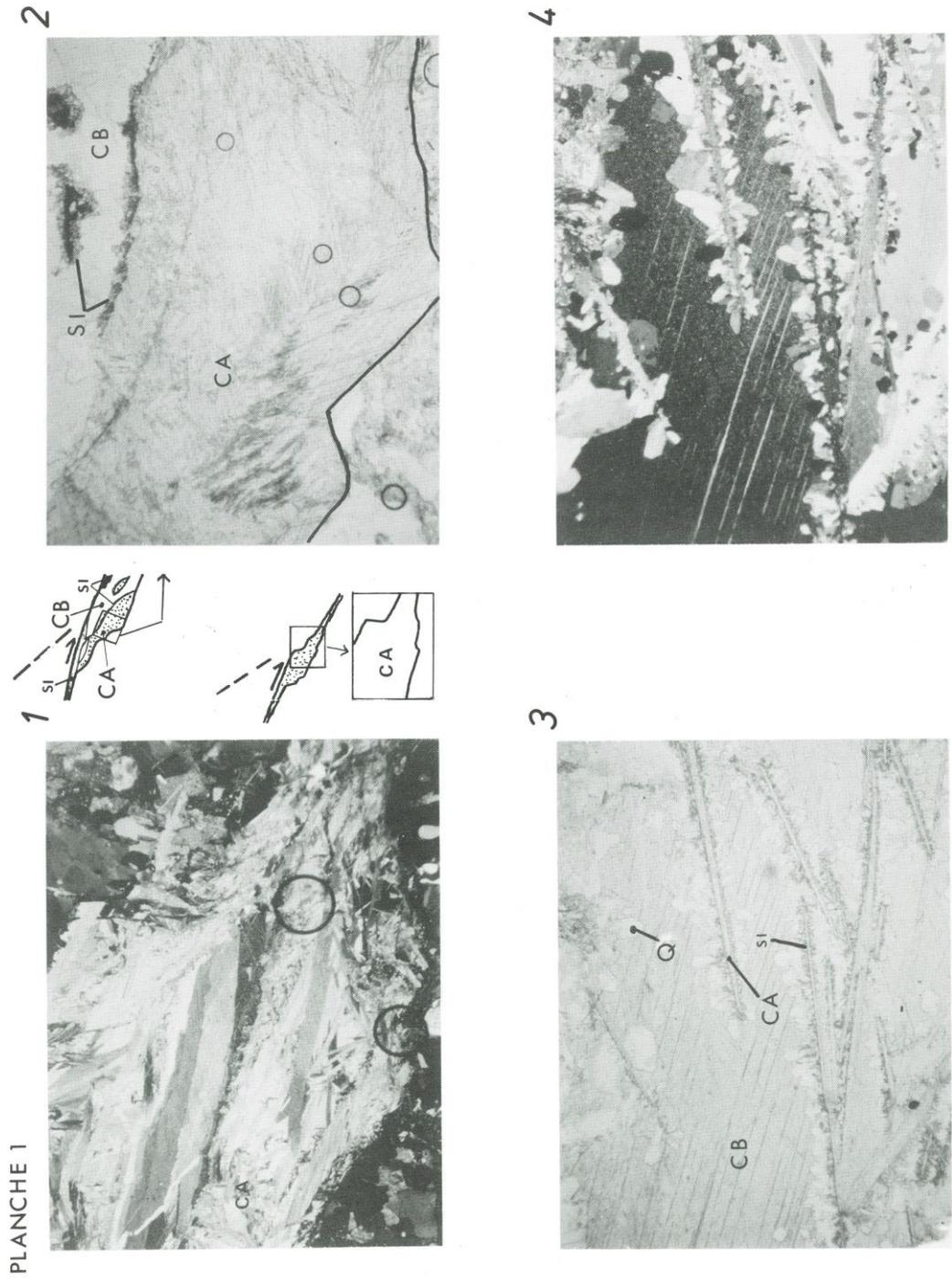


PLANCHE 1

PLANCHE 2

Photo 1 : Remplissage polyphasé 1. — calcite A, 2. — sidérite géodique 1, 3. — calcite B. Faille normale décrochante de la distension N-S observée à 1020 m (direction N15).

Multiphased infilling: 1. — calcite A, 2. — sidérite 1; 3. — calcite B. Normal-wrenching fault relative to the N-S distensive phase (N 15 striking, 1020 m in depth).

Photo 2 : Filonnet de calcite B recoupant la calcite A. Faille normale décrochante de la distension N-S observée à 1020 m (direction N15).

Calcitic (CB) vein intersecting the A calcitic infilling. Normal wrenching fault of the N-S distensive phase (N 15 in striking; 1020 m in depth).

Photo 3 : Remplissage polyphasé 1. — calcite géodique B, 2. — sidérite géodique 2, 3. — calcite géodique B. Faille normale décrochante de la distension N-S observée à 1151,50 m (direction N15).

CA : calcite A; CB : calcite B, Si : sidérite, or : orthogneiss. Échelle : X 25.

Multiphased infilling : 1. — calcite B, 2. — siderite 2, 3. — calcite B. Wrenching normal fault relative to the N-S distensive phase (N 15 striking; 1151,50 m in depth).

PLANCHE 2

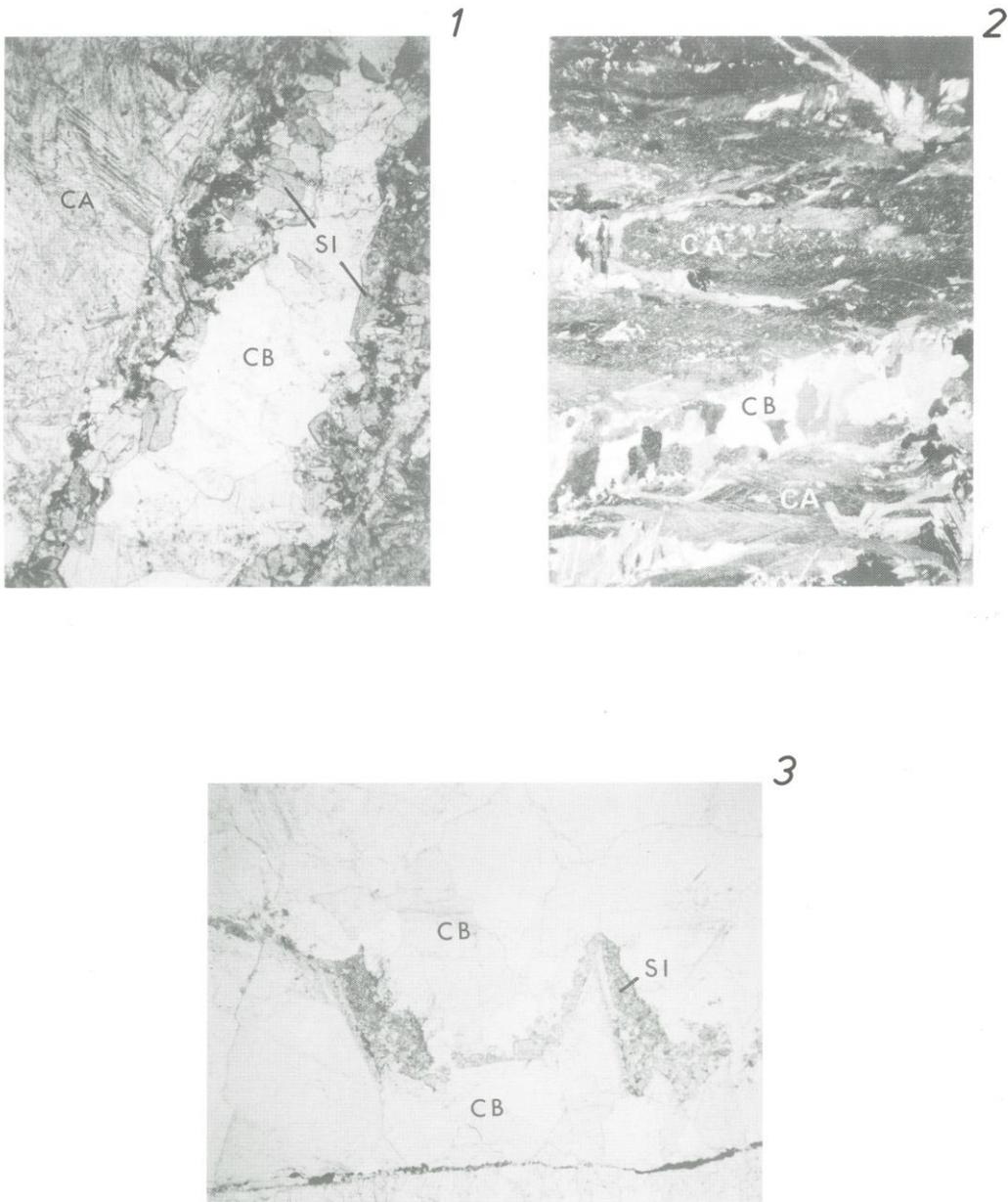


PLANCHE 2

PLANCHE 3

Microfractures associées à la faille normale N 130 de la figure 8 et chronologie des remplissages.

Microcracks associated to the N 130 striking normal fault (see figure 8) and infilling chronology.

Photo 1 : Zone relais entre deux microfractures affectant la calcite B et à remplissage de sidérite qui s'avère donc être postérieur à la calcite B.

Sideric infilling inside microcracks with B calcitic infilling.

Photo 2 : Microzone abritée avec calcite B bréchifiée et cimentée par la sidérite.

Siderite cemented calcitic (calcite B) breccia.

Photo 3 : Relais de deux microfractures qui affectent la calcite B, noter la bréchification de la calcite B et la cimentation des éléments par la sidérite qui est donc postérieure à la calcite B.

CB = calcite B ; Si = Sidérite, ZA = zone abritée, BR = brèche à éléments de CB et à ciment de Si, OR = orthogneiss, les flèches indiquent le sens de déplacement ; les pointillés indiquent la position de la verticale. Echelle : x 25.

Microcracks intersecting B calcitic infilling ; and sideritic cemented-calcitic (calcit B) breccia.

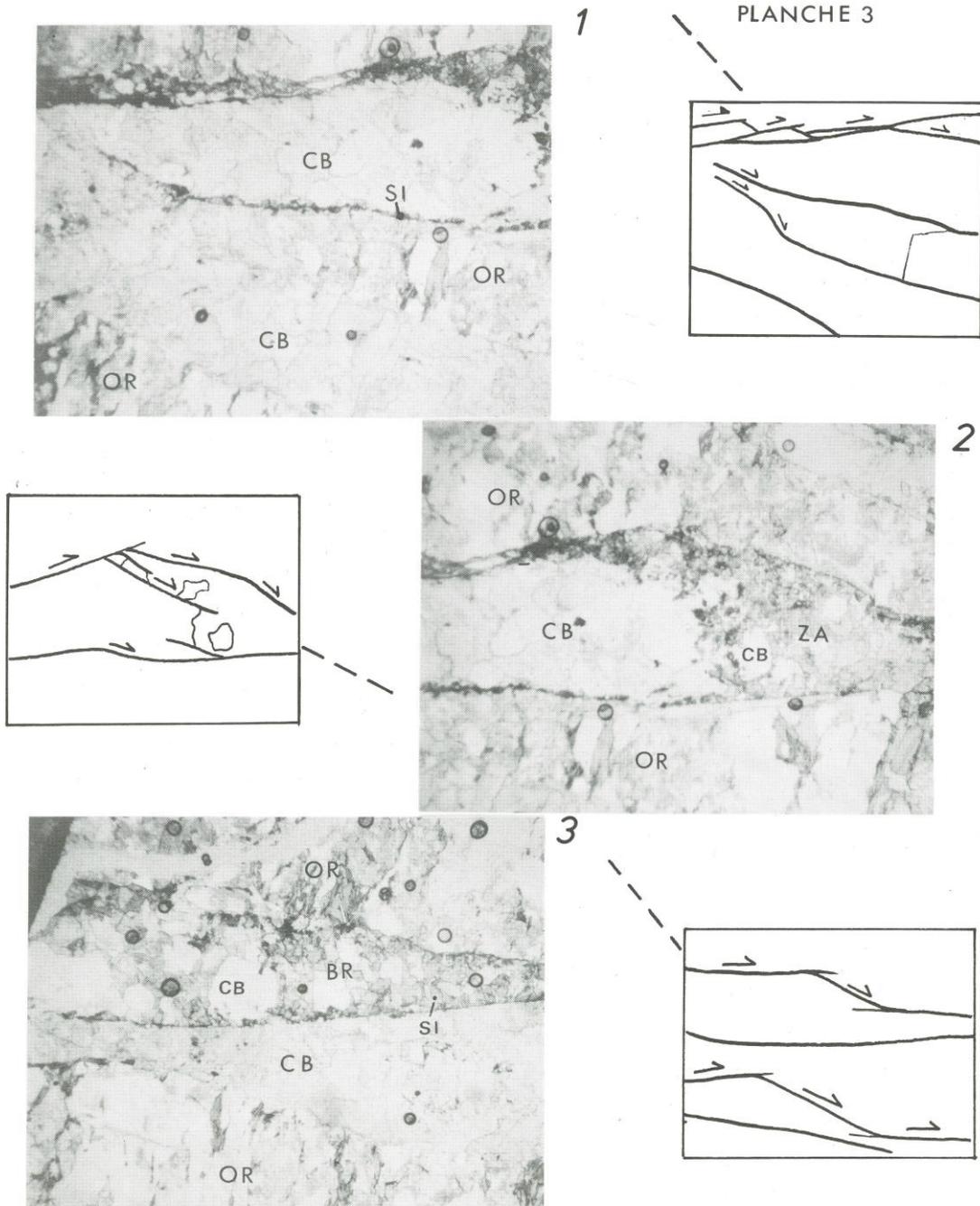


PLANCHE 3

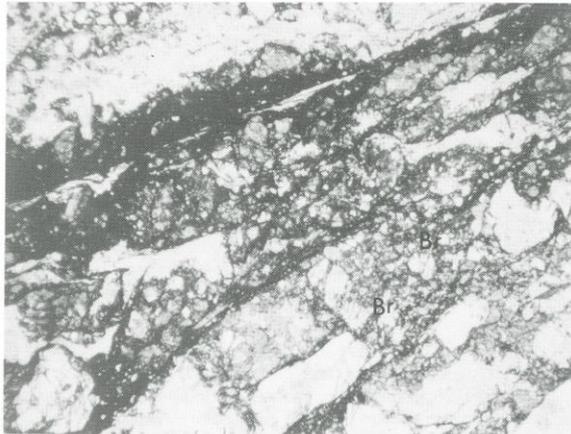
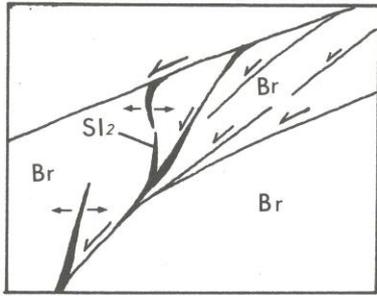
PLANCHE 4

Photo 1 : Zone de relais entre deux microfractures à remplissage de sidérite 2 affectant une microbrèche à ciment de sidérite 1.
Siderite 2 inside microcracks intersecting a sideritic (siderite 1) cemented microbreccia.

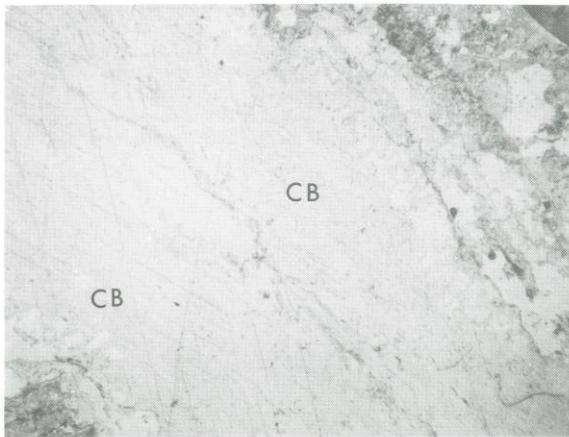
Photo 2 : Microfracture à jeu normal (noter les microrelais) affectant un remplissage de calcite B.
Normal microfault intersecting B calcitic infilling.

Br = brèche, Si = Sidérite, CB = calcite B, R = relais. Echelle : x 25.

PLANCHE 4



1



2

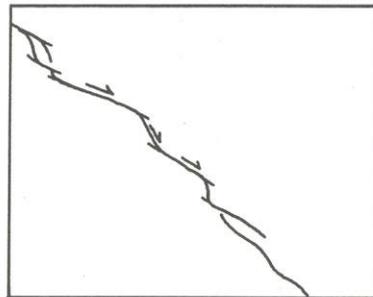


PLANCHE 4

ANNEXE 1

ANALYSE STATISTIQUE DE LA DIRECTION DES MICROFISSURES
ET DES TRAINÉES D'INCLUSIONS FLUIDES

par Marc Lespinasse.

Cette analyse a été menée sur des échantillons prélevés sur toute la longueur du sondage de Chassolle.

Pour chaque échantillon, plusieurs marqueurs microstructuraux ont été mesurés dans les quartz et les feldspaths : les microfissures (avec ou sans remplissage secondaire) et les trainées d'inclusions fluides (alignements d'inclusions secondaires formés par processus de fracturation-cicatrisation) (Lespinasse, 1984; Pecher *et al.*, 1985; Lespinasse et Pecher, 1986).

Les résultats sont présentés sous forme d'histogrammes reliant la direction à la fréquence (en %), chaque courbe étant lissée sur 3 points de mesures. Les échantillons étudiés ont été prélevés aux profondeurs — 189,8 m (C52) — 593 m (C38), — 1037,2 m (C18) (fig. 2).

Évolution selon z de la microfissuration, ses analogies avec la fracturation mésoscopique

L'essentiel de la microfissuration est répartie selon cinq directions majeures dont l'expression est variable suivant les échantillons. Ces directions correspondent aux familles F1 (N 160°E), F2 (N 20°E), F3 (N 50°E), F4 (N 85°E), et F5 (N 120°E) de la mésofracturation définies lors des études préliminaires (Feybesse *et al.*, 1985). F3 et F4 sont toutefois discrètes en profondeur (échantillon 18), alors que F1 et F5 y sont bien exprimées. F3 et F4 sont par contre mieux exprimées en surface (échantillon 52), où la microfissuration est assez différente de celle observée en profondeur. Il faut noter la présence à tous les niveaux de la famille F1. L'analogie de réseau entre les échantillons prélevés à — 593 et 1 0137 m suggère que le volume rocheux a probablement eu un

comportement mécanique analogue en chaque point au cours de son histoire.

Microfissuration et trainées d'inclusions fluides : géométrie des réseaux

Les trainées d'inclusions fluides sont disposées suivant les mêmes directions que celles des diaclases. Cependant, des différences de fréquence ont été observées suivant les échantillons. Par exemple, dans l'échantillon 52 les trainées sont de type F3 essentiellement, alors que la microfissuration présente des orientations plus variées (présence de N 85 et N 150 notamment). Les fluides ne sont donc pas piégés systématiquement dans chaque direction de microfracture.

L'étude a montré que les réseaux de microfissures et d'inclusions sont analogues aux réseaux de diaclases, et notamment se distribuent suivant 5 familles : N 20°E, N 50-60°E, N 85°, N 120°E et N 160°E. Seules les parties superficielles du sondage se distinguent par une géométrie différente, avec une expression importante de trainées orientées N 70°E. Cette observation est cependant à confirmer, car cette direction préférentielle pourrait être reliée à la proximité d'accidents N 70°E. Les trainées d'inclusions fluides sont les mieux exprimées dans les directions N 20, N 110 et N 150°E. Si l'on considère ces trainées comme étant des fractures de mode I (perpendiculaires à σ_3), leurs directions majeures sont compatibles avec divers événements régionaux de fracturation mais il n'est pas possible d'établir, dans l'état actuel des connaissances une corrélation précise. Seule, une approche des températures auxquelles les fluides ont été piégés pourrait permettre de situer les trainées d'inclusions fluides dans la succession des remplissages hydrothermaux et peut-être d'établir un lien avec les phases de fracturation identifiées.