Geodinamica Acta (Paris) 1987, **1**, 2, 125-137

Coupes équilibrées à travers le massif subalpin de la Chartreuse

Balanced cross-sections through the subalpine massif of the Chartreuse

Par Jean-Louis MUGNIER*, Réjane ARPIN**, François THOUVENOT**

RÉSUMÉ. — Pour étudier la tectonique des chaînes subalpines du Nord, et proposer un modèle cinématique régional, nous avons utilisé les résultats d'une expérience géophysique réalisée en 1985, et les observations géologiques de surface publiées à ce jour. Ces données ont été analysées de manière à préciser le style tectonique, le positionnement des failles par rapport aux horizons stratigraphiques et le schéma de branchement des failles. La construction simultanée d'une coupe interprétative, d'une coupe restaurée et d'une carte de branchement des failles a permis d'estimer l'amplitude du raccourcissement par la méthode des coupes équilibrées. Au niveau du Nord de la Chartreuse, la valeur minimale du raccourcissement global est de 14 km, 4 km étant associés au système chevauchant du Jura et 10 km à celui du massif des Bornes et des Bauges. Compte tenu des imprécisions existant sur les données utilisées, trois modèles cinématiques, qui correspondent à une plage de raccourcissement comprise entre 14 et 25 km, sont proposés.

Mots-clefs : Chevauchement, Coupe équilibrée, Alpes, Chaînes subalpines, Données sismiques.

ABSTRACT. — Kinematical models are proposed for the tectonic of the Chartreuse subalpine massif. They take into account the field observations published at present time and the result of a recent geophysical experiment. The analysis of these data shows that : (1) the structural style of Chartreuse can be describe by folds growing in front of propagating thrusts and/or by folds developed in response to steps in decollement levels. (2) The decollement levels flat in the marly levels of the Berriasian, Callovo-oxfordian and Aalenian, and ramps in the calcareous levels of the Urgonian and Tithonian. (3) The tip lines, the branch lines and the sequence of the thrusts in the Chartreuse are not well documented. Balanced and restored cross-sections are constructed by the use of the « Suppe » method and of branch-line maps. Three models are consistent with the data and give a bulk shortening in the north of the Chartreuse that ranges between 14 km and 25 km. The minimum value of 14 km is related to 10 km of displacement transfered from the Bornes-Bauges thrust system and 4 km transfered from the Jura thrust system, and the maximum value to 15 km transfered from the Bornes-Bauges, and 8 km from the Jura.

Keys-words : Thrust, Balanced cross-section, Alps, Subalpine chains, Seismic data.

* Institut Dolomieu (Unité Associée au CNRS n° 69), rue Maurice-Gignoux, 38031 Grenoble Cedex.

** L.G.I.T. (Unité Associée au CNRS n° 733), IRIGM, Université de Grenoble, BP 68, 38402 Saint-Martin d'Hères.

Le massif subalpin de la Chartreuse est situé dans la zone externe des Alpes occidentales françaises et s'étend entre Chambéry et Grenoble (fig. 1). C'est à ce niveau que l'arc jurassien vient se raccorder aux massifs subalpins. Si les structures de surface de la Chartreuse ont été étudiées et cartographiées en détail depuis longtemps, les données sur les structures profondes, encore peu nombreuses, viennent d'être complétées par la réalisation en 1985 d'une expérience sismique concernant le Nord du massif. Pour les incorporer dans les interprétations tectoniques de ce massif nous avons utilisé la méthode des coupes équilibrées (Elliott, 1983). Nous avons donc analysé les observations géologiques de surface de manière à déterminer :

- le schéma de branchement des failles (Hossack, 1983; Diegel, 1986),
- la séquence de mouvement le long des failles (Butler, 1982; Boyer et Elliott, 1982),
- les directions de transport des écailles limitées par les différentes failles,
- l'intensité de la déformation à l'intérieur des écailles (Woodward *et al.*, 1986).
- les règles qui permettent de décomposer le style tectonique régional en une superposition de figures structurales élémentaires (Bally *et al.*, 1966; Dalstrom, 1969 et 1970; Elliott et Johnson, 1980; Price, 1981; Boyer et Elliott, 1982, Graham *et al.*, 1987 par exemple).

A partir de cette analyse des observations géologiques, et compte tenu des incertitudes existant sur certains des points cités précédemment, nous présentons le long d'un plan de coupe plusieurs interprétations des structures profondes avec lesquelles les données sismiques sont compatibles. Chacune de ces interprétations a été réalisée de manière à ce que sa géométrie soit l'aboutissement d'un chemin cinématique de la déformation. L'existence d'un tel chemin est contrôlée par l'équilibrage de la balance des surfaces et des longueurs des horizons stratigraphiques

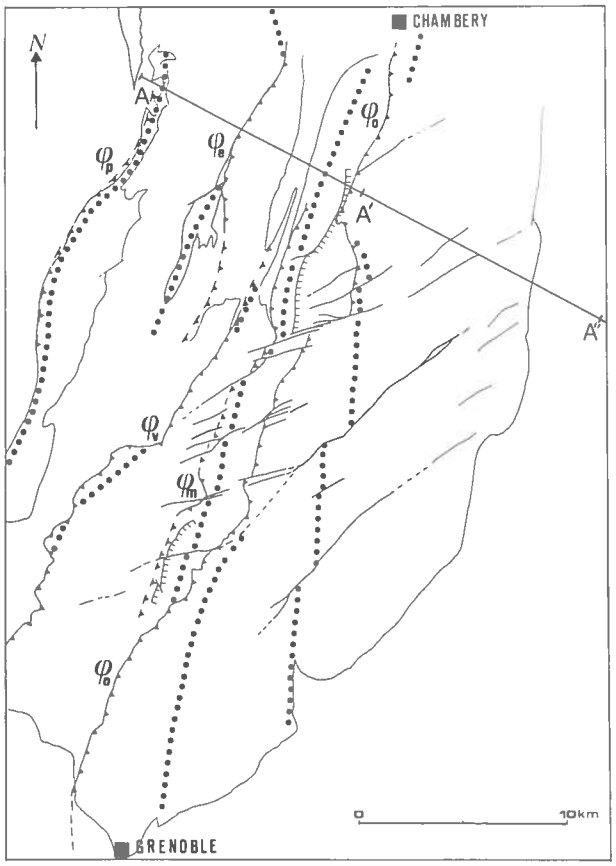


FIG. 1. — **Schéma structural de la Chartreuse (d'après Gidon, 1985).**

La limite du massif de la Chartreuse (limite à l'affleurement entre les formations secondaires et celles post-secondaires) a été représentée en trait continu.

Les traces topographiques des plans axiaux des anticlinaux majeurs sont représentées par des points noirs.

Dénomination des chevauchements : φp : Parves-Mont Tournier; φe : Epine; φc : Chambotte; φv : Voreppe; φm : chartreux médian ; φo : de Chartreuse orientale.

FIG. 1. — ***A structural map of the Chartreuse with the location of the cross-section.***

The border of the Chartreuse massif (the boundary between Mesozoic and post-Mesosoic formations) is showed by a continuous line. Name of the thrust : φp : Parnes; φe : Epine; φc : Chambotte; φv : Voreppe; φm : Médian; φo : Oriental.

The black dots are the topographic trace of the anticline axial planes.

(Goguel, 1952; Hossack, 1979), et est visualisée par la présentation simultanée de l'état initial - la coupe restaurée et de l'état final - la coupe géologique interprétative.

I. NOUVELLES DONNÉES GÉOPHYSIQUES.

Dans le cadre du programme « Géologie profonde de la France », un tir à l'explosif a été réalisé dans les Bauges, au Nord de la Chartreuse, et le signal sismique enregistré le long de deux profils en ligne, et deux profils en éventail situés dans le massif subalpin de la Chartreuse. Cette expérience a montré l'existence, à faible profondeur (2 à 3 km) d'un niveau réflecteur et réfracteur sous le Nord de la Chartreuse (fig. 2). Ce niveau est assez continu et possède une vitesse de propagation des ondes rapide (5,5 km/s). Compte tenu de la complexité des structures affleurant sur le terrain au-dessus de ce marqueur, la géométrie de détail de celui-ci ne pourra être précisée que grâce à une modélisation tridimensionnelle en vitesse. Il semble cependant que le marqueur plonge nettement en direction du massif de Belledonne. Plus en profondeur (7 à 10 km), d'autres marqueurs sont visibles en réflexion (Thouvenot et Menard, 1988). L'un d'eux pourrait correspondre au toit du socle antétriasique, pour lequel une profondeur importante (de l'ordre de 8 km) avait déjà été proposée plus au Nord, sous les Bauges (Thouvenot et Perrier, 1981).

Les séries jurassiques et crétacées du domaine subalpin présentent des variations de faciès limitées (Gignoux et Moret, 1952). Aussi le marqueur mis en évidence, qui compte tenu de la vitesse de propagation des ondes réfractées doit correspondre à un niveau calcaire et qui compte tenu de la qualité de la réflexion doit être surmonté par des formations moins compétentes, ne semble pouvoir correspondre qu'au Tithonique ou à l'Urgonien. Ces formations étant affleurantes ou même érodées, ceci impliquerait un redoublement tectonique d'une partie de la série, hypothèse déjà envisagée par Doudoux *et al.* (1982).

II — DONNÉES GÉOLOGIQUES DE SURFACE.

Les données de base utilisées sont les cartes géologiques au 1/50 000 (Gidon et Barfety, 1969; Gigou et Enay, 1976), des documents inédits de M. Gidon, ainsi que les mesures de microstructures réalisées par Robert (1976), Santos Narvaez (1980), Lamarche et Rochette (1987) et les auteurs de cet article.

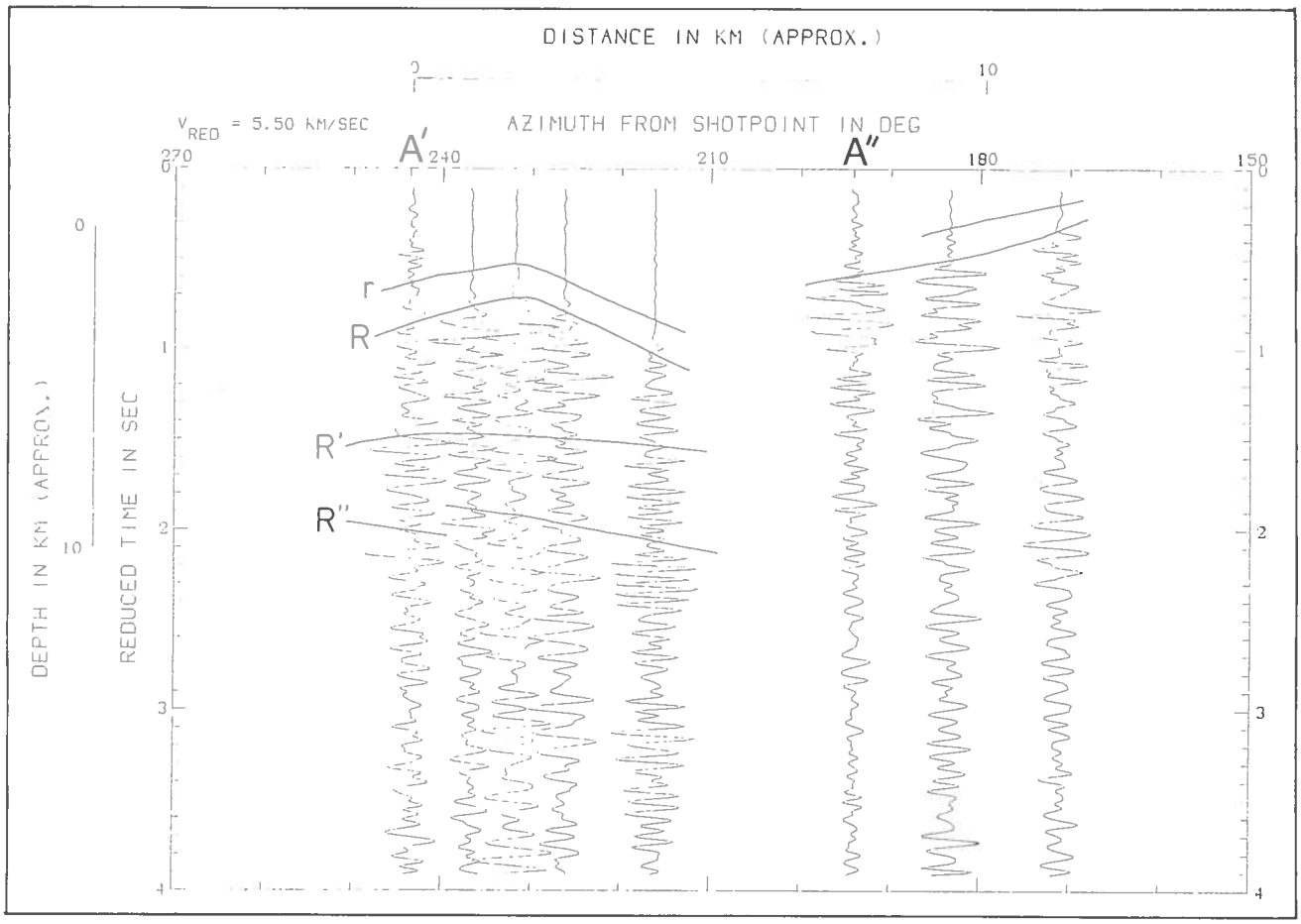


FIG. 2. — **Profil en éventail à distance constante point de tir-récepteur de 17,5 km.**

On obtient ainsi une coupe NW-SE du nord de la Chartreuse à Belledonne qui permet de suivre des horizons réfracteurs et réflecteur. r = réfraction sur le niveau dur à 5,5 km/s; R = réflexion associée; R',R"= réflexions profondes sous la Chartreuse.

Côté Belledonne, l'horizon réfracteur et réflecteur mis en évidence est assimilé au socle antétriasique.

L'échelle de profondeur est approximative; l'échelle de distance est comptée sur le miroir de réflexion.

FIG. 2. — ***Fan profile with constant offset of 17,5 km.***

It shows a NW-SE section across Chartreuse and Belledonne; levels of refraction and reflection can thus be followed.

r = refraction from the hard level (5,5 km/s); R = associated reflections; R', R" = deep reflections under Chartreuse.

Toward Belledonne, the level of refraction and reflection is interpreted as te ante-Triassic basement itself.

Depth scale approximative; horizontal scale valid on the reflection mirror.

A. Les niveaux incompétents.

Les plans de décollement à l'origine du redoublement de la série doivent être situés dans des formations de faible compétence mécanique. Celles-ci pourraient correspondre :

- aux niveaux marneux du Berriasien situés sous les calcaires du Valanginien. Ceci expliquerait pourquoi ces calcaires sont si fréquents, à l'affleurement, au toit du chevauchement de Chartreuse orientale;
- aux niveaux marneux du Callovo-oxfordien (Siddans, 1979);
- aux niveaux marneux de l'Aalénien.

Ces deux derniers niveaux présentent à l'affleurement, dans les collines bordières du massif cristallin de Belledonne (Vialon, 1974), une schistosité très développée. La série redoublée serait alors limitée à sa base par une zone épaisse le long de laquelle le cisaillement simple est très accentué plutôt que par une surface de faille discrète (Pijolat, *et al.*, 1981).

D'autres niveaux de décollement pourraient exister dans les formations du Lias et du Trias. Mais les faciès présents sous la Chartreuse ne sont pas connus et le caractère synrift de la sédimentation dans les Alpes

occidentales à ces époques (Lemoine *et al.*, 1981) implique de telles variations latérales qu'il n'est pas possible d'extrapoler les observations réalisées dans d'autres régions.

B. Le schéma de branchement des failles.

La structure de la Chartreuse peut être subdivisée en trois compartiments (Gidon, 1964) (fig. 1), qui sont d'Est en Ouest :

- la Chartreuse orientale, limitée à l'Ouest par le chevauchement de Chartreuse orientale (φo);
- l'anticlinal médian (A.M.), limité à l'ouest par une faille (φm)
- l'anticlinal occidental, limité à l'ouest par la faille de Voreppe (φv).

Plus à l'Ouest, les plis jurassiens pourraient correspondre à l'amortissement latéral du déplacement, le long de 2 chevauchements mis en évidence plus au Nord : le chevauchement de l'Epine (φe) et celui du chaînon de Parves (φp).

La liaison entre le front subalpin et la terminaison nord du chevauchement de Chartreuse orientale est masquée totalement par les formations alluviales et glaciaires au voisinage de Chambéry. La liaison entre la faille de Voreppe et celle de l'anticlinal médian est masquée et interprétée différement par Gidon *et al.* (1967) et Santoz Narvaez (1980); les premiers considèrent que les deux failles s'amortissent vers le Nord et ne présentent pas de point de branchement (Hossack, 1983) tandis que Santos Narvaez (1980) envisage que la faille de Voreppe soit la prolongation vers le Sud du front subalpin des Bauges et que la faille de l'anticlinal médian se branche sur cet accident.

L'extrémité Sud de la faille du synclinal médian, masquée par de mauvaises conditions d'affleurement au voisinage du chevauchement de Chartreuse orientale, peut correspondre à un amortissement du déplacement ou à un recoupement par le chevauchement de Chartreuse orientale.

C. La séquence de mouvement le long des failles.

Les failles de la Chartreuse ont toutes joué pendant ou après le Miocène, puisque les molasses, réputées de cet âge, se retrouvent sous les chevauchements. La datation de ces formations synorogéniques n'est cependant pas assez précise pour détailler la séquence des mouvements Miocènes. La plupart des arguments géométriques indiquent une propagation vers l'extérieur de la chaîne (fig. 3) :

— les décrochements dextres tardifs, orientés N 60 (Goguel, 1948; Robert, 1976), recoupent les chevauchements de Chartreuse orientale et de l'anticlinal médian, mais ne décalent pas la faille de Voreppe. Ces décrochements seraient donc des failles de déchirement (Dahlstrom, 1969), associées au déplacement le long de la faille de Voreppe;

— le basculement vers l'extérieur de la chaîne, jusqu'à avoir un jeu apparent en failles normales (Gidon, 1981a), de failles inverses situées au toit du chevauchement de Chartreuse orientale, montre l'existence de mouvements le long d'accidents plus tardifs et plus externes que ceux basculés.

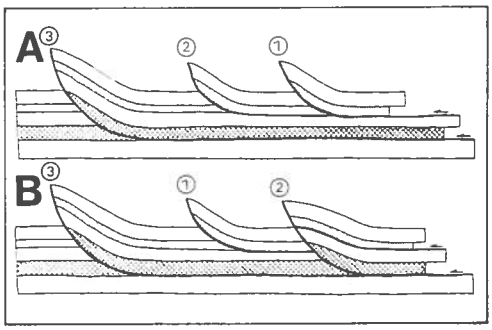


FIG. 3. — **Séquences de mouvement possibles : (A) Séquence de mouvement vers l'extérieur de la chaîne (dans l'ordre (1), puis (2), puis (3)), (B) Séquence de recoupement (breach sequence). La faille (2) vient recouper et décaler la faille (1).**

FIG. 3. — ***Thrust sequences :***

(a) piggy-back thrust propagation (in the order (1), (2), (3)), (b) breach sequence. The fault (2) breaches the fault (3).

Quelques arguments indiquent cependant une propagation vers l'intérieur de la chaîne :

- le chevauchement qui limite à sa base l'écaille de Canaple (Gidon, 1982), et qui correspond à une imbrication au mur du chevauchement de Chartreuse Orientale semble recouper la structure de l'anticlinal médian (Gidon, Comnunication orale).
- la comparaison, par projection sur un même plan de coupe de certains résultats de l'expérience sismique pourrait indiquer que le chevauchement de Chartreuse orientale décale le réfracteur, et recouperait donc le chevauchement à l'origine du redoublement de série.

La propagation vers l'intérieur de la chaîne observée en surface pourrait être liée à un recoupement des structures les plus superficielles par des chevauchements plus profonds et plus pentés (Butler, 1984) lors de la

reprise en compression de structures d'extension (Gillchrist *et al.*, 1987).

Par ailleurs une tectonique extensive antémiocène, et postcénomanienne est à l'origine de failles normales N-S (Gidon, 1982), tandis que certains plis semblent avoir été ébauchés avant le Miocène.

D. La direction de déplacement.

Les pics stylolitiques (Arthaud et Mattauer, 1969) et l'analyse des plans striés par la méthode des dièdres droits (Angelier et Mechler, 1977) indiquent une direction de raccourcissement N 95 à N 130 dans les formations calcaires du Nord de la Chartreuse.

L'étude des anisotropies de susceptibilité magnétique dans les formations marneuses du rebord est du massif indique un cisaillement le long des plans stratigraphiques avec un déplacement vers le N 120 du haut de la pile sédimentaire (Lamarche et Rochette, 1987). L'analyse des microstructures (stries et schistosité) indique un mouvement vers l'W.N.W. le long des chevauchements chartreux médian et de Chartreuse orientale.

Ainsi, en assimilant la déformation dans une écaille chevauchante mise en place par poussée à un modèle de cisaillement simple au voisinage de la surface de base (Gamond, 1980), et à un modèle de cisaillement pur dans le haut de l'écaille (Merle, 1984), nous avons considéré que les structures chevauchantes de la Chartreuse étaient déplacées vers le N 120. Ceci est en accord avec les modèles de déformation des Alpes externes, qui considèrent le raccourcissement comme étant radial par rapport à l'axe de la chaîne alpine (Goguel, 1963; Arpin *et al.*, 1986; Choukroune *et al.*, 1986). Nous avons donc construit nos coupes selon cette direction. Cependant, l'importance des mouvements décrochants dextres observés le long de la faille de Voreppe dont l'orientation varie de N 20 à N 50 (Arnaud, 1966), et le long d'une famille bien marquée de décrochements tardifs d'orientation N 60 dans la partie orientale de la Chartreuse pourrait indiquer (Gapais *et al.*, 1986) une direction de déplacement plutôt vers l'W-SW lors de la fin de la séquence de mouvements.

E. Les relations entre plis et chevauchements.

La notion de plis couchés à flancs inverses étirés qui était proposée à une époque pour décrire le style structural de la Chartreuse est abandonnée depuis les travaux de Gidon (1964, 1981a). Les témoins de séries inverses observables le long d'accidents comme le chevauchement de Chartreuse orientale sont liés (fig. 4) :

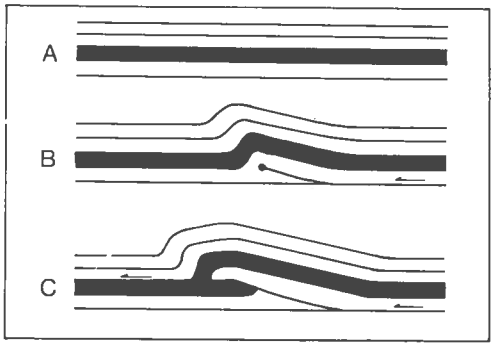


FIG. 4. — **Pli formé lors de la propagation d'un chevauchement.**
(A) géométrie initiale (B) pli d'amortissement à l'avant de l'extrémité du chevauchement (C) propagation du chevauchement à travers le pli.

FIG. 4. — ***Folds growing in front of propagating thrus.***
(a) initial geometry (b) fold in front of the tipe line of the thrust (c) propagation of the thrust across the fold.

- aux plis synclinaux dont les flancs est, très redressés et parfois inverses sont au contact du mur du chevauchement. Leur formation correspond à la propagation depuis l'extrémité du chevauchement d'une nouvelle surface de discontinuité à travers le pli d'amortissement du déplacement (Boyer et Elliott, 1982; Chapman et Williams, 1984), et/ou à l'accentuation de la courbure des plis par une déformation en cisaillement simple hétérogène associée au déplacement le long du chevauchement;
- aux écailles très déformées et fracturées, qui jalonnent la surface de chevauchement et présentent cartographiquement une succession stratigraphique inverse;
- aux anticlinaux situés au toit du chevauchement, et à flanc ouest très redressés, ou parfois inverses. Ils peuvent correspondre à des plis d'amortissement en extrémité du chevauchement, déplacés par la poursuite ultérieure du phénomène du chevauchement, et/ou à des plis associés aux variations de pendage des rampes (Rich, 1934; Dahlstrom, 1970; Suppe, 1983).

Il semble donc que la notion de plis crées par la propagation du chevauchement et/ou par le déplacement le long des failles soit adaptée au style structural de la Chartreuse.

III. LES COUPES ÉQUILIBRÉES.

A. La construction des plis par la méthode des kinks.

La déformation interne dans les chaînes subalpines étant faible et/ou mal quantifiée, nous avons supposé que la déformation associée au déplacement des écailles chevauchantes se produisait par cisaillement simple parallèlement à la stratification lors de plissements isopaques.

Nous avons utilisé la méthode des kinks (Suppe, 1983) pour schématiser la forme des plis observés en surface et pour construire les structures en profondeur de manière à ce que la coupe interprétative possède un bilan des surfaces et des longueurs équilibrées (« balanced cross-section ») (Hossack, 1979; Mugnier, 1984). La méthode des kinks permet de modéliser le développement cinématique des plis liés au déplacement le long d'un chevauchement en conservant les surfaces et les longueurs dans l'écaille déplacée, Les grandeurs angulaires sont liées par l'équation.

$$\varphi = \text{Arctg}\left[\frac{\sin(\gamma-\theta)\,[\sin(2\gamma-\theta) - \sin\theta]}{\cos(\gamma-\theta)\,[\sin(2\gamma-\theta - \sin\theta] - \sin\gamma}\right]$$

avec φ angle de changement de pendage de la faille.
θ angle entre la stratification et le plan de faille, avant le déplacement le long de la faille.
β angle entre la retombée du pli et la faille.
γ angle entre la stratification et la charnière du pli.

Cette équation prédit deux modes possibles pour la position de la surface axiale des plis au toit de la rampe (Suppe, 1983) (fig. 5). Le premier mode permet de conserver sensiblement le déplacement le long de la faille lors du passage de la rampe, tandis que dans le deuxième il existe une atténuation importante du mouvement. Nous avons considéré que le deuxième mode était en première approximation un moyen de schématiser les plis liés à l'amortissement des déplacements en extrémité de chevauchement, bien que du point de vue mécanisme et géométrie exacte des plis il existe clairement des différences sensibles. Ainsi le caractère isopaque des plis construits avec cette méthode ne correspond pas systématiquement avec les faits de terrain, particulièrement avec l'amincissement à l'échelle cartographique des séries marneuses du flanc ouest de l'anticlinal médian.

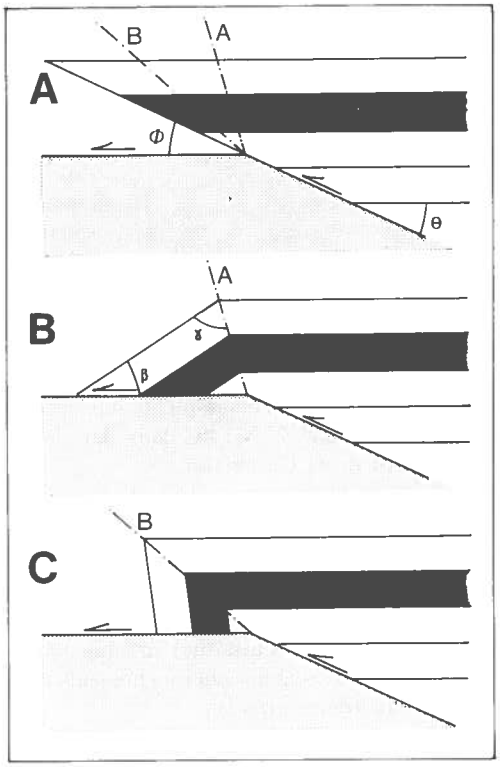


FIG. 5. — **Construction d'un pli passif à l'aplomb d'un changement de pendage d'une surface de faille (d'après Suppe, 1983).**

(A) déplacement rigide le long de la rampe.

(B) pli de mode 1.

(C) pli de mode 2.

Dans les flancs avants des plis en kinks, la surface et la longueur des bancs sont conservées.

FIG. 5. — ***Construction of fault-bend folds in response to a simple step in decollement (after Suppe, 1983).***

(a) rigid sliding along the ramp (b) first mode fold (c) second mode fold. The surface and the length of the beds are preserved in the forelimb of the folds.

B. la délimitation des écailles déplacées.

La délimitation des écailles en profondeur sur les coupes interprétatives a été réalisée en reliant les failles observées en surface et le niveau de décollement interprété au toit du marqueur sismique par des failles faiblement pentées dans les niveaux incompétents et des failles plus raides recoupant les formations compétentes. Compte tenu des incertitudes existantes, en profondeur sur la nature du marqueur sismique, et en surface sur le schéma régional de branchement des failles ainsi que sur les éventuelles

séquences de recoupement, nous proposons différentes interprétations portant sur la délimitation en coupe des écailles. Pour chacune, nous illustrons par des cartes de branchement interprétatives (Elliott et Johnson, 1980) les implications hors du plan de coupe des différentes manières de délimiter les surfaces enveloppes des écailles déplacées (Diegel, 1986).

De plus, nous avons souligné les arguments de terrain qu'il faudrait rechercher afin de tester chacune des interprétations.

C. Interprétation minimisant le raccourcissement.

Le raccourcissement le long de la coupe est plus faible quand le marqueur sismique est interprété comme le Tithonique, que lorsqu'il est interprété comme l'Urgonien. En effet, la rampe par l'intermédiaire de laquelle se produit le redoublement est plus courte dans le premier cas que dans le deuxième; sur la géométrie interprétée, la distance qui sépare, pour le Tithonique, le recoupement au mur (footwall cut off) du recoupement au toit (hanging wall cut off) est alors plus faible. De plus, le raccourcissement le long de la coupe est plus faible dans le cas d'une séquence de propagation dans l'ordre, vers l'extérieur de la chaîne que dans le cas d'une séquence dans le désordre, avec des recoupements d'origine profonde (Butler, 1984).

Nous avons donc supposé, pour minimiser la longueur du tithonique chevauché, que celui-ci était continu jusqu'au premier affleurement connu, c'est-à-dire l'écaille au toit du chevauchement de l'Epine (φe) (fig. 6 a et b). Ceci conduit à construire un « duplex » sous l'anticlinal de l'Outheran (prolongation vers le Nord de l'anticlinal médian).

La faille normale située dans l'écaille supérieure, sur le flanc Est de l'anticlinal est alors interprétée comme une structure d'extension locale liée au déplacement de l'écaille inférieure.

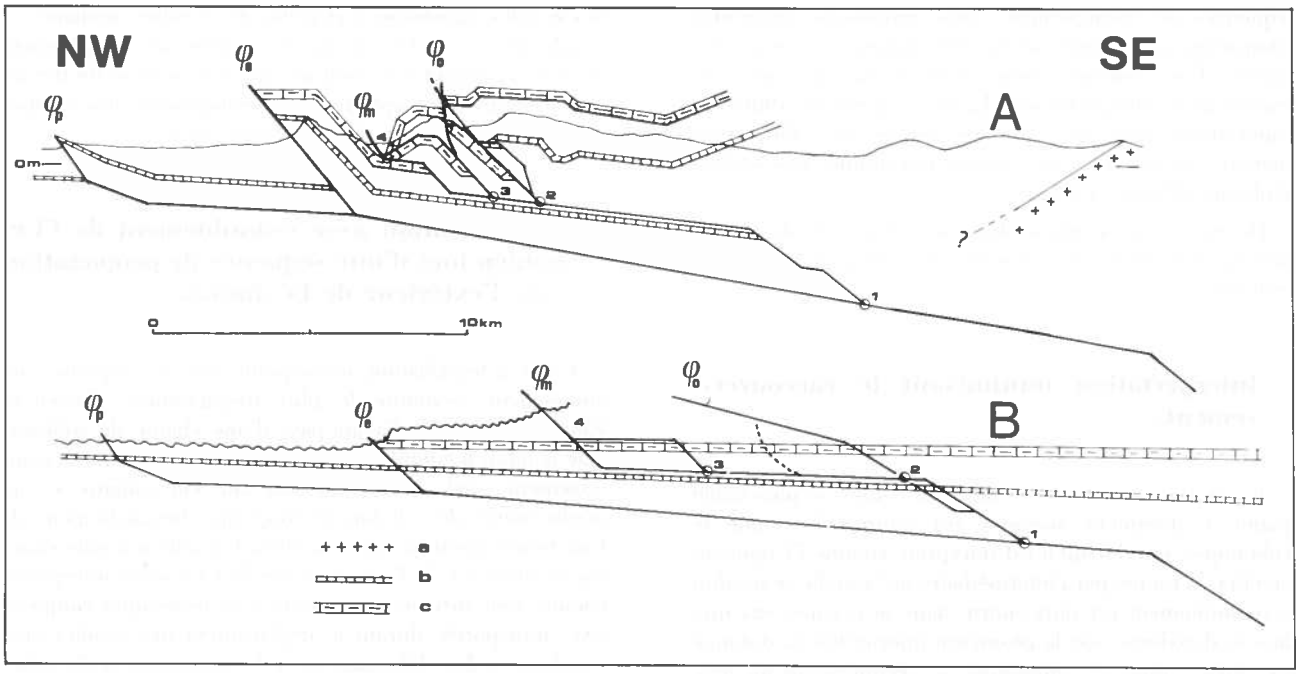
La coupe ainsi équilibrée présente un raccourcissement total de 14 km pour une longueur initiale de 44 km. Le schéma de branchement associé implique qu'il existe un point de branchement entre le chevauchement Chartreux médian et la faille de Voreppe (fig. 6 c) et que cette dernière se prolonge au Nord, en étant masquée, pour rejoindre la limite interne du « duplex ». Ceci semble difficile à admettre car le pli de l'anticlinal occidental, au toit du chevauchement de Voreppe, s'amortit rapidement en approchant du chevauchement chartreux médian (φm). Ce schéma nécessite également l'existence de rampes obliques à la géométrie complexe pour approfondir vers le Sud la surface de décollement à l'origine du redoublement de série et faire ainsi le lien entre la limite interne des écailles jurassiennes et celles des écailles médianes et occidentales de la Chartreuse. Ce schéma de branchement devrait cependant être contrôlé par une analyse de terrain des structures susceptibles de correspondre aux rampes obliques avant d'être définitivement rejeté.

D. Interprétation avec redoublement de l'Urgonien lors d'une séquence de propagation vers l'extérieur de la chaîne.

Cette interprétation correspond ave la séquence de mouvement reconnue le plus fréquemment (Boyer et Elliott, 1982) dans l'avant-pays d'une chaîne de collision. Elle conduit à équilibrer une coupe présentant un raccourcissement total de 20 km sur 50 km initiaux et un déplacement de 11 km le long du chevauchement de Chartreuse orientale (fig. 7 a et b). La faille normale située sur le flanc est de l'anticlinal médian est alors interprétée comme une structure antérieure à la tectonique compressive, transportée durant le déplacement des écailles chevauchantes. La déformation et le basculement de telles surfaces de failles antérieures, sans rejeu important de la faille, ont été décrits par Gidon (1982). Le schéma de branchement associé (fig. 7 c) nécessite une diminution vers le sud du déplacement le long du chevauchement de Chartreuse orientale. En effet, une quinzaine de kilomètres plus au Sud (coupe du Guiers Mort), un déplacement limité à 3-4 km est prouvé par l'observation du recoupement de l'Urgonien par la faille, à la fois au toit et au mur de celle-ci. Cet amortissement pourrait s'effectuer par un transfert du déplacement vers les zones plus externes par le biais des décrochements dextres N 60 et/ou par un changement de la direction de transport s'effectuant dans un sens anti-horaire en se dirigeant vers le Sud. L'étude détaillée des microstructures au toit du chevauchement de Chartreuse orientale permettrait de tester cette hypothèse.

E. Inteprétation avec redoublement de l'Urgonien lors d'une séquence de recoupement.

La limite pour les séries jurassiques, entre les faciès des domaines dauphinois et jurassiens coïncide approximativement à l'affleurement avec la trace d'une éventuelle prolongation du chevauchement chartreux médian (Santoz Narvaez, 1980) au Nord de la Chartreuse. De plus la continuité du marqueur sismique pourrait être interrompue à l'Est de la trace cartographique du chevauchement de Chartreuse orientale. Nous avons donc équilibré une coupe avec une séquence où (fig. 8 a et b) le redoublement principal est lié au chevauchement chartreux médian, et



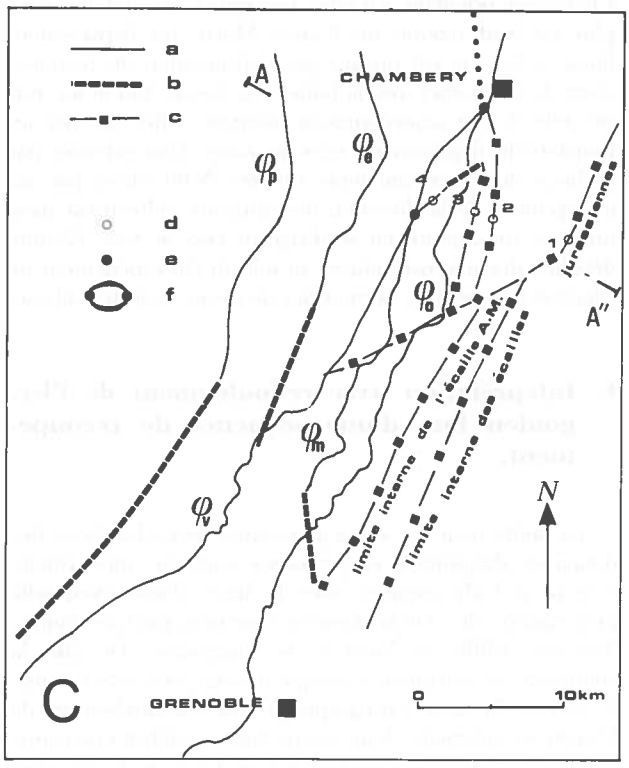


FIG. 6. — **Interprétation minimisant le raccourcissement.**

6A : Coupe interprétative des structures actuelles (raccourcissement global de 14 km pour une longueur initiale de 44 km).

(a) socle; (b) Tithonique; (c) Urgonien.

Echelle verticale = échelle horizontale Les numéros 1, 2, 3, correspondent aux mêmes points de branchement que ceux reportés sur la carte de branchement des failles.

6B : Coupe restaurée, 6C : Schéma interprétatif de branchement des failles :

(a) Trace des chevauchements à l'affleurement.
(b) Ligne d'amortissement du déplacement (enterrée)
(c) Ligne de branchement (enterrée).
(d) Point de branchement enterré construit à partir de la coupe.
(e) Point de branchement en surface (intersection interprétée des failles sur la carte géologique).
(f) Point de recoupement en surface (intersection interprètée des failles sur la carte géologique) - La dénomination des chevauchements est la même que elle de la fig. 7.

FIG. 6. — ***An interpretation which gives the minimum shortening value.***

Bulk shortening : 14 km for an initial lengh of 44 km A : interpretative cross section (a) basement; (b) Tithonian; (c) Urgonian The dots n° 1, 2, 3, 4 are the same on the balanced cross-section and on the branch-line map. B : Restored cross-section. C : Branch line map.

(a) crossing of the topographic surface and of the thrust.
(b) buried tip line.
(c) buried branch line.
(d) branch point deduced from the cross-section.
(e) branch point deduced from the geological map.
(f) breach point deduced from the geological map.

For the names of the thrust see fig. 6.

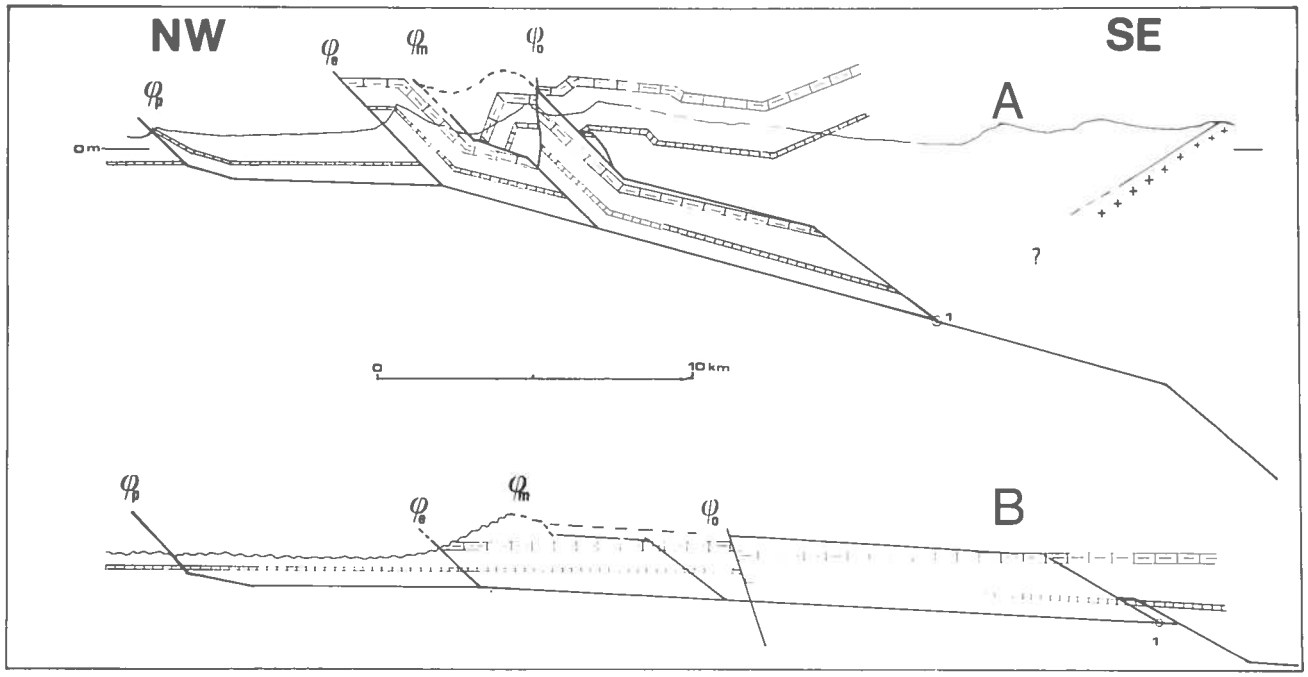


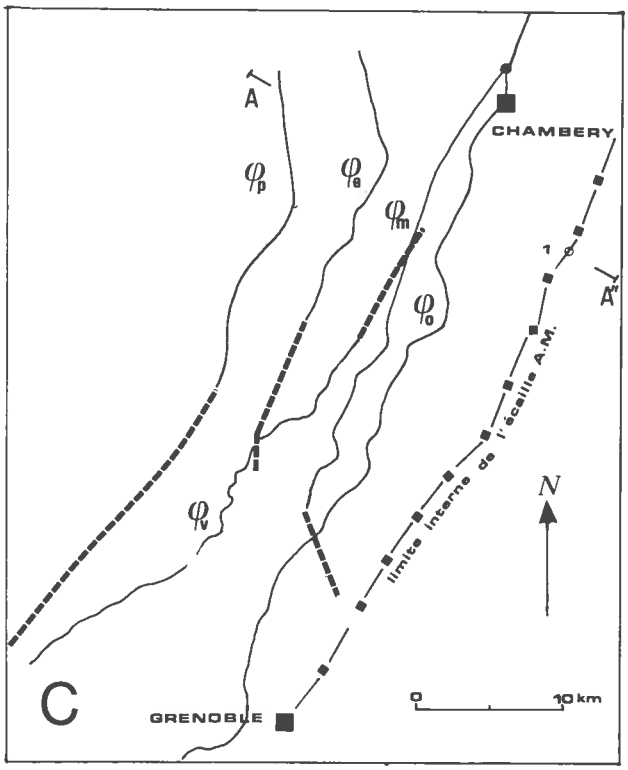
FIG. 7. — **Interprétation avec redoublement de l'Urgonien dans une séquence normale,**

(même légende que fig. 6).

Raccourcissement global de 20 km pour une longueur initiale de 50 km

FIG. 7. — ***An interpretation with Urgonian at the footwall of the thrust and with a piggy-back sequence.***

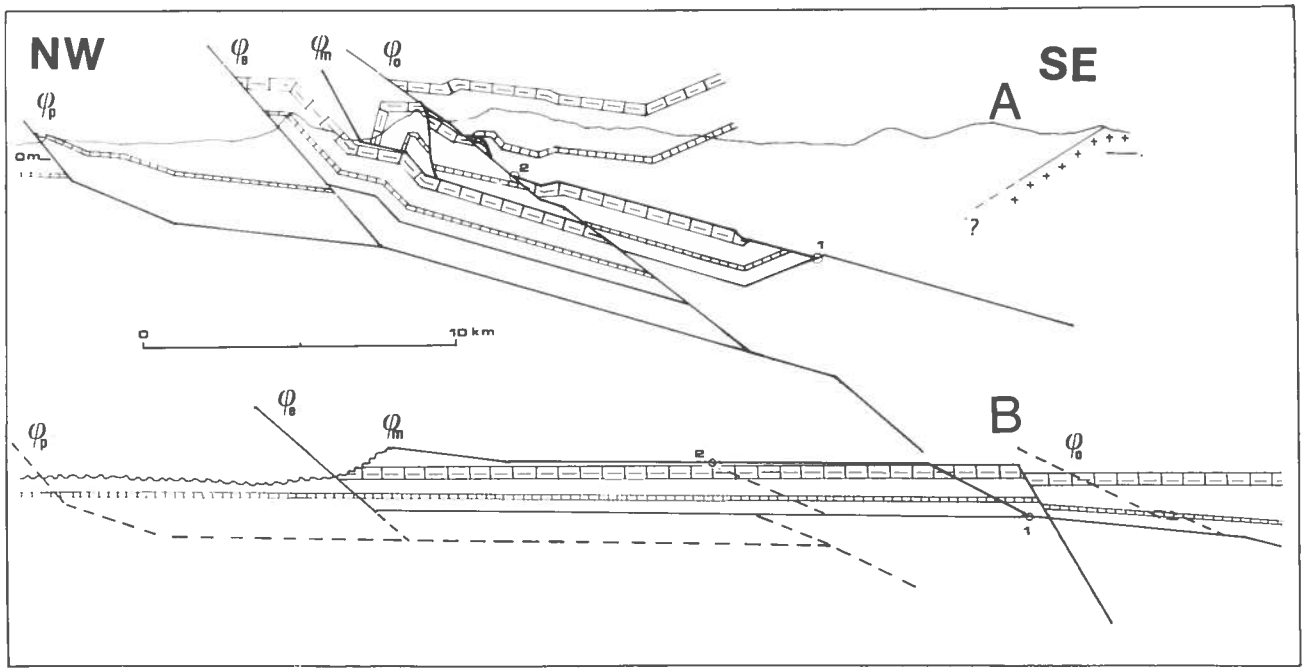
Same caption as fig. 6. Bulk shortening : 20 km for an initial lenght of 50 km.



où le chevauchement de Chartreuse orientale recoupe le redoublement. La coupe ainsi réalisée présente un raccourcissement total de 23 km, pour une longueur initiale de 53 km et un déplacement de 15 km le long du redoublement (φm). La faille normale située sur le flanc est de l'anticlinal médian est alors interprétée comme une structure antérieure à la tectonique compressive.

Le déplacement important le long du redoublement pourrait être transféré à la fois le long du chevauchement chartreux médian et le long de la faille de Voreppe, ce qui impliquerait l'existence d'un point de branchement entre les deux accidents sur la carte de branchement associée (fig. 8 c).

L'étude de la terminaison nord à l'affleurement du chevauchement de Voreppe, au voisinage du chevauchement chartreux médian, permettrait de tester cette hypothèse. Cette interprétation pourrait être testée en modélisant la propagation des rais sismiques afin de confirmer



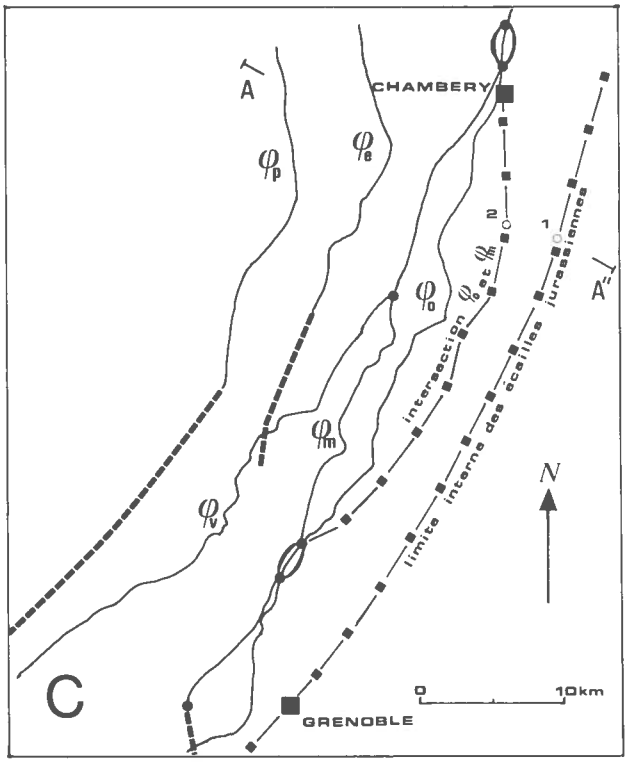


FIG. 8. — **Interprétation avec redoublement de l'Urgonien dans une séquence dans le désordre**

(même légende que fig. 6).

En trait plein : failles de la séquence 1.

En trait tireté : failles de la séquence 2 (recoupement) Raccourcissement global de 23 km pour une longueur initiale de 53 km.

FIG. 8. — ***An interpretation with Urgonian at the footwall of the thrust and with a breach sequence.***
Same caption as fig. 6.

Bulk shortening : 20 km for an initial lenght of 53 km Solid line : thrusts of the first sequence.
Dashed line : thrusts of the second sequence.

que la géométrie interprétative proposée par la coupe de la fig. 8 a expliquerait les arrivées tardives des ondes réfractées observées dans le compartiment à l'ouest du chevauchement de Chartreuse orientale.

IV — DISCUSSION.

A. Evolution latérale des structures des chaînes subalpines.

Les cartes de branchement proposées transfèrent les déplacements liés à l'édification des chaînons jurassiens sur la faille de Voreppe.

Ceci revient à considérer (Gidon, 1964) la zone constituée par l'anticlinal occidental de Chartreuse et la partie du Vercors située à l'Ouest du chevauchement du Moucherotte comme l'analogue du Jura dans la séquence de déformation de l'avant-pays alpin. La zone constituée par la Chartreuse orientale, prolongée vers le Sud par le chevauchement du Moucherotte, correspond à la prolongation vers le Sud du front des chaînes subalpines des Bauges et des Bornes situées plus au Nord. Les coupes équilibrées que nous avons construites prouvent donc un déplacement minimum de 10 km le long du front des Bauges, déjà interprété par Doudoux *et al.* (1982) comme étant l'avant d'une nappe subalpine.

B. Relation entre le chevauchement des massifs cristallins externes et la tectonique des chaînes subalpines.

Le massif cristallin externe de Belledonne est interprété, depuis les travaux de Menard (1979) puis Menard et Thouvenot (1984, 1986), comme étant chevauchant. Les chevauchements les plus externes (φv,φe,φp) sont la prolongation dans la couverture sédimentaire, du chevauchement des massifs cristallins externes (Gidon, 1981 b) d'autant qu'ils sont la prolongation vers le sud du système chevauchant jurassien lié à ce même chevauchement crustal (Mugnier et Vialon, 1986). Par contre, du point de vue géométrique, les chevauchements les plus internes (φm, φo) qui correspondent au front des chaînes subalpines des Bauges et des Bornes pourraient se prolonger vers les zones internes par un chevauchement situé aussi bien au dessus qu'au dessous du massif de Belledonne. Des données radiométriques, montrent cependant que la surrection du massif de Belledonne a commencé avant 14 MA, et que la majeure partie de la tectonique miocène de la Chartreuse est contemporaine de celle des massifs cristallins externes (Mugnier et Menard, 1986).

Pour construire nos coupes, nous avons donc envisagé que tous les chevauchements dans la couverture de la Chartreuse étaient liés au chevauchement des massifs cristallins externes, dont l'amplitude excéderait alors 14 km au niveau de la coupe étudiée.

C. Conclusion.

Cette étude illustre les difficultés rencontrées pour estimer l'amplitude du raccourcissement dans l'avant-pays d'une chaîne de collision, et la nécessité d'un modèle cinématique précis à l'échelle régionale pour interpréter les structures profondes.

Le long d'une coupe située au travers du nord de la Chartreuse, les seules données de surface n'indiquent qu'un raccourcissement de l'ordre de 7 km, tandis que la prise en compte des données sismiques, tout en prouvant un raccourcissement au moins double, ne permettent de proposer qu'une plage de valeurs comprise entre 14 km et 25 km pour le raccourcissement. En effet les incertitudes existant actuellement, sur le schéma régional de branchement de failles et sur la séquence de mouvement le long de celles-ci, permettent de proposer au moins 3 façons d'équilibrer la coupe interprétative des structures profondes en tenant compte des données géophysiques actuelles. Des études locales permettant de préciser la géométrie des failles au voisinage de leurs points de branchement potentiels apparaissent comme extrêmement fructueuses pour la mise au point d'un modèle tectonique régional.

Remerciements.

Nous remercions particulièrement M. Gidon et G. Menard dont l'aide et les conseils ont été précieux. Les critiques et commentaires de J.P. Gratier, de P. Vialon et des deux rapporteurs ont en outre fait bénéficier le texte de cette note de nombreuses remarques constructives. L'expérience de sismique a été réalisée dans le cadre du programme « Géologie Profonde de la France : Allochtonie des chaînes subalpines » (GPF2).

REFERENCES

ANGELIER J. & MECHLER P. (1977). — Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie : la méthode des dièdres droits. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 19, p. 1309-1318.

ARNAUD H. (1966). — Contribution à l'étude géologique des plateaux du Vercors méridional. *Géol. Alpine,* 32, p. 34-51.

ARPIN R., BIBERON B., GRATIER J.P. & JOUVE J.F. (1986). — Essai d'une méthode de dé-déformation à l'échelle cartographique : application à l'avant-pays alpin. 11e R.S.T., Clermont-Ferrand, *Soc. Géol. Fr.*, Edit. Paris, 4.

ARTHAUD F. & MATTAUER M. (1969). — Stylolithes d'origine tectonique dans le Languedoc. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (7), Tome XI, p. 738-744.

BALLY A.W., GORDY P.L. & STEWARD G.A. (1966). — Structure, seismic data and orogenic evolution of southern Canadian Rocky Mountains. *Bull. Can. Petrol. Geol.*, 14, p. 337-381.

BOYER S.E. & ELLIOTT D. (1982). — The geometry of thrust systems. *Bull. Am. Ass. Petrol. Geol.*, 66, p. 1196-1230.

BUTLER R.W.H. (1982). — The terminology of structures in thrust belts. *J. Struct. Geol.*, 4, p. 239-245.

BUTLER R.W.H. (1984). — Balanced cross-section and their implications for the deep structure of the northwest Alps : discussion *J. Struct. Geol.*, 6, p. 603-606.

CHAPMAN T.J. & WILLIAMS G.D. (1984). — Displacement-distance methods in the analysis of fold thrust structures and linked fault systems. *J. Geol. Soc. Lond.*, 141, p. 121-128.

CHOUKROUNE P., BALLEVRE H., COBBOLD P., GAUTIER Y., MERLE D. & VUICHARD J.P. (1986). — Deformation and motion in the western alpine arc. *Tectonics,* 5, p. 215-226.

DAHLSTROM C.D.A. (1969). — Balanced cross sections. *Can. J. Earth. Sci.* 6, p. 743-757.

DAHLSTROM C.D.A. (1970). — Structural geology in the eastern margin of the Canadian Rocky Mountains. *Bull. Can. Petrol. Geol.,* 18, p. 332-406.

DIEGEL F.A. (1986). — Topological constraints on imbricate thrust networks, example from the Mountain City Window, Tennessee, U.S.A., *J. Struct. Geol.,* 8, p. 269-279.

DOUDOUX B., MERCIER B. & TARDY H. (1982). — Une interprétation nouvelle de la structure des massifs subalpins savoyards (Alpes occidentales) : nappes de charriage oligocènes et déformations superposées. *C. R. Ac. Sc. Paris,* t. 295, p. 63-68.

ELLIOTT D. (1983). — The construction of balanced cross-sections. *J. Struct. Geol,* 5, p. 101.

ELLIOTT D. & JOHNSON M.R.W. (1980). — Structural evolution in the northern part of the Moine thrust belt. *Trans. Royal Soc. Edinburgh. Earth Sci.,* 71, p. 69-96.

GAMOND J.F. (1980). — Direction de déplacement et linéation : cas de la couverture sédimentaire dauphinoise orientale. *Bull. Soc. Géol. Fr,* (7), t. XXII, p. 429-436.

GAPAIS B., COBBOLD P., VENDEUILLE B., PRIOUR D. & CLOAREC J.L. (1986). — Le développement préférentiel de failles ductiles ou fragiles en famille unique : problème cinématique ou mécanique ? *11e R.S.T, Clermont-Ferrand. Soc. Géol. Fr., Edit. Paris,* p. 75.

GIDON M. (1964). — Nouvelle contribution à l'étude du massif de la Grande-Chartreuse et de ses relations avec les régions avoisinantes. *Trav. Lab. Géol. Alpine,* Grenoble, 40, p. 187-205.

GIDON M. (1981 a). — La structure de l'extrémité méridionale du massif de la Chartreuse aux abords de Grenoble et son prolongement en Vercors. *Géol. Alpine,* 57, p. 93-107.

GIDON M. (1981 b). — Les déformations de la couverture des Alpes occidentales externes dans la région de Grenoble, leurs rapports avec celles du socle. *C. R. Ac. Sc., Paris,* 292, série II, p. 1057-1060.

GIDON M. (1982). — La reprise de failles anciennes par une tectonique compressive : sa mise en évidence et son rôle dans les chaînes subalpines des Alpes occidentales. *Géol. Alpine,* 58, p. 53-68.

GIDON M. (1985). Aperçu sur la construction et la disposition des ensembles rocheux du massif de la Chartreuse et de ses chaînons satellites occidentaux. *In* LISMOND B., DROUIN P. Ed., Chartreuse Souterraine. Comité départemental de spéléologie de l'Isère. p. 11-22.

GIDON M., LE HEGARAT G. & REMANE J. (1967). — Nouvelles observations sur le secteur chambérien du massif de la Grande-Chartreuse. *Ann. Cen. d'Ens. Sup. Chambéry,* sect. Sc nº 5, p. 93-102.

GIDON M. & BARFETY J. (1969). — Carte géologique 1/50 000. Montmélian (B.R.G.M.).

GIGOU M. & ENAY R. (1976). — Carte géologique 1/50 000. La Tour du Pin (B.R.G.M.).

GILLCHRIST R., COWARD H. & MUGNIER J.L. (1987). — Structural inversion : examples from the Alpine foreland and Western Alpine collisional belt. *Geodimica acta* 1, 5-34).

GIGNOUX M. & MORET L. (1952). — Géologie Dauphinoise. Masson, Paris, 391 pages.

GOGUEL J. (1948). — Le rôle des failles de décrochement dans le massif de la Grande Chartreuse. *Bull. Soc. Géol. Fr.,* 18, p. 277-235.

GOGUEL J. (1952). — Traité de tectonique. Masson, Paris.

GOGUEL J. (1963). — L'interprétation de l'arc des Alpes occidentales. *Bull. Soc. Géol. Fr.* (7), 5, p. 20-29.

GRAHAM R., HOSSACK J., DERAMOND J., SOULA J.C. (1987). Géométrie des surfaces de chevauchement. *Bull. Soc. Géol. France,* (8), Tome III, p. 169-181.

HOSSACK J.R. (1979). — The use of balanced cross-sections in the calculation of orogenic contraction : a review. *J. Geol. Soc. Lond.,* 136, p. 705-711.

HOSSACK J.R. (1983). — A cross-section through the scandinavian Caledonides constructed with the aid of branch-line map. *J. Struct. Geol,* 5, p. 103-111.

LAMARCHE G. & ROCHETTE P. (1987). — Microstructural analysis ad origin of lineation in the magnetic fabric of alpine slate. *Tectonophysics,* (in press).

LEMOINE M., GIDON M. & BARFETY J.C. (1981). — Les massifs cristallins des Alpes occidentales : d'anciens blocs basculés nés au Lias lors du rifting téthysien. *C. R. Acad. Sc. Paris,* 292, p. 917-920.

MENARD G. (1979). — Relations entre structures profondes et structures superficielles dans le sud est de la France. Essai d'utilisation des données géophysiques. *Thèse 3e Cycle,* Université de Grenoble, 169 p.

MENARD G. & THOUVENOT F. (1984). — Ecaillage de la lithosphère européenne sous les Alpes occidentales : arguments gravimétriques et sismiques liés à l'anomalie d'Ivrea. *Bull. Soc. Géol. Fr.* nº 26, p. 875-884.

MENARD G. & THOUVENOT F. (1986). — Coupes équilibrées crustales : méthodologie et application aux Alpes occidentales. *Rev. Géol. Dyn. Géogr. Phys.,* 1, 35-44).

MERLE O. (1984). — Déplacement et déformation des nappes superficielles. *Rev. Géol. Dyn. Géogr. Phys.,* vol. 25, nº 1, p. 3-17.

MUGNIER J.L. (1984). — Déplacements et déformations dans l'avant-pays d'une chaîne de collision. Méthodes d'études et modélisation. Exemple du Jura. *Thèse Dr. Ing.,* Université de Grenoble, 163 pages.

MUGNIER J.L. & MENARD G. (1986). — Le développement du bassin molassique suisse et l'évolution des Alpes externes : un modèle cinématique. *Bull. Centre. Rech. Explor. Prod. Elf Aquitaine,* 10, 1, p. 167-180.

MUGNIER J.L. & VIALON P. (1986). — Deformation and displacement of the Jura cover on its basement. *J. Struct. Geol.,* 8, p. 373-387.

PIJOLAT B., GAY M. & GRATIER J.P. (1981). — les variations des valeurs de la déformation dans un système de plis par cisaillement. *Rev. Géol. Dyn. Géogr. Phys.,* 23, p. 195-201.

PRICE R.A. (1981). — The Cordilleran foreland thrust and fold belt in the southern Canadian Rocky mountains. in Thrust and Nappe Tectonics (edited by Mc Clay, K and Price, N.J.) *Spec. Publs geol. Soc. Lond.,* 9, p. 427-449.

RICH (1934). — Mechanics of low angle overthrust faulting as illustrated by the Comberland thrust block, Virginia, Kentucky, Tennessee. *Bull. Am. Ass. Petrol. Geol.,* 18, p. 1584-1596.

ROBERT J.P. (1976). — Les décrochements, fracturations et mouvements de blocs associés. Exemple des massifs subalpins dauphinois. *Thèse 3e* cycle, Univ. Grenoble I, 155 p.

SANTOS NARVAEZ J.M. (1980). — Contribution à l'étude géologique des chaînons externes nord-occidentaux du massif de Chartreuse (Savoie). *Thèse 3e cycle*, Univ. Paris VI, 170 p.

SIDDANS A.W.B. (1979). — Arcuate folds and thrust patterns in the subalpine chains of southeast France. *J. Struct. Géol.*, 1, p. 117-126.

SUPPE J. (1983). — Geometry and kinematics of fault bend folding. *Am. J. Sc.*, 283, p. 684-721.

THOUVENOT F. & PERRIER G. (1981). Seismic evidence of a crustal overthrust in the Western Alps. *Pure and appl. Geophys.*, 119, p. 163-183.

THOUVENOT F. & MENARD G. (1988). — Structure profonde du massif subalpin de la Chartreuse : apport de nouvelles données sismiques. En préparation.

VIALON P. (1974). — Les déformations synschisteuses superposées en Dauphiné. Leur place dans la collision des éléments du socle préalpin. Conséquences paléostructurales. *Bull. Suisse Min. pétrogr.*, 54, 2/3, p. 663-690.

WOODWARD N.B., GRAY D.R. & SPEARS O.B. (1986). — Including strain data in balanced cross-sections, *J. Struct. Géol*, 8, p. 313-324.

Manuscrit déposé le 5.9.1986, accepté le 12.2.87.