

Tectonique/*Tectonics*
(Sismologie/*Seismology*)

Premiers résultats de la traversée des Alpes occidentales par sismique réflexion verticale (Programme ECORS-CROP)

Roger BAYER, Michel CAZES, Giorgio Vittorio DAL PIAZ, Bernard DAMOTTE, Gulio ELTER, Guido GOSSO, Alfred HIRN, Roberto LANZA, Bruno LOMBARDO, Jean-Louis MUGNIER, Adolphe NICOLAS, Rinaldo NICOLICH, Riccardo POLINO, François ROURE, Rosalino SACCHI, Salvatore SCARASCIA, Ignazio TABACCO, Paul TAPPONNIER, Marc TARDY, Matthew TAYLOR, François THOUVENOT, Gérard TORREILLES et Alain VILLIEN

Résumé — Les premiers résultats de la traversée des Alpes occidentales par sismique réflexion verticale sont présentés à l'aide d'une coupe temps pointée. Les réflecteurs présentent un pendage dans la coupe temps d'environ 20° Est, soulignant l'existence de chevauchements lithosphériques majeurs issus de la collision récente et constituant un prisme d'accrétion crustal. La transparence des sutures internes et des zones de Sesia et d'Ivrée suggèrent la présence de structures redressées jusqu'à une douzaine de kilomètres.

First results of a deep seismic profile through the western Alps (ECORS-CROP Program)

Abstract — A line-drawing summarizes the first results of a deep seismic profile through the western Alps. The main reflectors display an apparent 20° East dip, underlying major lithospheric thrusts produced by the recent collision and typical of a crustal accretion prism. The internal suture zones and the Sesia and Ivrea Units are transparent to 10-14 km, suggesting the presence of steep structures to that depth.

Abridged English version — The seismic profile described here is part of a transect 350 km long, extending from Tournus close to the Massif Central border to Monferrato (*Pl. Ia*). It crosses the Bresse graben, the Jura and Alps belts, and ends in the subsiding Po Plain. The profile section described here is the Alpine part extending from the Massif des Bornes to Monferrato; it is 240 km long and only a 10 km section across the French-Italian border remains to be completed in 1987, together with the Jura-Bresse profile.

FIELD LAY-OUT AND PROCESSING. — Multiple coverage vertical reflection profiling adapted from the industrial prospecting method in sedimentary basins has been developed as a tool for crustal investigations following the COCORP programme in the US. Through the Alps, explosives would have been preferred, but logistics prevented us from finding sufficiently uniform places suitable for use and vibrators had to be employed. A compromise was found between field and processing center efforts which would enable acquiring a data set from which subsequent penetration to exceptionally large depths could be retrieved. Eight very long sweeps, lasting 50 sec. each, were stacked in the field as a 64 sec. record per vibration point. Processing to 26 s TWT with a 9-32 HZ signal may later be extended as deep as 40 s TWT with 9-23 Hz. The same technique has been used on both the French and the Italian halves of the line. Technical parameters are summarized in the table (table des données techniques, sismique réflexion verticale). A limited number of shots of explosive charges were fired into the spreads. In Italy this resulted in a 1 to 3 fold coverage. In order to achieve a single coverage of the 60 km beginning just West of the border with offsets up to 30 km, three different shotpoints at 30 km intervals were used but with charges up to 225 kg. A preliminary operation of wide-angle seismic

Note présentée par Jean AUBOUIN.

refraction was completed in 1985, using 70 parameters and 5 charges of 1,000 kg. The reflectors from this experiment have also been reported on the line drawing (barbed lines in Plate I *b*). They are ascribed to Moho reflections but their precise location in the line drawing section cannot be ascertained because of the increasing lateral distance of these reflectors with respect to the plane of the section under consideration.

DISCUSSION. — The line drawing has led to two provisional structural interpretations (Pl. II *a* and *b*). They have common features pointing to seemingly reliable results, as well as divergences, i. e. unconstrained or still poorly constrained features. We note from West to East:

— Below the cover nappes of the Bornes massif, a transparent zone exists, passing beyond 7 sec. into a zone of parallel and closely spaced reflectors ascribed by reference to other ECORS traverses [2] to a layered lower crust. The transition to mantle would occur at 11-12 sec. The crustal unit, horizontal to the West, gently dips Eastward below Belledonne before disappearing. The general structure evokes a crustal (Pl. II *b*) or lithospheric (Pl. II *a*) thrust.

— The Penninic Front (FP) is marked by two strong reflectors with a 25° E apparent dip. They could emerge around 6 sec. into a mantle thrust overlying a layered crust.

— Easterly, some West dipping reflectors below the Vanoise could represent some back thrusting or the western flank of a large dome culminating in the Grand Paradis (GP). Possible mantle reflectors at 6-8 sec. below a layered crust are ascribed to a major lithospheric thrust.

— East of GP, a remarkably transparent zone to 8 sec. coincides with the Sesia and Ivrea units and with two suture zones of Viù-locana (the eastern border of ophiolites and thus of the Piedmont ocean) and of the Insubric Line (the eastern border of high pressure metamorphism and thus of alpine subduction). Steep structures characterizing these domains may explain the seismic transparency.

— Finally, below the Po Plain all structures dip eastward. West dipping inverse faults are observed in the sedimentary cover with a 30° dip on the time section which should be reduced due to its low seismic velocity. The results of the wide-angle operation point to Moho reflectors having a 20° E dip below a crust around 30 km thick.

Thus the preliminary results of the ECORS-CROP seismic profile indicate the existence of a crustal accretion prism below the Western Alps. Two (Pl. II *b*) or three (Pl. II *a*) lithospheric thrusts may be interpretatively envisaged. Incoming new data should make it possible to improve this initial image.

INTRODUCTION. — Après avoir réalisé dans les Pyrénées le premier profil en région montagneuse, le programme ECORS s'est associé au programme CROP (Italie) pour effectuer un profil sismique à travers les Alpes occidentales. C'est dans cette chaîne prestigieuse, longuement parcourue et décrite par les géologues que sont nés plusieurs des concepts majeurs des Sciences de la Terre. C'est aussi un ensemble géologique complet, si l'on ne restreint pas le système alpin occidental à la chaîne proprement dite et si l'on inclut les régions périphériques engagées dans son élaboration et affectées par ses effets, comme le graben bressan et le Jura.

Après une étude préliminaire du profil, une opération franco-italienne de sismique réflexion grand angle a été menée en 1985. Des opérations d'accompagnement (gravimétrie, levés géologiques de terrain) ont été réalisées en 1986 ou sont en cours.

TRACE DU PROFIL. — Le profil choisi s'étend de la bordure du Massif Central près de Tournus au Montferrat dans la plaine du Pô (pl. 1). Achievé, il totalisera presque 350 km. Le tronçon transalpin du Massif des Bornes au Montferrat long de 240 km a été réalisé

en 1986 à l'exception d'un segment frontalier d'environ 10 km, programmé pour l'été 1987.

Parmi les différents profils envisagés [1], on a retenu celui de la planche I car il recoupe une zone de collision continentale frontale aux structures franches et relativement cylindriques. Par ailleurs il offre la possibilité d'étudier l'ensemble d'une chaîne depuis les accidents distensifs liés au fonctionnement d'une marge passive, parfois conservés dans les domaines externes, jusqu'aux structures de la collision. Il traverse enfin dans la zone d'Ivrée une croûte continentale inférieure et le manteau sous-jacent. Il s'agit là d'un ensemble unique et fascinant, dont l'étude semblait adaptée à la technique mise en œuvre.

On discute ci-dessous de l'interprétation préliminaire du tronçon alpin *sensu stricto* allant du Petit Bornand jusqu'à Lamporo (Plaine du Pô) en Italie, en passant par les hautes vallées de l'Isère et de l'Orco.

DONNÉES TECHNIQUES SUR LE PROFIL. — La méthode de sismique réflexion verticale en couverture multiple utilisée pour la prospection industrielle des bassins sédimentaires a été adaptée à l'exploration de la croûte continentale par le programme COCORP aux États-Unis. L'utilisation de sources explosives aurait été souhaitable pour le profil transalpin mais des raisons logistiques ont amené à utiliser comme source un groupe de cinq vibrateurs lourds. Afin de conserver la possibilité d'étude des zones très profondes tout en ménageant l'effort financier, des vibrations de très longue durée, 50 s, ont été effectuées. Dans un premier temps le traitement est fait jusqu'à 25 s temps double mais ultérieurement il pourra être prolongé en profondeur avec un spectre plus étroit de signal. Les paramètres de la mise en œuvre, similaires en France et en Italie sont résumés par une table.

De plus, un nombre limité de tirs à l'explosif a été enregistré par les dispositifs réflexion. En Italie ceci aboutit à une couverture quasi verticale variable de 1 à 3 suivant les endroits, avec des charges de 30 à 100 kg. A l'Ouest trois points de tir espacés de 30 km ont été utilisés, les charges atteignant 225 kg, pour réaliser une couverture simple du tronçon de 60 km commençant à Val d'Isère, avec des distances tir-capteur atteignant 30 km.

Une opération préliminaire de sismique refraction grand angle a été réalisée en 1985 à l'aide de 70 sismographes autonomes et de 5 tirs de 1 t. Le déport des horizons réflecteurs étant parfois important par rapport au profil sismique considéré et la cylindricité des structures imparfaite, leur positionnement dans ce profil est incertain.

Table des données techniques, sismique réflexion verticale

- Source: 5 vibrateurs lourds (Mertz M 22 ou Prakla WCAE).
- Enregistrement: SN 348, 120 traces.
- Pas d'échantillonnage: 4 ms.
- Intervalles entre groupes de géophones: 80 m.
- Dispositif asymétrique: traces 1 à 30, point de vibration, traces 31 à 120, fenêtre de 560 m entre les traces 30 et 31.
- Couverture: un point de vibration tous les 80 m, sommation de 8 vibrations unitaires par point, couverture d'ordre 60.
- Durée de la vibration: 50 s, gamme de fréquences, 9-39, 10-40 ou 12-42 Hz.
- Durée d'enregistrement: 50 + 14 s.

Réalisation Compagnie Générale de Géophysique (Massy, France) et O.G.S. (Trieste, Italie).

INTERPRÉTATIONS. — Les résultats de la sismique réflexion verticale sont présentés sur la planche I sous la forme d'une coupe temps (pointé provisoire). On a reporté sur la même figure la position des réflecteurs reconnus par la sismique réflexion grand angle de 1985 qui semblent pouvoir être attribués au Moho, en dépit des problèmes de déport mentionnés plus haut. Il est évidemment prématuré de chercher à interpréter définitivement ce pointé, mais certains traits méritent d'être signalés dès maintenant car ils contraindront tout modèle futur de la chaîne. Notons les, d'Ouest en Est.

A l'Ouest du front pennique (FP), la structure de la zone alpine externe apparaît clairement. A la base de la couverture sédimentaire des Bornes, on reconnaît la croûte de l'avant-pays européen sous son aspect sismique précédemment révélé par le profil ECORS du Nord de la France [2]: partie supérieure transparente épaisse de 7 s et partie inférieure litée (nombreux réflecteurs parallèles (*pl. 3 a*), épaisse ici d'environ 4 s. A la

EXPLICATIONS DES PLANCHES

Planche I

- a.* Localisation du profil ECORS-CROP sur un schéma simplifié des Alpes occidentales. *Domaine périalpin*: 1. Sédiments tardi- à post-orogéniques; 2. Séries Mésozoïques du Jura; 3. Socle Pré-Mésozoïque. *Zone externe*: 4. Couvertures Mésozoïques et Tertiaires; 5. Massif cristallins externes. *Zone pennique*: 6. Zone valaisanne; 7. Klippes préalpines; 8. Zone briançonnaise et Massifs cristallins internes. *Zone piémontaise*: 9. Schistes lustrés et ophiolites. *Domaine austroalpin*: 10. Sesia-Dent Blanche. *Domaine sudalpin*: 11. Zone d'Ivrée et unités sudalpines indifférenciées; 12. Sédiments post-orogéniques de la Colline de Turin et du Montferrat. *F. P.*: Front pennique; *L. I.*: Ligne insubrienne et du Canavese.
- b.* Coupe temps (pointé provisoire) du profil Alpes sensu-stricto. Les traits barbelés correspondent aux réflecteurs mis en évidence par la sismique grand angle.
- a.* Location of the ECORS-CROP traverse in Western Alps. Perialpine realm: 1. Late and post orogenic sediments; 2. Jura Mesozoic cover; 3. Pre-Mesozoic basement. External zones: 4. Mesozoic and Cenozoic cover; 5. External Crystalline Massifs. Penninic zone: 6. Valaisan zone; 7. Prealpine klippen; 8. Briançonnais and Internal Crystalline Massifs zone. Piedmont zone: 9. Schistes lustrés and ophiolites. Austroalpine realm: 10. Sesia-Dent Blanche. Sudalpine realm: 11. Ivrea zone and undifferentiated sudalpine units; 12. Turin Hills and Monferrato post orogenic cover. *F. P.*: Penninic Front; *L. I.*: Insubric Line.
- b.* Provisional line drawing of the Profil-Alpes traverse. Barbed lines: reflectors of the 1985 wide angle seismic operation.

Planche II

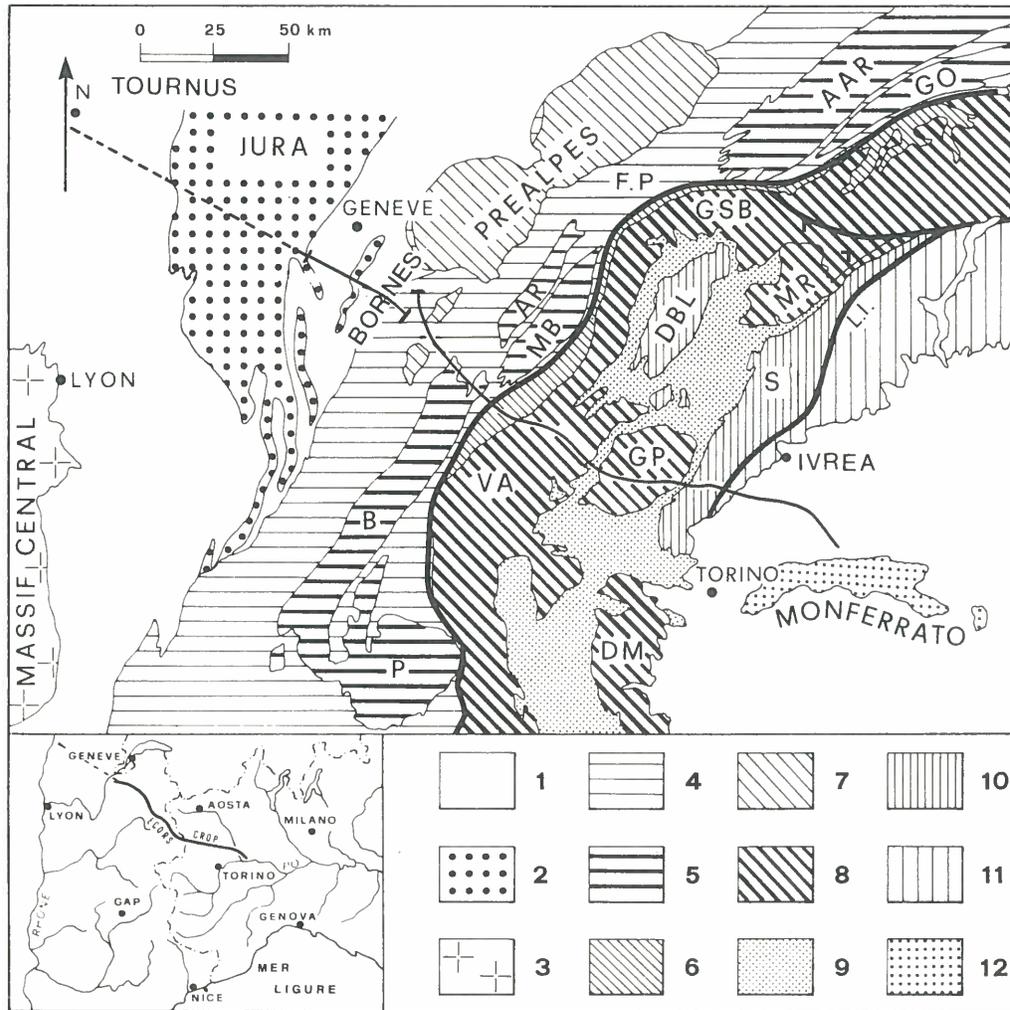
Deux interprétations structurales compatibles avec les données sismiques de la planche I. Les traits gras correspondent aux réflecteurs considérés comme significatifs et les traits minces, à des structures plus hypothétiques. *a.* Profil impliquant un chevauchement lithosphérique majeur sous le F.P. *b.* Profil impliquant une extension de la croûte sous les nappes penniques. Hachuré oblique: Manteau; Tiretés: Croûte inférieure litée; Croix: croûte supérieure.

Two structural interpretations of the Plate I line drawing. Thick lines: reflectors considered as being significant; thin lines: interpreted structures. *a.* Interpretation of a major lithospheric thrust beneath the *F. P.* *b.* Interpretation of an european crust extending beneath the penninic nappes. Oblique hatches: mantle; dashes: lower crust; crosses: upper crust.

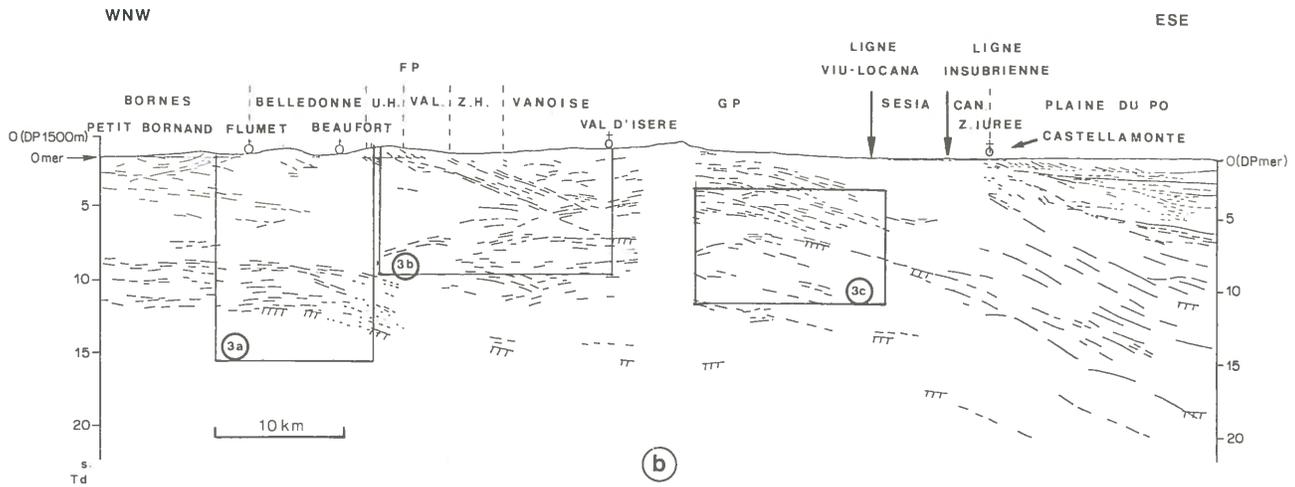
Planche III

Sections de vibrosismique localisées par des cartouches sur la planche I *b.* *a.* Croûte inférieure litée sous les Massifs Cristallins externes. *b.* Réflecteurs attribués au front pennique. *c.* Réflecteurs bien lités dans la zone du Grand Paradis attribués, dans la partie supérieure aux unités penniques, et dans la partie inférieure à une écaille de manteau ou de croûte inférieure.

Selected vibroseis sections (location in Plate I *b.*) *a.* Layered lower crust beneath the External Crystalline Massifs. *b.* Strong reflectors ascribed to *F. P.* *c.* Layered structure of the Grand Paradis, attributed to the penninic units overlying a lower crust or mantle section.

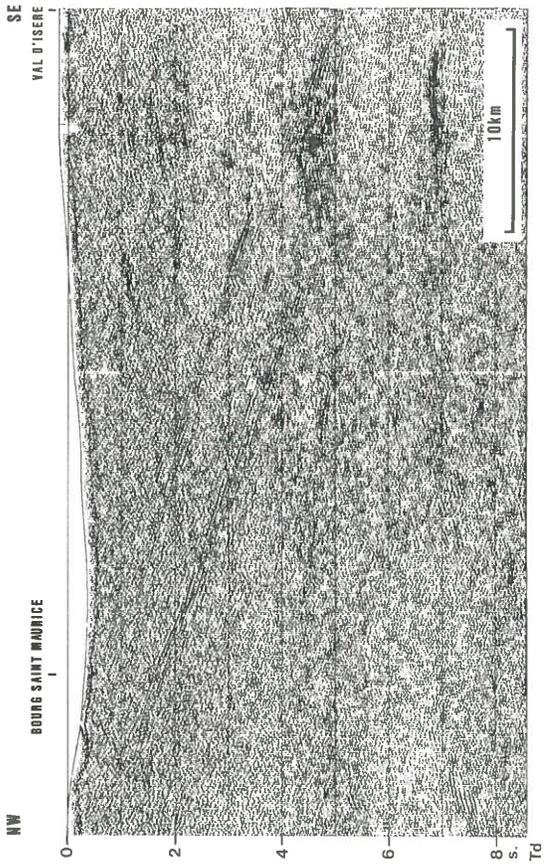


(a)

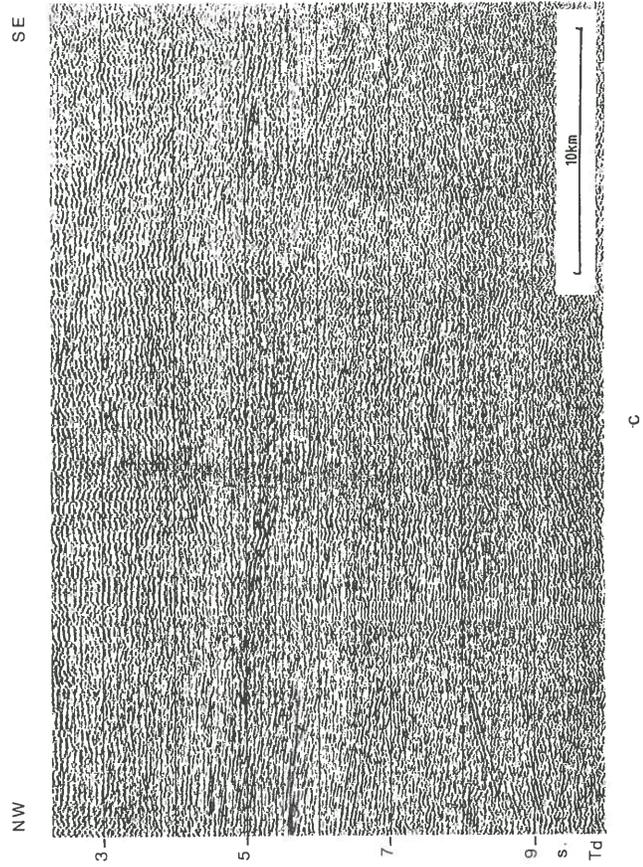


(b)

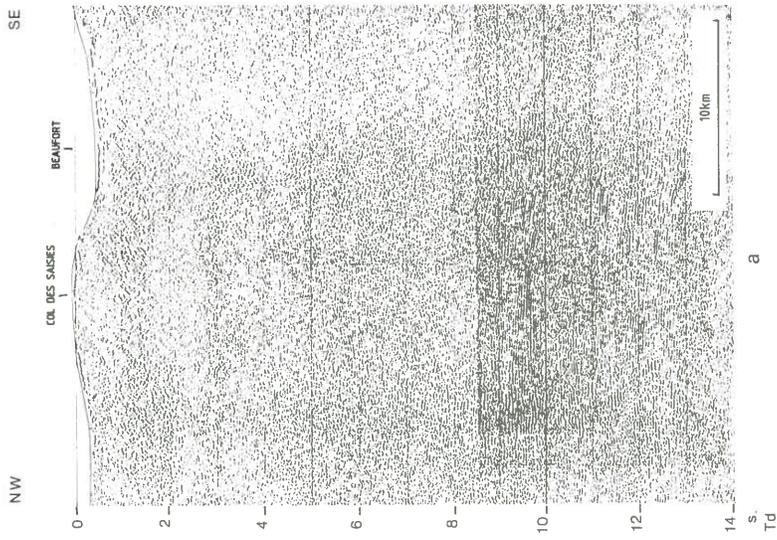




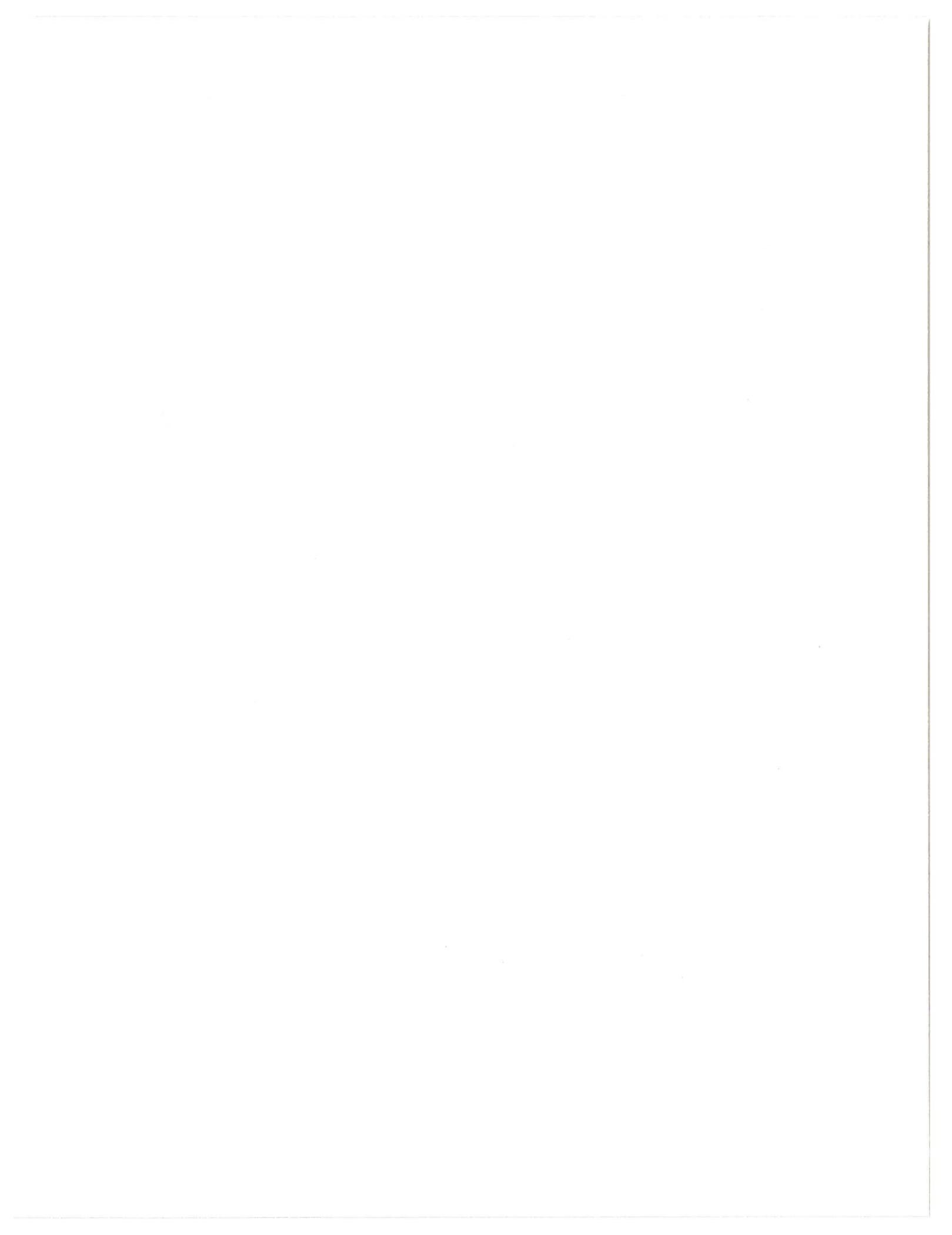
b



c



a



base de la croûte les réflecteurs disparaissent, précisément là où le Moho avait été localisée par la sismique réflexion grand angle. Quasiment horizontale en limite NO du profil, cette croûte, tout en gardant la même épaisseur, accuse ensuite un pendage progressif vers l'Est, d'abord très léger entre le front et la partie médiane de Belledonne, plus marqué ensuite sous sa partie interne avant que ses marqueurs sismiques ne disparaissent à l'aplomb du F. P. Cette flexion se produit sous le chevauchement crustal de Belledonne souligné par un réflecteur à faible pendage Est (2 à 4 s de profondeur) que l'on suit sur 20 km jusqu'à la verticale de Beaufort et dont l'émergence Ouest est masquée par les assises sédimentaires décollées des Bornes.

Le front pennique coïncide avec l'émergence d'une zone de réflecteurs très nets à pendage apparent de 20° E (*pl. III b*) qui en recoupe d'autres à pendage Ouest avant de s'amortir ou de se greffer vers 6 s sur une écaïlle possible du manteau. Au-delà de 6 s, les réflecteurs nombreux et réguliers évoquent une croûte inférieure litée. Sa base étant à 8-9 s, la remontée correspondante du Moho inviterait à envisager un chevauchement lithosphérique vers l'Ouest avec un coin de manteau supérieur dans la zone transparente à 10 s sous les massifs cristallins externes (*pl. II a*). Cette interprétation ignore les réflecteurs de la sismique réflexion grand angle plus profonds que 10 s et on peut proposer d'autres alternatives (par exemple *pl. II b*).

Vers l'Est, les réflecteurs sont plus désordonnés et l'interprétation est actuellement peu contrôlée. Les réflecteurs à pendage Ouest de la Vanoise-Val d'Isère peuvent résulter du rétrochevauchement tardi-alpin ou de la voussure de la partie axiale de l'édifice bien visible au dessus d'une croûte de nouveau litée (*pl. III c*). Une écaïlle de manteau ou un duplex de croûte inférieure semble apparaître sous cette croûte litée (*pl. II*).

En Italie, les deux sutures majeures des zones internes, la zone de Sesia qui les sépare et le sommet de la zone d'Ivrée sont transparentes jusqu'à 5 s, probablement en raison de leurs structures verticales. La suture de Viù-Locana, où s'enfilent les ophiolites correspondant à la cicatrice laissée par la résorption du bassin piémontais, est limitée vers l'Ouest par la terminaison des réflecteurs attribués au Grand Paradis. La suture de la zone du Canavese-Ligne insubrienne séparant les unités subductées à métamorphisme haute pression à l'Ouest des domaines non métamorphiques à l'Est n'est pas identifiable.

Sous la plaine du Pô, la zone d'Ivrée s'enfouit sous les dépôts Cénozoïques affectés de failles inverses à pendage Ouest et se raccorde ainsi à la croûte apulienne. A l'extrémité SE du profil, la base des formations sédimentaires se situe à 6-7 s (environ 10 km). Les pendages apparents supérieurs à 30° doivent être réduits compte tenu de la faible vitesse sismique dans les sédiments.

Le Moho sous la plaine du Pô est identifié par un réflecteur net dans les profils grand angle de 1985. Ce réflecteur plonge vers l'Est de 25 km sous Castellamonte à plus de 35 km sous Vercelli, soit avec un pendage de 20° environ. L'épaisseur de la croûte apulienne sous les sédiments est donc de l'ordre de 30 km.

CONCLUSION. — La coupe temps, obtenue à partir des premiers résultats de la sismique réflexion verticale réalisée par l'opération ECORS-CROP au travers des Alpes occidentales, permet de proposer quelques traits structuraux à l'échelle lithosphérique. La coïncidence de certains tracés sur les deux coupes de la planche II montre où l'interprétation des données sismiques semble relativement solide et au contraire la divergence d'autres tracés, où se situent les principales zones d'incertitude. Pour aller plus loin, il convient d'attendre l'ensemble optimisé des données de sismique et l'intégration des résultats de

la gravimétrie et de la structure (coupes équilibrées). Néanmoins, il apparaît déjà clairement que la chaîne alpine comporte deux ou trois chevauchements lithosphériques majeurs à vergence Ouest (l'un émergeant à l'Ouest des massifs cristallins externes, le second au front pennique, le troisième, le long de la ligne insubrienne). Ces écaillles lithosphériques ont construit un prisme d'accrétion crustal à l'origine de la chaîne actuelle. Enfin, l'analyse de ces premiers résultats souligne l'importance des données de la sismique grand angle venant en complément de la sismique verticale pour contraindre les modèles. Il paraît essentiel de pouvoir disposer de données nouvelles centrées sur les zones-clés du profil.

La direction et la coordination des recherches ont été effectuées par le Comité de Coordination composé de Guy Aubert, Marcello Bernabini, Christian Bois, Sergio Lorenzoni, Carlo Morelli et Claude Sallé qui ont aussi collaboré à l'interprétation des résultats. Les données ont été acquises grâce aux programmes ECORS (I.N.S.U., I.F.P., Elf-Aquitaine) et CROP-CNR, et aux Compagnies B.P. et Eurafrep.

A. Hirn, A. Nicolas, R. Nicolich et R. Polino, responsables de l'équipe de profil.

Note reçue le 21 septembre 1987, acceptée le 7 octobre 1987.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Équipe de Profil Alpes ECORS-CROP, Rapport *Inst. Fr. Pétrole*, 1986, 73 p. et Rapport C.N.R., Rome, 100 p.

[2] M. CAZES, G. TORREILLES, C. BOIS, B. DAMOTTE, A. GALDEANO, A. HIRN, A. MASCLE, P. MATTE, PHAM VAN NGOC et J. F. RAOULT, *Bull. Soc. Géol. France*, 1985, p. 925-941.

- R. B. et A. N.: *U.S.T.L., place Eugène-Bataillon, 34060 Montpellier*;
 A. B.: *Istituto Geofisica Mineraria, Via Eudossiana, Roma, Italia*;
 C. B., B. D., F. R. et C. S.: *I.F.P., B.P. n° 311, 92506 Rueil-Malmaison*;
 M. C., G. T. et A. V.: *S.N.E.A.P., Tour Gén., 92088 Paris Défense*;
 G. V. D. P.: *Istituto di Geologia, Via Gotto 1, Padova, Italia*;
 R. L. et R. S.: *C.N.R. et Dipartimento di Scienze della Terra, Via Accademia delle Scienze 5, 10123 Torino, Italia*;
 G. E., B. L. et R. P.: *C.N.R.-C.S. orogeno Alpi occidentali, Via Accademia delle Scienze 5, 10123 Torino, Italia*;
 G. G.: *Istituto di Geologia, C. so Tukory 131, 90143 Palermo, Italia*;
 A. H. et P. T.: *I.P.G., Place Jussieu, 75230 Paris*;
 C. M. et R. N.: *Istituto di Miniere e Geofisica Applicata, Via Valerio 10, 34127 Trieste, Italia*;
 J. L. M. et F. T.: *Université de Grenoble, rue M.-Gignoux, 38031 Grenoble*;
 S. S.: *C.N.R., Istituto Geofisica della Litosfera, Via Bassini 15, Milano, Italia*;
 E. T.: *Dipartimento di Scienze della Terra, Via Cicognara 7, 20129 Milano, Italia*;
 M. T.: *Université de Savoie, B.P. n° 1104, 73011 Chambéry*;
 M. T.: *Soc. Fr. Pétroles, B.P. n° 10, quai P.-Donmes, 92412 Courbevoie*.