

Modélisation expérimentale des chevauchements imbriqués : application aux chaînes de montagnes

par JACQUES MALAVIEILLE *

Mots clés. — Modèle, Chevauchement, PC, Cinématique, Maquette, Subduction, Collision, Découlement, Tectonique couverture.

Résumé. — La modélisation expérimentale du raccourcissement dissymétrique d'un modèle multicouches, permet de visualiser la naissance et l'évolution d'un système de chevauchements. Les résultats de l'expérience sont comparés aux chevauchements qui se forment dans les régions où le raccourcissement est lié à un contexte géodynamique de subduction-collision (chaînes de collision, prismes d'accrétion océaniques...).

Nous mettons en évidence : la dissymétrie des structures après raccourcissement, qui est significative du pendage de la paléosubduction ; la diminution de l'âge et du pendage des chevauchements depuis les zones les plus internes jusqu'aux zones externes ; l'existence d'un découplage mécanique à la base de la zone raccourcie ; le fonctionnement de grands rétrochevauchements dont la vergence est opposée à celle du système de failles du domaine raccourci.

Les comparaisons portent sur la chaîne alpine, l'Himalaya et les Cordillères Nord Américaines.

Experimental model for imbricated thrusts : comparison with thrust-belts

Abstract. — The experimental study of a multilayer model affected by asymmetric shortening, enables the examination of the birth and evolution of thrust system. The results of the experiment are compared to thrusts which appear in some particular geological areas, in the areas where the shortening is caused by a subduction-collision geodynamic process (collision ranges, accretionary prism...). The main results are shown to be :

the asymmetry of the main structures after shortening, which is significant of the dip of the paleosubduction ;
the decrease of the age and dip of thrusts, from internal to external areas ;
the existence of mechanical decollement at the base of the shortened zone ;
the importance of backthrusts whose vergence is contrary to that of the system of faults in the shortened area ;
the appearance of many little reverse faults with internal vergence, between the main thrusts with external vergence.
Analogies have been made with the Alpine chain, the Himalaya and the North American Cordilleras.

INTRODUCTION : INTÉRÊT D'UNE APPROCHE EXPÉRIMENTALE.

Les chevauchements et les plis absorbent la plus grande partie du raccourcissement dans les chaînes de montagnes. Des études très variées portent sur ces structures et on connaît assez bien, aujourd'hui, leur géométrie ainsi que les mécanismes de déformation qui interviennent dans leur fonctionnement. Cependant, l'évolution d'une chaîne de montagne reste très difficile à reconstituer. En effet, sur le terrain, on ne peut observer qu'un état de déformation final (superposition de structures tectoniques), qui est le résultat d'une histoire tectonique complexe.

L'approche analytique a permis la formulation de différents modèles mécaniques pour expliquer le fonctionnement des zones plissées et faillées. Cependant, elle ne peut rendre compte aisément d'une déformation importante, surtout si elle est hétérogène. En effet, l'analyse d'une déformation continue importante associée à une déformation discontinue importante nécessite l'intégration d'un nombre trop grand de paramètres.

Ainsi, les résultats obtenus peuvent être contra-

dictoires suivant les paramètres choisis. Par exemple, dans le cas des Montagnes Rocheuses (Canada), pour expliquer les mêmes structures on peut proposer soit des modèles « gravitaires » (représentés par les travaux de Price et Mountjoy [1970] ; Elliott [1976]), soit des modèles en « compression » (modèle de Chapple [1978] par exemple).

Dans d'autres régions, des problèmes semblables ont été abordés de façon satisfaisante par le biais d'une modélisation expérimentale. A Taiwan, par exemple, Davis *et al.* [1983] ont modélisé le raccourcissement de séries de couvertures continentale dans une zone de convergence de plaques. Cette approche a donné des résultats intéressants car elle permet de prendre en compte de grandes déformations (continues et discontinues), et elle donne, d'autre part, une vision cinématique de l'évolution des structures. C'est pour ces raisons que nous l'avons adoptée pour étudier l'évolution des chevauchements dans les chaînes de montagnes.

* Lab. de géologie structurale, Univ. des sciences et techniques du Languedoc, Pl. Eugène-Bataillon, 34060 Montpellier Cédex, France.

Note présentée à la séance du 21 janvier 1983, déposée le 30 juin 1983 ; manuscrit définitif reçu le 19 septembre 1983.

LA MODÉLISATION.

1) *Principe*. La plupart des chaînes à la surface du globe sont dissymétriques. Partant de cette constatation, nous avons essayé, en simulant expérimentalement un raccourcissement dissymétrique, de comprendre les mécanismes de formation des chevauchements dans les chaînes de montagne. Le raccourcissement dissymétrique nous paraît représentatif de situations naturelles particulièrement propices à la formation de chevauchements, situations qui se retrouvent en particulier aux limites de plaques lithosphériques, dans les zones de convergence. Dans ces domaines, l'enfoncement d'une plaque lithosphérique sous une autre, au niveau d'une subduction, provoque un raccourcissement dissymétrique et un découplage des différentes unités supérieures de la lithosphère qui ne peuvent sub-

duer. Citons comme exemple, les cas de la croûte continentale dans les zones de collision (fig. 1 b), des prismes d'accrétion sédimentaire dans les zones de subduction océaniques (fig. 1 a) et, à une échelle inférieure, du décollement couverture sédimentaire - substratum en avant des zones internes dans les chaînes de montagnes (fig. 1 c).

2) *Appareillage utilisé*. Dans l'expérience (fig. 2) le raccourcissement s'effectue à partir d'une zone de convergence (ZC). De part et d'autre de cette zone, on définit deux domaines : un premier qui est raccourci (DR), se déplace vers la zone de convergence et un autre qui est fixe (DF). La déformation va se propager depuis la zone de convergence vers l'extrémité du domaine raccourci.

La machine (fig. 3) est composée d'un châssis, sur les côtés duquel, sont fixées deux vitres qui

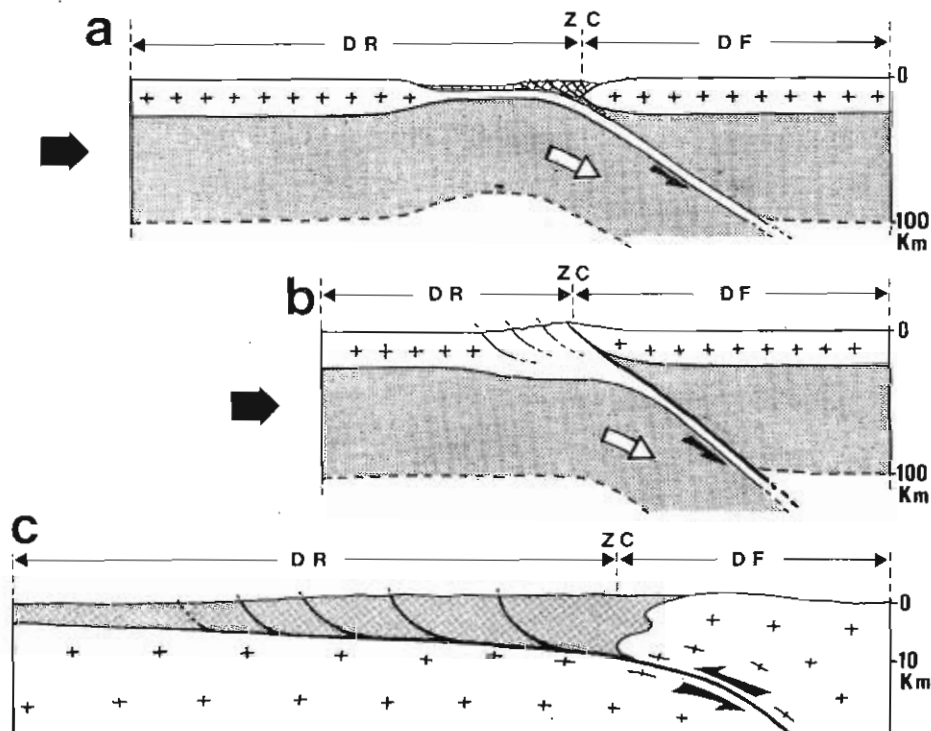


FIG. 1. — Différents contextes tectoniques responsables d'un raccourcissement dissymétrique. D.R. : Domaine raccourci ; Z.C. : Zone de Convergence ; D.F. : Domaine Fixe (ces mêmes abréviations seront utilisées pour les figures suivantes).

a : zone de subduction océanique : formation d'un prisme d'accrétion sédimentaire ; b : zone de collision continentale : formation d'un prisme d'empilement crustal ; c : décollement socle-couverture causé par le jeu d'une faille de socle.

Figurés : a et b : en blanc la croûte océanique, avec des croix la croûte continentale, en barré vertical les sédiments, en grisé la lithosphère ; c : avec des croix le socle, en grisé la couverture sédimentaire.

FIG. 1. — Various tectonic context causing an asymmetric shortening. D.R. : Shortened area ; Z.C. : Convergence zone ; D.F. : Fixed domain (these abbreviations will be used for the following figures).

a : zone of oceanic subduction : formation of a sedimentary accretionary prism ; b : zone of continental collision : formation of a crustal stacking prism ; c : a basement-cover decollement caused by the displacement along a basement thrust fault.

Fig. 1 a and b : The oceanic crust is shown in white, the continental crust by crosses, the sediments by vertical lines, and the lithosphere in grey. Fig. 1 c : the basement is shown by crosses and the sedimentary cover in grey.

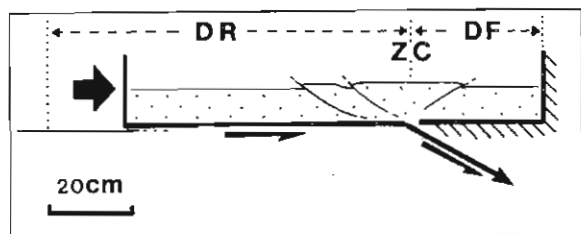


FIG. 2. — Schéma de principe de la modélisation.

FIG. 2. — Sketch of the experiment principle.

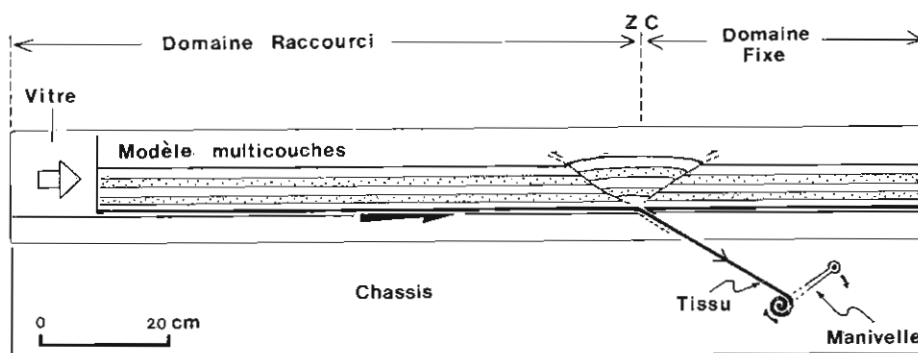


FIG. 3. — Appareillage utilisé.

FIG. 3. — Sketch of the apparatus.

permettent l'observation en coupe des modèles qu'elles confinent. Entre ces deux vitres circule une bande de tissu en nylon. Celle-ci repose sur le support plan que constitue la partie supérieure du châssis. Ce tissu passe au travers d'une fente (qui matérialise le point de convergence) située aux deux tiers du plan support. La partie du matériau qui repose sur le tissu correspond au domaine raccourci. L'extrémité du tissu qui passe au travers de la fente, va s'enrouler autour d'un axe dont la rotation est assurée manuellement. A l'autre extrémité est fixée une limite en bois qui sert à maintenir le matériau pendant le déroulement de l'expérience, les deux limites en bois n'ont aucun rôle dans la formation des structures. L'observation se fait à partir de photos et de films réalisés au cours de l'expérience.

3) *Le matériau et son comportement mécanique.* Nous avons utilisé une poudre fine obtenue par sciage de roches calcaires (molasses marines d'âge miocène de la région de Montpellier). Nous avons choisi cette poudre en raison de la ressemblance des structures qu'elle produit, avec les structures naturelles. Son comportement mécanique est voisin de celui d'un sable, c'est-à-dire que sa déformation se traduit par l'apparition de failles. Ces failles ne sont pas des ruptures du matériau, mais des bandes de cisaillement où la déformation se concentre de façon

hétérogène. Le gradient de déformation que l'on observe à l'approche d'une telle faille est à considérer comme faisant partie de la bande de cisaillement, même si, dans un stade avancé de la déformation, la zone active devient plus étroite et laisse « mortes » les zones adjacentes apparemment déformées de façon continue. De plus, la granulométrie relativement homogène de cette poudre (la taille des éléments varie de 0,1 à 0,05 mm) entraîne une homogénéité de comportement et permet donc une bonne reproductibilité des structures d'une expérience à

l'autre. Les structures qui vont apparaître dans ce matériau dépendent donc exclusivement des conditions aux limites imposées au système.

4) *Préparation des modèles multicouches.* Les modèles sont constitués de couches horizontales de poudre uniformément compactée entre les deux vitres (fig. 3). L'épaisseur du modèle est de 10 cm environ. Des marqueurs horizontaux sont matérialisés par la coloration des différentes couches de poudre du modèle. Cette coloration est obtenue par mélange à sec de petites quantités de poudres colorantes (oxydes divers). Le comportement mécanique du matériau ne semble pas modifié par ces oxydes. Ces couches sont assimilées à des marqueurs passifs de la déformation.

5) *Limites matérielles de l'expérience.* Pour la commodité d'observation, l'expérience dure environ cinq minutes (plusieurs expériences de durées différentes ont donné les mêmes structures). Le glissement de la poudre le long des vitres est très facile. Le parfait cylindrisme des structures montre que les « effets de bord » sont négligeables, ce qui permet une observation directe en coupe de l'évolution des modèles. Le matériau ne peut s'enfoncer à l'endroit (fente) de la convergence. Le plancher support étant rigide, le modèle ne peut échapper que vers le haut.

Il n'y a pas de zone de glissement préférentiel au contact entre le tissu rugueux du domaine raccourci et la poudre.

6) *Naissance et évolution des failles pendant l'expérience* (fig. 4). Dès les premiers stades de l'expérience, pour un raccourcissement faible (le raccourcissement pour la figure 4 b est de 2 cm), on observe l'apparition de deux failles inverses conjuguées au niveau de la zone de convergence. Celle qui apparaît dans le domaine raccourci fait un angle voisin de 20° avec l'horizontale, l'autre fait un angle voisin de 25°. Ces failles naissent immédiatement, car le matériau a un comportement mécanique favorable à une déformation discontinue. La naissance de nouvelles failles dans le domaine raccourci va se faire de façon centrifuge (fig. 4 b à g). Ainsi, les failles les plus jeunes seront toujours les plus externes (les failles sont numérotées sur la figure en fonction de leur apparition). On remarque, ici, que l'ensemble du système chevauche en continu le domaine fixe à la faveur des failles antithétiques R_1 et R_2 , celui-ci prend alors un profil d'équilibre déterminé par la géométrie de la faille R_1 (fig. 4 g). Dans l'expérience, le matériau ne peut disparaître au niveau du point de convergence. Le raccourcissement se fait donc sans changement de volume, ceci se traduit par un découplage entre le support de tissu du domaine raccourci qui peut s'enfoncer, et le matériau qui ne disparaît pas. Le raccourcissement continu et forcé, provoque également l'épaississement du modèle par empilement des différentes unités à la faveur des chevauchements. Cet épaississement en provoquant l'accroissement de la contrainte normale sur le plan de faille actif, finit par bloquer celui-ci, et engendrer une nouvelle faille dans une zone moins épaisse, c'est-à-dire plus externe.

À un stade plus évolué de l'expérience (fig. 4 d) commencent à apparaître de petites failles inverses antithétiques dans les zones limitées par deux chevauchements majeurs. Ces petites failles vont se multiplier en même temps qu'apparaîtront de nouvelles failles vers l'extérieur du système (fig. 4 d à g). Dans la figure 4 g, on remarque qu'un petit « coin » de matériau est « extrudé » à la faveur de la faille la plus externe, à laquelle est associée une petite faille antithétique.

Pendant l'évolution de l'expérience, le pendage des failles apparues dans le domaine raccourci, augmente. Par exemple, la faille 1 de la figure 4 b (la première apparue) voit son inclinaison varier de façon continue depuis un angle de 20° au moment de son initiation, jusqu'à un angle de 35° à la fin de l'expérience (fig. 4 g). Il en est de même pour toutes les autres failles, dont le basculement final sera fonction de l'ordre d'apparition. Par contre, les chevauchements antithétiques R_1 et R_2 vont se coucher jusqu'à l'horizontale, pendant que se produit

le déplacement du relief vers le domaine stable. En fin d'expérience, les grandes failles antithétiques R_1 , R_2 sont représentées par un système complexe très déformé, de quelques centimètres d'épaisseur (fig. 4 g).

En résumé, le raccourcissement dissymétrique donne naissance à deux systèmes de failles de sens opposé, qui vont évoluer simultanément. Le premier système est formé par les chevauchements du domaine raccourci. Dans ce système, la déformation migre à partir de la zone de convergence, dans un sens opposé au mouvement du domaine raccourci. Dans le deuxième système, les grandes failles de sens opposé R_1 et R_2 vont permettre le déplacement global du relief vers le domaine fixe. Simultanément apparaissent entre les grandes failles du domaine raccourci, de petites failles inverses de sens opposé.

APPLICATION DES RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION À DES EXEMPLES GÉOLOGIQUES.

1) *Dissymétrie des structures*. Les structures obtenues dans l'expérience sont caractérisées par leur dissymétrie (fig. 4 g). La géométrie des failles résulte directement du raccourcissement imposé, qui est lui-même dissymétrique. Ainsi la vergence des chevauchements est toujours à l'opposé du sens de convergence. Par analogie avec les zones de subduction lithosphériques (fig. 1 a et b), on peut penser que dans les chaînes de subduction-collision, la dissymétrie des structures tectoniques observées sur le terrain (sens des chevauchements, déversement des plis, etc.) permet de déterminer facilement le pendage de la paléosubduction lithosphérique qui les a créées. À une échelle inférieure, dans le cas d'une interaction socle-couverture (fig. 1 c), la vergence des chevauchements observés dans la couverture indiquera le sens de mouvement des failles qui ont fonctionné dans le socle.

2) *Migration de la déformation vers l'extérieur de la zone épaissie*. Nous avons vu dans l'expérience (fig. 4 b à g) que la déformation se propage dans le domaine raccourci, en créant de nouveaux chevauchements en avant de la zone épaissie (les précédents formés cessent de fonctionner). Après déformation, les chevauchements les plus externes seront donc les plus jeunes, et les plus internes les plus anciens. Un autre caractère apparaît simultanément. Sitôt créés les chevauchements subissent une rotation passive : ils tendent à se redresser à cause du jeu des failles antithétiques, qui assurent par ailleurs l'épaississement au niveau de la zone de convergence. Les contacts les plus vieux seront donc les plus raides, le pendage diminuant quand on s'écarte du point de convergence (fig. 4 g).

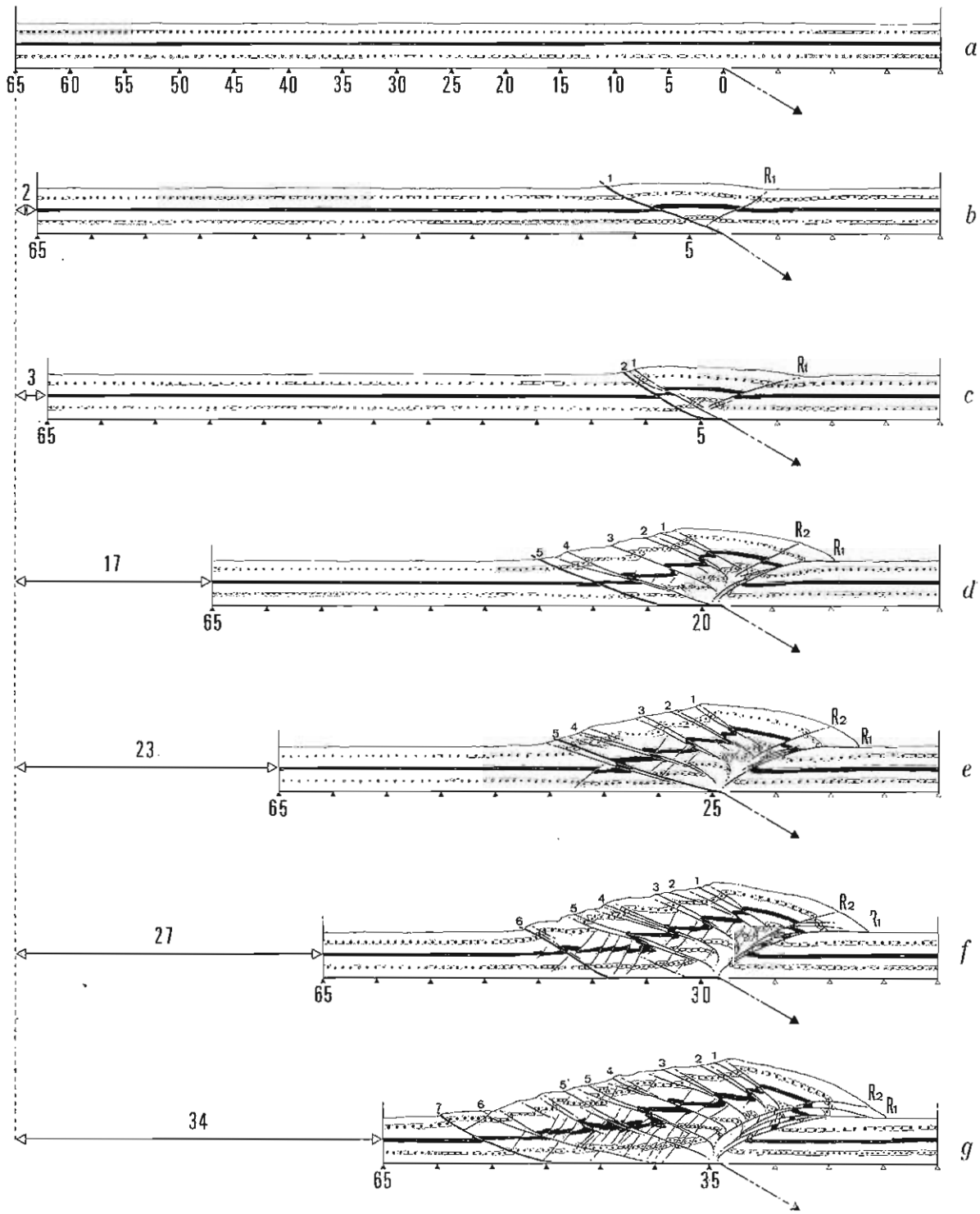


FIG. 4. — Description de l'évolution des failles au cours de l'expérience.

L'échelle graphique de 0 à 65 cm permet de visualiser la quantité de raccourcissement pour les différents stades représentés (la valeur exacte est indiquée à gauche du domaine raccourci). Les failles (ou groupes de failles) qui apparaissent dans le domaine raccourci sont numérotés de 1 à 7 par ordre d'apparition. Les rетроchevauchements du domaine fixe sont appelés R_1 et R_2 . A chaque stade de l'expérience, la faille active et la zone de décollement sont représentés par un trait plus épais.

FIG. 4. — Fault evolution during the experiment.

The graphic scale from 0 to 65 cm enables one to observe the value of the progressive shortening (the exact value is indicated on the left of the shortened zone). The faults (or group of faults) which appear in the shortened zone are numbered from 1 to 7 depending on their formation order. The backthrusts in the fixed area are called R_1 and R_2 . At every stage of the experiment, the active faults and the decollement zone are shown with a thicker line.

L'application de ces mécanismes aux chaînes de collision est possible, et, logiquement, si le mécanisme de formation de la chaîne est continu, l'analogie est directe. Pour la majorité des chaînes dissymétriques (Alpes, Rocheuses, Himalaya, Appalaches, ...) l'âge et le pendage des contacts tectoniques majeurs décroissent en effet depuis les zones internes (proches de la suture qui matérialise dans ce cas la zone de convergence) jusqu'aux zones externes (par exemple dans l'Himalaya depuis la suture du Tsangpo jusqu'au MBT). Ce modèle est également applicable aux prismes d'accrétion (fig. 5)

— A une échelle supérieure, on peut penser par analogie avec l'expérience, que dans les cas de subduction continentale (chaînes de collision), il existe un découplage entre la croûte continentale et le manteau supérieur [Mattauer, 1983]. Ce découplage mécanique se produit le long d'un plan séparant des formations aux propriétés rhéologiques contrastées. Il est induit par leur différence de densité : la subduction de lithosphère étant continue et la croûte continentale trop légère ne pouvant s'enfoncer au-delà d'une certaine profondeur, elle va se raccourcir et s'épaissir par l'intermédiaire de chevauchements crustaux.

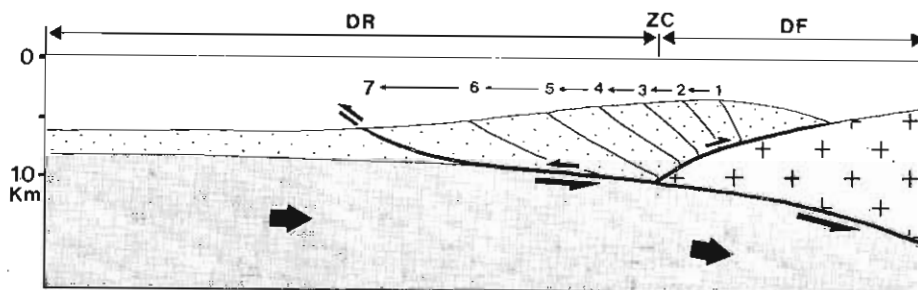


FIG. 5. — Modèle proposé pour le fonctionnement d'un prisme d'accrétion sédimentaire

Les failles sont numérotées de 1 à 7 de la plus ancienne à la plus récente. Le contact actif (contact n° 7) et la zone de décollement sont représentés par un trait plus épais. La croûte océanique est représentée en grisé, la croûte continentale par des croix, les sédiments avec des points.

FIG. 5. — Suggested model for the formation of sedimentary accretionary prism.

The faults are described from the oldest to the youngest with numbers from 1 to 7. The active fault and the decollement zone are shown with a thicker line. The oceanic crust is shown in grey, the continental crust with crosses, and for the sediments with dots.

dans les zones de subduction [Le Pichon *et al.*, 1982 ; Fig. 17]. En effet, les forages montrent des superpositions anormales de séries, avec une variation des âges qui rajeunissent quand on s'écarte de la zone de subduction en direction de la plaque subductée [Moore *et al.*, 1979 ; Fig. 3]. De même, le pendage de ces failles diminue quand on se rapproche de l'avant du prisme, donc des contacts les plus jeunes [Karig, 1975 ; Fig. 7].

3) *Le découplage à la base du domaine raccourci.* On peut comparer le découplage tissu-poudre de l'expérience (imposé par l'appareillage), à plusieurs types de découplages ou décollements géologiques dont les effets pourraient être semblables.

— Par exemple, les décollements socle-couverture qui se produisent lorsqu'à la faveur d'un chevauchement profond le socle pousse en avant la couverture (fig. 1c) qui va être raccourcie et épaissie. Dans ce cas, l'évolution des chevauchements dans la zone « décollée » peut être comparée à celle de l'expérience. Les chevauchements des Montagnes Rocheuses (Canada) sont un exemple naturel particulièrement spectaculaire de tels découplages socle-couverture.

chements crustaux. Ces chevauchements ne sont possibles que s'il existe un décollement croûte-manteau permettant un raccourcissement très important par superposition de plusieurs unités de croûte continentale (fig. 6).

4) *Les grands rétrochevauchements du domaine fixe.* Dès le premier incrément de la modélisation, on voit apparaître un chevauchement dans le domaine fixe (fig. 4b). Il va évoluer en continu tout au long de l'expérience et permettre le charriage, sur le domaine fixe, de l'ensemble du relief causé par le raccourcissement (fig. 4b à g). Nous proposons d'expliquer les « rétrocharriages » des Alpes par analogie avec les structures expérimentales. Il existe en effet dans cette chaîne, des chevauchements dont le sens est opposé à la vergence globale vers l'Ouest (fig. 7a). Cela se traduit notamment par le rétrochevauchement du Briançonnais sur les Massifs Cristallins Internes (fig. 7b) (Grand Paradis, Dora-Maira, Mont-Rose). Nous interprétons ces structures, sans faire intervenir une inversion de la vergence des mécanismes de déformation. Notre hypothèse est la suivante : après la collision des deux domaines continentaux

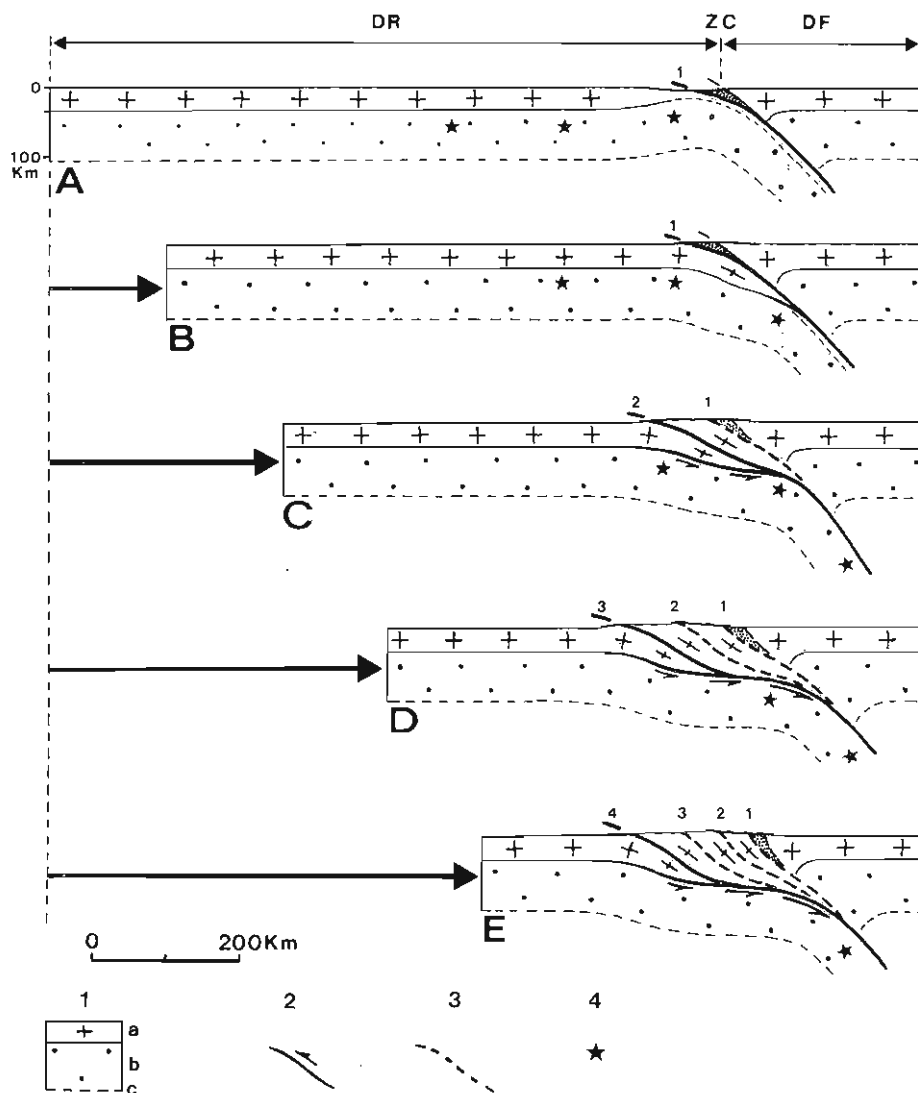


FIG. 6. — Modèle proposé pour le fonctionnement d'un prisme d'accrétion crustal lors d'une collision continentale.

A, B, C, D, E : stades successifs. Les chevauchements sont numérotés de 1 à 4 dans l'ordre d'apparition. Figurés : 1 : lithosphère continentale : a : croûte continentale, b : manteau, c : base de la lithosphère ; 2 : chevauchements actifs ; 3 : chevauchements inactifs ; 4 : points repères.

FIG. 6. — Suggested model for the formation of a crustal stacking prism during a continental collision.

A, B, C, D and E ; successive stages. The thrusts are numbered from 1 to 4 depending on their formation order. 1 : continental lithosphere (a : continental crust, b : mantle, c : base of the lithosphere) ; 2 : active thrusts ; 3 : inactive thrusts ; 4 : indicative dots.

italiens et européens, la subduction de la lithosphère se poursuivant, la croûte continentale du domaine européen est entraînée. La croûte continentale ne peut s'enfoncer, à cause de sa trop faible densité, au-delà d'une certaine profondeur ; elle se dédouble alors par l'intermédiaire d'une grande faille ductile [Ménard, 1979 ; Beach, 1981]. L'unité de croûte ainsi formée vient chevaucher vers l'Ouest le reste de la croûte du continent qui poursuit sa subduction

tirée par la lithosphère. Cette unité chevauchante va pousser vers l'avant la totalité de la zone Briançonnaise. Celle-ci se déforme et s'épaissit, la déformation migre vers l'extérieur de la chaîne par l'intermédiaire de grands chevauchements à vergence ouest (ce qui provoque également le charriage vers l'Ouest des Massifs Cristallins Externes). De plus, l'épaississement devenant important, la zone directement soumise à la poussée du butoir que constituent

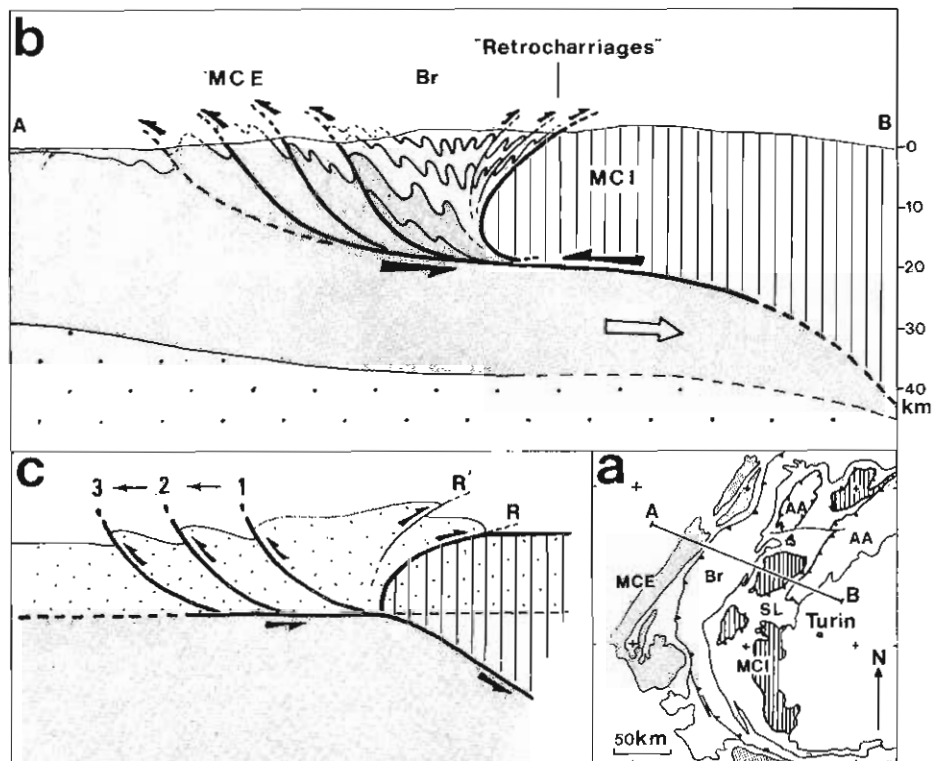


FIG. 7. — Schéma interprétatif du fonctionnement des rétrocharriages dans les Alpes Occidentales.

a : Schéma structural simplifié des Alpes Occidentales et localisation de la coupe A-B. Abréviations : MCE : Massifs Cristallins Externes, Br. : Briançonnais, SL. : Nappe des schistes lustrés, MCI : Massifs Cristallins Internes, AA. : Austro Alpin.

b : Coupe transversale schématique de la chaîne au niveau du Grand Paradis. En hachures verticales, l'équivalent du domaine fixe de l'expérience (MCI = Massifs Cristallins Internes suturés au domaine italien). En grisé et en blanc le domaine raccourci (Les Massifs Cristallins Externes = MCE et la croûte continentale du domaine européen en grisé ; les sédiments de la zone Briançonnaise en blanc = Br.).

c : Schéma comparatif simplifié des structures de l'expérience. Grisé : Croûte continentale + lithosphère du domaine européen. Hachures verticales : Domaine fixe = Massifs Cristallins Internes + Suture + Domaine italien. Points : Domaine Raccourci = Briançonnais et Massifs cristallins Externes. R et R' = Rétrochevauchement.

FIG. 7. — Interpretative sketch of backthrusting in the Western Alps.

a : Simplified structural sketch of the Western Alps and situation of the cross section A-B. MCE : External Crystalline Massifs. Br. : Briançonnais. SL : « Nappes des Schistes Lustrés ». MCI : Internal Crystalline Massifs. AA : « Austro Alpin ».

b : Transversal schematic cross section through the Western Alps at the level of the « Grand Paradis » massif.

c : Comparative sketch between the experiment and the « retrocharriages » of the Alps. In grey : the continental crust and the lithosphere of the European area. — Vertical lines : set area = internal crystalline massifs + suture + Italian area. Dots : shortened zone = « Briançonnais » + External crystalline massifs. — R and R' = Backthrusts.

les Massifs Cristallins Internes (unité de croûte chevauchante), rétrochevauche le système vers l'Est. Les rétrochevauchements seraient les équivalents des failles R_1 et R_2 de l'expérience, les Massifs Cristallins Internes constituant le domaine fixe (fig. 7c). Les rétrocharriages (R_1 et R_2) sont de loin les failles qui ont le rejet le plus important dans un stade avancé de l'expérience (photo 1). On peut se demander pourquoi dans la nature des rétrochevauchements équivalents n'apparaissent pas dans le continent opposé à la subduction (domaine italien) lors de la collision ? Nous avons vu dans l'expérience que le

premier rétrocharriage apparaît (et ce dès les premiers incréments du raccourcissement) parce que le matériau ne peut s'enfoncer au niveau de la zone de convergence. Dans le cas d'une subduction de plaque lithosphérique, le matériau (ici la croûte continentale) peut s'enfoncer (au moins jusqu'à une profondeur voisine de 60 km), supporté et entraîné par la plaque rigide qui subducte. Il est donc logique qu'il n'y ait pas de rétrocharriages d'échelle crustale (au moins tant que la subduction de croûte est possible). Les rétrocharriages décrits dans les Alpes sont d'échelle inférieure aux grands chevauchements

crustaux, ils se produisent parce que les matériaux du Briançonnais ne peuvent s'enfoncer au front du chevauchement vers l'Ouest des Massifs Cristallins Internes.

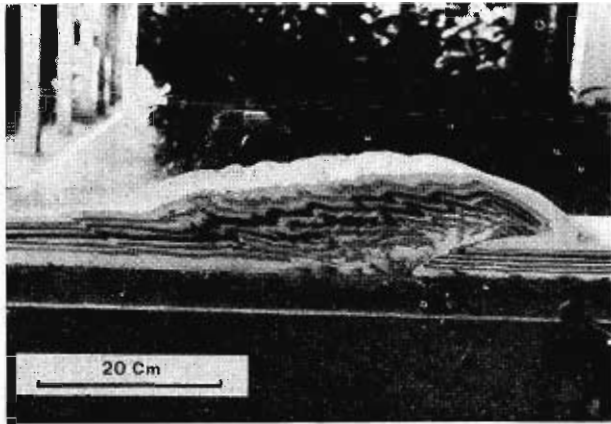


PHOTO 1. — Le dispositif expérimental et le modèle multicouches après raccourcissement.

PHOTO 1. — Experimental apparatus and the multilayer model after shortening.

5) *Les petites failles inverses associées aux grands chevauchements.* La figure 8 a représente la géométrie des chevauchements pour un stade évolué de l'expérience. On observe dans le domaine raccourci de nombreuses failles inverses comprises entre les chevauchements et de sens opposé (fig. 8 c). Si l'on compare le système de failles de l'expérience avec les lignes de glissements théoriques (fig. 9) obtenues par le calcul [Hubbert, 1951] pour un système simple ayant des conditions aux limites proches de celles de notre expérience, on constate une grande similitude géométrique. Cependant, dans les modèles, malgré l'homogénéité du matériau et la présence de marqueurs colorés réguliers, l'observation pour des

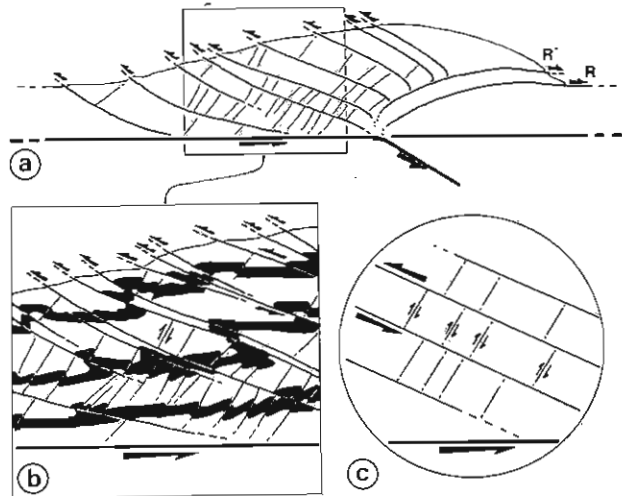


FIG. 8. — Schéma de fonctionnement des petites failles inverses associées aux grands chevauchements.

a) Le chevauchement du domaine raccourci et les petites failles inverses associées. b) Détail : Les couches marqueurs sont représentées en noir. c) Détail du fonctionnement.

FIG. 8. — Sketch of the Formation of little faults associated with the main thrusts.

a) Thrust system in the shortened area and associated little reverse faults. b) Details of markers layers in black. c) Detail of the Kinematics.

stades évolués de l'expérience est difficile, les structures étant complexes (photos 1 et 2, fig. 8 b).

Dans la nature, des matériaux hétérogènes, associés à des marqueurs complexes, soumis à la même déformation, donneront des structures d'une géométrie bien plus complexe encore. On peut donc se demander, par analogie, si une partie des structures attribuées sur le terrain à des superpositions de phase de déformation, ne pourraient résulter en fait d'un même mécanisme de déformation progressive. Celui-ci étant cohérent à l'échelle d'une chaîne mais pouvant

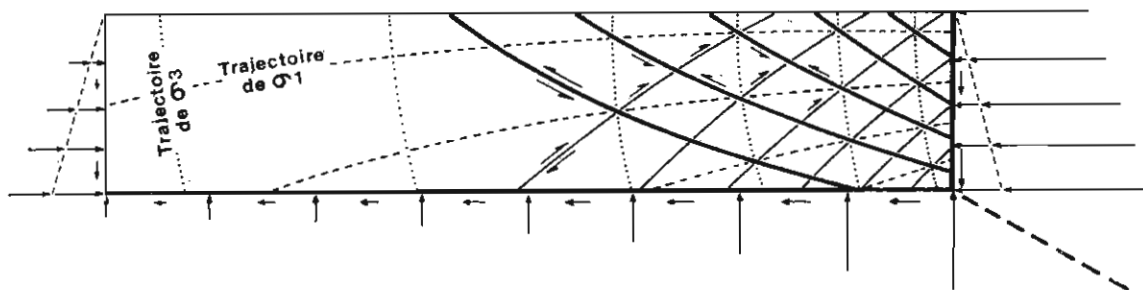


FIG. 9. — Schéma théorique [d'après Hubbert, 1951] illustrant à un instant donné, la déformation du domaine raccourci, et montrant la ressemblance entre les lignes de glissement calculées et les failles de l'expérience (comparer avec la fig. 8a).

FIG. 9. — Theoretical sketch [after Hubbert, 1951] showing deformation of the shortened area and showing a likeness between calculated slip lines and experimental faults (compare with fig. 8a).

être très difficile à analyser à partir des seules observations de terrain. En effet, l'observation sur le terrain permet rarement d'avoir une vision d'ensemble des structures, et surtout, elle ne permet pas d'en avoir une vision évolutive.

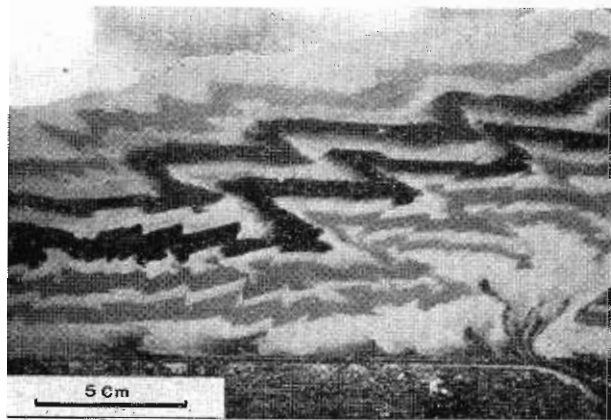


PHOTO 2. — Détail de la photo 1 montrant la complexité apparente des structures à un stade évolué de la déformation.

PHOTO 2. — Detail of photo 1 showing the apparent complexity of the structures at an evaluated stage of the deformation.

Ainsi, nous pensons que certains chevauchements ou plissements à vergences opposées (problématiques dans des contextes de chaîne à vergence globale unique et claire), peuvent s'intégrer (par analogie avec l'expérience) dans un même processus de déformation progressive [Brun et Choukroune, 1981].

Ce problème d'analyse se retrouve à tous les niveaux et il nous paraît clair que pour interpréter les déformations observées depuis l'échelle de la lame mince, jusqu'à l'échelle de la chaîne, il faut essayer de replacer les structures dans des modèles généraux évolutifs, susceptibles de prendre en compte le plus grand nombre de paramètres et d'observations. Pour élaborer ces modèles, l'expérimentation nous paraît être un outil indispensable.

CONCLUSION.

Ainsi, en montrant la cinématique de phénomènes dont on ne peut observer dans la nature que le résultat final, cette approche permet l'interprétation de structures géologiques complexes. Il est bien évident que cette modélisation très simple ne peut tenir compte du grand nombre de paramètres qui règlent la déformation dans les chaînes de montagnes. Les résultats obtenus n'ont, par conséquent, qu'une valeur qualitative. Dans l'avenir nous essayerons à l'aide d'autres modèles et avec un appareillage plus complet, de mieux comprendre l'influence des différents paramètres qui interviennent dans la formation des chevauchements : géométrie des modèles, cohésion du matériau, niveaux de décollement, gravité...

Remerciements. — Ces travaux ont été réalisés dans le cadre de l'A.T.P. « Sismogenèse, plis, failles », du C.N.R.S.-I.N.A.G.

Références

- BEACH A. (1981). — Thrust tectonics and crustal shortening in the external French Alps based on a seismic cross-section. *Tectonophysics*, 79, T1.T6.
- BRUN J.P. et CHOUKROUNE P. (1981). — Déformation progressive et structures crustales. *Rev. Géol. dyn. Géogr. phys.*, vol. 23, p. 177-193.
- CHAPPELLE W.M. (1978). — Mechanics of thin-skinned Fold-and-Thrust belts. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 89, p. 1189-1198.
- DAN DAVIS, SUPPE J. et DAHLEN F.A. (1983). — Mechanics of Fold-and-Thrust belts and Accretionary wedges. *J. Geophys. Res.*, vol. 88, p. 1153-1172.
- ELLIOTT D. (1976). — The motion of thrust sheets. *J. Geophys. Res.*, vol. 81, p. 949-963.
- HUBBERT M.K. (1951). — Mechanical basis for certain familiar geologic structures. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, vol. 62, p. 355-372.
- KARIG D.E. et SHARMAN III G.E. (1975). — Subduction and Accretion in Trenches. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, vol. 86, p. 377-389.
- LE PICHON X., LYBÉRIS N., ANGELIER J. et RENARD V. (1982). — Strain distribution over the East mediterranean ridge : a synthesis incorporating new sea-beam data. *Tectonophysics*, 86, p. 243-274.
- MATTAUER M. (1983). — Subduction de lithosphère continentale, décollement croute-manteau et chevauchements d'échelle crustale dans la chaîne de collision himalayenne. *C.R. Ac. Sc.*, Paris, t. 296, p. 481-486.
- MENARD G. (1979). — Relations entre structures profondes et structures superficielles dans le SE de la France. Thèse 3^e Cycle, Univ. Grenoble, 178 p.
- MOORE J.C., WATKINS J.S., SHIPLEY T.H., BACHMAN J.B., BEGHEL F.W., BUTT A., DIDYK B.M., LEGGETT J.L., LUNDBERG N., Mc MILLEN K.J., NITSUMA N., SHEPARD L.E., STEPHAN J.F. et STRADNER H. (1979). — Progressive accretion in the middle America trench, southern Mexico. *Nature*, vol. 281, p. 638-642.
- PRICE R.A. et MOUNTJOY E.W. (1970). — Geologic structure of the Canadian Rocky Mountains between Bow and Athabasca rivers — Progress report. *Geol. Ass. Can. Spec. pap.*, 6, p. 7-25.