

Le séisme du Grand-Bornand (Haute-Savoie) du 14 décembre 1994 : un coulissage dextre dans le socle subalpin

Julien Fréchet, François Thouvenot, Liliane Jenatton, Pho Hoang-Trong et Michel Frogneux

C.R. Acad. Sci. Paris,
t. 323, série II a,
p. 517 à 524,
1996

Résumé Le séisme étudié ici est le plus important qui se soit produit dans le SE de la France dans les 30 dernières années. L'installation d'un réseau mobile, pendant les 10 jours qui ont suivi la secousse principale, a permis l'étude des répliques, anormalement très peu nombreuses et de très faible magnitude. Le plan de faille retenu est orienté N40° ; il est subvertical, avec un coulissage dextre et une petite composante de chevauchement. Cette faille serait associée aux failles tardi-hercyniennes cévenoles qui hachent le socle subalpin des Cévennes aux Préalpes.

Mots-clés : Alpes, Savoie, Sismicité, Socle, Coulissage.

J. F., F. T. et L. J. :
LGIT, Observatoire de Grenoble,
BP n° 53, 38041 Grenoble CEDEX 9,
France ;

P. H.-T. et M. F. :
EOPGS, 5, rue René-Descartes,
67084 Strasbourg, France.

Abstract The December 14, 1994 Grand-Bornand (French Alps) earthquake: a right-lateral strike-slip in the subalpine basement

This earthquake is the most significant event in South-East France for the last 30 years. The aftershock activity, recorded by a mobile network for 10 days after the main shock, was abnormally low. The fault plane is near vertical and strikes N40°, with right-lateral strike-slip and small thrust component. This fault could be one of the Late-Variscan faults that slice the subalpine basement from the Cévennes (south-eastern Massif Central) to the Pre-Alps.

Keywords: Alps, Savoy, Seismicity, Basement, Strike-slip.

Abridged English Version

THE seismicity of the western Alps is usually moderate, even if events of very low magnitudes are observed daily. However, felt earthquakes are not uncommon: in the northern French Alps (fig. 1), five earthquakes have reached or exceeded intensity VII since the beginning of this century (Rothé, 1941 and 1972; Vogt, 1979). The magnitude-5.1 earthquake that occurred close to Le-Grand-Bornand (France) on December 14, 1994 is the highest-magnitude event since the Corrençon earthquake (Isère) which reached magnitude 5.3 on April 25, 1962 ($I_0 = \text{VIII-IX}$). More than the very-low-magnitude shocks usually recorded, such events better reflect the regional stress field and throw light on the present kinematics of the Alpine arc.

The Grand-Bornand earthquake was felt over a wide area in the northern French Alps (fig. 2). Intensity VI-VII was reached in the epicentral area (chimney falls, cracked walls, rock slides). It was also felt with intensity IV in Grenoble, 100 km away. Isoseismal curves are stretched in a NE-SW direction, with an elongation towards the SW. The instrumental epicentre is located to the NE of the maximum intensity area.

The main shock and a magnitude-2.8 aftershock that occurred 47 minutes later were both recorded by the French, Italian and Swiss seismic networks, which provided good-quality digital signals in more than one hundred stations. This allowed an accurate determination of the epicentre in the

Note

présentée par
Paul Tapponnier.

remise le 13 novembre 1995,
acceptée après révision
le 10 juin 1996.

Fig. 1 Sismicité du Nord des Alpes françaises. En noir, séismes historiques de magnitude supérieure ou égale à 4,5 (dans les quatre derniers siècles) ; en blanc, séismes localisés par Sismalp de 1989 à 1994. Encadré : cadre des figures 3 et 6 a.

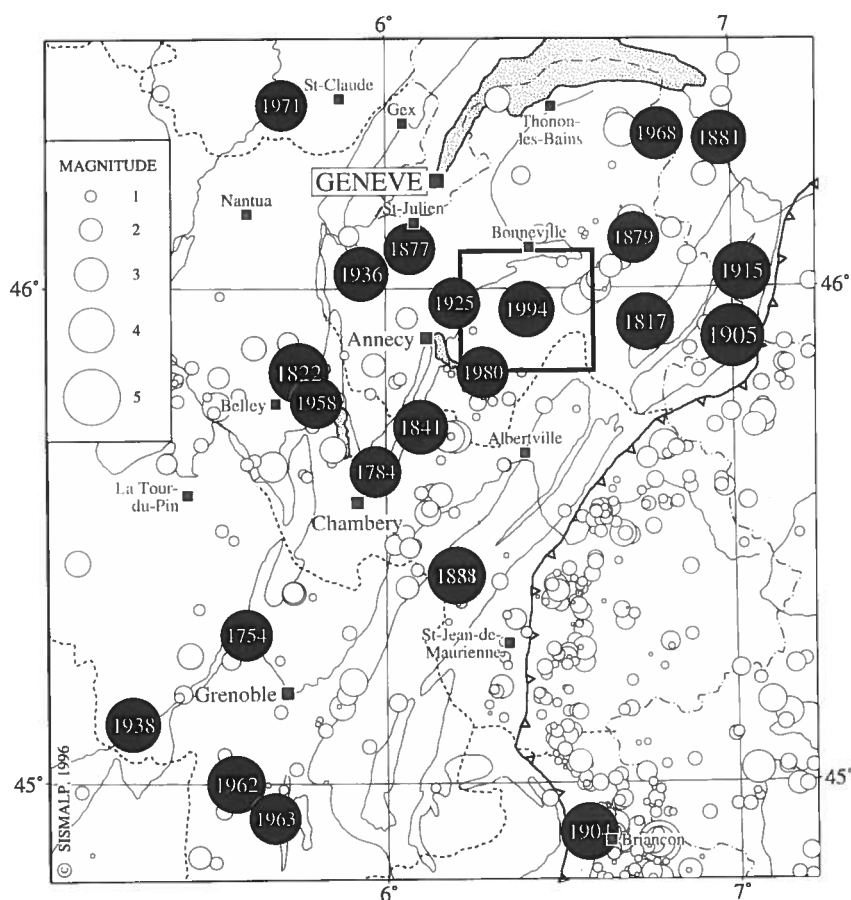
Seismicity of northern French Alps. Solid circles, historical earthquakes with magnitudes higher than or equal to 4.5 (last four centuries); open circles, earthquakes localized by Sismalp from 1989 to 1994. Box: position of figures 3 and 6 a.

Bornes massif, 2 ± 0.5 km NNE of Le-Grand-Bornand (**fig. 3**), and of the focal depths (10.4 ± 1.0 km for the main shock; 8.5 ± 0.7 km for the aftershock). Both hypocentres are located in the crystalline basement (**fig. 4**), the depth of which is documented to be 5 km beneath the subalpine chains (Bayer *et al.*, 1987).

We obtain a very reliable focal mechanism for the main shock, with a $N101^\circ$ -trending P axis (**fig. 5**). This is a strike-slip solution, with nodal planes striking $N40^\circ$ and $N152^\circ$ (**table**); it also shows a slight thrust component. The few first-motion readings available for the aftershock are consistent with the main-shock mechanism. The E-W orientation of the P axis corroborates results obtained by Fréchet (1977) in the nearby Belledonne massif or by Ménard (1988) and Nicolas *et al.*

(1990) for the Faverges earthquake (1980), 30 km to the SW.

A 29-station mobile network monitored the seismic activity for the next 10 days (**fig. 6 a**). Aftershocks were exceptionally few and magnitudes restricted to very low values (M_L from -0.3 to 0.9). Thirteen of them could be located close to the main-shock hypocentre and in the same depth range (8.2-10.6 km). Most-accurately located aftershock epicentres line up along a NE-SW direction which corresponds to the $N40^\circ$ strike of one of the nodal planes (**fig. 6 b**). Right-lateral strike-slip would have taken place along this near-vertical fault plane which is thought to be one of the Late-Variscan faults that slice the subalpine basement from the Cévennes (south-eastern Massif Central to the Pre-Alps (Vialon, 1974; Thouvenot and Perrier, 1981; Tapponnier, 1982).



INTRODUCTION

Les Alpes occidentales sont caractérisées par une sismicité habituellement modérée, qui se traduit quotidiennement par quelques séismes de très faible magnitude. Dans les Alpes internes, cette sismicité s'organise assez nettement le long du chevauchement pennique frontal et en bordure de la plaine du Pô. Les séismes s'y produisent très régulièrement. Par contraste, la sismicité du domaine externe est très diffuse (**fig. 1**). Les séismes y sont rares, mais, lorsqu'ils surviennent, leurs magnitudes sont souvent supérieures à 2 et ils sont donc fréquemment ressentis. Dans le Nord des Alpes françaises, on recense depuis le début du siècle cinq séismes majeurs d'intensité maximale supérieure ou égale à VII (Rothé, 1941 et 1972 ; Vogt, 1979) : le 29 avril 1905 à Chamonix, Haute-Savoie (VIII-IX) ; le 17 avril 1936 à Frangy, Haute-Savoie (VII-VIII) ; le 25 avril 1962 à Corrençon, Isère (VIII-IX) ; le 25 avril 1963 à Monteynard, Isère (VII-VIII) ; et le 19 août 1968 à Abondance, Haute-Savoie (VII-VIII). Le dernier séisme à avoir provoqué de légers dégâts est celui de Faverges (Haute-Savoie), le 2 décembre 1980

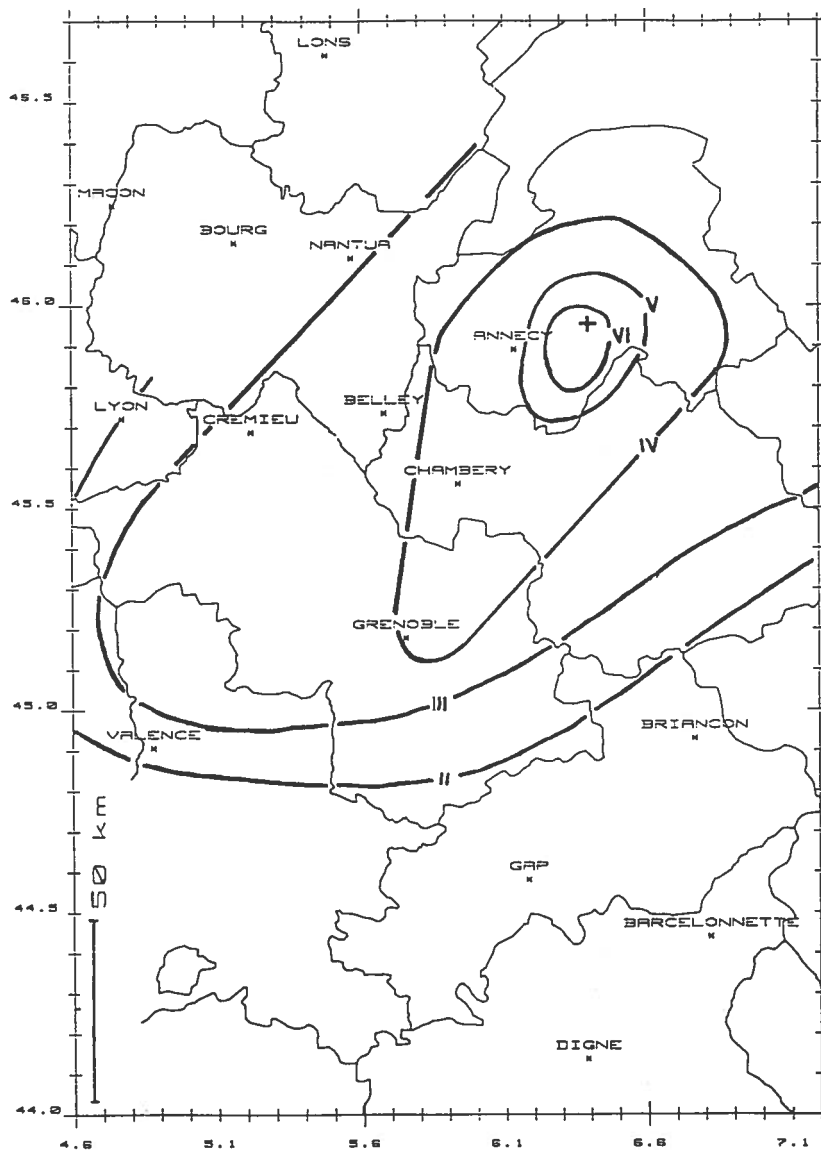


Fig. 2 Carte macrosismique du choc principal montrant la dissymétrie des isoséistes, étirées en direction du SW. Croix : épicentre instrumental.

Macroseismic map for main shock shows asymmetry of isoseismal curves, stretched towards SW. Cross: instrumental epicentre.

(I_0 : VI-VII). Dans un tel contexte, il est exceptionnel de pouvoir étudier, comme c'est le cas ici, un séisme de magnitude 5,1. Plus que les très faibles secousses habituellement observées, un tel événement présente l'intérêt de mieux refléter le champ régional des contraintes.

EFFETS ET LOCALISATIONS

Le 14 décembre 1994 à 8 h 55 mn 59,3 s UTC, s'est produit à proximité du Grand-

Bornand (Haute-Savoie) un séisme de magnitude 5,1 (LDG/CEA). Le séisme de Corrençon (1962), de loin le plus destructeur de ces dernières décennies dans le Nord des Alpes, avait une magnitude de 5,3. Le séisme du Grand-Bornand est donc le plus important événement qui se soit produit dans le SE de la France dans les 30 dernières années. Le choc principal a été suivi d'une réplique faiblement ressentie dans la zone épacentrale, à 9 h 43 mn 15,0 s UTC (magnitude LDG : 2,8).

Fig. 3 Carte géologique de la zone épacentrale avec les principales failles.

1 : alluvions récentes ; 2 : glaciaire ; 3 : molasse jurassienne ; 4 : molasse alpine ; 5 : calcaires, marnes et grès paléogènes ; 6 : marnes et calcaires du Crétacé inférieur ; 7 : Terres Noires et calcaires jurassiques ; 8 : dolomies et calcaires liasiques et triasiques.
Étoile : épigénère du choc principal.
Encadré : cadre de la figure 6 b.

Geological map of epicentral area with main faults. 1: recent deposits; 2: glacial till; 3: Jurassic molasse; 4: Alpine molasse; 5: Palaeogene limestones, marls, and sandstones; 6: Lower-Cretaceous marls and limestones; 7: Terres Noires and Jurassic limestones; 8: Liassic and Triassic dolomites and limestones.
Star: main-shock epicentre.
Box: position of figure 6 b.

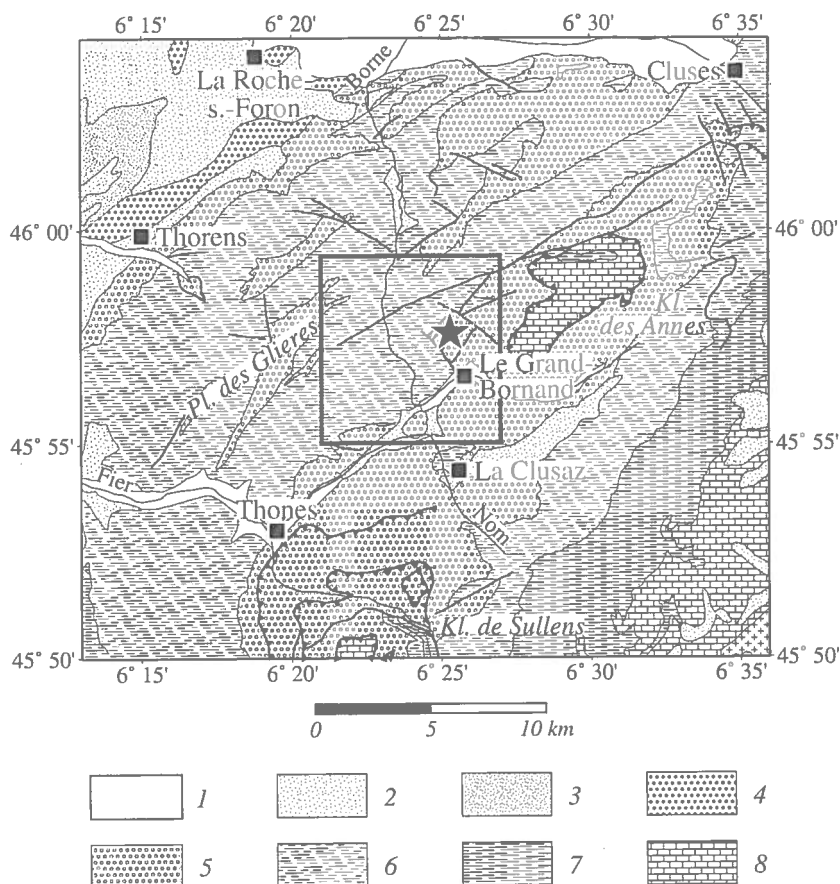
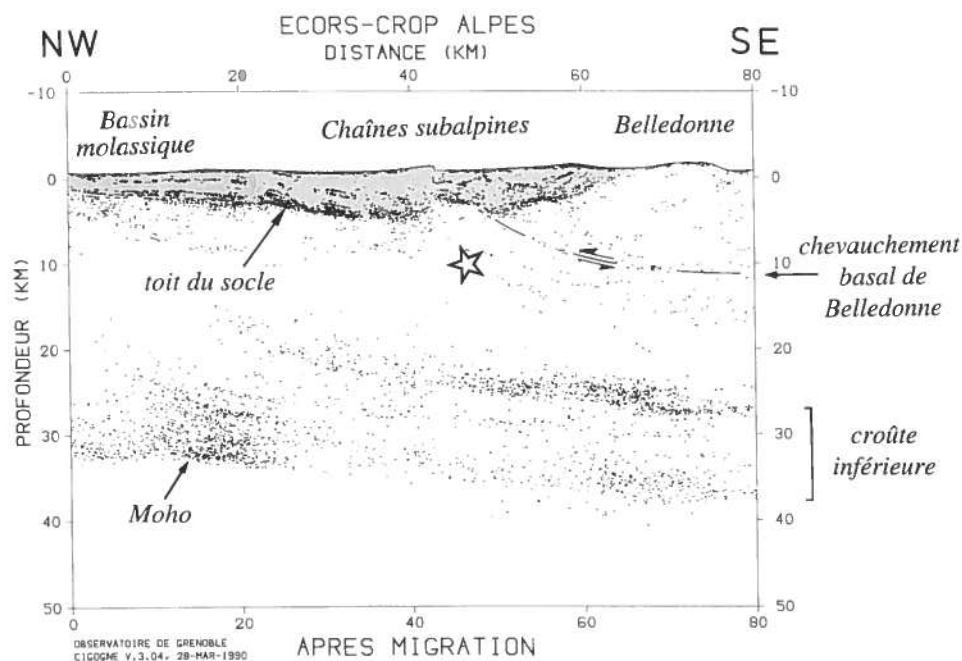


Fig. 4 Position du foyer du choc principal (étoile) sur la coupe Ecors-Crop Alpes (d'après Sénéchal et Thouvenot, 1992).

Main-shock focus (star) plotted onto Ecors-Crop Alps seismic section (after Sénéchal and Thouvenot, 1992).

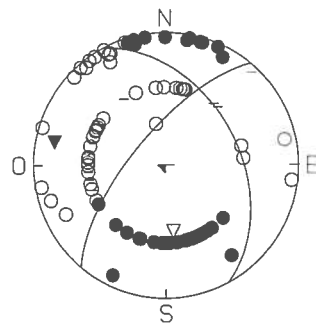


Le séisme a été largement ressenti en Haute-Savoie et dans les départements limitrophes (Savoie, Ain, Isère), ainsi qu'en Suisse romande (fig. 2). L'intensité VI-VII a été atteinte à Entremont, La Clusaz, Villard-sur-Thônes et Thônes : chute de cheminées, de tuiles et d'une croix au sommet d'une église, fissurations de murs intérieurs et extérieurs, éboulement de rochers de volume métrique ; il a été ressenti IV jusqu'à Grenoble (100 km de distance) et II jusqu'à Lyon (130 km). Les isoséistes sont allongées dans la direction NE-SW, avec une extension plus marquée vers le SW. L'épicentre instrumental se trouve décalé vers le NE de la zone pléistocéiste.

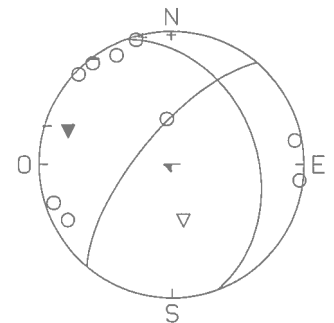
Le séisme a pu être particulièrement bien étudié grâce au réseau dense de 44 stations sismologiques de l'Observatoire de Grenoble (Sismalp), mais aussi grâce aux autres réseaux français, italien et suisse. On dispose au total d'un ensemble de 115 signaux numériques homogènes. En raison de la grande variation latérale des structures, on n'a utilisé, pour les localisations définitives (programme HYPO71 (Lee et Lahr, 1971), modifié), que les données de 33 stations situées à moins de 150 km de l'épicentre. Les épicentres du choc principal et de la réplique de 9 h 43 UTC (réplique principale) sont situés à 900 m l'un de l'autre, avec une incertitude horizontale de 500 m. Les profondeurs – relatives au niveau de la mer – sont de 10,4 km pour le choc principal et de 8,5 km pour la réplique principale, avec une incertitude verticale de 1 000 m. La station sismologique de La Clusaz, à 5 km de l'épicentre, permet un bon contrôle de ce paramètre.

La zone focale est située sous le roc de Charmieux, à 2 km au NNW du Grand-Bornand (45°57,5'N et 6°25,5'E), au SW de la klippe des Annes (fig. 3), dans la chaîne sub-alpine des Bornes. A cet endroit, la couverture sédimentaire post-triasique est bien connue (fig. 4), car on se trouve très précisément sur le tracé du profil Ecors-Crop Alpes (Bayer *et al.*, 1987). Les deux séismes ont indubitablement leurs foyers dans le socle cristallin, dont le sommet est situé ici vers 5 km de profondeur. En surface un peu plus au Nord, une faille majeure orientée N60°-

94/12/14 8:55:59.2



94/12/14 9:43:14.9



N70° part du plateau des Glières pour former la limite nord de la klippe des Annes. Toujours en surface, la zone épicentrale est caractérisée par un réseau serré de petites failles d'extension kilométrique, affectant le roc de Charmieux et orientées selon les deux directions conjuguées N45° et N135°.

MÉCANISMES AU FOYER

Pour obtenir le mécanisme au foyer du choc principal, on a utilisé les sens de premier mouvement en 109 stations bien réparties en azimut (fig. 5). La solution focale est bien contrainte : il s'agit d'un mécanisme en décrochement (plans nodaux orientés N40° et N152°), avec une petite composante de chevauchement. L'axe *P* est orienté N101°. Les quelques sens de déviation disponibles pour la réplique principale sont cohérents avec ce mécanisme (tableau).

Dans la région, quelques séismes ont fait l'objet d'étude de mécanismes au foyer (Fré-

Fig. 5 Mécanismes au foyer du choc principal et de la plus importante réplique (hémisphère inférieur, projection de Schmidt). Plein : compression ; vide : dilatation ; + ou - : compression ou dilatation moins sûre.

Focal mechanisms of main shock and of main aftershock (lower hemisphere, Schmidt projection). Full: compression; open: dilatation; + or - : less reliable compression or dilatation.

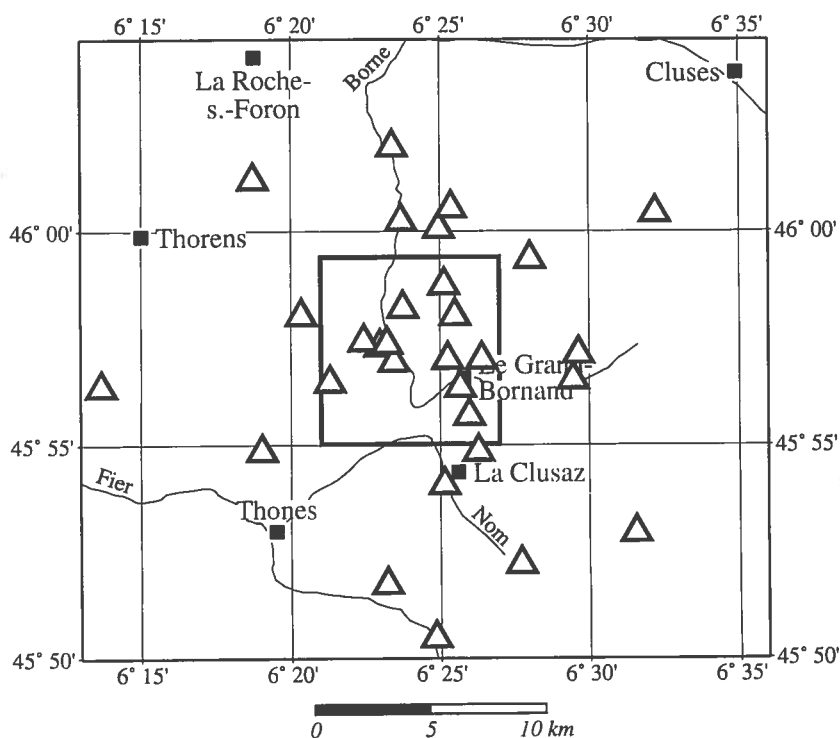
Tableau Azimuts et pendages (en degrés) : des axes *P* et *T* ; des plans nodaux *F* 1 et *F* 2. Solutions focales obtenues par le programme FPFIT (Reasenberget Oppenheimer, 1985).

Azimuths and dips (degrees): *P* and *T* axes; nodal planes *F* 1 and *F* 2. Focal solutions obtained from program FPFIT (Reasenberget Oppenheimer, 1985).

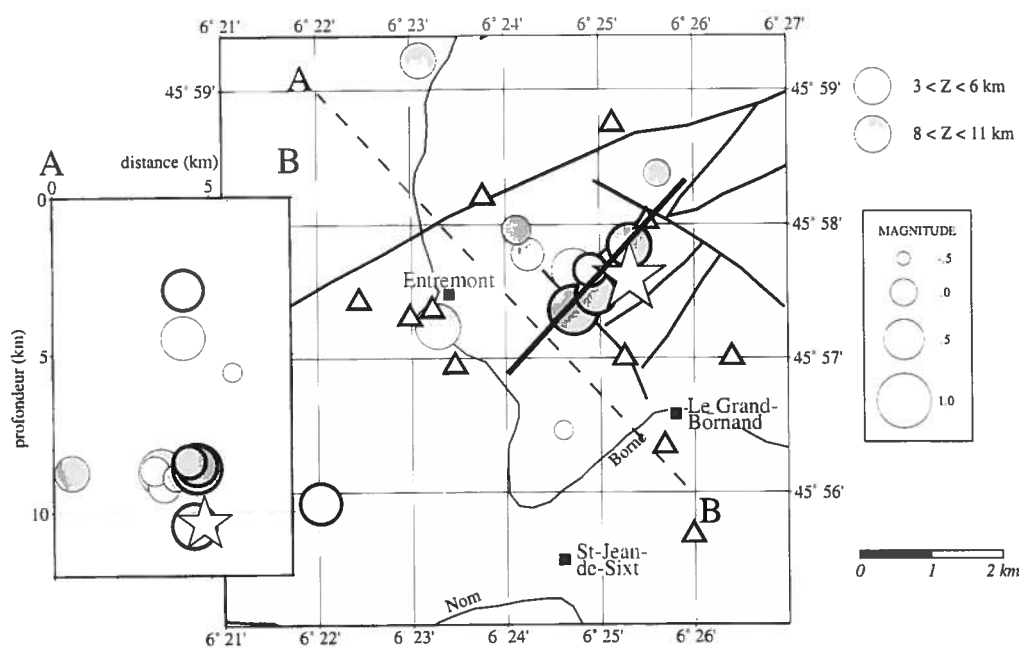
Date	Heure	<i>P</i>	<i>T</i>	<i>F</i> 1	<i>F</i> 2
14.12.1994	08 : 56	281/16	173/39	N40/70NW	N152/43NE
14.12.1994	09 : 43	287/20	167/35	N40/70NW	N160/55NE

Fig. 6 a) Implantation du réseau mobile (triangles) dans la zone épacentrale. Encadré : position de la figure 6 b. b) Carte des répliques sur fond des principales failles connues en surface. Le plan de faille retenu est orienté NE-SW (en gras). Profondeurs des foyers en kilomètres par rapport au niveau de la mer. En gras : épicentres les mieux localisés. Étoile : choc principal. A gauche : coupe NW-SE le long de la ligne tirée AB sur la carte.

a) Position of temporary network (triangles) in epicentral area. Box: position of figure 6 b. b) Map of aftershocks with main documented surface faults. Most-likely fault plane is NE-SW (thick line). Focal depths in kilometres relative to sea-level. Thick contour: most-accurate epicentres. Star: main-shock epicentre. Left: NW-SE cross-section along dashed line AB on map.



a)



b)

chet, 1977 ; Ménard, 1988 ; Nicolas *et al.*, 1990). Le plus significatif de ces séismes est celui de Faverges en 1980 (magnitude 4,7). Situé à moins de 30 km au SW du séisme du Grand-Bornand, il avait un mécanisme de faille inverse, avec un axe *P* orienté, selon les auteurs, entre N90° et N130°. Pour deux séismes situés plus à l'Est dans le massif de Belledonne, Fréchet (1977) obtenait deux mécanismes de coulissage avec des axes *P* orientés N90°. L'orientation E-W de la contrainte principale semble donc maintenant établie dans cette région des chaînes subalpines. En raison du manque de stations, les mécanismes étudiés antérieurement sont rarement bien contraints, ce qui démontre l'apport décisif d'un réseau sismologique régional pour obtenir, dans le cas du séisme du Grand-Bornand, une solution non ambiguë.

ÉTUDE DES RÉPLIQUES

Dans les jours qui ont suivi le choc principal, un réseau mobile de 29 stations (fig. 6 a) a été installé par l'Observatoire de Grenoble et le Réseau national de surveillance sismique (RéNaSS, Strasbourg). Complété par la station sismologique permanente de La Clusaz, le réseau temporaire a fonctionné du 14 au 26 décembre. Contre toute attente, seulement 13 répliques de très faible magnitude ($-0,3$ à $0,9$) ont pu être localisées (fig. 6 b). Neuf d'entre elles sont situées entre 8 et 11 km de profondeur, c'est-à-dire dans le socle, dans le même domaine de profondeur que le choc principal et la réplique principale. Les répliques les mieux localisées s'alignent selon une direction NE-SW. L'hypocentre d'une des répliques, à une profondeur de 8,8 km, est cependant éloigné de 3,5 km de cet alignement. Par ailleurs, trois foyers sont beaucoup plus superficiels : ils correspondent probablement à des réajustements dans la couverture sédimentaire et à la limite socle-couverture.

DISCUSSION ET CONCLUSION

A 10 km de profondeur, le foyer du séisme du Grand-Bornand se trouve clairement dans le socle, à quelques kilomètres en avant

du chevauchement basal du massif de Belledonne. La coupe Ecors-Crop Alpes (fig. 4) montre qu'à cet endroit, le socle subit un important décalage. Bien qu'il convienne d'être prudent – on se trouve là à un raccord de profils et, pour cette raison, ce point n'a jamais été pleinement exploité –, une migration soignée telle que celle présentée à la figure 4, qui prend notamment en compte la topographie, laisse penser qu'il existe un lien entre cette anomalie structurale et le séisme étudié.

La direction N150° d'un des plans nodaux des mécanismes au foyer correspond à l'orientation de certaines failles de coulissage sénestre, qui affectent la couverture jurassienne : failles du Vuache, de Saint-Claude, de Morez. Connues de longue date (Heim, 1919), et bien que leur jeu soit compatible avec celui des mécanismes au foyer, leur existence dans le socle n'est pas attestée. En revanche, les foyers des répliques les mieux localisées s'alignent dans une direction N40°, qui est celle de l'autre plan nodal. C'est donc ce plan que nous choisissons comme plan de faille. La dissymétrie observée pour les iso-séistes, avec un allongement marqué de celles-ci en direction du SW (fig. 2), ainsi que le décalage de l'épicentre instrumental (qui correspond au début de la rupture) vers le NE de la zone pléistocéiste suggèrent, par ailleurs, que la rupture sur le plan de faille s'est propagée du NE vers le SW. Avec un moment sismique de l'ordre de 10^{16} N.m et une surface de rupture d'environ 4 km², le déplacement sur la faille peut être estimé à 5-10 cm.

La direction N40°, mise ici en évidence, correspond à celle des failles tardi-hercyniennes cévenoles qui, selon des idées déjà anciennes (Vialon, 1974), entaillent le socle des Cévennes aux Préalpes. Ce réseau de failles subverticales affecte peut-être toute la croûte. Bien que ces dernières soient absolument indécélables sur les sections de sismique réflexion, cette hypothèse a déjà été envisagée par Tapponnier (1982). Cette même zone décrochante a été reconnue comme une discontinuité majeure pour la structure de la croûte (Thouvenot et Perrier, 1981) ou pour la répartition des contraintes (Delouis *et al.*, 1993).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BAYER, R., CAZES, M., DAL PIAZ, G.V., DAMOTTE, B., ELTER, G., GOSSO, G., HIRN, A., LANZA, R., LOMBARDO, B., MUGNIER, J.-L., NICOLAS, A., NICOLICH, R., POLINO, R., ROURE, F., SACCHI, R., SCARASCIA, S., TABACCO, I., TAPPONNIER, P., TARDY, M., TAYLOR, M., THOUVENOT, F., TORREILLES, G. et VILLIEN, A., 1987. Premiers résultats de la traversée des Alpes occidentales par sismique réflexion verticale (Programme ECORS-CROP), *C.R. Acad. Sci. Paris*, 305, série II, p. 1461-1470.
- DELOUIS, B., HAESSLER, H., CISTERNAS, A. et RIVERA, L., 1993. Stress tensor determination in France and neighbouring regions, *Tectonophysics*, 221, p. 413-437.
- FRÉCHET, F., 1977. Sismicité du sud-est de la France, et une nouvelle méthode de zonage sismique, *Thèse*, Univ. Grenoble-I, 159 p., en dépôt à la Soc. géol. France.
- HEIM, A., 1919. *Geologie der Schweiz. I. Molasseland und Jura-gebirge*, Tauchnitz, Leipzig, 704 p.
- LEE, W.H.K. et LAHR, J.C., 1975. HYPO71 (Revised): A computer program for determining hypocenter magnitude, and first motion pattern of local earthquakes, *US Geol. Surv. Open-File Report*, 75-311, 110 p.
- MÉNARD, G., 1988. Structure et cinématique d'une chaîne de collision - Les Alpes occidentales et centrales, *Thèse Sc.*, Univ. Grenoble-I, 268 p., en dépôt à la Soc. géol. France.
- NICOLAS, M., SANTOIRE, J.-P., et DELPECH, P.-Y., 1990. Intraplate seismicity: new seismotectonic data in western Europe, *Tectonophysics*, 179, p. 27-53.
- REASENBERG, P.A. et OPPENHEIMER, D., 1985. FPFIT, FPLOT and FPPAGE : Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions, *US Geol. Surv. Open-File Report*, 85-739, 109 p.
- ROTHÉ, J.-P., 1941. La sismicité des Alpes occidentales, *Ann. Inst. Phys. Globe Strasbourg*, III/3, p. 26-100.
- ROTHÉ, J.-P., 1972. La sismicité de la France de 1961 à 1970, *Ann. Inst. Phys. Globe Strasbourg*, IX, p. 3-134.
- SÉNÉCHAL, G. et THOUVENOT, F., 1992. Geometrical migration of line-drawings : a simplified method applied to ECORS data, in : *Continental Lithosphere : Deep Seismic Reflections, Geodynamics Series*, 22, AGU, Washington DC, p. 401-407.
- TAPPONNIER, P., 1982. Bassin du Sud-Est - Jura-Alpes : Profil Mâcon-Moutiers, in : *Proposition de programme 1982*, Programme ECORS, rapport IFF-INSU, p. 38-43.
- THOUVENOT, F. et PERRIER, G., 1981. Seismic evidence of a crustal overthrust in the western Alps, *Pure & Appl. Geophys.*, 119, p. 163-184.
- VIALON, P., 1974. Les déformations « synschisteuses » superposées en Dauphiné - Leur place dans la collision des éléments du socle préalpin - Conséquences pétrostructurales, *Schweiz. mineral. petrogr. Mitt.*, 54, p. 663-690.
- VOGT, J., éd., 1979. Les tremblements de terre en France, *Mém. BRGM*, 96, 220 p.