

Champs de contraintes et cinématique des chevauchements sud-alpins près de la terminaison de la faille giudicarienne

Philippe Hervé LELOUP, TRONG TRINH PHAM, Rolando ARMIJO et Robin LACASSIN

Résumé — Pour préciser la cinématique des déformations alpines de la marge apulienne au Sud-Est de la faille Giudicarienne (région du lac de Garde, Italie), nous avons réalisé une étude de microtectonique cassante qui met en évidence une phase compressive majeure N160, antérieure à un raccourcissement local N125 lié au fonctionnement d'un accident inverse. D'autre part, la géométrie des plis et des accidents majeurs et les déformations associées aux chevauchements parallèles à la faille Giudicarienne indiquent une direction de chevauchement N130, vers le Sud-Est. La compression majeure est compatible avec la direction de la convergence Afrique-Eurasie au début du Tertiaire. Par la suite, cette convergence provoque le rejeu en profondeur d'une ancienne faille normale NNE-SSW en faille inverse sénestre. Cette faille bifurque à l'interface socle/couverture en une faille sénestre (faille Giudicarienne) et une série de chevauchements vers le Sud-Est.

Tectonic stresses and kinematics of south-alpine thrusts near the giudicarian fault termination

Abstract — Brittle microstructures show the existence of a major compression phase during the Eocene with σ_1 oriented N160 close to the relative convergence between Africa and Europe. This is followed by a local perturbation (σ_1 oriented N125) related to the activation of a reverse fault. Thrust geometry and microstructures observed in the footwall of flat thrusts demonstrate SE vergent, N135 directed, thrusting. During the late Tertiary, a former normal fault, trending NNE-SSW, has been reactivated with an oblique slip at depth (left-lateral/reverse). This fault bifurcates at the basement/cover interface, into a left-lateral fault (Giudicarian f.) and SE-vergent thrusts.

Abridged English Version — A structural map of the southern Alps ([3], [4]) shows that the large strike-slip faults which limit the internal zones to the south (Insubric f., Giudicarian f., Gailtal f.) are parallel to the South-Alpine thrusts (Fig. 1). Near the southern termination of the Giudicarian fault (Italy), the thrusts, still parallel to the left-lateral fault, trend NNE and are thus oblique to the main part of the South-Alpine front (Fig. 2). We attempted to study the kinematics of the alpine deformation in this region, along a NW-SE section (Fig. 3) between the South-Alpine foreland near Verona, and the giudicarian strike-slip fault. In the tabular zone, west of Verona, the strain intensity is small and brittle microstructures (tension gashes, stylolithes, microfaults...) can be used to determine the paleostress tensor (stress tensors compatible with fault populations have been calculated in 22 stations, using two different inversion methods ([5], [6]), which gave similar results). To the west of this zone, a system of thrusts parallel to the Giudicarian fault shows more intense deformation in decollement zones (folds, shear planes...); this has been used to estimate the direction of transport of the thrust sheets.

BRITTLE MICROSTRUCTURE OF THE VERONA PLATFORM. — Three successive tectonic stages during the Tertiary have been observed: (1) an early extension with normal faults and vertical cracks; (2) a regional compression with σ_1 (max. compr. stress.) trending N160 (from N145 to N180) which occurs over the entire platform (Fig. 4a); (3) a second compression is localized along the Adige fault with σ_1 trending N125 (from N90 to N140) (Fig. 4b). This compressional deformation was produced during the activation of this reverse fault.

Note présentée par Jean-Louis Le MOUËL.

THRUST KINEMATICS. — The major thrust (Tremosine thrust) (*Figs. 3 and 5 a*) corresponds to a minimum shortening of 5 km. In the decollement zone below the thrust, the deformation is characterized by recumbent folds, cut by extensional shear planes. The average direction of extension is N135 (*Fig. 6*), estimated using slickenslides or the perpendicular to the intersection between shear-planes and cleavages (*Fig. 5 b and c*). These shear planes result from the progressive shearing of the footwall of the thrust; in this context we interpret the extension direction as a good estimation of the transport direction on this thrust. This is nearly parallel to the local compression along the Adige fault.

DISCUSSION. — The major chronological constraints are: (1) folds compatible with the regional compression are cut by the Adamello intrusions [7] dated from 29 M.a. to 42 M.a. [8]. (2) The Giudicarian fault has cut the Adamello intrusions. (3) The folds and thrusts of NNE-SSW direction, like the Adige fault or the Tremosine thrust, formed between the Oligocene and the Pliocene. We propose the following tectonic evolution (*Fig. 7*): distension until Eocene, followed by the regional N160 oriented compression; during the Oligo-Miocene the Giudicarian strike slip fault, and the thrusts parallel to this fault are simultaneously active.

The direction of regional compression may be compared to the NNW-SSE relative motion between Europe and Africa during the lower Tertiary [12]. The two systems of late Tertiary faults (parallel thrusts and strike slip fault) cannot be activated by a regional uniform stress tensor; indeed, the slip vectors along the two fault systems are almost perpendicular (*Fig. 2*). Nevertheless, we may explain these “incompatible”, synchronous movements by a kinematic model of bifurcation [13] (*Fig. 8*). During regional compression, a former major normal fault trending NNE-SSW, and dipping WNW, was reactivated with a left-lateral/reverse slip at depth. At the basement/cover interface, this fault bifurcates into a left-lateral strike-slip fault (the Giudicarian f.), and thrusts, with a N130 slip direction (for example the Tremosine thrust).

INTRODUCTION. — La chaîne Alpine est le résultat de la collision de deux marges continentales au Tertiaire. Les directions de transport sur les chevauchements crustaux qui affectent la marge Européenne ainsi que l'évolution du champ de contraintes dans l'avant-pays Alpin sont relativement bien étudiées ([1], [2]). Par contre la déformation alpine de la marge Apulienne (cinématique et champs de contraintes) est moins bien connue. A grande échelle, les schémas structuraux des Alpes méridionales ([3], [4]) montrent que les grands chevauchements, à vergence sud, sont presque parallèles aux accidents décrochants limitant au sud les zones internes des Alpes (F. Insubrienne, Judicarienne et du Gailtal) (*fig. 1*). Au niveau de la terminaison sud de la faille Judicarienne, on observe une virgation des structures et, dans la région du lac de Garde, les chevauchements sont nettement obliques à l'ensemble du front Sud Alpin (*fig. 2*).

Pour mieux comprendre la cinématique de ces accidents qui affectent la marge apulienne, nous avons réalisé une étude microtectonique le long d'une coupe NW-SE depuis la faille Judicarienne jusqu'à la plate-forme de Vérone. Cette coupe met en évidence une déformation croissante vers la faille Judicarienne (*fig. 3*). Nous résumons ici les premiers résultats concernant: (1) l'analyse des microstructures cassantes (failles, fentes, stylolithes) dans la zone tabulaire au nord de Vérone, (2) la géométrie et la cinématique des chevauchements parallèles à la faille Judicarienne. Ces observations ont été le plus souvent

réalisées dans les calcaires micritiques roses du faciès Scaglia Rossa (Crétacé sup. et Paléocène inf.), qui enregistrent bien les déformations cassantes ou plus pénétratives.

ANALYSE DES MICROSTRUCTURES CASSANTES. — 22 stations microtectoniques ont été étudiées, situées d'une part dans la zone tabulaire (couches horizontales, déformation faible), d'autre part à proximité de la faille inverse de l'Adige qui limite cette zone à l'Ouest (couches basculées et plissées, déformation plus complexe). Les tenseurs des contraintes compatibles avec les populations de failles ont été calculés par deux méthodes d'inversion différentes ([5], [6]) donnant des résultats cohérents. Cette analyse met en évidence trois générations de microstructures successives. Seules les deux premières semblent affecter l'ensemble de la région étudiée.

La première génération est caractérisée par des failles normales parallèles à des fentes verticales ou à des dykes basaltiques et associées à des stylolithes à pics verticaux. Cette distension semble être en partie synsédimentaire de la Scaglia Rossa et associée au volcanisme Éocène inférieur, mais la direction d'extension est mal définie.

Ces structures distensives sont recoupées par des failles inverses, des décrochements conjugués et des stylolithes à pics horizontaux. Les directions des pics stylolithiques, ainsi que les tenseurs de contraintes calculés indiquent que la contrainte principale majeure (σ_1) est presque horizontale ($\sigma_1 = \sigma_{hmax}$) et de direction moyenne N160 (de N145 à N180), en régime compressif décrochant ($\sigma_1 > \sigma_2 \geq \sigma_3$) (fig. 4 a).

La troisième génération de microstructures est localisée au voisinage de la faille de l'Adige. Dans ce secteur, deux familles superposées de stylolithes à pics horizontaux, ainsi que les failles associées, sont basculées avec les couches. Si l'on ramène la stratification à l'horizontale, la première famille de microstructures indique une direction moyenne N160 pour σ_1 (dispersion de N135 à N180), proche de celle observée dans la zone tabulaire (fig. 4 a). La dernière génération indique une direction moyenne N125 pour σ_1 (dispersion de N90 à N140), perpendiculaire à la faille de l'Adige et aux axes de plis observés (fig. 4 b).

CINÉMATIQUE DES CHEVAUchemENTS. — La coupe équilibrée de la figure 3 met en évidence une série de chevauchements, qui affectent la couverture sédimentaire à l'Ouest de la faille de l'Adige et absorbent un raccourcissement minimal de 12 km. Nous avons analysé en détail les microstructures associées au chevauchement majeur de Trémosine, situé sur la rive Ouest du lac de Garde, qui présente une géométrie en rampe/décollement avec un raccourcissement minimal de 4 km. Dans la région de Trémosine le contact est presque horizontal et fait reposer les dolomies triasiques sur la Scaglia Rossa qui sert de niveau de décollement (fig. 5 a). Dans l'unité inférieure, la déformation augmente quand on approche du niveau de décollement.

Dans les calcaires jurassiques, la déformation est caractérisée par des plis en genoux déversés vers le SE, les microstructures liées aux épisodes de déformation mis en évidence dans la plate-forme de Vérone sont basculées et plissées avec les couches.

Dans la Scaglia Rossa, juste sous le chevauchement, la déformation, beaucoup plus intense et pénétrative, est caractérisée par une schistosité (de fracture ou de dissolution), et des plis couchés déversés au SE, recoupés par de nombreux plans de cisaillements extensifs (fig. 5 b). Bien que des systèmes conjugués soient observés, la plupart de ces plans montrent un jeu en faille normale vers le SE. La direction d'extension maximale peut être déduite des stries portées par les plans de cisaillement; quand les stries n'étaient pas visibles, nous avons estimé cette direction en prenant la perpendiculaire à l'intersection

entre les plans de cisaillements et de schistosité (*fig. 5 b* et *c*). Les directions d'extension ainsi calculées dans huit stations différentes sont, en moyenne N135 (*fig. 6*).

Nous interprétons ces différentes structures comme le résultat d'un cisaillement progressif affectant le niveau de décollement lors de la mise en place de la nappe. Dans ce contexte, les plans de cisaillement peuvent être comparés aux structures extensives observées dans les grandes zones de cisaillement ductile (plans C' et boudinage) et sont donc des marqueurs de la direction et du sens du chevauchement. La direction d'extension N135 mesurée sous le chevauchement de Trémosine correspond à la direction de transport sur cet accident. Elle est compatible avec les axes de plis dans l'unité inférieure (*fig. 6*), et est parallèle à la direction de compression locale liée au fonctionnement de la faille de l'Adige.

DISCUSSION. — La datation des différentes structures, rendue difficile par le manque de sédiments récents, est basée sur les éléments suivants :

(1) Les microstructures les plus anciennes, distensives, sont pour partie synsédimentaires de la Scaglia Rossa, et probablement pour partie associées au volcanisme Éocène inférieur.

(2) Au NW de la région étudiée, des plis d'axe ENE-WSW, perpendiculaires à la direction de compression régionale dans la plate-forme de Vérone, sont recoupés par les intrusions de l'Adamello [7], datées de 29 à 42 M.a. [8].

(3) Les plis et les chevauchements de direction NNE-SSW (chevauchement de Trémosine, faille de l'Adige...) affectent des sédiments Oligocènes et sont recouverts en discordance par des sédiments Pliocènes [9].

(4) La faille Judicarienne correspond à une discontinuité crustale majeure dont l'histoire est complexe : il s'agit probablement, comme le chevauchement de Trémosine, d'une

EXPLICATIONS DES PLANCHES

Planche I

Fig. 1. — Situation de la zone étudiée (encadré) dans le cadre structural alpin.

Fig. 1. — *Structural setting of the area studied.*

Fig. 2. — Schéma structural de la zone étudiée. A-B coupe de la figure 3. *a* : direction moyenne de σ_1 de la compression régionale. *b* : direction moyenne de σ_1 de la compression locale le long de la faille de l'Adige. *c* : direction de transport sur le chevauchement de Trémosine. Les zones encadrées correspondent aux figures 4 et 6.

Fig. 2. — *Structural map of the lago di Garda area (after [3] modified).* *a*: average direction of σ_1 of regional compression. *b*: average direction of σ_1 of local compression along Adige fault. *c*: transport direction on Tremosine thrust. A-B: location of section of Figure 3. Boxed area correspond to Figures 4 and 6.

Fig. 3. — Coupe équilibrée interprétative entre la faille Judicarienne et la plate-forme de Vérone (le niveau de décollement correspond aux évaporites du Trias inférieur).

Fig. 3. — *Balanced section of thrusts and detachment zone, SE of the giudicarian fault (A-B in Figure 2).* The décollement zone occurs in the lower triassic evaporites.

Fig. 4. — Directions de σ_1 dans la plate-forme de Vérone. *a* : phase compressive régionale; *b* : phase compressive locale liée au fonctionnement de la faille de l'Adige. Le long de cette faille les directions sont indiquées après que la stratification ait été ramenée à l'horizontale.

Fig. 4. — *Directions of σ_1 in the tabular area north of Verona.* *a*: regional compression. *b*: local compression accounting for activation of the Adige fault. Along this fault the directions of σ_1 have been untilted as strata.

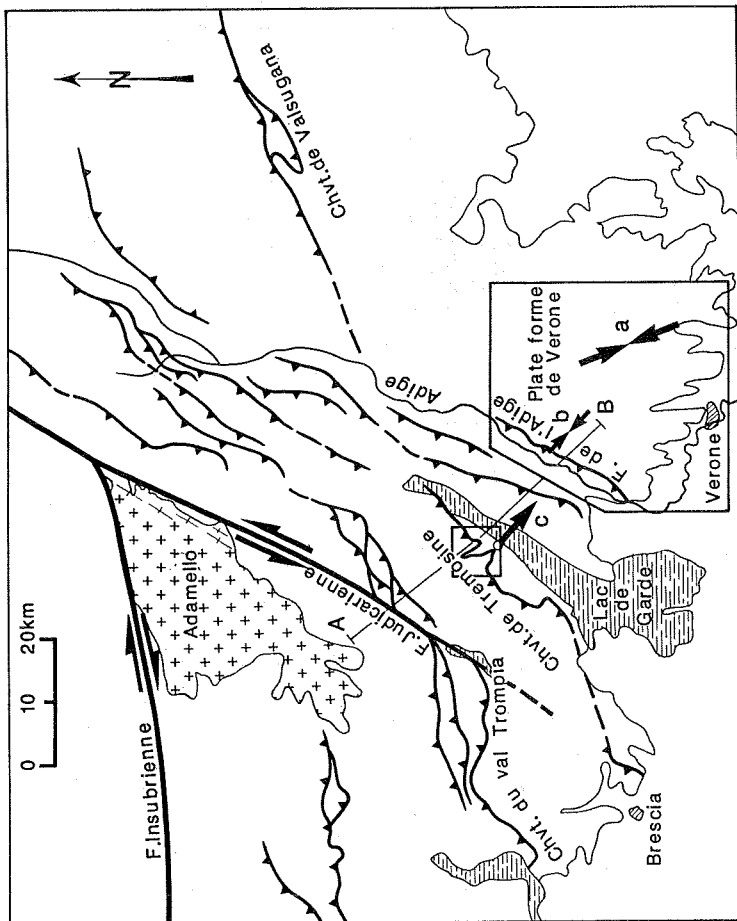
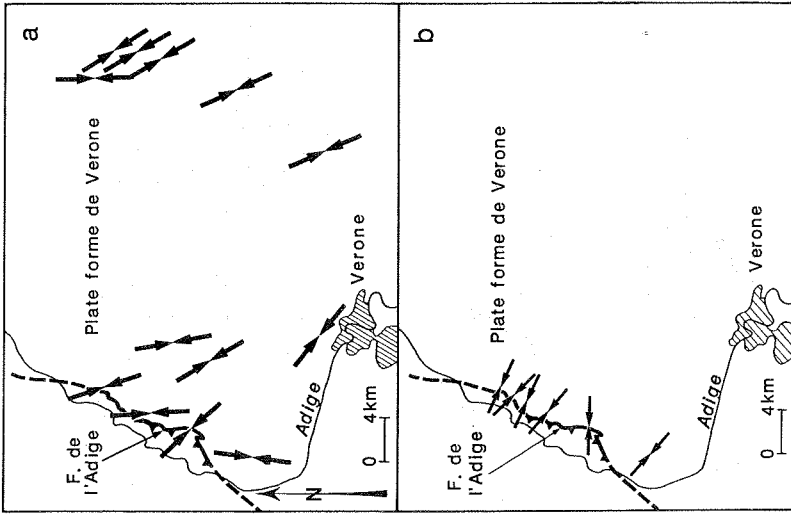


Fig. 2

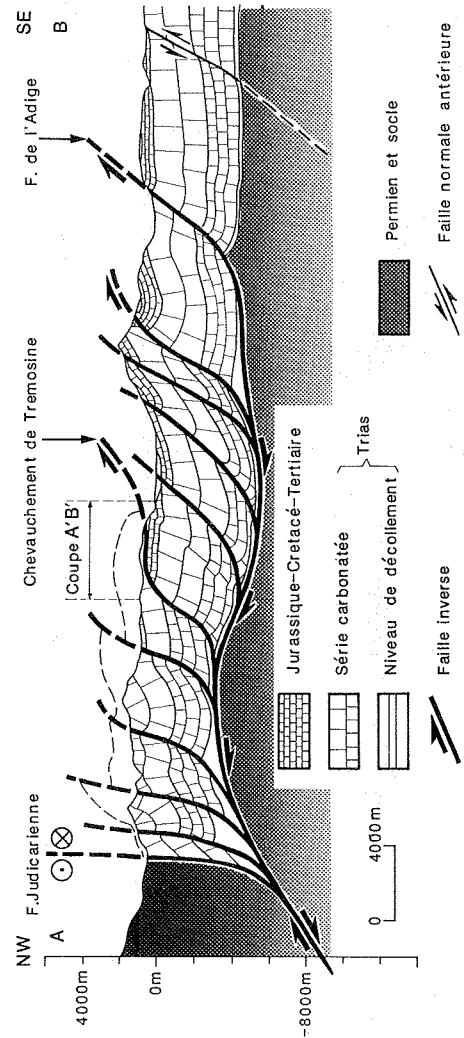


Fig. 3

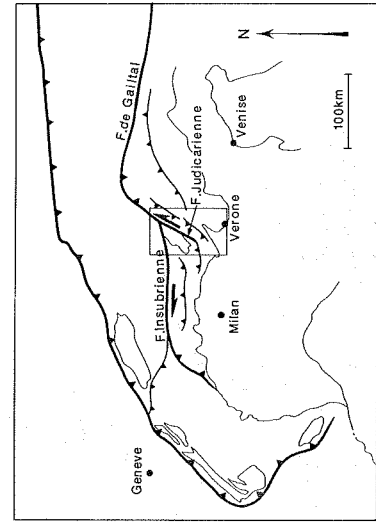


Fig. 4

Fig. 1

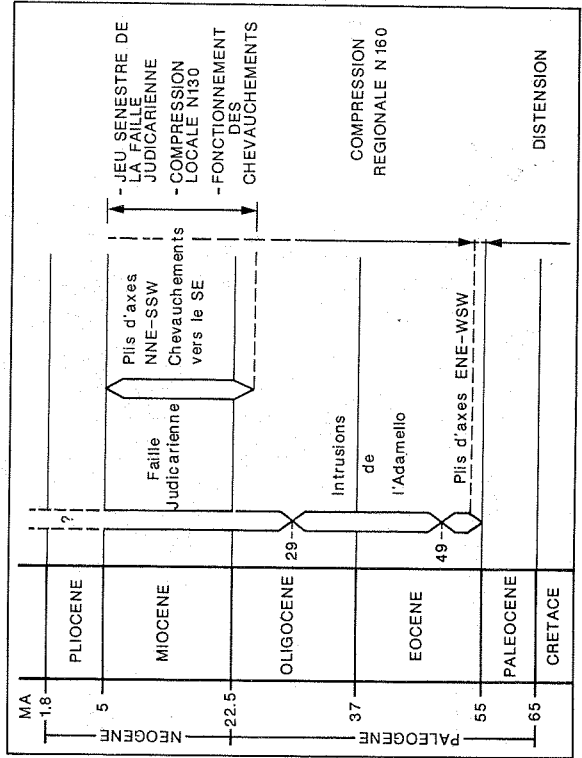
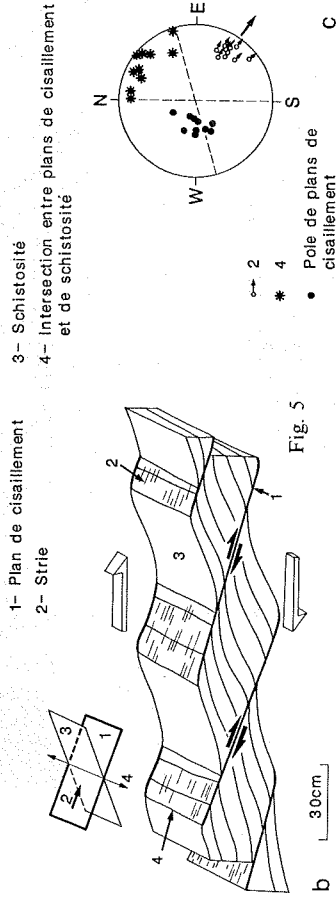
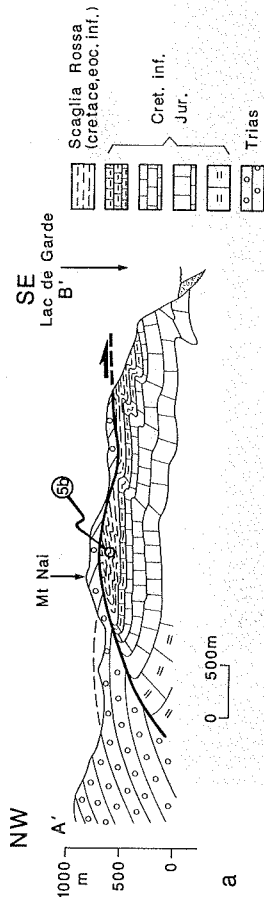
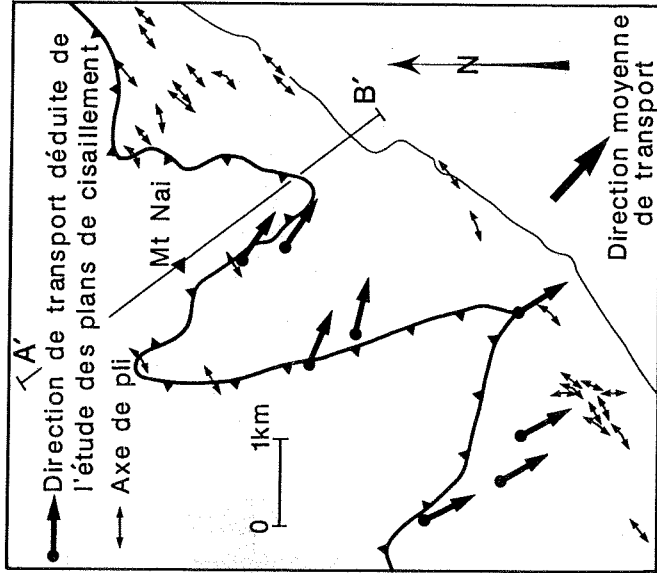


Fig. 6

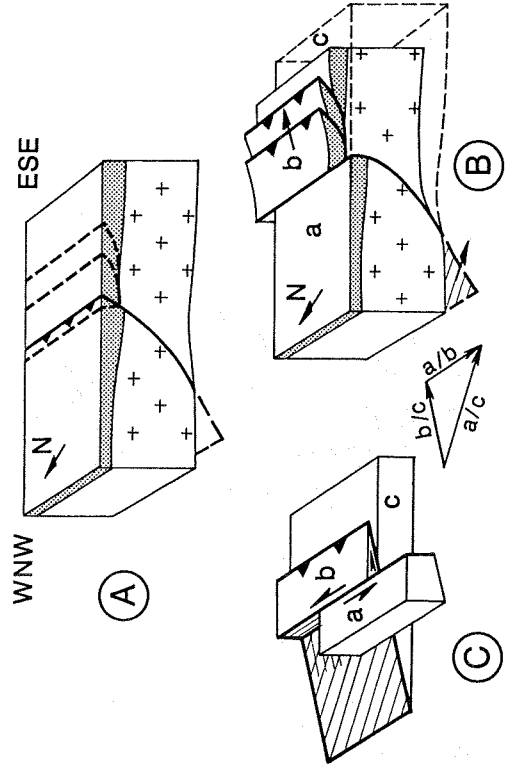


Fig. 8

Planche II

Fig. 5. — *a* : géométrie du chevauchement de Trémosine. *b* : déformation dans le niveau de décollement sous le chevauchement. *c* : projection sur canevas de Schmidt (hémisphère inf.) des différentes structures utilisées pour estimer la direction de transport.

Fig. 5. — *Geometry and kinematics of tremosine thrust. a* : section showing the ramp and flat geometry, respectively NW and SE of Mt Nai. *b* : geometry of extensive shear planes observed in the decollement zone. *c* : determination of the transport direction using shear plane geometry (Schmidt lower hemisphere); 1, shear plane; 2, slickenslides; 3, cleavage; 4, intersection between shear plane and cleavage; in diagram black dots represent the poles of shear planes.

Fig. 6. — Directions de transport sur le chevauchement de Trémosine.

Fig. 6. — *Kinematics of Tremosine thrust. Large arrows indicate the transport directions deduced from shear plane geometry; small double arrows are fold axes in footwall.*

Fig. 7. — Chronologie relative des différentes structures.

Fig. 7. — *Relative timing of tectonic events.*

Fig. 8. — Blocs diagrammes schématiques explicatifs du phénomène de bifurcation. A : état à l'Éocène. B : état post Miocène. C : géométrie des plans de failles et des vecteurs glissements relatifs entre les trois « blocs » *a*, *b* et *c* (le diagramme triangulaire représente la projection des vecteurs glissements relatifs sur le plan de faille entre *a* et *c*).

Fig. 8. — *Model showing the reactivation of a major crustal discontinuity during oblique convergence. A* : geometry before convergence. *B* : the NNW-SSE directed convergence results in oblique slip at depth which splits in two fault systems toward the surface, with respectively strike slip and thrust movement. *C* : rigid block kinematics of the fault bifurcation; the triangular velocity diagram represents relative displacement of the three blocks named *a*, *b* and *c* projected on the deep fault plane.

ancienne faille normale de la marge apulienne, active du Trias au Crétacé supérieur [10] et reprise lors de la collision alpine. Au Tertiaire, la faille Judicarienne semble avoir eu un jeu principalement décrochant sénestre, affectant par endroits, en les mylonitisant, les granitoïdes de l'Adamello. Ce mouvement est cinématiquement compatible avec l'existence de chevauchements E-W à sa terminaison SW (chevauchement de Val Trompia), ainsi qu'avec l'état de contrainte régional au Tertiaire. Plusieurs auteurs ont interprété cette faille verticale comme responsable du décalage sénestre de 60 km entre la faille Insu-brienne et la faille du Gailtal [11].

Ces différents arguments permettent de proposer l'histoire tectonique suivante, résumée figure 7 : distension jusqu'à l'Éocène inférieur, suivie par une compression régionale de direction N160, avec à l'Oligo-Miocène des perturbations locales liées aux chevauchements vers le SE et au jeu décrochant de la faille Judicarienne. La direction de compression régionale N160 est bien expliquée par la convergence à grande échelle entre l'Afrique et l'Europe de direction NNW-SSE à la fin de l'Éocène [2]. La faille Judicarienne et les chevauchements de même direction ont des vecteurs glissements perpendiculaires (fig. 2). Ces accidents ne peuvent être simplement activés par un même état de contrainte. Néanmoins, leur fonctionnement simultané peut être expliqué par un modèle cinématique de bifurcation [13] (fig. 8) : la compression régionale N160 provoque le rejeu d'une discontinuité majeure dans la croûte profonde (ancienne faille normale de direction NNE-SSW à pendage NW) en faille inverse sénestre. A la limite socle/couverture cette faille bifurque en un décrochement sénestre de direction N40 (faille Judicarienne) et une série d'accidents inverses de direction de transport N130 (par ex. chevauchement de Trémosine).

Remerciements. — Ce travail a été en partie financé par l'A.T.P. sismogénèse, plis et failles (C.N.R.S.-I.N.S.U.). Nous remercions Paul Tapponnier pour ses conseils et Guy Aveline pour la mise au propre des figures. Contribution I.P.G.P. n° 1014.

Note reçue le 5 mai 1988, acceptée le 28 juin 1988.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] J. MALAVIEILLE et coll., Signification tectonique des linéations d'allongement dans les Alpes occidentales, *Bull. Soc. Geol. France*, 26, n° 5, 1984, p. 895-906.
- [2] F. BERGERAT, Stress fields in the European platform at the time of Africa-Eurasia collision, *Tectonics*, 6, n° 2, April 1987, p. 99-132.
- [3] A. BONI, La ligne Judicarienne et la limite NW de l'Apennin septentrional, *Geol. Rundschau*, 53, 1963, p. 84-100.
- [4] A. CASTELLARIN et G. B. VAI, Introduzione alla geologia strutturale del sudalpino, in *Guida alla geologia del sudalpino centro-orientale*, A. CASTELLARIN et G. B. VAI éd., Soc. Geol. Ital., 1982, p. 1-22.
- [5] R. ARMJO et coll., The inverse problem in microtectonics and the separation of tectonic phases, *Tectonophysics*, 82, 1982, p. 145-160.
- [6] A. ETCHECOPAR et coll., An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis, *J. struct. Geol.*, 3, n° 1, 1981, p. 51-65.
- [7] P. BRACK, Structures in the southwestern border of the Adamello Intrusion (Alpi Bresciane, Italy), *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.*, 61, 1981, p. 37-50.
- [8] BORIANI et coll., Radiometric geochronology of central Alps, *Rend. Soc. It. Min. Petr.*, 40, 1985, p. 139-186.
- [9] J. P. CADET, Étude géologique de la rive occidentale du lac de Garde de bogliaco a Salo et des régions situées à l'Est de Brescia (Alpes méridionales, province de Brescia, Italie), *Bull. Soc. Geol. Fr.*, (7), 7, 1965, p. 160-167.
- [10] E. L. WINTERER et A. BOSELLINI, Subsidence and sedimentation on jurassic passive continental margin, southern alps, Italy, *Bull. Am. Ass. Petrol. Geol.*, 65, n° 3, 1981.
- [11] H. P. LAUBSCHER, Alpen und plattentektonik das problem der bewegungsdiffusion und kompressiven Plattengrenzen, *Z. Deutsch. geol. Ges.*, 124, 1973, p. 295-308.
- [12] OLIVET et coll., Cinématique de l'Atlantique nord et central, *Pub. du CNEOX*, n° 54, 1984.
- [13] R. ARMJO et coll., Quaternary extension in southern Tibet: field observations and tectonic implications, *J.G.R.*, 91, B14, 1986 et TAPPONNIER et coll., en préparation.

Laboratoire de Tectonique et de Mécanique de la Lithosphère,
I.P.G.P., 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05.