

Photo-interprétation, tectonique cassante et thermalisme : exemple du domaine alpin (France)

par Jean-Claude GRILLOT * et Jean DAZY **

RÉSUMÉ. — Le thermalisme du domaine alpin est abordé par le biais de l'analyse des structures cassantes décelables à différentes échelles.

A partir des données structurales de terrain, d'informations sismotectoniques actuelles et d'interprétations photogéologiques aux échelles du 1/30 000 et du 1/15 000, la signification des linéaments détectés sur clichés pris par satellite (Landsat 1) est discutée.

Les sources thermales principales se localisant sur ces structures, qui ne sont décelées le plus souvent qu'à cette petite échelle, il est montré que la répartition des émergences, à l'échelle du domaine alpin, se calque sur des linéaments qui correspondent à des décrochements réactivés au cours d'épisodes tectoniques successifs, y compris et surtout à l'époque actuelle.

La présence de ces structures cassantes, que les seules analyses de terrain ne permettent pas dans la plupart des cas de soupçonner, atteste le rôle majeur des grandes zones décrochantes dans la pérennité ou l'apparition relativement récente des émergences thermales.

Ceci introduit une certaine cohérence dans la répartition de ces sources à l'échelle du domaine alpin; ce que ne peuvent montrer les analyses locales.

ABSTRACT. — *Photointerpretation, brittle tectonics and thermal springs: Examples from the Alpine realm (France).* This paper examines the location of hot springs in the Alps realm through analysis of brittle tectonics structures detected on different scales. The significance of the lineaments mapped on Landsat I satellite images is discussed from field structural data, from present day sismotectonic data and from geological interpretations to the 1/30 000th and the 1/15 000th.

The major thermal springs are located on those lineaments which are most frequently detected on the smaller scale. On the other hand, on the larger Alpine realm scale, hot waters distribution is connected with lineaments corresponding to reactivated strike-slip faulting, during successive tectonic phases, and more especially at the present time.

Field evidence alone does not always succeed in bringing out such brittle tectonics structures, whose presence testifies to the major part played by the large strike-slip faulted zones in the persistence or, conversely, the recent birth, of thermal springs. The distribution of thermal springs therefore exhibits some consistency *on an Alpine scale*; such consistency is not always obvious from local field observations.

1. Introduction

Vouloir aborder le thermalisme par l'analyse des structures tectoniques cassantes peut surprendre dans la mesure où il est admis que, de toute évidence, des liens étroits existent entre ce

type de phénomène et des accidents affectant, plus ou moins profondément, l'écorce terrestre.

Si ce lien est incontestable, en effet, dans les zones de grandes cassures actives jalonnées par des manifestations thermales spectaculaires (zones hydrothermales célèbres de Waiotapu et de

* Laboratoire d'Hydrogéologie, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 34000 Montpellier Cedex.

** Laboratoire d'Hydrogéologie, Institut Dolomieu, 38031 Grenoble Cedex.

White Island en Nouvelle Zélande par exemple), ces phénomènes existent aussi, bien que plus discrets, dans d'autres régions du globe où les observations de terrain ne permettent pas d'être aussi affirmatif. C'est par exemple le cas, en France, des bordures alpines et pyrénéennes, où les sources n'apparaissent pas le plus souvent au droit d'une grande cassure. D'autre part, ces sources peuvent présenter plusieurs points d'émergences qui ont des caractéristiques physico-chimiques parfois différentes, bien que ceux-ci se fassent sur une aire réduite (sources de la région d'Aix-les-Bains par exemple). De plus ces émergences apparaissent fréquemment à la faveur de diaclases, ou de failles à faible rejet apparent, ayant une extension en surface limitée.

De cette sorte, la relation entre grandes cassures profondes et thermalisme n'est plus aussi nette, et si cette interdépendance est admise, c'est davantage par analogie avec des zones plus probantes que par des preuves de terrain indiscutables.

Cette part de subjectivité mérite, à notre sens, quelque réflexion car elle va à l'encontre des principes de base de toute démarche scientifique.

Pour limiter ce manque d'objectivité, la photo-interprétation aux échelles courantes (1/50 000 et 1/30 000) est couramment pratiquée. Elle peut en effet permettre de rechercher, sur une plus grande superficie, des structures qui ont pu échapper aux observations de terrain. Mais cette technique, utile pour examiner la situation locale des émergences, n'est pas toujours fructueuse. Dans des régions à fort couvert végétal par exemple, les clichés perdent une grande partie de leur intérêt lorsque ce couvert masque tout ou en partie les structures recherchées. D'autre part, quand le relief est accentué, il est difficile de s'affranchir des effets de distorsion photographique, ce qui rend le relevé imprécis.

Depuis l'avènement des satellites et les progrès réalisés en matière de prises de vue, le cliché aérien obtenu à très petite échelle offre par contre de grandes possibilités. Les satellites d'observation évoluant à haute altitude (environ 900 km pour Landsat 1), et étant équipés de capteurs optiques et électroniques à fort pouvoir de résolution, permettent de visionner dorénavant en *une*

seule image la couverture de zones de grandes dimensions (34 000 km² par cliché Landsat), sans que les variations de relief, même les plus accentuées, n'introduisent de grandes distorsions. Ces prises de vue possèdent donc de gros avantages par rapport aux clichés classiques, et leur qualité, liée à la technique d'analyse, leur est également bien supérieure. En effet, il ne s'agit pas d'une simple photographie, mais d'une *restitution d'image* à partir de l'énergie électromagnétique émise, diffusée ou réfléchiée par les objets situés à la surface du sol. Il s'en suit que la détection de ces objets est faite avec une finesse et une précision qui dépassent largement ce que peut réaliser l'œil humain qui, contrairement aux capteurs, ne peut séparer et même, dans certains cas, est incapable de détecter, des radiations de longueur d'onde différentes.

En d'autres termes, en s'affranchissant au maximum aussi bien des effets de relief que du couvert végétal, et en allant au-delà de la perception visuelle humaine, le cliché pris par satellite offre un intérêt tout particulier.

En résumé, pour toute analyse géologique de surface, on dispose actuellement des types d'informations suivantes :

— celles de terrain, qui sont indispensables pour la reconnaissance des structures cassantes, par exemple la fréquence, la distribution spatiale et la nature des éléments structuraux ;

— celles issues de la photo-interprétation aux échelles classiques permettant, mais seulement dans de bonnes conditions d'affleurement, de passer de l'observation ponctuelle à celle d'une grande superficie ;

— celles enfin fournies par la photo-interprétation réalisée à très petite échelle qui révèlent des linéaments affectant de vastes zones et que l'on peut repérer avec un minimum d'imprécisions quelles que soient les formes de relief et la densité du couvert végétal.

Toutefois, lorsque ces informations sont acquises, il reste à préciser la signification des linéaments et leurs éventuelles relations avec les structures observées sur le terrain. Par exemple, sur des documents pris à haute altitude, le renseignement restitué est imprécis : rien ne permet de dissocier les véritables fractures de simples ali-

gnements morphologiques, et la nature des discontinuités reste inconnue. De même à plus grande échelle, et dans la mesure où une définition des clichés qui rendent le mieux compte des observations de terrain n'est pas apportée, l'information recueillie n'a pas de signification précise.

Ces questions, abordées dans des travaux antérieurs entre autres par l'un d'entre nous, ont reçu quelques réponses positives bien qu'encore partielles (J.C. GRILLOT, à paraître). Il a été montré aussi qu'en terrain cristallin des zones semi-arides, si le 1/200 000 (clichés Ersat) est bien adapté aux analyses de champs de linéaments (P. BERARD, 1982), le 1/20 000 et le 1/50 000, selon l'importance du couvert latéritique, rendent mieux compte des observations structurales faites sur affleurements (M. ENGALENC *et al.*, 1979). En milieu sédimentaire subtabulaire, et selon la densité du couvert végétal, le 1/50 000 et le 1/30 000 se sont avérés les plus appropriés aux études structurales en question (J.C. GRILLOT, 1979; M. RAZACK, 1979).

Dans le domaine alpin, pour aborder en premier lieu l'analyse des structures cassantes, on dispose d'informations acquises à plusieurs niveaux d'investigation : il s'agit d'une part d'un relevé des linéaments au 1/2 500 000 (clichés Landsat 1, d'après B. BIJU-DUVAL *et al.*, 1976); d'autre part d'interprétations photogéologiques réalisées au 1/15 000 et au 1/30 000 dans quelques massifs subalpins; enfin de relevés structuraux effectués dans ces massifs, sur le terrain.

Dans le même domaine, et sur le plan thermal, on peut s'appuyer sur un inventaire des principales sources (B.R.G.M., 1973) qui peuvent être classées en deux groupes : celles qui sont minérales froides et dont la température ne dépasse pas la moyenne annuelle de celle de l'air au lieu d'émergence considéré; celles qui sont thermales et qui présentent une température plus élevée.

Cette différenciation thermique est déjà en soi une preuve de l'existence ou non, dans la zone d'émergence, de discontinuités profondes et à forte perméabilité permettant le transfert, par circulations d'eaux descendantes puis ascendantes, du flux de chaleur depuis la profondeur jusqu'en surface.

Pour les sources chaudes, cette relation a bien été confirmée ponctuellement dans des exemples pris tant en région de socle (J.P. GIBERT *et al.*, 1975; F. BERTHIER, 1982) qu'en domaine de couverture (J. DAZY et J.C. GRILLOT, 1981-1982). Cependant, ces preuves n'ont été apportées que dans des situations locales, et elles ne mettent pas suffisamment en valeur le rôle que jouent, ou que peuvent jouer, les phénomènes tectoniques actuels. Or les circulations hydrothermales provoquent à terme, par précipitations des sels dissous, un colmatage des conduits de remontée. Aussi la pérennité de sources anciennes, ou l'apparition relativement récente de certaines d'entre-elles, sous-entend que le contexte tectonique a maintenu, ou favorisé, ces circulations.

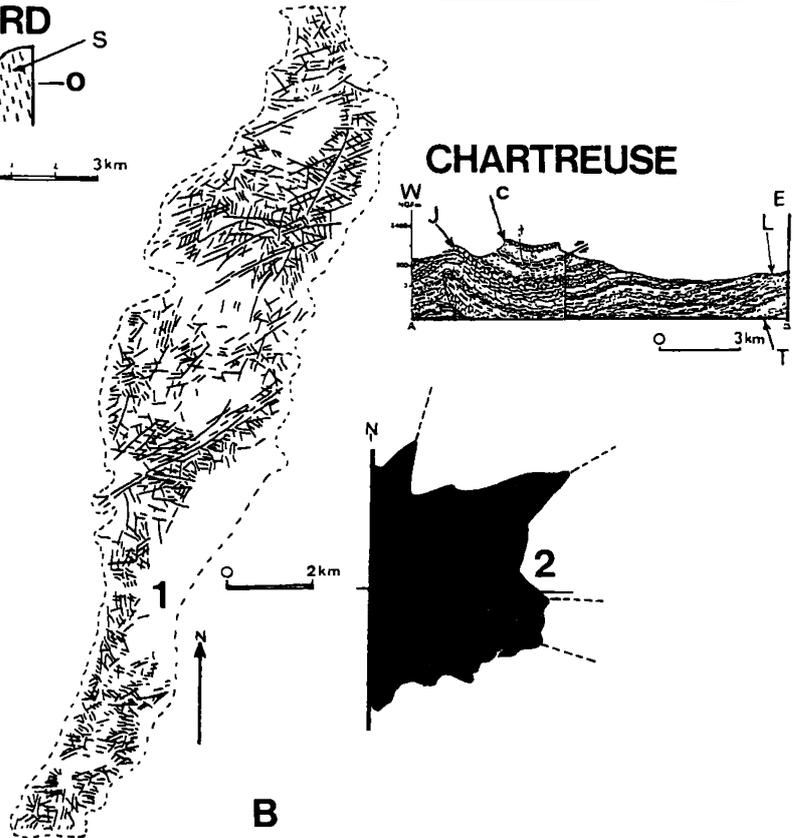
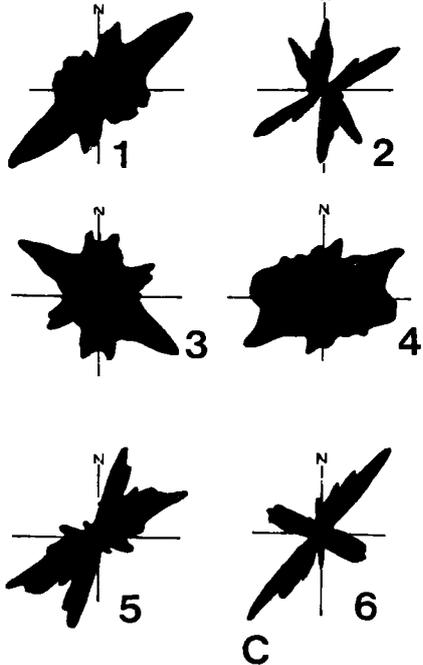
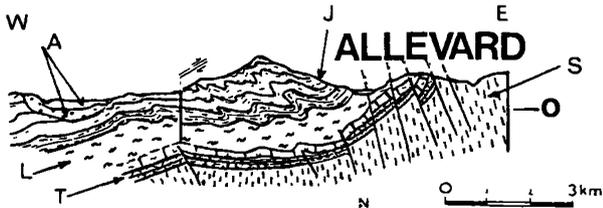
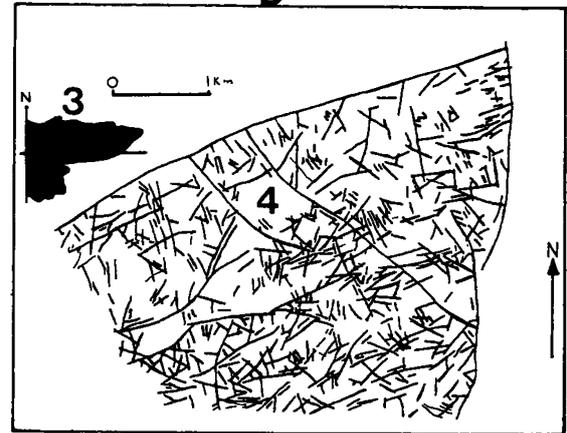
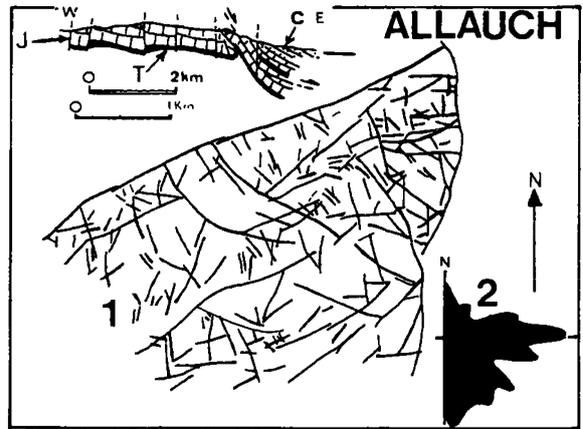
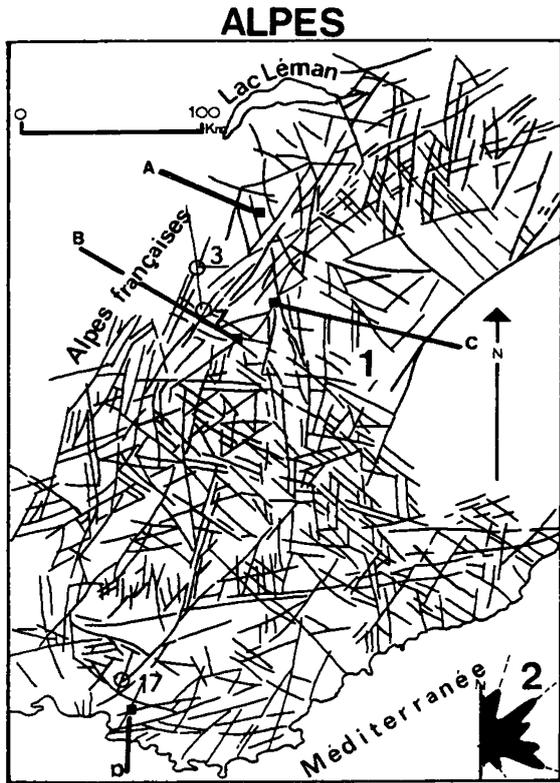
C'est pourquoi, après avoir analysé trois exemples locaux, on se propose d'examiner, à l'échelle alpine, l'occurrence d'émergences thermales en fonction d'une reconnaissance, à différentes échelles, des structures cassantes, et de leurs éventuels rejeux successifs. Cette analyse est donc basée sur la confrontation entre données issues de la photo-interprétation, et relevés structuraux sur le terrain (J.C. GRILLOT, 1981). Elles tiennent compte aussi des observations tectoniques et sismotectoniques se rapportant au champ de contrainte actuel (C. WEBER *et al.*, 1980).

2. Photo-interprétation à différentes échelles dans le domaine alpin (fig. 1)

Trois sites hydrothermaux ont fait tout d'abord l'objet d'analyses détaillées : il s'agit, en allant du nord au sud, des sources d'Aix-les-Bains, de l'émergence d'Allevard, et de celle d'Aix en Provence.

Ces sources se localisent sur un ou plusieurs linéaments décelés au 1/2 500 000 (fig. 1, Alpes 1). Après traitement optique (C. DROGUE *et al.*, 1975) de l'ensemble de ces structures, une organisation directionnelle apparaît selon essentiellement trois familles :

- subméridienne à NNE-SSW;
- NE-SW;
- WNE-ESE et NW-SE.



Dans les massifs carbonatés proches des sources d'Allevard et d'Aix-en-Provence (Allevard-Chartreuse et Allauch), la photo-interprétation aux échelles du 1/50 000 et du 1/30 000 introduit un *effet d'échelle* marqué par une prédominance variable des familles de linéaments (intensité des pics différente), alors que les directions se conservent. En effet, dans la région d'Allevard (fig. 1C), les séries permotriasiques et liasiques présentent une famille de joints orientée NW-SE, ayant un poids relatif plus important au 1/15 000 (fig. 1C₂) qu'au 1/30 000 (fig. 1C₁). Dans le Dogger, cette prédominance a tendance à s'inverser (fig. 1C₃ et 1C₄). Elle est encore différente dans les micaschistes (fig. 1C₅ et 1C₆).

Dans les massifs voisins de la Chartreuse (fig. 1 B), au niveau des formations carbonatées du faciès urgonien surmontant les assises jurassiques d'Allevard, les directions NNE-SSW, NE-SW et WNW-ESE présentent au 1/30 000 une intensité relative sensiblement comparable.

Enfin, dans le massif d'Allauch (fig. 1 D), le 1/30 000 et le 1/15 000 font nettement ressortir la direction WNW-ESE (poids relatif équivalent), alors que la direction NW-SE est davantage marquée au 1/30 000.

Ces résultats traduisent des caractéristiques du milieu assez remarquables :

— les linéaments s'organisent en familles de direction constante : leur distribution n'est donc probablement pas aléatoire, et ceci quelle que soit l'échelle d'observation;

— les directions de ces linéaments se conservent quelle que soit la partie de la série lithostratigraphique considérée;

— la prédominance relative d'une famille sur l'autre est par contre très variable selon la série, et dépend de l'échelle utilisée.

Ce dernier point traduit l'*effet d'échelle* (M. RAZACK, 1980) qui peut refléter l'incidence de la lithologie (faciès et épaisseur des strates) sur la longueur et la maille des éléments d'une même famille directionnelle, ce qu'une grande échelle peut mieux dévoiler qu'une petite lorsque les linéaments sont fins et serrés, par exemple dans les séquences calcaro-marneuses (J.C. GRILLOT, 1977).

3. Tectonique cassante polyphasée ante-pliocène

3.1. ANALYSES STRUCTURALES RÉGIONALES

Dans le massif de la Chartreuse (fig. 2), l'expression quantitative de l'ensemble fissural (sans distinction dans un premier temps entre failles et diaclases), rend compte d'une organisation des joints selon un axe principal orienté WNW-ESE. Cet axe correspond de plus à la direction moyenne du raccourcissement Z_a de la phase de compression alpine de Miocène supérieur (histogrammes 1 et 2 en cartouche).

Par rapport aux grands décrochements dextres orientés NE-SW qui affectent le massif (J. GOGUEL, 1948; C. KERCKHOVE et P. ANTOINE, 1964; J.P. ROBERT, 1976; M. GIDON, 1981 a et b), la fracturation s'organise plus précisément dans les directions NNE-SSW, NE-SW, WNW-ESE et NW-SE (histogrammes de 1 à 6 en cartouche).

Fig. 1. — *Photo-interprétation et traitement de l'information dans le domaine alpin.*

ALPES : champ de linéaments (1) relevés sur clichés Landsat 1 d'après BIJU-DUVAL B. *et al.*, 1976; (2) traitement au banc d'optique.

A : situation géographique des massifs de la Biolle et du Revard.

B : massif de la Chartreuse. Champ de fractures relevées au 1/30 000 (1) et traitement (2).

C : massif d'Allevard. Echelle du 1/30 000 dans les micaschistes (1), dans les séries permotriasiques et liasiques (2), les séquences du Dogger (3) et du Néocomien (4). Echelle du 1/15 000 dans les micaschistes (5) et dans le Permo-Trias-Lias (6).

D : massif d'Allauch. Echelle du 1/30 000 (1 et 2) et du 1/15 000 (3 et 4).

Légendes des coupes : A : Alluvions récentes; C : Crétacé (U : Urganien); J : Jurassique; L : Lias; T : Trias; S : Socle micaschisteux.

SOURCES : 3 : Aix-les-Bains; 7 : Allevard; 17 : Aix-en-Provence.

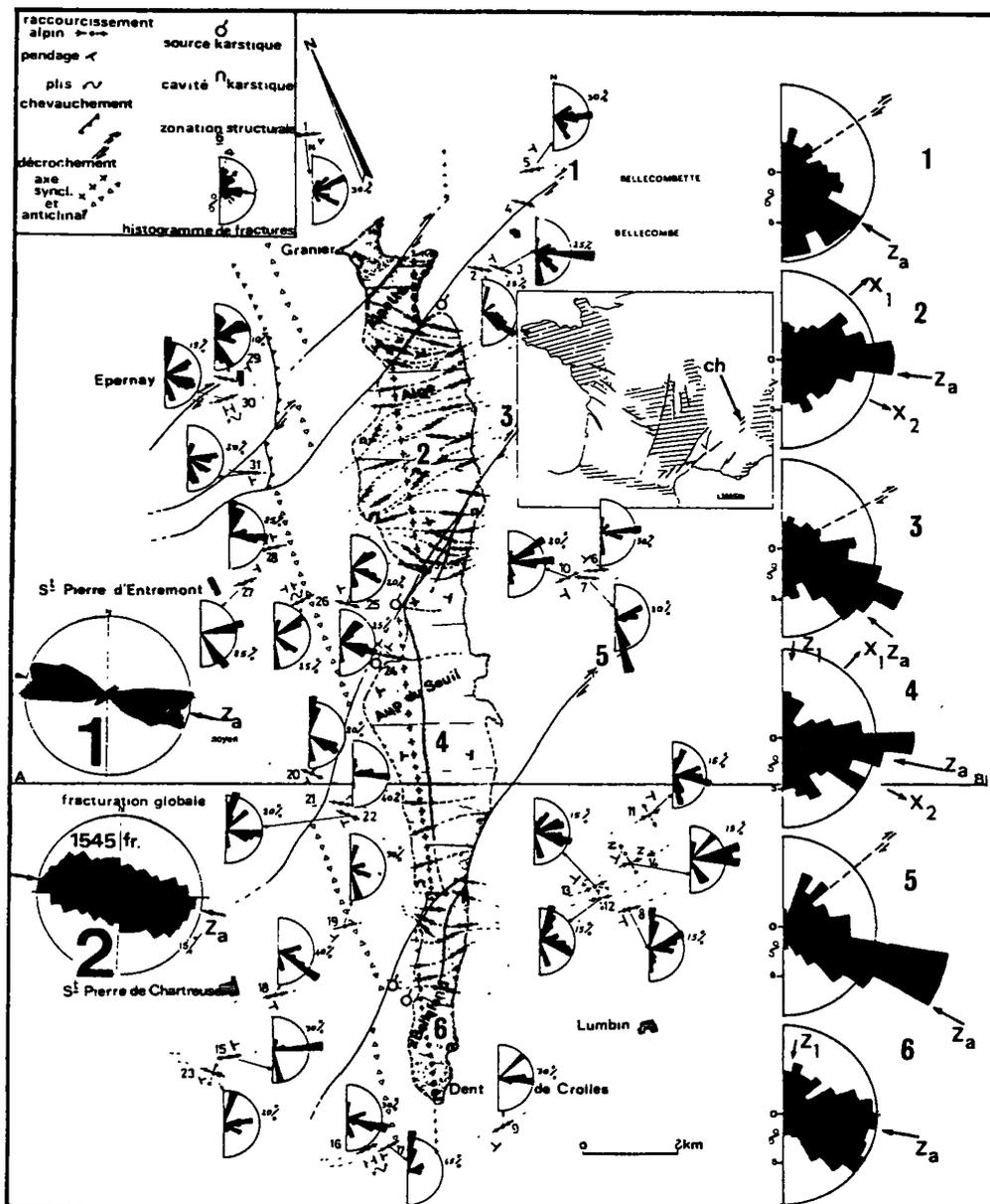
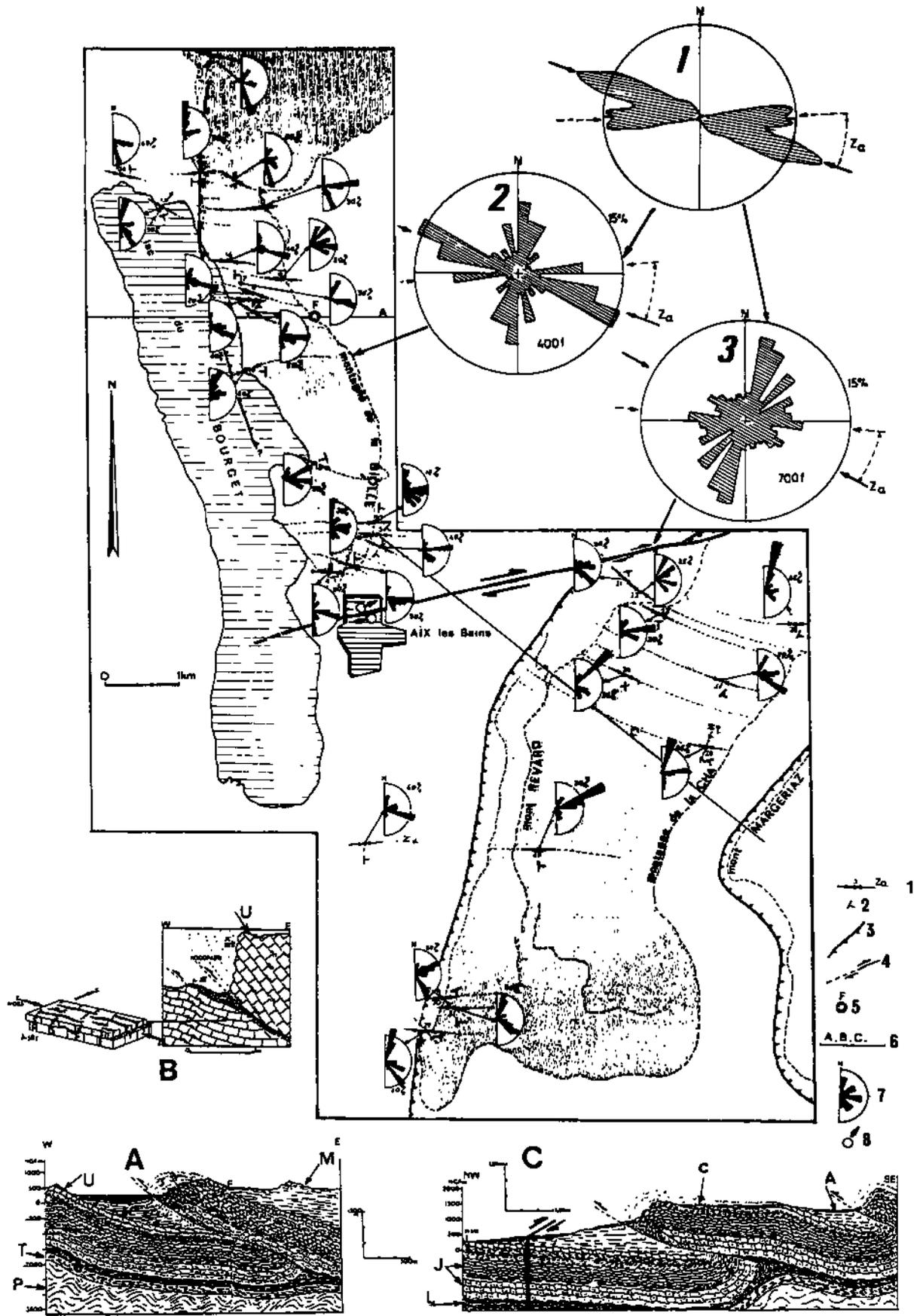


Fig. 2. — *Fracturation et tectonique sur le massif de la Chartreuse.*

Z_a : raccourcissement horizontal de la phase alpine d'âge Miocène supérieur.
 Z_1 : raccourcissement horizontal de la phase pyrénéenne d'âge Eocène supérieur.
 X_1 : allongement horizontal d'une distension anté-Eocène.
 X_2 : allongement horizontal de la distension d'âge Oligocène moyen.
En cartouche : Direction moyenne de Z_a (1); fréquence relative des fractures sur l'ensemble du massif (2).
 A-B : coupe (voir figure 1).

Fig. 3. — *Fracturation et tectonique sur les massifs de la Biolle et du Revard.*

En cartouche : Raccourcissement horizontal Z_a moyen de la phase alpine (1); fréquence relative de la fracturation sur le massif de la Biolle (2) et sur le Revard (3).
Légende des coupes : A : Alluvions récentes; M : Miocène; C : Crétacé (U : Urgonien); J : Jurassique; L : Lias; T : Trias et P : Paléozoïque.
Légende de la carte : Raccourcissement alpin Z_a déterminé sur stations microtectoniques (1); pendage des strates (2); chevauchement (3); décrochement (4); forage pétrolier (5); localisation des coupes (6); histogramme de fréquence des fractures (7). Pour les coupes, voir fig. 1; sources thermales d'Aix-les-bains (8).



En tenant compte des variations de fréquence des familles de joints, et de la nature des fractures, une interprétation de ces structures cassantes a déjà été proposée (J.C. GRILLOT, 1979), qui montre qu'en réalité la phase alpine affecte une couverture déjà fracturée selon la majorité des directions que l'on détecte actuellement.

Il en est de même dans les massifs de la Chambotte-Biolle et du Revard situés, respectivement au nord et à l'est des sources d'Aix-les-Bains (fig. 3) et dont les directions moyennes du raccourcissement alpin ont été obtenues (fig. 3-I), après traitement de ces directions, par filtrage optique. Toutefois, on note une particularité entre ces deux massifs concernant la fréquence des joints : si, dans la Chambotte, l'organisation fissurale montre une intensité dominante dans la direction du raccourcissement alpin (histogramme 2), elle est pratiquement oblitérée sur le Revard (histogramme 3). Par contre, dans chacun d'eux, apparaît une orientation NNE-SSW très discrète par ailleurs sur la Chartreuse.

Cette hétérogénéité spatiale de la fissuration, déjà interprétée dans des travaux antérieurs (J.C. GRILLOT, 1977), montre que très probablement l'intensité fissurale des séries carbonatées est contrôlée par une autre facteur que la contrainte principale. On peut penser que l'agencement sédimentaire du milieu (variations de faciès, distribution et épaisseur des strates) intervient alors de façon prépondérante.

Du point de vue structural (fig. 4), l'analyse des structures cassantes, présentant un ou plusieurs mouvements successifs, confirme le fait que la plupart des fractures sont antérieures à la phase alpine de la fin du Néogène (M. GIDON et J.L. PAIRIS, 1976). A ce titre, si l'on tient compte des états de contrainte anté-miocènes mis en évidence dans ces massifs (en distension et en

compression avec respectivement extension et raccourcissement orientés NNE-SSW), un modèle génétique d'apparition des fractures, qui s'appuie sur l'évolution probable du sud-est de la France (A.F. BAUDRIMONT et P. DUBOIS, 1977; P. CHOUKROUNE et M. MATTAUER, 1978), est proposé sur la figure 5.

Dans la région d'Allevard (fig. 6), l'expression quantitative de la fracturation dans le Lias (A_1), le Dogger (A_2), et les micachistes (A_3), permet de suivre la répartition directionnelle des fractures, et leurs fréquences, depuis le socle micaschisteux jusqu'à la couverture sédimentaire.

On peut ainsi observer une bonne concordance directionnelle des joints affectant les deux milieux, bien que les fréquences soient fortement dissemblables. Ces observations vont dans le sens de conclusions formulées antérieurement et selon lesquelles la fracturation de couverture est commandée par des mouvements du socle (J.C. GRILLOT, 1981).

En ce qui concerne les champs de contrainte ayant marqué ce massif jusqu'au Pliocène (A_4), deux tenseurs (σ_1 horizontaux orientés WSW-ENE et WNW-ESE) semblent s'individualiser. Leur interprétation cependant est encore discutée puisque, selon les auteurs, il s'agit soit d'un seul état marqué par des déviations à proximité d'accidents préexistants (J.C. GRILLOT, 1979); soit de deux phases distinctes (J.M. FRANÇOIS et G. MASSONNAT, 1981-1982). Il est à peu près certain toutefois que ces manifestations tectoniques sont d'âge Miocène supérieur. Quant aux mouvements sur fractures (A_5), ils affectent de même manière des joints ayant une orientation identique à celle des discontinuités rencontrées dans les massifs voisins (fig. 4).

Dans le massif d'Allauch, situé au sud du domaine alpin, la répartition des fractures fait

Fig. 4. — Structures tectoniques cassantes.

A et B : massif de la Chartreuse.

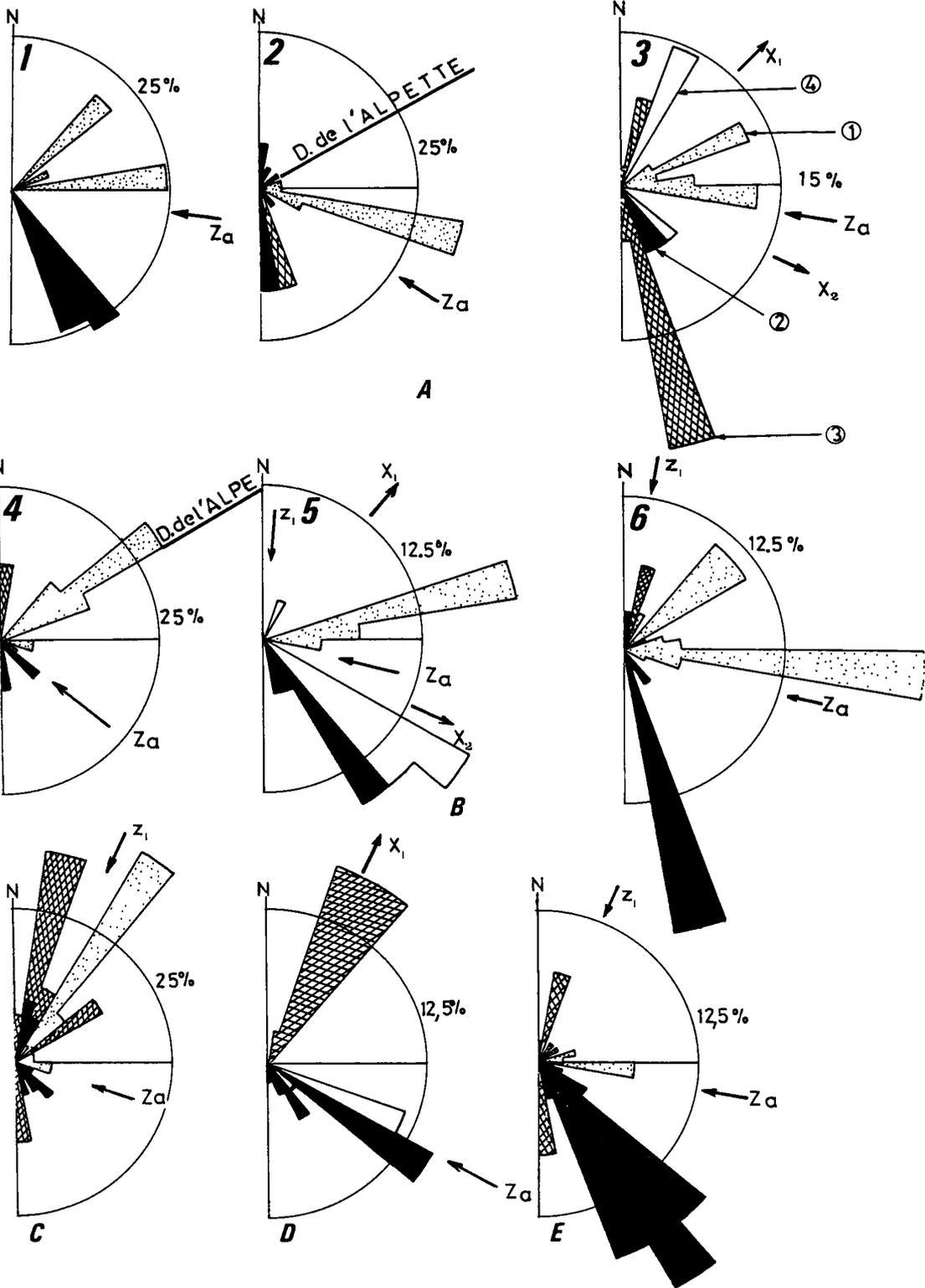
C : massif de la Biolle.

D et E : massif du Revard (pour la situation des histogrammes A et B voir fig. 2).

Légende des structures (histogramme 3) : décrochements dextres (1); décrochements sénestres (2); failles inverses (3); failles normales (4).

Légende des axes de déformation : voir celle de la figure 2.

Dans le massif du Revard, l'histogramme D correspond aux structures proches de l'accident décrochant d'Aix-les-Bains (stations 21, 22 et 23 fig. 3); l'histogramme E pour l'ensemble des structures relevées sur les autres stations microtectoniques.



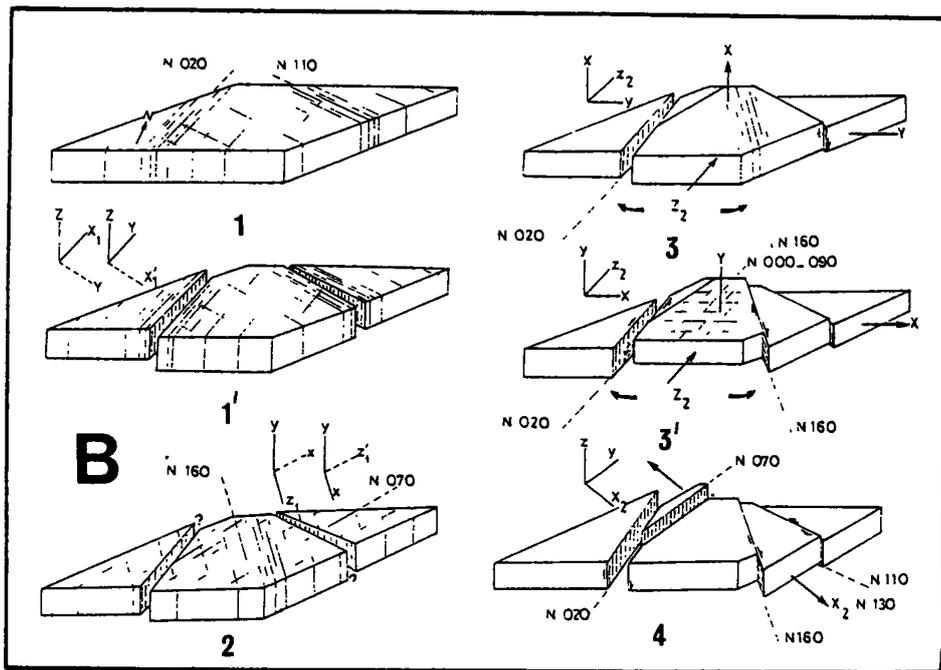
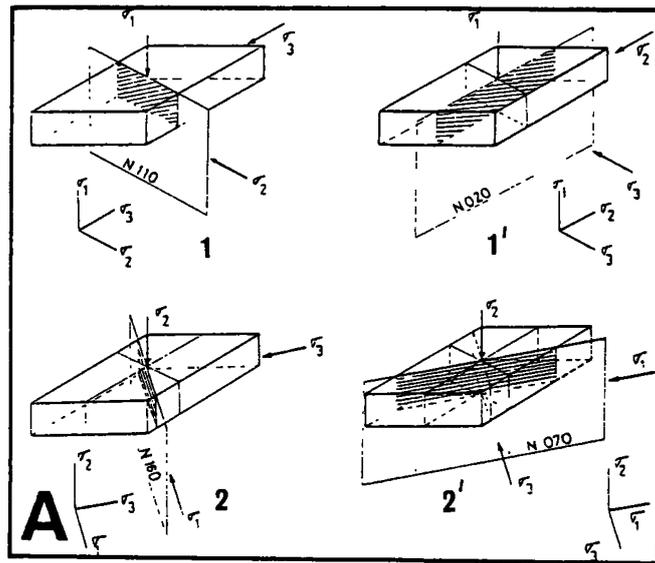


Fig. 5. — Contraintes (A) et déformations (B) : modèle d'apparition des fractures et jeux successifs anté-pliocènes. Distension anté-cénomaniennne (1 et 1'); phase pyrénéenne précoce (2) d'âge Crétacé supérieur (?); phase pyrénéenne d'âge eocène supérieur (3 et 3'); distension d'âge Oligocène moyen (4).

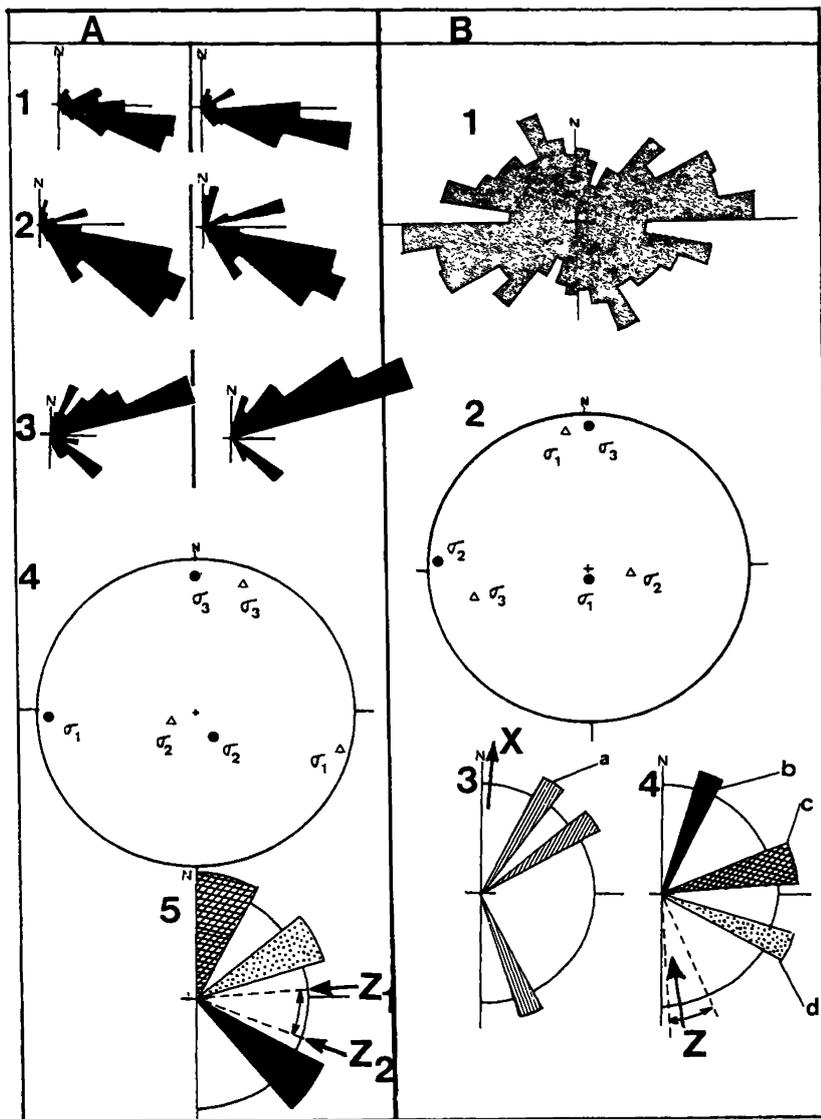


Fig. 6. — Fracturation, contraintes et structures cassantes associées dans les massifs d'Alleverd (A) et d'Allauch (B) d'après FRANÇOIS J.M., 1980

- A : fréquence directionnelle des grandes fractures et toutes discontinuités confondues dans le Lias (1), le Dogger (2) et les micaschistes (3).
Tenseurs de contrainte en compression avec σ_1 orientés ENE-WSW et ESE-WNW (4).
Structures cassantes associées (5).
- B : fréquence directionnelle de toutes fractures confondues (1). (2) tenseurs de contrainte en compression (σ_1 NNW-SSE) et en distension (σ_3 N-S).
Structures cassantes associées (a : failles normales; b : décrochements sénestres; d : décrochements dextres; c : failles inverses lors de la compression (4) et de la distension postérieure (3)).

ressortir des familles directionnelles (fig. 6 B₁) très voisines de celles qui se détachent dans les massifs septentrionaux (fig. 2 et 3). Par contre, les fréquences dans une direction donnée sont comparativement différentes.

Pour ce qui est des champs de contrainte reconstitués dans ce massif (fig. 6 B₂), deux tenseurs anté-pliocènes apparaissent : l'un de compression (σ_1 horizontal subméridien), l'autre de distension (σ_3 horizontal lui aussi subméridien). Le premier se rapporterait à la phase pyrénéo-provençale de l'Eocène supérieur, le second à la distension de l'Oligocène moyen (J.M. FRANÇOIS, 1980). Quant aux mouvements sur fractures impliqués dans les jeux successifs (fig. 6 B₃ et B₄), ils précèdent probablement, étant donné la constance directionnelle des familles de fractures du Nord au Sud du domaine alpin externe, ceux qui ont ensuite été induits par la phase alpine.

3.2. SYNTHÈSE DES DONNÉES STRUCTURALES

a) *Sur un plan quantitatif*

Les relevés de terrain, exprimant la fréquence des joints selon les directions, font apparaître une assez remarquable constance directionnelle des familles de fractures dans le domaine alpin. On retrouve en effet, dans les quatre massifs, les directions NNE-SSW, NE-SW, WNW-ESE et NW-SE. Les fréquences sont cependant très variables, aussi bien à l'intérieur d'un même massif que d'un secteur à un autre. Elles sont probablement dépendantes de l'agencement sédimentaire du milieu, comme on l'a suggéré plus haut.

b) *Sur un plan qualitatif*

Ces joints ont une histoire complexe, leur genèse étant liée à des épisodes tectoniques successifs, l'organisation fissurale est donc aussi étroitement contrôlée, au niveau de sa distribution directionnelle, par le contexte tectonique; il se confirme bien qu'elle n'est pas aléatoire.

Il en résulte que les fractures ont été affectées par des mouvements soit en ouverture (décrochements, failles normales), soit en fermeture

(failles inverses), selon la direction qu'elles avaient relativement au champ de contrainte du moment considéré.

Ainsi :

1) Dans les massifs sub-alpins situés schématiquement au Nord d'un axe « limite Sud des massifs du Vercors et du Pelvoux », il apparaît que le Miocène supérieur se caractérise par des jeux décrochants sur fractures orientées NE-SW, WNW-ESE et NW-SE. A cette époque, ces mouvements ont tendance à réouvrir ces directions fissurales et à favoriser la reprise ou l'apparition éventuelle de circulations souterraines.

2) Dans les massifs sub-alpins situés schématiquement au Nord d'un axe (Diois, Barronies, etc) certains de ces accidents (NNE-SSW et NE-SW) ont eu tendance à rester ouverts depuis l'Eocène supérieur jusqu'au Pliocène (décrochements et failles normales).

4. Thermalisme alpin et structures cassantes

4.1. LINÉAMENTS ET THERMALISME

Pour des raisons d'observations structurales limitées au voisinage immédiat des émergences d'Allevard et d'Aix-en-Provence, les données de terrain ne permettent pas de démontrer dans ces exemples, l'existence d'une nette relation entre thermalisme et grandes fractures. En ce qui concerne les émergences principales d'Aix-les-Bains (sources Alun-Soufre), des indices tectoniques, matérialisés par des déviations du champ de contrainte alpin, ont par contre permis de mettre en évidence un grand décrochement dextre (fig. 3) à l'origine du thermalisme relativement prononcé de ces sources (46 °C), et de leur important débit (J. DAZY et J.C. GRILLOT, 1981-1982).

Cette difficulté rencontrée n'est en fait qu'apparente. On a pu voir en effet que pour caractériser la géométrie fissurale des aires d'émergences thermales, l'analyse de terrain et la photo-interprétation classique, *sur des massifs environnants*, lorsque les conditions d'affleurement le permettent, étaient significatives de cette géométrie. Ceci permet de distinguer parfois certaines directions

fissurales ayant joué en ouverture (décrochements, failles normales), et qui ont un rôle probable dans les manifestations thermales. Cependant, dans la plupart des cas, ce n'est qu'à une petite échelle que l'on peut déceler les structures cassantes recoupant ces aires d'émergences. Or ces structures présentent une organisation directionnelle très similaire à celle qui apparaît à l'échelle de terrain. Elles peuvent donc être utilisées pour examiner, non plus localement, mais sur un plus vaste domaine, la position d'un plus grand nombre de sources.

C'est ce qui a été entrepris à l'échelle alpine, en tenant compte des mouvements récents sur fractures mis en évidence par des analyses sismotectoniques faites récemment dans les Alpes.

4.2. NÉOTECTONIQUE ET SISMICITÉ

Des mouvements néotectoniques verticaux ont été mis en évidence par comparaison entre des nivellements successifs réalisés dans le Sud-Est de la France (J. FOURNIQUET *et al.*, 1977). D'autre part, en tenant compte d'un modèle d'évolution tectonique du système alpin en Méditerranée (P. TAPONNIER, 1977), une interprétation cinématique des Alpes du Sud a été proposée à partir d'observations tectoniques et sismiques actuelles (H. PHILIP et P. TAPONNIER, 1976). Enfin les caractéristiques géodynamiques de cette zone ont été définies sur ces bases (A. BARBREAU *et al.*, 1976).

Toutes ces analyses permettent d'établir une bonne corrélation entre tectonique actuelle et sismicité, cette dernière tendant actuellement à privilégier les mouvements suivant des décrochements obliques (NNE-SSW et NW-SE) par rapport à l'arc alpin (C. WEBER *et al.*, 1980). De cette sorte, on est en mesure d'identifier le champ de contrainte actuel, les trajectoires spatiales de ses axes et les déformations qui lui sont associées.

4.3. SISMOTECTONIQUE, STRUCTURES CASSANTES ET THERMALISME (fig. 7)

Les trajectoires de la contrainte maximale horizontale actuelle σ_1 montrent une virgation d'une direction subméridienne, au sud de l'axe

« limite sud du Vercors-Pelvoux », à une orientation WNW-ESE au nord. Les mécanismes au foyer des séismes, accompagnés par des mouvements décrochants, permettent d'identifier, après contrôle de terrain, des orientations fissurales affectées par ces mouvements (H. PHILIP *in* C. WEBER *et al.*, 1980).

On voit de la sorte que les directions NNE-SSW et WNW-ESE ont tendance à jouer en décrochements au sud de cet axe, alors que la première de ces familles peut évoluer en failles inverses au nord. Inversement, le direction NE-SW correspond à des failles inverses au Sud, alors qu'elle est affectée de mouvements décrochants plus au nord.

Autrement dit, une même famille directionnelle de fractures subit à l'époque actuelle des mouvements différents (en ouverture ou en fermeture), selon qu'elle appartient aux secteurs méridionaux ou septentrionaux du domaine alpin. C'est pourquoi la position des sources thermales alpines ne coïncide qu'avec des structures décrochantes actuelles, visibles à petite échelle, soit simples et orientées N-S à NE-SW (cas des émergences d'Allevard, d'Aix-en-Provence et de Gréoux); soit conjuguées et orientées NE-SW et NW-SE (sources d'Aix-les-Bains et de Monétier).

On notera que dans le domaine alpin septentrional, la contrainte actuelle maximale σ_1 se superpose en direction à celle qui s'est manifestée au Miocène supérieur. Dans la partie méridionale, elle se confond en direction avec l'orientation de la contrainte maximale horizontale de l'Eocène supérieur. Comme il est vraisemblable que la distension de l'Oligocène moyen a accentué l'ouverture des fractures particulièrement orientées NE-SW et NW-SE (extension N 110-N 120), le rôle des décrochements de type cévenol dans la pérennité des sources au sud du Vercors a pu être prolongé jusqu'à l'époque actuelle. Autrement dit, le thermalisme pourrait être plus ancien dans le domaine méridional que dans la partie Nord. Cependant, dans la partie méridionale, des discontinuités orientées NE-SW ont une composante actuelle de mouvement en failles inverses. Ces structures n'ont, en conséquence, probablement aucune action dans la remontée des eaux souterraines (cas de l'émergence de Gréoux par exemple).

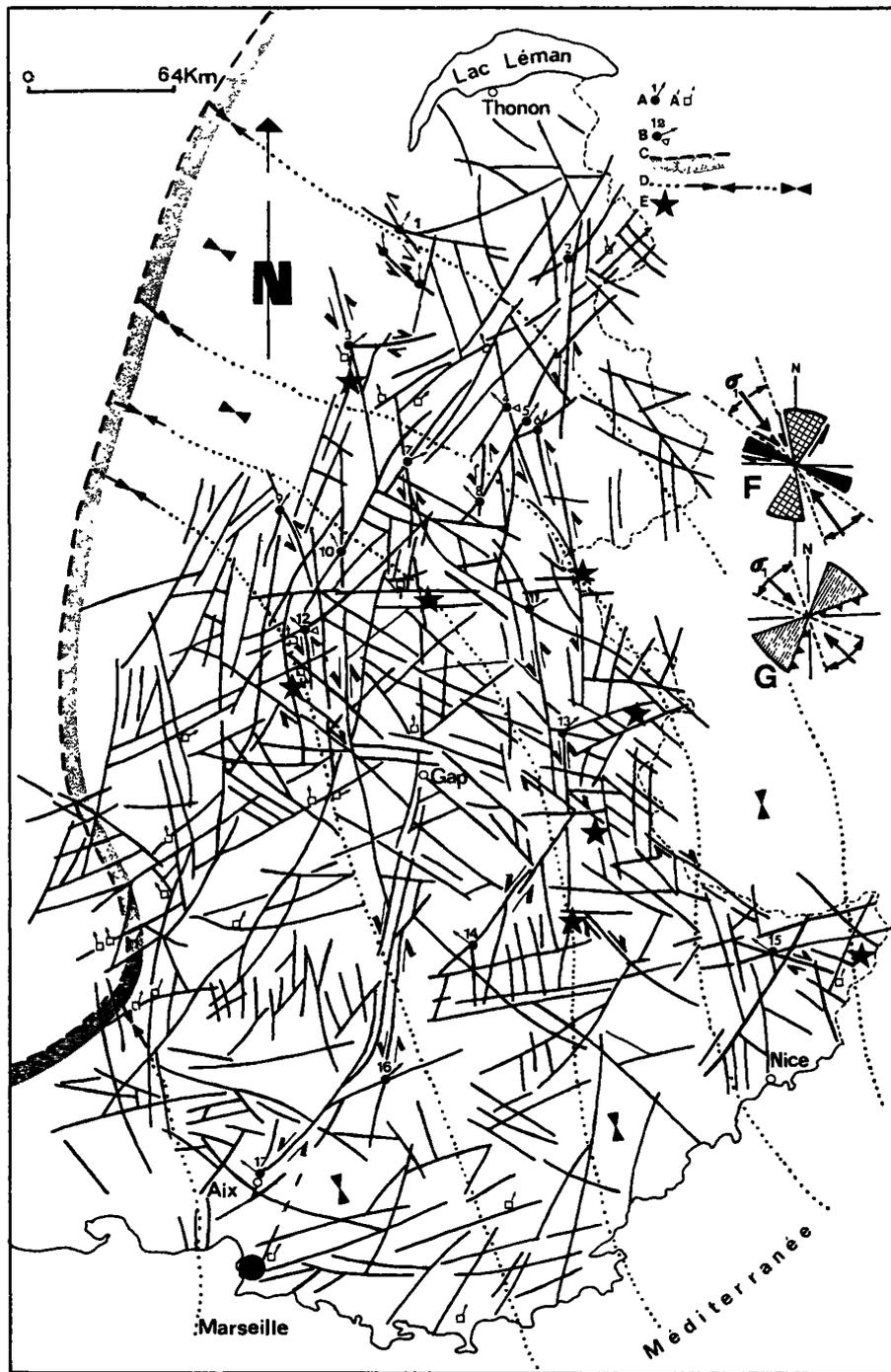


Fig. 7. — Fracturation, sismotectonique actuelle et thermalisme.

En cartouche : A : sources thermales; A' : émergences minérales froides; B : sources ayant une température supérieure à 50 °C (d'après la légende de la carte des eaux thermales et minérales de la France au 1/1 000 000, Ed. B.R.G.M., 1973); C : limite de zone en compression actuelle; D : trajectoire de σ_1 ; E : mécanismes au foyer en décrochement des séismes récents (épicerentre) d'après PHILIP H. in WEBER C. *et al.*, 1980; F et G : tendances aux jeux actuels sur fractures en fonction des directions de σ_1 dans le domaine alpin (croisillons : décrochements sénestres; zone ombrée : décrochements dextres; zone hachurée : failles inverses).

Désignation des sources thermales : 1 : Allonzier; 2 : Saint-Gervais; 3 : Aix-les-Bains; 4 : La Lechère; 5 : Salins Moutiers; 6 : Brides; 7 : Allevard; 8 : Saint-Jean de Maurienne; 9 : Echaillon de Veurey; 10 : Uriage; 11 : Monétier; 12 : La Motte; 13 : Risoul; 14 : Digne; 15 : Berthemont Roquebillière; 16 : Gréoux; 17 : Aix-en-Provence.

Cette association sources thermales-accidents décrochants jouant actuellement semble se confirmer par l'examen, en parallèle, de la répartition des principales émergences froides. En effet, ces sources se localisent essentiellement dans la partie externe du domaine alpin et, plus au Sud, du massif des Maures, et tendent à se situer soit à proximité d'accidents jouant actuellement en failles inverses, soit en dehors des zones de grands décrochements. C'est par exemple le cas des émergences situées au SE de Gap et de celles apparaissant en bordure du massif des Maures. Ces remarques vont dans le sens d'observations faites dans la région d'Aix-les-Bains : si les émergences chaudes d'Alun-Soufre sont intimement liées à la présence d'un accident décrochant d'importance régionale, les sources froides de Marlioz (12 °C) situées immédiatement au sud et émergeant du même réservoir carbonaté (faciès urgonien), sont en dehors de toute zone décrochante (J. DAZY et J.C. GRILLOT, 1981-1982). Ce type de relation avait d'ailleurs été supposé dans le massif du Pelvoux et dans la Tarentaise, où émergent les sources de La Léchère, Salins-Moutiers et Brides (J. SARROT-REYNAULD *et al.*, 1977; J. SARROT-REYNAULD et Y. SIMEON-DUPANLOU, 1979).

En d'autres termes, si l'on peut confirmer l'existence d'une relation directe de cause à effet entre thermalisme et mouvements tectoniques cassants, ces mouvements se manifestent sur des accidents décrochants qui ne sont décelables, le plus souvent, qu'à très petite échelle. Ceci introduit, à l'échelle du domaine alpin, une certaine *cohérence* dans la répartition des sources thermales dont on devrait tenir compte dorénavant.

5. Conclusion

Malgré leurs effets peu spectaculaires, les sources thermales du domaine alpin sont bien en relation avec des mouvements tectoniques impliquant, *actuellement*, une réactivation de grandes fractures qui ne se décèlent cependant, le plus souvent, qu'à petite échelle. A ce titre, les clichés pris par satellite sont d'un apport précieux.

Cette réactivation se manifeste essentiellement par des mouvements cisailant qui maintiennent ou provoquent des ouvertures suffisantes pour permettre, à long terme, et sans colmatage définitif des conduits, la remontée rapide des eaux souterraines profondes donc chaudes.

L'interprétation du thermalisme alpin acquiert ainsi une autre dimension que n'ont pas les analyses locales : une certaine *cohérence*, dans la répartition des émergences, apparaît à l'échelle de tout le *domaine alpin*, les sources jalonnant des faisceaux de *grandes fractures* qui ont une *activité sismique actuelle*. Ceci devrait orienter les recherches portant sur le thermalisme, et les conséquences géothermiques qui peuvent en découler. Mais ces recherches ne peuvent être disjointes des données structurales acquises si possible à différentes échelles, en réservant à ce propos une place de choix aux clichés pris par satellite.

RÉFÉRENCES CITÉES

- BARBREAU (A.), BODELLE (J.), ESCALIER DES ORDRES (P.), MOHAMMADIOUN (B.), VOGT (J.) et WEBER (C.) (1976). — Essai de confrontation de la sismicité historique et de données structurales nouvelles en Provence occidentale et centrale. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (7), XVIII, 5, p. 1111-1117.
- BAUDRIMONT (A.F.) et DUBOIS (P.) (1977). — Un bassin mésogéen du domaine péri-alpin : le Sud-Est de la France. *Bull. Centre de Rech. Expl.-Prod. Elf-Aquit.*, 1, ISSN 0396-2687, p. 261-305.
- BERARD (P.) (1982). — Interprétation des images satellites en complément à la photo-interprétation traditionnelle pour la définition des structures hydrogéologiques au Niger et en Haute-Volta. *Coll. nat. B.R.G.M.* G. Castany, Orléans, p. 67-82.
- BERTHIER (F.) (1982). — Circulations profondes en milieu fissuré de socle. Cas des anomalies minérales de Cezallier (Massif Central Français). Implications. *Coll. nat. B.R.G.M.* G. Castany, Orléans, p. 83-96.
- BIJU-DUVAL (B.), LAMPEREIN (C.), RIVÉREAU (J.C.) et LOPEZ (N.) (1976). — Esquisse photogéologique du domaine méditerranéen. Grands traits structuraux à partir des images Landsat 1. Commentaires. *Rev. Inst. Franç. du Pétrole*, XXXI, 3, p. 365-400.
- CHOUKROUNE (P.) et MATTAUER (M.) (1978). — Tectonique des Plaques et des Pyrénées : sur le fonctionnement de la faille transformante Nord-Pyrénéenne; comparaison avec des modèles actuels. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (7), XX, 5, p. 689-700.

- DAZY (J.) et GRILLOT (1981-1982). — Le thermominéralisme péri-alpin : exemple de la région savoyarde (France). *Rev. géol. dyn. géogr. phys.*, Paris, XXIII, 4, p. 319-328.
- DROGUE (C.), MAS (J.C.), LLORIA (C.) et GUÉRIN (R.) (1975). — Utilisation du filtrage optique pour l'étude de la fracturation des roches carbonatées en Hydrogéologie. *Rev. géol. dyn. géogr. phys.*, Paris, XXVII, 1, p. 39-44.
- ENGALENC (M.), GRILLOT (J.C.) et LACHAUD (J.C.) (1979). — Méthode d'étude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest. *Com. Inter-Afr. des Etudes Hydr. (Ouagadougou, Haute-Volta) et Géohydraulique (Paris)*, vol. 2, 191 p.
- FOURNIQUET (J.) (1977). — Mise en évidence de mouvements tectoniques actuels verticaux dans le Sud-Est de la France par comparaison de nivellements successifs. *Rapport B.R.G.M., 77 SGN 081 GEO*, Orléans, mars 1977.
- FRANÇOIS (J.M.) (1980). — Contribution à l'étude de la structure profonde des magasins fissurés. *Thèse 3^e cycle*, Montpellier, 138 p., ronéot.
- FRANÇOIS (J.M.) et MASSONNAT (G.) (1981-1982). — Relations entre fracturation et circulations aquifères dans le massif d'Allevard (Alpes, France). *Rev. géol. dyn. géogr. phys.*, Paris, XXIII, 1, p. 309-318.
- GIDON (M.) et PAIRIS (J.L.) (1976). — Le rôle des mouvements tectoniques éocènes dans la genèse des structures de l'extrémité Nord-Est du Dévoluy et dans celle du chevauchement de Digne. *Géologie alpine*, t. 52, p. 73-83.
- GIDON (M.) (1981 a). — La structure de l'extrémité méridionale du massif de la Chartreuse aux abords de Grenoble et son prolongement en Vercors. *Géologie alpine*, t. 57, p. 93-107.
- (1981 b). — Les déformations de la couverture des Alpes occidentales externes dans la région de Grenoble; leurs rapports avec celle du socle. *C.R. Acad. Sci., Paris*, t. 292, sér. II, p. 1057-1060.
- GIBERT (J.P.), SOREL (D.) et VERGELY (P.) (1975). — Tectonique cassante polyphasée et émergences d'eaux thermales : le site de Chaudes-Aigues (Cantal). *Bull. Soc. géol. Fr.*, (7), XVII, 4, p. 622-636.
- GOGUEL (J.) (1948). — Le rôle des failles de décrochements dans le massif de la Grande Chartreuse. *Bull. Soc. géol. Fr.*, XVIII, 5, p. 227-235.
- GRILLOT (J.C.) (1977). — A propos de méthodologies d'analyses quantitatives, à l'échelle régionale, de champs de fractures : premiers résultats d'une application. *Rev. géol. dyn. géogr. phys.*, Paris, XIX, 3, p. 219-234.
- GRILLOT (J.C.) (1979). — Structure des systèmes aquifères en milieu fissuré. Contribution méthodologique à cette connaissance. *Thèse Doct. Sci.*, Montpellier, 212 p., 54 pl., ronéot.
- GRILLOT (J.C.) (1981). — Reconnaissance des déformations cassantes à différentes échelles. Nature et essai de corrélation dans l'extrême Sud-Ouest de l'Europe (Portugal). *Rev. Inst. Franç. du Pétrole*, XXXVI, 4, p. 505-511.
- GRILLOT (J.C.) (à paraître). — Photo-interprétation à différentes échelles et relevés de terrain : exemple de corrélations structurales dans le Bassin Méditerranéen et sur le socle Ouest Africain. *Geologische Rundschau*, Marburg, R.F.A.
- KERCKHOVE (C.) et ANTOINE (P.) (1964). — Sur l'existence de failles de décrochement dans le massif des Bauges (zone subalpine, Savoie). *Trav. Lab. Géol.*, Grenoble, t. 40, p. 80-89.
- PHILIP (H.) et TAPPONNIER (P.) (1976). — Tectonique actuelle et sismicité en Provence : essai d'interprétation cinématique. *Coll. A.T.P. géodyn. de la Méditerranée occid. et de ses abords (1972-1975)*, I.N.A.G., p. 121.
- RAZACK (M.) (1978). — Sur la contribution de méthodes d'analyse numérique appliquées à l'étude d'un champ de fractures pour une meilleure connaissance de la structure des réservoirs fissurés. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, t. 286, sér. D, p. 1577-1580.
- RAZACK (M.) (1979). — Approche numérique et quantitative de l'étude sur clichés aériens de la fracturation des réservoirs en roches fissurées. *Rev. Inst. Franç. du Pétrole*, XXXIV, 4, p. 547-574.
- RAZACK (M.) (1980). — Approche quantitative de l'effet d'échelle sur le relevé de la fracturation par photo-interprétation dans l'étude de la géométrie des réservoirs fissurés. *Mém. hors sér. Soc. géol. Fr.*, 11, p. 81-90.
- ROBERT (J.P.) (1976). — Les décrochements, fracturations et mouvements de blocs associés. Exemple des massifs dauphinois. *Thèse 3^e cycle*, Grenoble, 153 p., ronéot.
- SARROT-REYNAUD (J.), POULAIN (P.A.) et MARCE (A.) (1977). — Tectonique et anomalies géothermiques des sources thermominérales des bordures orientales et méridionales du massif du Pelvoux. *Géologie alpine*, t. 53, p. 75-82.
- SARROT-REYNAUD (J.) et SIMEON-DUPANLOU (Y.) (1979). — Tectonique et anomalies géothermiques. Données nouvelles dans les sources thermales de Tarentaise : Brides, Salins et la Lechère (Savoie). 104^e congr. nat. Soc. Sav., Bordeaux, p. 111-122.
- TAPPONNIER (P.) (1977). — Evolution tectonique du système alpin en Méditerranée : poinçonnement et écrasement rigide-plastique. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (7), XIX, 3, p. 437-460.
- WEBER (C.), HIRN (A.), PHILIP (H.) et ROCHE (A.) (1980). — Tectonique récente et sismicité de la France. Image géophys. de la France, 26^e congr. intern. géol., Paris, Thème II, coll. 7, Ed. B.R.G.M., Orléans, p. 26-50.