C. R. Acad. Sci. Paris, t. 312, Série II, p. 1617-1623, 1991

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

Les séismes de Cervières (Hautes-Alpes) des 11 et 13 février 1991 : un coulissage dextre entre zones piémontaise et briançonnaise

François THOUVENOT, Julien FRÉCHET, Pierre VIALON, Fabrice GUYOTON et Marco CATTANEO

Résumé — Trois séismes de magnitude 4,7, 3,6 et 3,8 se sont produits les 11 et 13 février 1991 dans la région de Briançon (Hautes-Alpes) où ils ont été ressentis par la population et ont occasionné de légers dégâts. C'est la première fois, dans les Alpes françaises, que des séismes de cette importance, donc significatifs sur le plan de la tectonique régionale, peuvent être étudiés de façon détaillée, en particulier en ce qui concerne la localisation des hypocentres et les mécanismes au foyer. La zone épicentrale se situe au contact des domaines briançonnais et piémontais, et les mécanismes obtenus peuvent tous trois être interprétés comme un coulissage dextre sur un plan de faille orienté N 143 à N 165. Ils soulignent donc l'importance des mouvements longitudinaux dans le domaine interne des Alpes occidentales, avec une extension est-ouest bien marquée.

The February 11 and 13, 1991 earthquakes in Cervières, French Alps: a right-lateral strike-slip between the Piedmontese and Briançonnais zones

Abstract — *Three earthquakes occurred on February 11 and 13, 1991, in the Briançon area (French Alps). They were locally felt and caused slight damage in the epicentral zone. Because of their relatively high magnitudes (4.7, 3.6 and 3.8), these earthquakes are significant from the point of view of regional tectonics. This is the first time such major events can be studied in detail by the new Alpine seismic networks, with precise hypocentral locations and well-constrained focal mechanisms. Epicentres are located at the contact between the Briançonnais and Piedmontese zones, and the focal mechanisms can be interpreted as right-lateral strike-slip on a fault plane trending N 143-N 165. This supports the importance of longitudinal displacements in the inner realm of the western Alps, along with a pronounced EW extension.*

Abridged English Version — The historical seismicity of the Briançonnais zone (*Fig.* 1) has long been recognized as one of the highest in the French Alps [1]. Since the beginning of this century, five earthquakes with maximal intensities of VII and beyond have been reported [2], with the 1959 Saint-Paul-sur-Ubaye earthquake reaching intensity VIII. However, in the last three decades, the seismic activity has been very low: since 1977 when a magnitude-4 earthquake occurred in Guillestre, very few events have reached magnitude 3.5. This paper addresses a recent magnitude-4.7 earthquake followed by two strong aftershocks. More than the very-low-magnitude shocks usually recorded [3], such events better reflect the regional stress field and spotlight the present kinematics of the Alpine arc.

The main shock, with magnitude 4.7, occurred near Cervières (7 km ESE of Briançon) on February 11, 1991 at 1,543 UT. It was widely felt in the Briançon area, along the Susa Valley (Piedmont), and as far as Grenoble (90 km in distance). In Cervières and close-by L'Argentière-La Bessée, the maximal intensity reached VI-VII (falls of plaster, cracks in stonework). 2 days later, on February 13, 1991, two aftershocks occurred in the same area: a magnitude 3.6 at 1,254 UT, followed by a magnitude 3.8 at 1,549 UT. Both aftershocks were locally felt with intensity VI.

The three events were recorded at Observatoire de Grenoble by the SISMALP network that monitors the seismicity of the French Alps ([4], [5]). We also used data collected on the Italian side, which here proved essential given the straddling position of the epicentral

Note présentée par Xavier LE PICHON.

0764-4450/91/03121617 $ 2.00 © Académie des Sciences

zone on the French-Italian border (*Fig.* 2). Data from networks in Provence and around Nice completed the data set. Using absolute as well as relative hypocentral determinations, epicentres fall within 300 m from each other, 2 km east of Cervières. The focus of the main shock was 7.4 km deep, whereas it was slightly shallower for both aftershocks (6.4 km).

The focal mechanisms are of uneven quality (*Fig.* 3). Although the main shock provides a well-constrained focal solution, some first motions for both aftershocks are ambiguous, especially in the SE quadrant. However, both aftershocks have a very similar mechanism, different from that of the main shock. This is reinforced by the observation of seismograms (*Fig.* 4): the waveforms are almost identical for both aftershocks, whereas the main shock shows clear differences at the very beginning of the signal. The three mechanisms exhibit strike-slip, with an EW extensive component more pronounced for both aftershocks than for the main shock (Table).

East of Briançon (*Fig.* 5), the eastern Briançonnais zone is torn into strips trending N 145-N 165. This direction played a major role in the recent tectonics, as shown by some late faulting features that intersect the east "Vergenz" of the Briançonnais backthrusting ([11], [12]). The Cervières earthquakes precisely occurred in this contact zone where the Calcareous Briançonnais meets up with the Piedmontese Schistes Lustrés. In this tectonic setting, the nodal plane striking N 143-N 165 (Table) very likely corresponds to the fault plane. The resulting right-lateral strike-slip is significant from the kinematical viewpoint. It has long been postulated ([13], [9], [14]) that important longitudinal displacements, combining translations and rotations, have arisen in the inner realm of the Alps since the Mid-Cainozoic. The right-lateral strike-slip here evidenced between the Piedmontese and Briançonnais zones strengthens these assumptions.

INTRODUCTION. — Dans les Alpes françaises, le Briançonnais est l'une des zones sismiques les plus actives (*fig.* 1). Elle a du moins été reconnue comme telle il y a 50 ans sur la base de la sismicité historique [1]. Depuis le début du siècle, cinq séismes y ont en effet été ressentis avec une intensité maximale supérieure ou égale à VII [2] : le 12 juillet 1904, au voisinage immédiat de Briançon; les 19 mars 1935, 15 février et 18 juillet 1938 dans l'Embrunais et le Queyras; et le 5 avril 1959 à Saint-Paul-sur-Ubaye (intensité VIII). D'un point de vue instrumental, cette activité est cependant difficile à cerner : depuis 1950, quatre secousses seulement ont atteint ou dépassé la magnitude 4. Le séisme de Saint-Paul-sur-Ubaye en 1959 est le seul à avoir dépassé la magnitude 5; depuis le séisme de Guillestre du 3 juillet 1977 (magnitude 4,0), le Briançonnais n'est affecté que par des secousses épisodiques de magnitude modérée, presque toutes inférieures à 3,5. Dans un tel contexte, il est exceptionnel de pouvoir étudier, comme c'est le cas ici, un séisme de magnitude 4,7 accompagné de deux importantes répliques. Plus que les très faibles secousses habituellement observées [3], de tels événements présentent l'intérêt de mieux refléter le champ régional des contraintes. Leur étude contribue nécessairement à une meilleure compréhension de la cinématique de l'arc alpin.

LES SÉISMES DE CERVIÈRES. — Le 11 février 1991 à 15 h 43 mn 42,9 s TU s'est produit près de Cervières (7 km à l'est-sud-est de Briançon) un séisme de magnitude 4,7 (magnitude M_L déterminée par le Laboratoire de Détection géophysique du C.E.A.). Largement ressenti dans la région de Briançon et, du côté italien, dans la quasi-totalité du Val de Suse, il a provoqué quelques dégâts légers (chutes de plâtres, lézardes dans les maçonneries) à Cervières et l'Argentière-La Bessée (intensité VI-VII); il a également déclenché deux

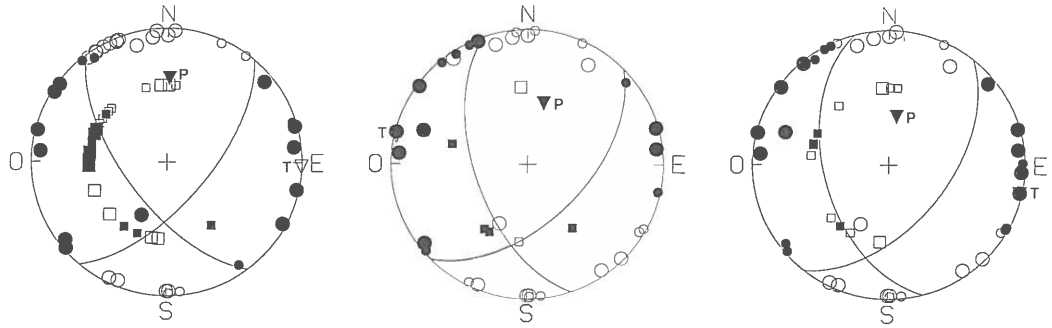

Fig. 3. — Mécanismes au foyer (hémisphère inférieur, projection de Schmidt). Plein : compression; vide : dilatation; rond : onde directe; carré : onde réfractée; symbole réduit : lecture moins sûre.

Fig. 3. — Focal mechanisms (lower hemisphere, Schmidt projection). Full: compression; open: dilatation; circle: direct wave; square: refracted wave; small-size symbol: less reliable reading.

avalanches aux environs immédiats de Cervières, sur les pentes du Lassseron; il a été ressenti jusqu'à Grenoble, à 90 km de distance. Par sa magnitude, c'est le plus important séisme qui se soit produit dans les Alpes françaises depuis le séisme de Faverges (Savoie), le 2 décembre 1980 (magnitude 4,7). Il est relativement fréquent, dans les Alpes françaises, qu'un séisme de magnitude supérieure à 4 soit suivi, à plus ou moins long terme (quelques minutes à 1 semaine), par une réplique de magnitude supérieure à 3,5. On ne pouvait par conséquent être surpris par la secousse du 13 février à 12 h 54 mn 42,3 s TU, de magnitude 3,6. Plus inattendue, le même jour, fut celle de 15 h 49 mn 39,0 s TU, de magnitude 3,8. Les deux répliques ont été toutes deux largement ressenties localement (intensité VI).

Localisation des hypocentres. — Le réseau SISMALP de l'Observatoire de Grenoble comporte actuellement 25 stations sismologiques (*fig.* 2). Réparties sur l'ensemble des Alpes françaises et reliées par le réseau téléphonique commuté à l'Observatoire de Grenoble ([4], [5]), ces stations ont correctement enregistré les trois secousses. Cependant, la zone épicentrale étant située en bordure du réseau, il s'est avéré essentiel d'adjoindre aux informations recueillies par SISMALP celles du réseau de l'Institut Géophysique et Géodésique de Gênes, qui contrôle la sismicité piémontaise et ligure, ainsi que celles des réseaux de Nice et de Provence, gérés par l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg. On a pu rapidement disposer d'un ensemble de données numériques homogènes et de qualité, complété par les temps d'arrivée fournis par le Laboratoire de Détection géophysique du C.E.A. Les hypocentres ont d'abord été localisés en utilisant un modèle de vitesse unidimensionnel (programme HYPO 71 [6], modifié). On a ensuite utilisé des localisations relatives pour repositionner les différentes secousses les unes par rapport aux autres. Dans un cas comme dans l'autre, les épicentres calculés sont situés à moins de 300 m les uns des autres, ce qui est du même ordre de grandeur que l'incertitude horizontale. Seule la profondeur du choc principal (7,4 km) est sensiblement différente de celle des répliques (toutes deux à 6,4 km). Comme l'incertitude verticale est estimée à 700 m, cette différence de profondeur semble significative. La zone épicentrale est située à 2 km à l'est de Cervières (coordonnées épicentrales : 44°52,1′ de latitude nord et 6°45,0′ de longitude est).

Mécanismes au foyer. — Les mécanismes au foyer des trois séismes sont de qualité inégale (*fig.* 3). Si le choc principal fournit une solution focale bien contrainte, les sens

TABLEAU

Azimuts et pendages : des axes P et T; des plans nodaux F 1 et F 2.

Azimuths and dips: P and T axes; nodal planes F 1 and F 2.

Date	Heure	P	T	F 1	F 2
11.02.1991	15:43	1/39	92/2	40/65	143/63
13.02.1991	12:54	14/52	282/2	45/55	160/58
13.02.1991	15:49	8/61	102/3	37/54	165/50

de premier mouvement pour les deux répliques sont parfois ambigus. C'est en particulier le cas dans le quadrant sud-est des sphères focales où quelques stations apparaissent anormalement en dilatation alors qu'elles étaient en compression pour le choc principal. On peut cependant supposer que les mécanismes des répliques, pratiquement identiques entre eux, sont un peu différents de celui du choc principal. Nous sommes confortés dans cette opinion par l'observation des sismogrammes (*fig.* 4) : les formes d'onde sont presque identiques pour les deux répliques, alors que le choc principal montre, dans le tout début du signal, une différence tangible. Les trois mécanismes ont été traités avec le programme FPFIT [7], qui présente l'avantage de fournir des solutions objectives en contrôlant l'incertitude sur les deux plans nodaux. On aboutit dans les trois cas à des mécanismes en décrochement, avec une composante d'extension est-ouest, légère pour le choc principal, beaucoup plus marquée pour les deux répliques (tableau). Dans la région, si l'on ne considère que les séismes de magnitude supérieure à 4, les seuls mécanismes au foyer dont on dispose sont ceux du séisme de Saint-Paul-sur-Ubaye en 1959, et du séisme de Guillestre en 1977. On peut considérer le premier comme bien contraint ([8], [9], [10]) : il est pratiquement identique à celui des répliques étudiées ici. Le second, principalement en raison de sa magnitude beaucoup plus faible et du nombre alors restreint de stations dans les Alpes, est plus difficile à interpréter. Il y avait été reconnu une extension pratiquement est-ouest ([8], [9], [10]), mais il faut ici souligner la mauvaise qualité des données.

IMPLICATIONS TECTONIQUES. — A l'est de Briançon (*fig.* 5), la direction structurale N 145 à N 165 correspond aux limites des différentes écailles constituant la zone briançonnaise orientale [11]. Cette direction a joué un rôle majeur dans la tectonique récente, comme le montrent les accidents tardifs qui recoupent les plis à vergence est du rétrocharriage briançonnais. Très redressés, ces accidents découpent en lanières les zones de contact entre le Briançonnais calcaire, le Prépiémontais et les Schistes Lustrés piémontais [12]. C'est précisément dans ces limites orientales du Briançonnais que se trouvent localisés les trois séismes de Cervières. Dans ce contexte tectonique, le plan nodal F 2 de nos mécanismes au foyer (tableau), d'azimut N 143 à N 165, correspond vraisemblablement au plan de faille. (Le plan F 1, qui pourrait correspondre aux failles de direction N 40 à N 60 connues dans la zone des Schistes Lustrés, paraît moins vraisemblable dans le compartiment tectonique où sont localisés les séismes.) Le fort pendage ouest du plan F 2 (50 à 63°) s'intègre bien dans les schémas structuraux régionaux [12]. La profondeur des trois séismes (de 6,4 à 7,4 km) indique cependant que les accidents sub-verticaux reconnus en surface gardent un pendage important jusqu'à plusieurs kilomètres de profondeur avant de s'amortir éventuellement. (Un phénomène analogue a été signalé plus au sud, en Haute-Ubaye [3].) Le décrochement dextre qui ressort alors sans ambiguïté des trois mécanismes est important d'un point de vue cinématique. Si l'on a reconnu du coulissage sur la majorité des accidents N 155 de la région, leur rejet dextre plurikilo-

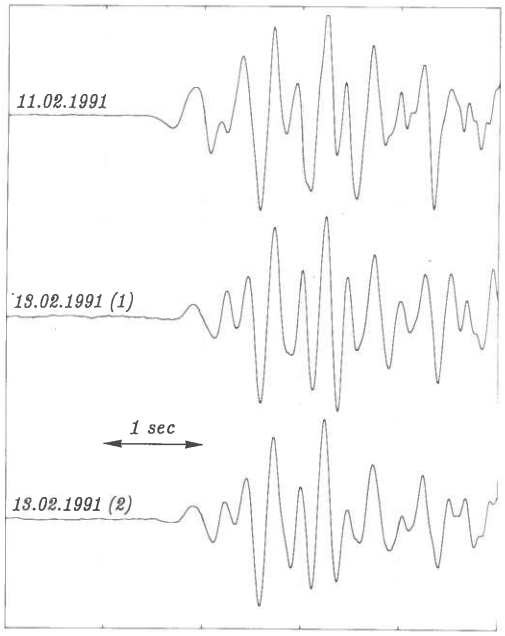

Fig. 4

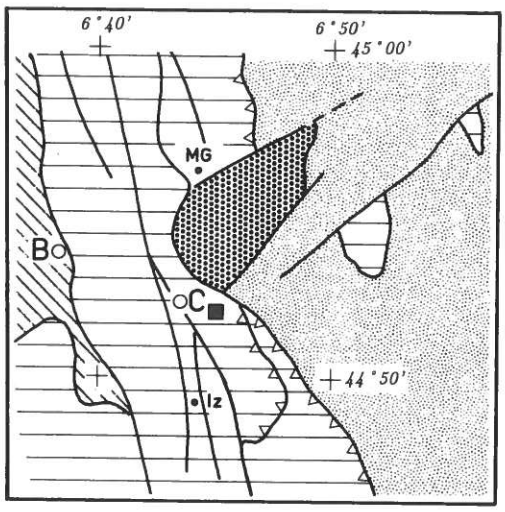

Fig. 5

Fig. 4. – Exemple d'enregistrement des trois séismes à la station OG 03 (133 km de distance). Seules les cinq premières secondes sont représentées, avec des amplitudes normalisées. De haut en bas : choc principal, première réplique et seconde réplique.

Fig. 4. – Example of seismograms for the three earthquakes as recorded at station OG 03 (133 km in distance). Only first five seconds are displayed, with normalized amplitudes. From top to bottom: main shock, first aftershock, and second aftershock.

Fig. 5. – Carte tectonique simplifiée. Carré plein : épicentres étudiés. B = Briançon; C = Cervières; Iz = Col d'Izoard; MG = Col du Montgenèvre. Hachures en biais = Houiller briançonnais; hachures horizontales = couverture du Briançonnais calcaire; pointillés = Roches Vertes; grisé = Schistes Lustrés.

Fig. 5. – Simplified tectonic map. Full square: epicentres under study. Slanted hatching = Carboniferous Briançonnais; horizontal hatching = Calcareous Briançonnais cover; dotted = Greenstones; shaded = Schistes Lustrés.

métrique n'était que supposé jusqu'alors [12]. Des idées déjà anciennes ([13], [9], [14]) envisagent d'importants mouvements longitudinaux, combinaisons de translations et de rotations, qui auraient pris naissance dans la partie interne des Alpes depuis le Tertiaire. Le coulissage dextre entre Briançonnais et Piémontais mis en évidence ici semble confirmer ces hypothèses.

Conclusions. – A environ 7 km de profondeur, le séisme de Cervières du 11 février 1991 présente un mécanisme de coulissage dextre sur un plan de faille orienté N 143 (correspondant à l'orientation locale de la limite Briançonnais-Piémontais). 1 km au-dessus du foyer, deux séismes ont été induits, avec des mécanismes quasi identiques faisant intervenir une composante d'extension est-ouest beaucoup plus marquée que pour le choc principal. La sismicité historique de cette limite orientale du Briançonnais était considérée comme faible, peut-être pour des raisons d'imprécision des localisations antérieures qui situaient les épicentres plus à l'ouest, vers le Chevauchement Pennique Frontal. Les séismes étudiés ici mettent en relief toute l'importance du contact Briançonnais-Piémontais et l'actualité de son coulissage.

Note remise le 11 avril 1991, acceptée le 26 avril 1991.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] J.-P. ROTHÉ, *Ann. Inst. Phys. Globe Strasbourg*, 3/3, 1941, p. 1-105.

[2] J. VOGT éd., Les tremblements de terre en France, *Mém. B.R.G.M.*, 96, 1979, 220 p.

[3] F. GUYOTON, J. FRÉCHET et F. THOUVENOT, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 311, série II, 1990, p. 985-991.

[4] F. THOUVENOT, J. FRÉCHET, F. GUYOTON, R. GUIGUET et L. JENATTON, *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, Bruxelles, 1, 1990, p. 1-10.

[5] J. FRÉCHET, F. THOUVENOT, G. POUPINET, F. GUYOTON, J. SARRAULT et A. NEDELLEC, *Bull. seism. Soc. Am.*, 1991 (soumis).

[6] W. H. K. LEE et J. C. LAHR, *U. S. Geol. Surv. Open-File Report*, 75-311, 1975, 110 p.

[7] P. A. REASENBERG et D. OPPENHEIMER, *U. S. Geol. Surv. Open-File Report*, 85-739, 1985, 109 p.

[8] J. FRÉCHET, *Thèse de 3e cycle*, Univ. Grenoble, 1978, 159 p.

[9] G. MÉNARD, *Thèse d'État*, Univ. Grenoble, 1988, 268 p.

[10] G. MÉNARD et J. FRÉCHET, *Earth and Planet. Sc. Let.*, 1991 (soumis).

[11] J.-C. BARFÉTY, M. GIDON et C. KERCKHOVE, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 267, série B, 1968, p. 394-397.

[12] J.-C. BARFÉTY et M. GIDON, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 281, série B, 1975, p. 1677-1680.

[13] M. GIDON, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 278, série B, 1974, p. 21-24.

[14] P. VIALON, P. ROCHETTE et G. MÉNARD, in *Alpine Tectonics*, M. P. COWARD, D. DIETRICH et R. G. PARK éd., *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 45, 1989, p. 329-338.

Laboratoire de Géophysique interne et Tectonophysique, Observatoire de Grenoble, I.R.I.G.M., B. P. n° 53 X, 38041 *Grenoble;*

Istituto Geofisico e Geodetico, Università di Genova, Viale Benedetto, Gênes, Italie.

EXPLICATIONS DE LA PLANCHE

Fig. 1. – Sismicité historique de la zone briançonnaise. Étoile montrée d'une flèche : séismes de Cervières. Encadré : cadre de la carte de la figure 5. Les événements auxquels le texte fait référence sont indiqués par leurs dates respectives.

Fig. 1. – Historical seismicity of the Briançonnais zone. Star shown by arrow: Cervières earthquakes. Box: emplacement of map in Figure 5. Events referred to in text show their respective dates.

Fig. 2. – Stations sismologiques dont les données numériques ont été utilisées dans cette étude. Cercle plein : station SISMALP; cercle vide : autre station.

Fig. 2. – Seismic stations that provided digital data used in this study. Full symbol: SISMALP station; open symbol: other station.

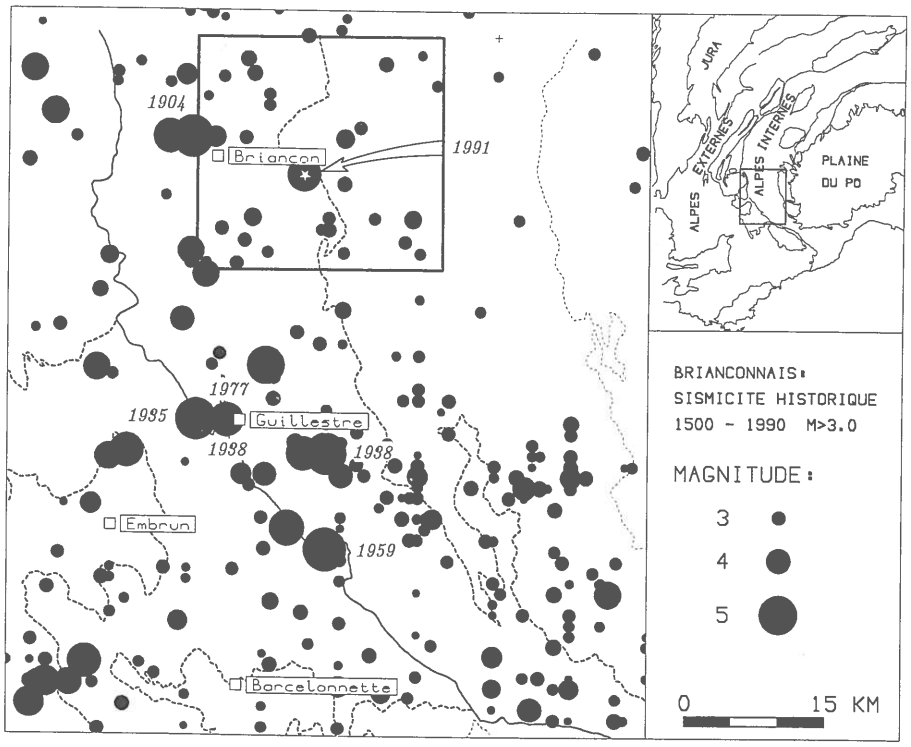
1904
1991
Briançon
1977
1995
Guillestre
1988
1998
Embrun
1959
Barcelonnette
JURA
ALPES EXTERNES
ALPES INTERNES
PLAINE DU PO
BRIANCONNAIS:
SISMICITE HISTORIQUE
1500 - 1990 M>3.0
MAGNITUDE:
3
4
5
0
15 KM

Fig. 1

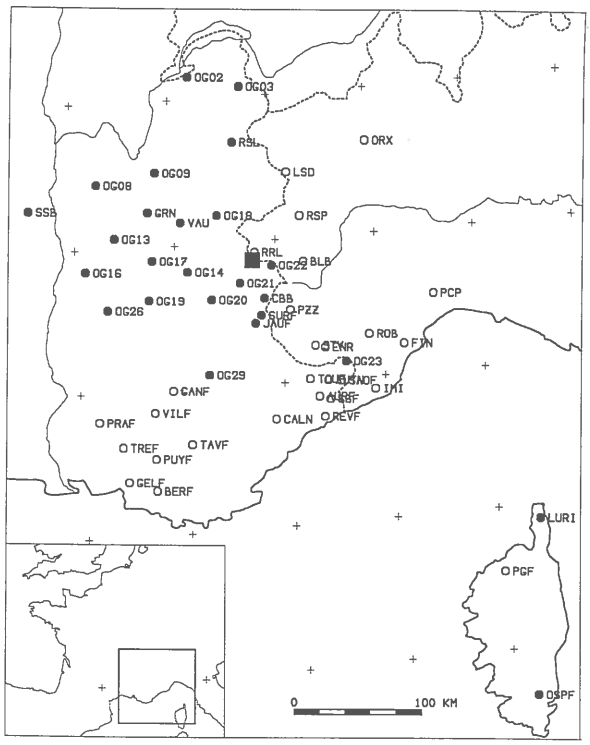
OG02
OG03
RSL
ORX
OG09
LSD
OG08
SSB
GRN
VAU
OG18
RSP
OG13
RRL
OG22
BLB
OG16
OG17
OG14
OG21
OG19
OG20
CBB
PCP
OG26
PZZ
JAUF
ROB
FIN
OG23
OG29
CANF
IMI
VILF
PRAF
CALN
REVF
TREF
TAVF
PUYF
GELF
BERF
LURI
PGF
OSPF
0
100 KM

Fig. 2