



HAL
open science

Place de la néotectonique dans l'évaluation de l'aléa sismique : exemple de la Provence (France)

B. Sauret, M. Terrier

► **To cite this version:**

B. Sauret, M. Terrier. Place de la néotectonique dans l'évaluation de l'aléa sismique : exemple de la Provence (France). 1990, pp.211-230. insu-00505817

HAL Id: insu-00505817

<https://insu.hal.science/insu-00505817v1>

Submitted on 26 Jul 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

PLACE DE LA NEOTECTONIQUE DANS L'EVALUATION DE L'ALEA SISMIQUE : EXEMPLE DE LA PROVENCE (FRANCE)

par B. SAURET* et M. TERRIER (*,**)

Mots clés : Néotectonique, Faille active, risque sismique, Provence, France

RESUME

La néotectonique participe de façon déterminante à toute étude d'évaluation de l'aléa sismique. A cette fin, la Provence occidentale (France) a récemment fait l'objet d'un nouveau bilan néotectonique. Celui-ci s'est appuyé, d'une part sur l'examen critique de données extraites d'une compilation bibliographique et d'autre part sur des éléments nouveaux résultant d'observations de terrain ou d'investigations particulières telles que la comparaison des nivellements et l'analyse morphostructurale.

Les résultats obtenus ont permis de prouver l'activité tectonique quaternaire de certaines failles et de révéler plusieurs traits néotectoniques nouveaux. Ces résultats, qui ont constitué des éléments primordiaux lors de l'élaboration du schéma sismotectonique global de la Provence occidentale ont été intégré dans deux types d'études d'aléa sismique : d'une part lors de la réalisation des Plans d'Expositions aux Risques Sismiques et d'autre part, lors des études des dangers concernant les installations industrielles à haut risque des Bouches-du-Rhône.

En outre, d'un point de vue fondamental, la relation néotectonique-aléa sismique confrontée à des problèmes pratiques posés par l'ingénieur, a permis de faire avancer notablement la réflexion sur la notion de faille active en domaine intraplaque de sismicité faible à modérée.

ABSTRACT

Neotectonics play a vital role in all seismic risk assessment. Accordingly, Western Provence has recently been the subject of a new neotectonic assessment. The study was based partly on a critical review of data in the literature, and partly on new field data or specific investigations such as comparison of levelling profiles and morphostructural analysis.

The results have shown the existence of Quaternary tectonic activity and identified several new tectonic features. These results have been fundamental in drawing up an overall seismo-tectonic scheme for western Provence. They have been incorporated into two types of seismic risk study in the Bouches-du-Rhône Department: establishing plans of exposure to seismic risk and studies of dangers to high-risk industrial sites.

From a more basic point of view, the relation between neotectonics and seismic risk and the practical problems identified by the engineer have made possible advances in theories concerning active faults in areas of low to moderate seismicity in within-plate geodynamic settings.

* BRGM Département Environnement et Risques, Service Risque et Génie sismiques, 117, Avenue de Luminy, 13009 MARSEILLE

** Laboratoire de géologie structurale et appliquée, Université de Provence, 3, Place Victor Hugo, 13331 MARSEILLE Cédex 03

INTRODUCTION

La néotectonique participe de façon déterminante à toute étude d'aléa sismique. Il est en effet désormais clairement admis que les données de sismicité instrumentale et historique sont insuffisantes à elles seules pour rendre compte des déformations que subit actuellement l'écorce terrestre. Par la période de temps qu'elle intéresse, le Plio-Quaternaire, voire le Mio-Plio-Quaternaire, la néotectonique rend mieux compte de ces déformations.

En Provence occidentale, les données sismotectoniques sont relativement bien connues, en particulier depuis l'élaboration de la carte sismotectonique de France au 1/1 000 000ème (BRGM/CEA, EDF, 1981) et de la zonation sismotectonique proposée par COMBES (1984). Cependant, les études d'aléa sismique exigeant une remise à jour permanente de tels bilans, une révision de ces données fondamentales et des investigations nouvelles ont été engagées dans cette région. Ce sont les principaux résultats de ces recherches et leurs implications pratiques qui sont présentées ici(*).

Outre des recherches classiques de terrain, conduisant à la découverte d'affleurements de Quaternaire déformé, plusieurs techniques d'investigation relativement nouvelles ont été mises en oeuvre (en particulier dans la zone test de la Moyenne Durance) et illustrent ainsi le caractère pluridisciplinaire de la néotectonique : traitement et interprétation de l'imagerie LANDSAT et SPOT, comparaison des profils de nivellement, analyse morphostructurale.

Certains de ces travaux sont encore en cours mais la somme des résultats déjà acquis a été directement intégrée dans deux types d'études appliquées à la prévention du risque sismique dans le département des Bouches-du-Rhône, à savoir, au niveau communal, les Plans d'Exposition aux Risques Sismiques et sur le site des installations industrielles à haut risque, les études de dangers incluant le risque sismique.

Enfin, face aux problèmes posés par l'ingénieur et le décideur, la prise en compte de la néotectonique dans l'évaluation de l'aléa sismique tant au niveau local qu'au niveau régional, a ainsi permis de faire avancer notablement la réflexion sur la notion de faille active en domaine intraplaque de sismicité faible à modérée en particulier, et cela dans le cadre du groupe de travail REGINE (**).

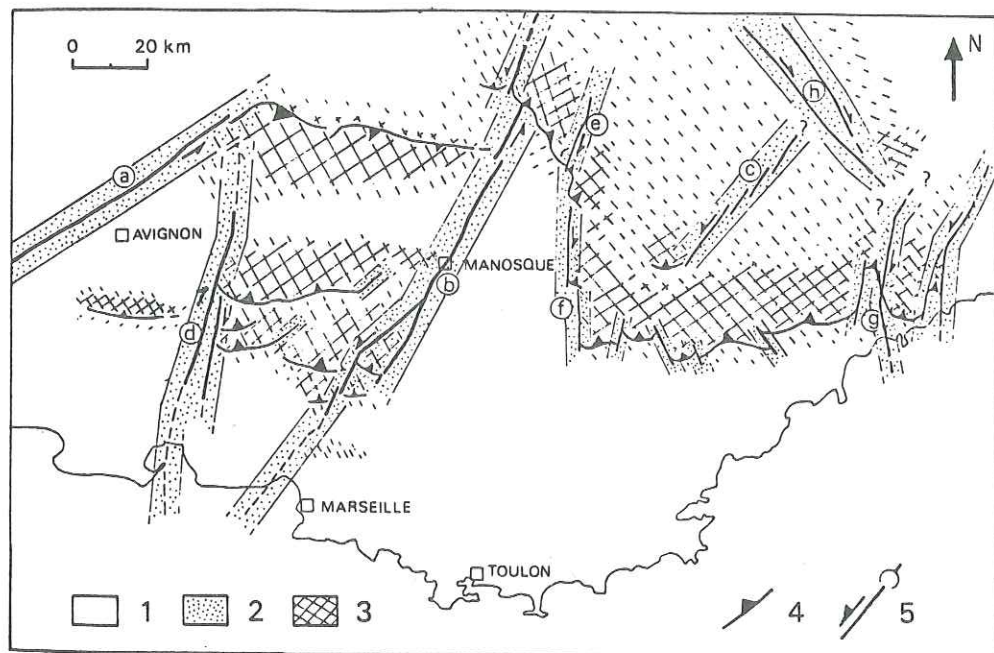
CADRE SISMOTECTONIQUE

A l'heure actuelle, la Provence est soumise à un régime de déformation de type décrochant compressif compatible avec une direction de raccourcissement horizontale subméridienne, conséquence de la convergence des plaques africaine et européenne. Selon COMBES (1984), trois types de domaines sismotectoniques peuvent être distingués en Provence (Fig. 1) :

- domaines de type 1, caractérisés par une relative stabilité tectonique et par une sismicité faible à nulle ;
- domaines de type 2, caractérisés par des déformations linéaires concentrées le long des grands systèmes de failles décrochantes et par une sismicité présentant des secousses fréquentes mais d'intensité relativement modérée et des épïcêtres alignés sur ces accidents ;
- domaines de type 3, caractérisés par des déformations de type compressif (faille inverse, chevauchement) et une sismicité de fréquence plus faible mais d'intensité généralement plus forte que celle des domaines de type 2.

* Concernant les notions d'évaluation de l'aléa sismique, le lecteur pourra se référer avec profit à l'ouvrage fondamental de DAVIDOVICI et coll. (1985)

** Groupe de Réflexion Géologie de l'Ingénieur et Néotectonique



- | | |
|---|------------------------------------|
| 1 - Domaine sismotectonique de type 1 ; | 5 - Décrochement ; |
| 2 - Domaine sismotectonique de type 2 ; | a - Faille de Nîmes ; |
| 3 - Domaine sismotectonique de type 3 ; | b - Faille de la Moyenne Durance ; |
| 4 - Chevauchement ; | d - Faille de Salon-Cavaillon ; |

Figure 1 - ZONATION SISMOTECTONIQUE DE LA PROVENCE

D'après P. COMBES (1984)

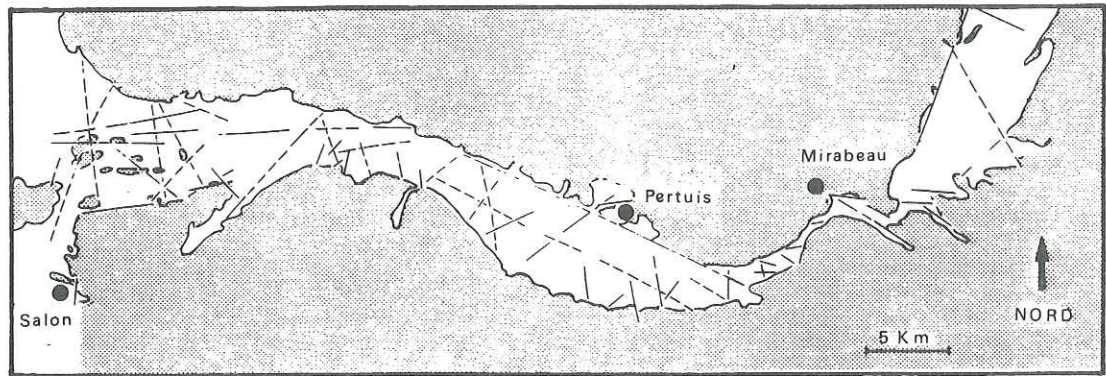
APPORTS NEOTECTONIQUES NOUVEAUX

◆ Les méthodes

Le traitement et l'interprétation de l'imagerie LANDSAT sont mentionnés dans cet article uniquement pour signaler l'identification de linéaments au niveau de terrains quaternaires en Basse Durance ; l'analyse de l'imagerie satellitaire SPOT, sous l'angle néotectonique, étant actuellement en cours en ce qui concerne la Moyenne Durance.

La méthode des nivellements comparés développée par FOURNIGUET (1977) a pour principe de comparer entre eux deux nivellements successifs, à savoir NGF (1890-1910) et IGN (1964-1980), effectués dans une région donnée, suivant des cheminements identiques, en utilisant les mêmes repères. La comparaison des nivellements portant sur les différences d'altitude de 2 repères consécutifs et non pas directement sur les altitudes des repères. Les premiers essais de comparaison sur les données couvrant l'ensemble du Sud-Est de la France ont permis à FOURNIGUET (1977) de localiser différents mouvements verticaux actuels (anomalie ponctuelle, panneau basculé, affaissement...), probablement d'origine tectonique. La superposition des résultats de FOURNIGUET avec la carte des accidents majeurs actifs au Mio-Plio-Pléistocène, a amené COMBES (1984) à conclure à une poursuite de l'activité tectonique du Mio-Plio-Pléistocène à l'Actuel (fig.3). Selon le même principe général initial, la méthode de FOURNIGUET (1977) a ultérieurement été reprise et améliorée par son auteur (1987), permettant une meilleure précision des résultats. Les nivellements comparés suivant cette nouvelle méthode ont alors été réinterprétés en Provence.

L'analyse morphostructurale, quant à elle, consiste, en particulier, à tracer, à partir des cartes topographiques au 1/25 000ème et au 1/50 000ème, des cartes d'isohypses des surfaces récentes, de façon à mettre en évidence des irrégularités (PRUD'HOMME, 1972 ; FREYTET et al, 1985 ; DEFFONTAINES, 1986), classées en différents types.







- | | | | |
|---|------------------|---|----------------------------|
|  | Quaternaire |  | : Linéaments bien visibles |
|  | Anté-Quaternaire |  | : Linéaments peu visibles |

Figure 2 - LINEAMENTS VISIBLES AU NIVEAU DES TERRAINS QUATERNAIRES DE LA BASSE DURANCE D'après TERRIER et GERAUD (1988).

Linéaments relevés sur les images LANDSAT 1989 à 1/250 000 et/ou TM à 1/100 000

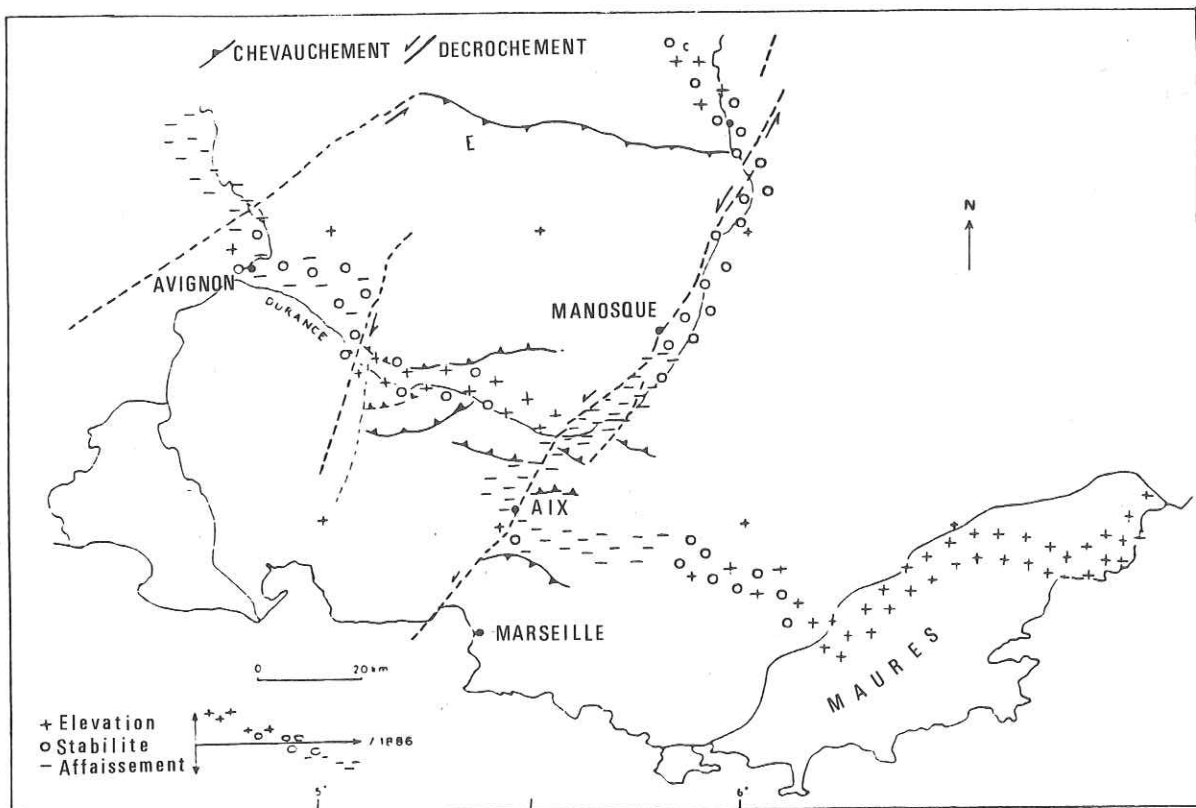


Figure 3 - CARTE INTERPRETATIVE DES MOUVEMENTS VERTICAUX DE LA PROVENCE DEDUITE DES PROFILS DE NIVELLEMENTS d'après FOURNIGUET (1977) in COMBES (1984)

Les études tout à fait classiques de terrain ont bénéficié, quant à elles, de certaines conditions favorables : notamment en Moyenne Durance, la mise à jour d'affleurements frais sur le tracé du nouveau tronçon d'autoroute Manosque-Sisteron et en Basse Durance, de l'agrandissement d'un front de taille de carrière (site de Grand-Vallon).

◆ Les résultats

Au point de vue de la méthodologie générale, il est important de préciser qu'il n'est pas accordé un même poids à toutes les données néotectoniques recueillies. Ainsi, les déformations d'ordre tectonique observées à l'affleurement sont classées au titre de preuves, tandis que les différentes anomalies mises en évidence, d'une part par la comparaison des nivellements et d'autre part par l'étude morphostructurale, sont classées au titre d'indices, et ce, tant que leur origine strictement néotectonique n'est pas démontrée. Cette remarque prendra toute sa valeur dans la discussion concernant la notion de faille active en fin d'article.

L'ensemble des preuves et des indices de déformation quaternaire collectées a conduit à deux types de résultats fondamentaux :

- a) la preuve de l'activité quaternaire des deux accidents décrochants majeurs de la Provence occidentale est apportée. L'existence de nombreux indices appuie cette constatation ;
- b) des traits néotectoniques nouveaux sont révélés.

Ces résultats sont illustrés par les quelques exemples présentés ci-dessous :

■ La faille de Salon-Cavaillon :

Celle-ci correspond à un accident décrochant dextre, d'orientation subméridienne qui s'étend depuis le Mont Ventoux jusqu'au Golfe de Fos et très vraisemblablement au-delà en mer (Fig. 4), soit au moins sur 100 km

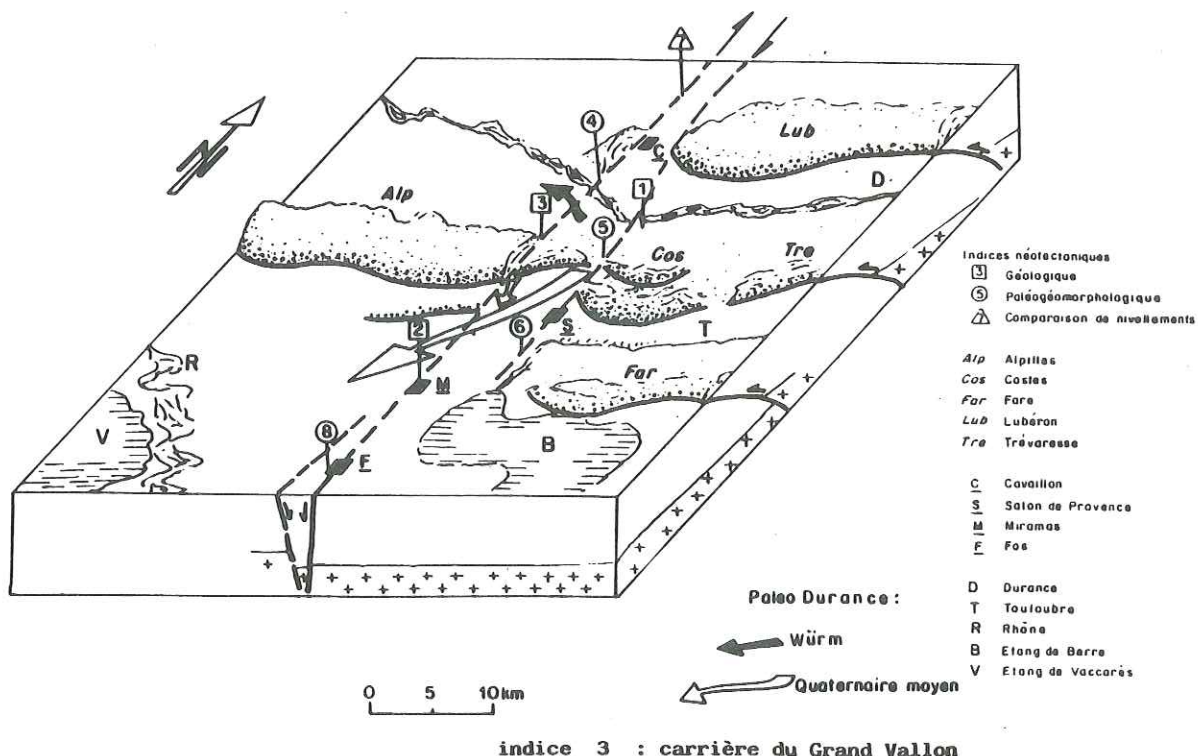


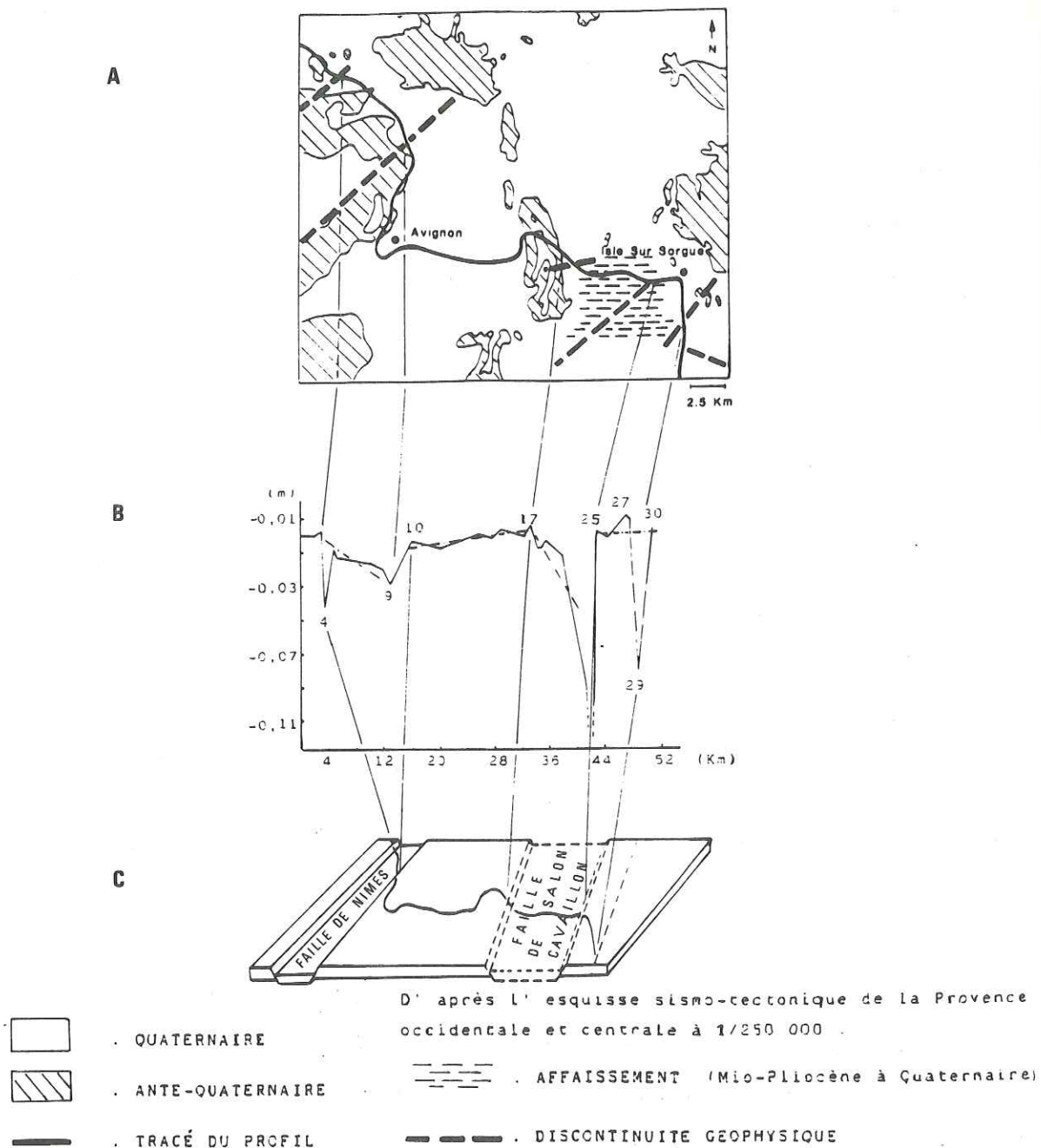
Figure 4 - LA FAILLE DE SALON-CAVAILLON DANS SON CONTEXTE STRUCTURAL

D'après Groupe RÉVINE (Soumis à Tectonophysics)

de longueur. Cet accident profond qui affecte très probablement la croûte jusqu'au Moho est un accident ancien qui a contribué en particulier au contrôle de la sédimentation mésozoïque et cénozoïque de la Provence (BAUDRIMONT et DUBOIS, 1977). Cependant, le tracé de ce trait structural majeur est mal défini en surface. Il est, en effet, masqué par des formations récentes de la basse Durance et de la Crau et doit correspondre très probablement à un système de failles subparallèles plutôt qu'à un accident unique. Une activité sismique relativement importante, tant historique (avec plusieurs séismes d'intensité au moins égale à VI, 1731, 1763, 1769, 1863, 1887, 1935) qu'instrumentale est corrélable à ce système.

Figure 5 - REGION D'AVIGNON : COMPARAISONS DES NIVELLEMENTS et INTERPRETATIONS

- A - Localisation du profil 166 (repères 1 à 30) et des éléments corrélables
 B - Profil de comparaison correspondant à cette partie du tracé
 C - Bloc diagramme interprétatif
 D'après TERRIER et GERAUD (1988)



Par ailleurs, un certain nombre d'indices de déformations récentes existe (Fig.4). Une synthèse des informations disponibles a été réalisée dans le cadre de l'élaboration du P.E.R. de Salon-de-Provence (SAURET et TERRIER, 1988). Comme cela était déjà supposé antérieurement, les dérivations successives des cours de la Durance rissien et würmien au niveau des seuils d'Eyguières et de Lamanon peuvent être raisonnablement attribuées au rejeu combiné des failles de ce système et des accidents Est-Ouest des Costes et des Alpilles (indice 5, fig. 4).

Plus au Nord, près d'Isles-sur-Sorgues, la comparaison des nivellements selon la méthode FOURNIGUET (1987) indique la présence de 2 anomalies ponctuelles (indice 7, fig. 4 et 5), associées par TERRIER et GERAUD (1988) au rejeu de la faille de Salon-Cavaillon.

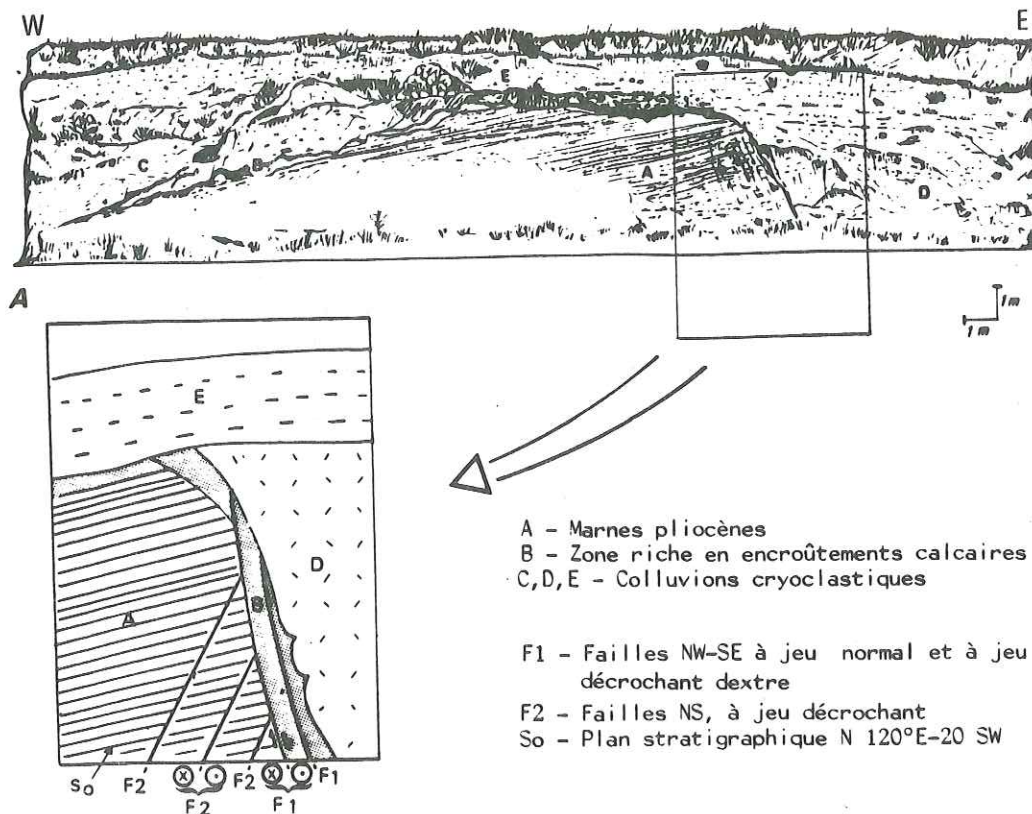


Fig. 6 - CARRIERE DE GRAND VALLON

- a - Vue générale de l'affleurement avant excavation
D'après TERRIER et GERAUD (1988)
- b - Détail du contact de faille mis à jour par l'excavation
D'après TERRIER (1989)

Entre ces deux points d'observation, l'agrandissement du front de la carrière de Grand Vallon (indice 3, fig. 4) a permis à TERRIER (1989), d'attester du caractère tectonique du contact Pliocène inférieur-Würm (*) (fig. 6b), supposé auparavant par TERRIER et GERAUD (1988, fig. 6a). Au niveau de celui-ci, deux directions principales de failles sont mises en évidence : N-S et NW-SE. La direction N-S correspond à un jeu décrochant ; la direction NW-SE indique un jeu normal et décrochant dextre.

Dans la région de Fos, les données d'une campagne géophysique (DELLERY et al, 1964) conduisent à envisager comme probables des rejeux post-miocènes sur des failles subméridiennes (indice 8, fig. 4). Ceci semble confirmer le prolongement sud de l'accident de Salon-Cavaillon déduit jusqu'à présent des seules données concernant le socle anté-triasique.

* Il s'agit de cailloutis cryoclastiques d'âge compris globalement entre 30 000 BP et 10 000 BP (EVIN et al, 1983)

■ La faille de la Moyenne Durance :

Toutes les études convergent pour attribuer à cette faille à une histoire longue et complexe (GIGOT et al., 1975 ; VILLEGGER, 1984 ; ROUSSET, 1986). C'est un accident de socle qui a conditionné l'évolution structurale et sédimentaire de la région depuis au moins le Mésozoïque jusqu'au Mio-Pliocène. Deux types de mouvements le caractérisent :

- . flexure à regard ouest au Mésozoïque (fosse vocontienne) et à l'Oligocène (bassin de Manosque), ou à regard Est à la fin du Miocène (bassin de Valensole),
- . décrochement senestre à l'Eocène et au Mio-Pliocène.

D'un point de vue sismique, la faille de la Moyenne Durance se caractérise par un remarquable alignement de quatre séismes d'intensité au moins égale à VII-VIII (1509, 1708, 1812, 1913).

Les travaux entrepris en Moyenne Durance, dont une synthèse partielle est présentée par TERRIER et LENOTRE (sous presse), permettent de préciser l'évolution récente de cette faille.

On remarque en particulier que de Sisteron à Mirabeau (fig. 7), le nombre d'anomalies ponctuelles déduites de la comparaison des nivellements, nombre rapporté à 100 km de longueur de profil, est de 13,5 pour 100 km. Cette moyenne est très nettement supérieure à la moyenne générale de l'ensemble des profils de la Provence qui est de 6,5 pour 100 km. Selon TERRIER et LENOTRE, il est probable que ces anomalies soient situées au droit de failles élémentaires constituant l'accident de la Moyenne Durance. De même, les différents segments basculés observés à proximité de l'accident sont probablement reliés au rejeu actuel de celui-ci.

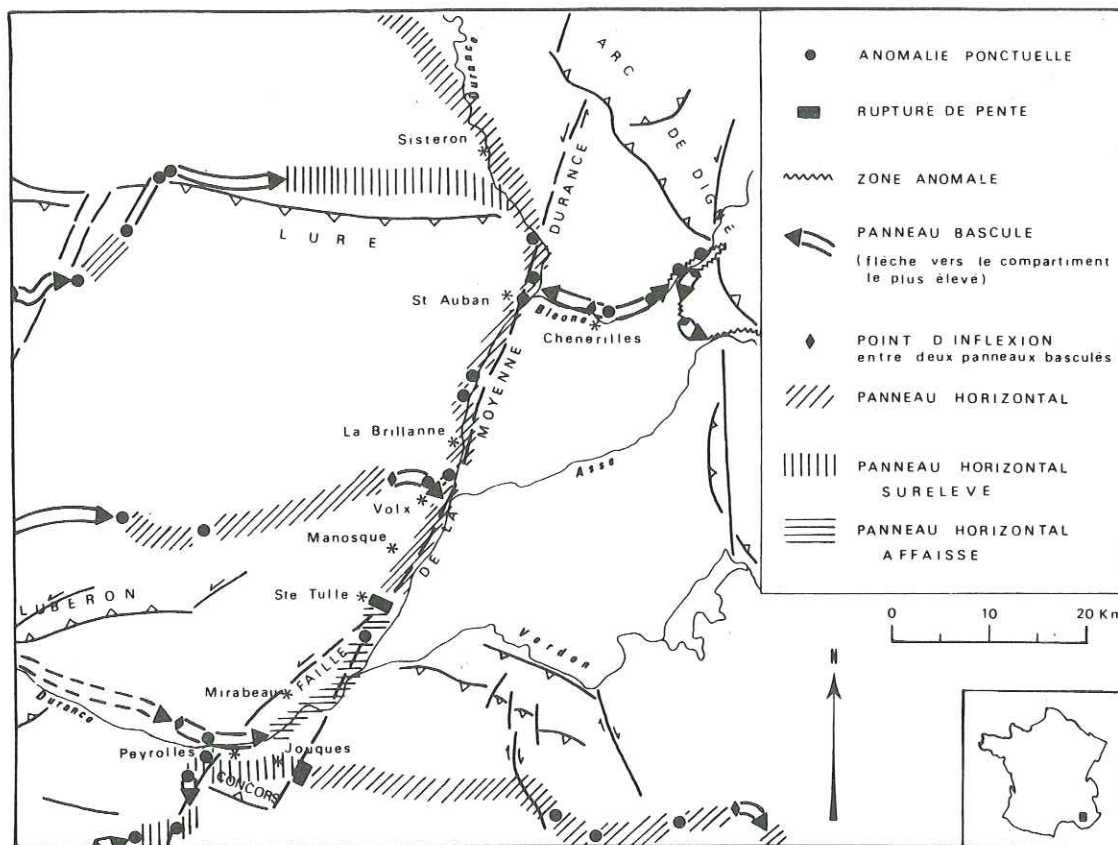


Fig. 7 - MOUVEMENTS VERTICAUX ACTUELS EN MOYENNE DURANCE D'APRES LA COMPARAISON DES NIVELLEMENTS

D'après TERRIER et LENOTRE (à paraître)

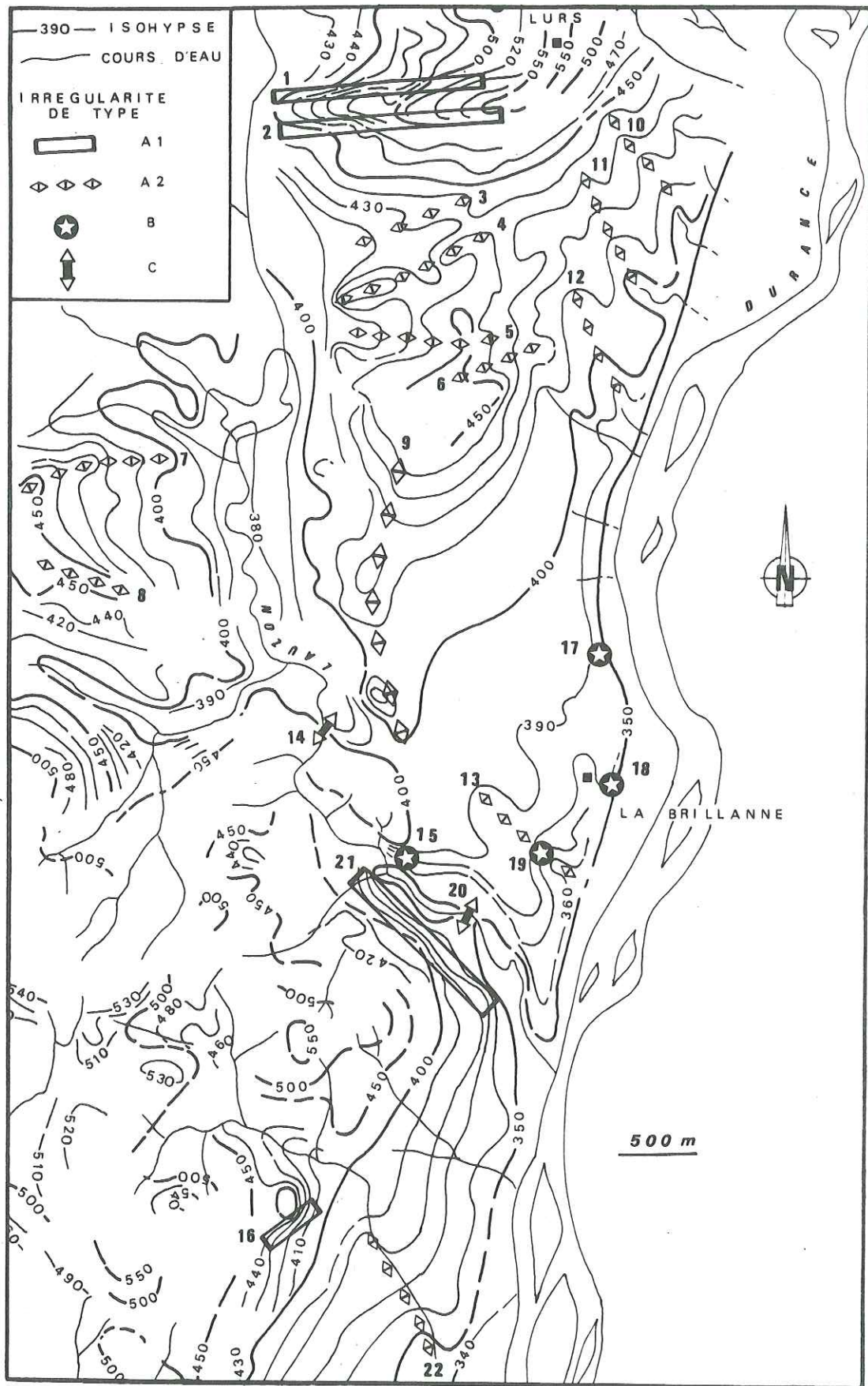


Figure 8 A - CARTE DES ISOHYPSES DES SURFACES ET DES IRREGULARITES
 AU NORD DE MANOSQUE (D'après TERRIER et LENOTRE, à paraître)

N.B. Les irrégularités en corrélation directe avec les incisions
 du réseau hydrographique (cartes IGN) ne sont pas mentionnées.

TYPES D'IRREGULARITES:	numéro	type	interprétation
<u>A: orientation de type</u>			
a1-inflexion	1	a2	S1
a2-resserrement	2	a2	S1
<u>B: point de resserrement</u>			
<u>ou de divergence</u>	3 à 7	a1	S1
<u>C: non conformité avec</u>			
<u>le réseau hydrographique</u>	8	a1	L,S(?)
	9	a1	M2,S2(?)
	10 à 13	a1	M2
<u>INTERPRETATION</u>			
<u>L: limite lithologique</u>	14	c	M3
<u>S: limite structurale</u>	15	b	L,S2(?)
s1-plis	16	a2	L
s2-faille	17	b	S2,N
<u>M: morphologie</u>			
m1-emboîtement de 2	18	b	M1,S2,N
terrasses alluviales	19	b	S2,N
m2-incision du réseau	20	c	S2(?),N
hydrographique	21	a2	S2(?),N
m3-surimposition ou	22	a1	S2(?),N
antécédence du réseau			
<u>N: hypothèse néotectonique</u>			

Figure 8 B - TABLEAU RECAPITULATIF DES IRREGULARITES OBSERVEES,
DE LEUR TYPE ET DE LEURS INTERPRETATIONS

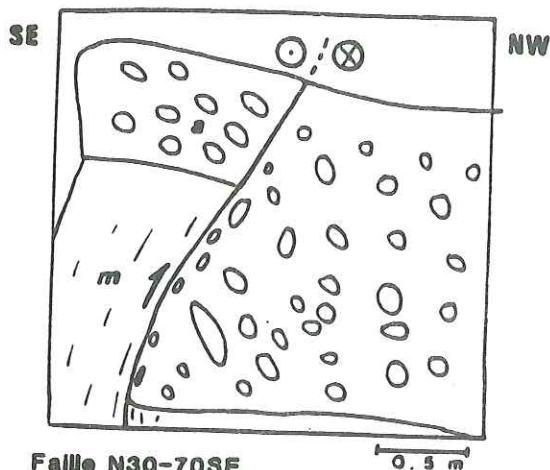
D'après TERRIER et LENOTRE (à paraître)

L'analyse morphostructurale d'une portion de l'accident de la Moyenne Durance au Nord de Manosque (fig. 8) permet de mettre en évidence diverses anomalies dont quatre (17 à 20) sont interprétables en termes d'indices néotectoniques et deux exigent une étude plus approfondie mais dont il n'est pas exclu qu'elles représentent l'expression en surface de déformations souples ou cassantes plus profondes.

Les relevés de terrain réalisés le long du tracé de l'autoroute de Manosque à Sisteron ont conduit à observer à La Brillanne, dans le secteur même de l'étude morphostructurale, un contact faillé entre des marnes datées du Miocène moyen et des alluvions d'âge Riss (indice 17, fig.8 et, fig.9). La déformation analysée au niveau de ce contact correspond à un jeu senestre à composante inverse. Cette déformation attribuable au rejeu d'une des failles constituant le système faillé de la Moyenne Durance est compatible avec une direction de compression d'orientation subméridienne.

♦ L'analyse critique de données bibliographiques (SAURET, 1988 et SAURET et TERRIER, 1988) a permis de préciser les caractéristiques néotectoniques de secteurs jusqu'alors mal connus.

Au Nord de l'Etang de Berre, une "flexure" dans les cailloutis cryoclastiques du glacis würmien de Coudoux (fig. 10), décrite par GABERT (1965) et confirmée par cet auteur (communication orale 1987) a conduit à reconsidérer l'accident de la Fare qui borde, au Sud, le massif du même nom. Cette faille inverse, à vergence sud, a pu être ainsi assimilée à celles du même type que la faille de la Trévaresse, située 10 km au Nord. ✓



Faille N30-70SE

a alluvions du Riss récent

m marnes sableuses serravallennes

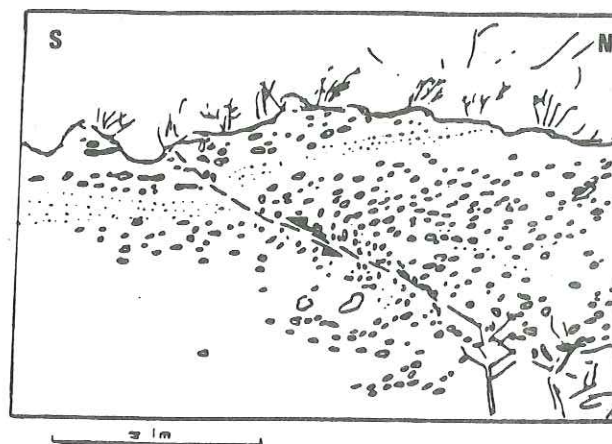


Fig. 10 - LE PLI FAILLE DANS LE TALUS DU GLACIS WÜRMIEN DE LA FARE-COUDOUX

D'après photo GABERT (1965)
in SAURET (1988)

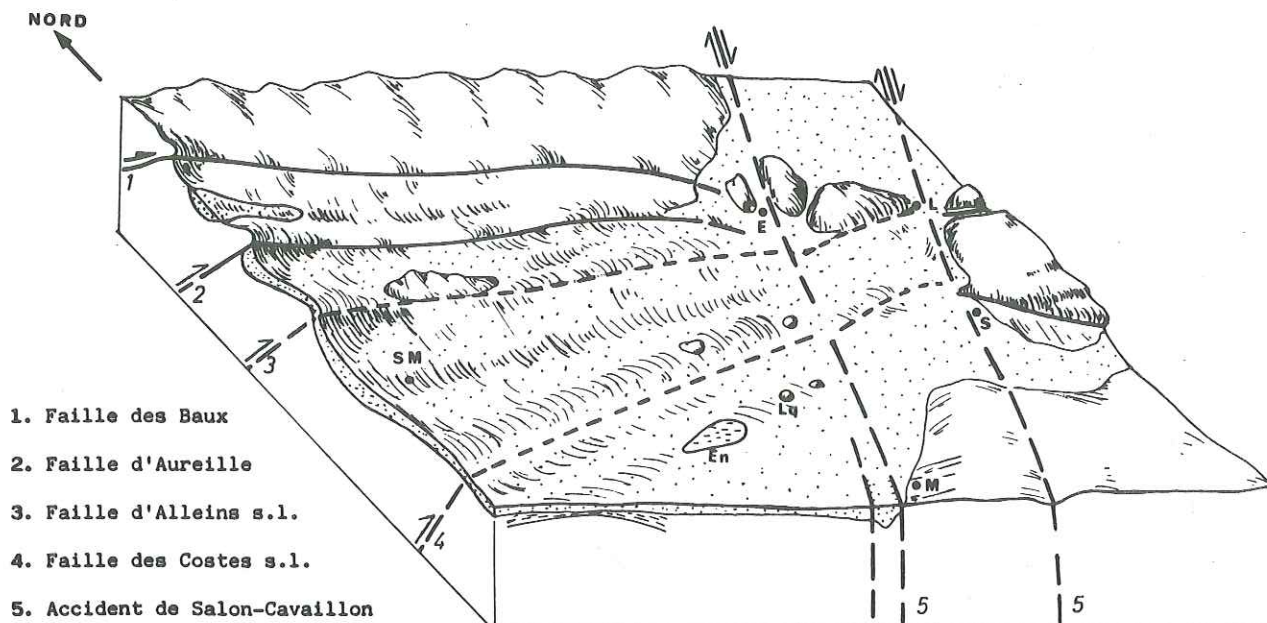
Fig. 9 - JEU POST RISSIEN DE LA FAILLE DE LA MOYENNE DURANCE (LA BRILLANNE)

d'après TERRIER et LENOTRE (à paraître)

La réinterprétation des données néotectoniques du secteur Nord-Est de la Crau a permis d'identifier dans ce secteur deux types de structures : les accidents inverses E-W (failles des Baux, d'Aureille, d'Alleins, des Costes et de la Fare) et les accidents décrochants N-S correspondants au système de failles subméridiennes de Salon-Cavaillon.

Il est ainsi permis d'envisager une évolution tectonique récente du Nord-Est de la Crau, suivant une hypothèse nouvelle privilégiant le rôle des structures compressives (type anticlinal-synclinal), d'orientation globalement Est-Ouest et, situées sous la Crau. Ce schéma a l'avantage d'expliquer les dérivations successives de la Durance depuis le Pliocène jusqu'au Würm (fig.11) de manière plus cohérente qu'un régime distensif, classiquement envisagé (GOUVERNET, 1957; COVA, 1965 ; COLOMB et ROUX, 1978).

En résumé, il apparaît, d'une part que l'activité tectonique quaternaire des deux accidents décrochants majeurs de la Provence occidentale, jusqu'à présent présumée, est aujourd'hui prouvée et d'autre part, que des indices d'activité existent en dehors des portions d'accident considérés comme actifs et ce notamment sur leurs prolongements sud où la sismicité et les marqueurs récents sont peu représentés. On notera enfin que cette activité quaternaire des accidents suivant des modalités identiques à celles du Miocène (contrainte maximale horizontale et subméridienne) était déjà, d'une certaine façon, confirmée par les relevés microtectoniques réalisés dans les alluvions et colluvions quaternaires de la Basse Durance (ARLHAC et al., 1987).



 Villafranchien et Quaternaire
  Pliocène
  Anté-Pliocène

E : Eyguières ; M : Miramas ; S : Salon ; SM : Saint-Martin-de-Crau ;
 En : Etang d'Entressen ; ô : Bergerie de Carougnade ; Lq : Etang de Luquier

Figure 11 - BLOC DIAGRAMME INTERPRETATIF ET SCHEMATIQUE
DU NORD-EST DE LA CRAU

D'après SAURET et TERRIER (1988)

REMISE A JOUR DU BILAN SISMOTECTONIQUE

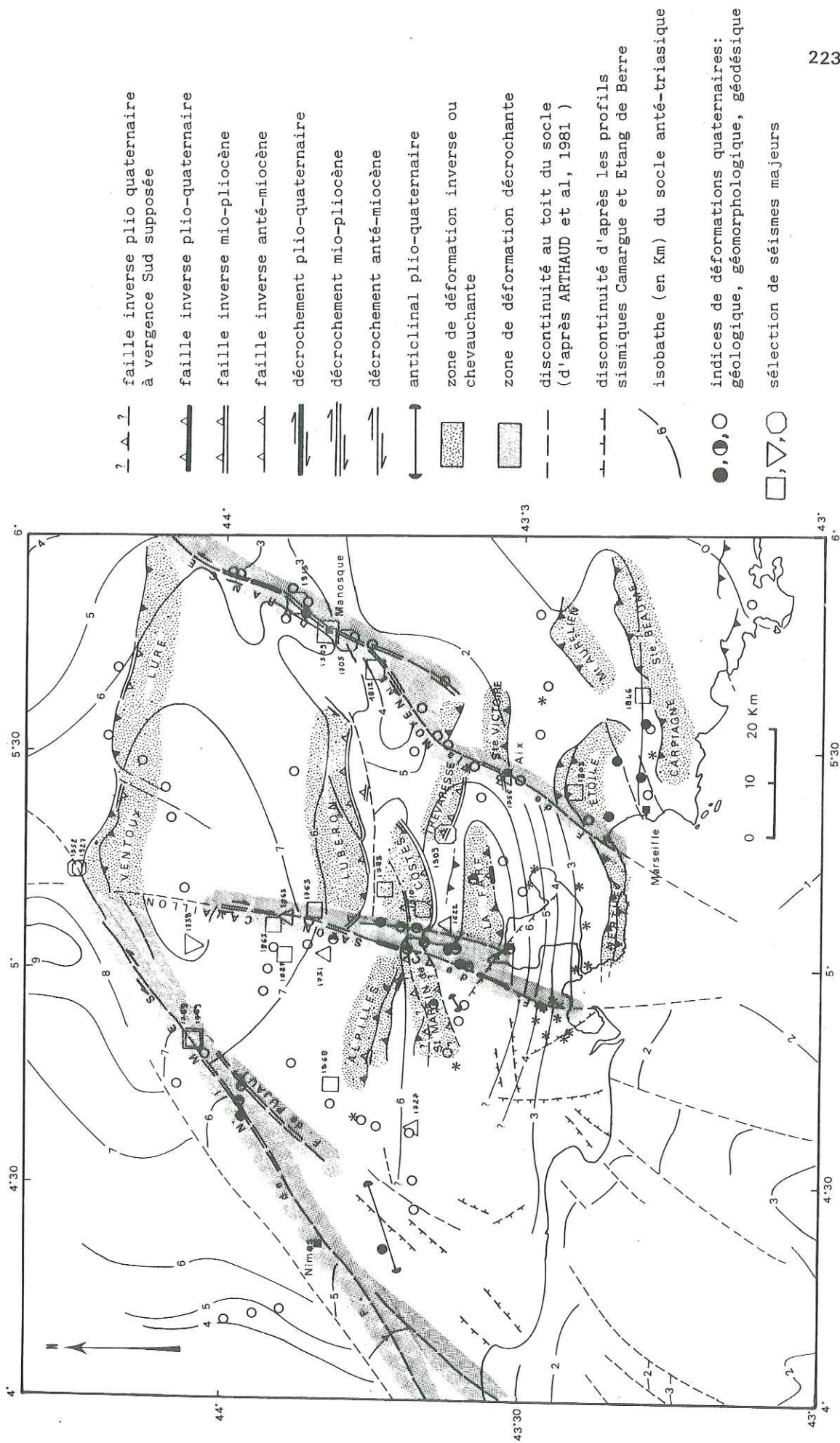
Conjointement aux apports néotectoniques nouveaux présentés ci-dessus, la connaissance du contexte sismotectonique de la Provence a largement bénéficié de la révision du fichier de sismicité historique (BRGM/CEA/EDF) et des données instrumentales acquises en permanence par le réseau national du LDG, du CEA et le réseau local Provence (IPG Strasbourg). Ce dernier contraint particulièrement bien la faille de la Moyenne Durance et les structures compressives du Sud de la Provence.

A la demande de la Direction Régionale de l'Industrie et de la Recherche, les études d'aléa sismique, réalisées sur les sites des industries à haut risque des Bouches-du-Rhône, ont conduit le BRGM et le CEA à réviser le schéma sismotectonique de la Provence établi par COMBES (1984, fig.1) et à proposer un schéma sismotectonique nouveau, qui tient compte de l'avancement des plus récents travaux (COMBES et al, sous presse, fig.12).

Parallèlement, une classification des failles majeures de la Provence occidentale est proposée. Elle repose sur les critères suivants :

- Nature et extension des accident dans les niveaux les plus caractéristiques de l'écorce terrestre : discontinuité affectant ou non le Moho, profondeur du socle paléozoïque, épaisseur du Trias, épaisseur de l'ensemble de la couverture sédimentaire ; orientation, longueur, pendage, extension "verticale", type de mouvement.

Figure 12 - SCHEMA SISMOTECTONIQUE GLOBAL DE LA PROVENCE OCCIDENTALE d'après COMBES et al. (soumis à Tectonophysics)



- Cinématique et dynamique récente des failles, fonction :
 - a) de la nature et de la chronologie des mouvements néotectoniques (âge et type des déformations les plus récentes),
 - b) des corrélations avec des indices néotectoniques de type géomorphologique ou géodésique.
- Sismicité associée (historique, instrumentale).

Cette classification s'appuie sur les similitudes ou, au contraire, les différences pouvant apparaître entre les accidents géologiques majeurs afin d'argumenter valablement les hypothèses pouvant être émises sur leur activité sismique potentielle (relatives aux transferts d'épicentre entre ces structures). Finalement, elle distingue cinq types de structures géologiques en Provence occidentale, à chacun desquels est associé de façon déterministe, un séisme maximal historiquement vraisemblable (S.M.H.V.), caractérisé par son intensité, sa magnitude, la profondeur de son foyer (et corrélativement, l'extension maximale de la source sismique associée), le type de mécanisme à la source et un modèle spécifique d'atténuation de l'énergie rayonnée depuis la source. Les cinq types retenus sont les suivants :

a) Les structures compressives septentrionales auxquelles est associé un séisme maximal du type de celui du 11/6/1909 (intensité VIII-IX, magnitude voisine de 6.0, profondeur focale 3 km) : accidents des Costes, de la Trevasse, des Alpilles, du Luberon, de la Fare, de la Ste Victoire, du Ventoux et de Lure.

La faille de Saint-Martin-de-Crau est associée à ce groupe même si son expression morphologique en surface diffère nettement de celles des autres structures qui s'y rapportent.

b) Les structures compressives méridionales sont associées à un séisme du type de celui du 12/12/1846 (intensité VI, magnitude voisine de 4.5, profondeur du foyer 2 km) ; il s'agit des accidents de l'Etoile, de la Nerthe, de la Ste Baume, d'Olympe-Aurélien et de Carpiagne.

c) Les systèmes de décrochements senestres NE-SW ; ils sont associés à un séisme maximal du type de celui du 13/12/1509 ou du 17/08/1708 (intensité VIII, magnitude 5.0 à 5.5, profondeur du foyer 3 km). Ils regroupent les failles de la Moyenne Durance et de Nîmes.

d) Le système subméridien de failles de Salon-Cavaillon ; le séisme maximal correspondant est représenté par la secousse du 12/07/1763 (intensité VII, magnitude 4.5 à 5.0, profondeur du foyer 3 km).

e) Les failles NW-SE de l'étang de Berre et du système camargais : ces accidents ne sont pas associés à une sismicité de niveau significatif. Notons que, en outre, ils se distinguent des autres types de structures par leurs caractéristiques structurales et néotectoniques.

APPLICATIONS AUX ETUDES D'EVALUATION DE L'ALEA SISMIQUE

Si la volonté de diminuer le risque sismique en Provence a conduit à une amélioration du bilan néotectonique de cette région, en retour, le génie parasismique a largement bénéficié de l'avancement de ces recherches tant en ce qui concerne les "ouvrages courants" (soumis aux règles parasismiques P.S. 69/82)*

* celles-ci étant en cours de révision : Association Française de Génie Parasismique 90 (à paraître)

que les "ouvrages à haut risque" pour lesquels un dommage même mineur en cas de secousse, peut avoir pour la population ou l'environnement des conséquences catastrophiques (cas des industries nucléaires et chimiques) et qui exigent donc des études particulières.

♦ La loi du 13 juillet 1982 sur l'indemnisation des victimes des catastrophes naturelles oblige l'Etat à réaliser des Plans d'Exposition aux Risques (P.E.R.), prenant en compte, à l'échelle de la commune, les inondations, les glissements de terrain, les séismes et, en montagne, les avalanches. Vingt et une communes des Bouches-du-Rhône ont fait l'objet de P.E.R. sismiques, suivant une méthodologie bien élaborée (BARD et al, 1986), la phase technique (ou microzonage) ayant été menée conjointement par le BRGM et le CETE Méditerranée (Groupe P.E.R., 1986, 1987, 1988). A ce niveau, le problème de la prise en compte des failles actives a été posé (SAURET, 1988, GODEFROY et al., sous presse). Vu le niveau de protection recherché pour les "ouvrages courants" (protection statistique) et étant donné la méconnaissance des phénomènes de rupture de surface et de champ proche, aucune interdiction de construire n'a été prescrite sur le tracé et aux abords immédiats de failles actives. Toutefois, le risque a été affiché dans chaque rapport technique et lorsque la faille pouvait être associée à des phénomènes d'amplification spécifique du mouvement sismique du sol (cas des reliefs de faille notamment), une zone particulière a été individualisée.

A titre d'exemple, la figure 13 présente les P.E.R. sismiques des communes de Salon-de-Provence et de Pelissanne (Groupe P.E.R. 1987, 1988). Sur les 11 zones identifiées sur la commune de Salon de Provence, l'une d'entre elles a été déterminée à partir des données néotectoniques (zone 11). Cette zone correspond aux séries miocènes verticalisées au front de l'accident chevauchant mio-pliocène des Costes. Elle est associée à une zone d'amplification du coefficient δ (*) directement liée au relief accusé, associé au front chevauchant. Par ailleurs, il est intéressant de signaler qu'une zone (la zone 8) a pu être délimitée à partir des données paléogéomorphologiques rassemblées lors de l'étude néotectonique. Elle correspond au thalweg durancien würmien.

♦ A l'initiative du Ministère de l'Environnement, il a été demandé aux Directions Régionales de l'Industrie et de la Recherche d'évaluer les risques sismiques et ses conséquences possibles sur les installations industrielles soumises à la directive européenne SEVESO (**). Le BRGM et le CEA ont procédé à l'évaluation de l'aléa sismique sur les sites industriels des Bouches-du-Rhône, selon une approche déterministe, qui respecte les principes de la règle fondamentale de sûreté, RFS-I 2c (1981), édictée pour les installations nucléaires, comme l'a préconisé le Ministère de l'Environnement.

Le schéma sismotectonique établi (fig. 12) ainsi que la classification (en cinq types de structures) des différentes sources sismiques identifiées pour la Provence occidentale ont directement servi de base à cette évaluation. A chacun de ces types de structures est associé un séisme historique maximal. La démarche retenue a consisté à admettre un aléa équiprobable, en termes de secousse maximale vraisemblable, sur toutes les failles classées dans la même catégorie de structures sismogènes. Ce type d'approche a ainsi permis la détermination fiable de l'agression sismique à prendre en compte sur chaque site, suivant une approche déterministe respectant la spécificité de chacune de ces sources.


*le coefficient δ est l'un des coefficients spécifiques à prendre en compte par les architectes (Règles parasismiques PS 69/82)


**Directive 82/501/CEE et du Conseil des Communautés Européennes du 24 juin 1982 concernant les risques d'accidents majeurs de certaines activités industrielles



VALEURS DES COEFFICIENTS δ POUR LES ZONES 8 et 11 DU MICROZONAGE DE SALON-de-PROVENCE

 faille des Costes (tracé connu en surface)

 zone 11 (amplification du coefficient δ dû à la présence de la faille; cf. tableau)

 zone 8 (amplification liée à la présence de l'ancienne vallée de la Durance (Würmienne), enfouie sous des alluvions récentes; cf. tableau).

(1) à (12) : autres zones individualisées

ZONE 8		
Mode de fondation	T(s)	
	<0,5	>0,5
(1)	1,25	1,0
(2)	1,10	0,9
(3)	1,10	0,9
(4)	1,15	1,0

T(s) : période de réponse

Mode de fondation :

ZONE 11	
Mode de fondation	T(s)
	quel que soit T
(1)	1,50
(2)	1,50
(3)	
(4)	

(1) Semelles superficielles (2) semelles sur puits

(3) Radier

(4) Pieux appuyés sur pointe

Figure 13 - MICROZONAGE DES COMMUNES DE SALON-DE-PROVENCE ET DE PELISSANNE
(Bouches-du-Rhône, France)

D'après Groupe P.E.R. (1987, 1988)

NOTION DE FAILLE ACTIVE APPLICATION A LA PROVENCE

En domaine intracontinental de sismicité considérée comme faible à modérée (cas d'une grande partie de l'Europe de l'Ouest), les relations tectonique-sismicité ne sont pas toujours bien établies, ce qui rend difficile l'application des définitions de "faille active", essentiellement élaborées en

Californie dans un contexte sismotectonique fondamentalement différent (frontière de plaques, marqueurs en néotectonique clairement exprimés, sismicité forte). Cette difficulté a, récemment, conduit COMBES et GOULA (1988) à développer une méthode apparemment plus appropriée, basée sur le zonage tectonique, définissant un certain nombre de zones homogènes du point de vue géologique et en tout point desquelles, l'évènement sismique le plus important est supposé pouvoir se produire.

Toutefois, le groupe REGINE, composé d'experts du BRGM, du CEA et d'EDF, confrontés à ce type de problèmes dans la conception des grands ouvrages, a décidé de mener une réflexion approfondie sur le thème des failles situées en contexte intraplaque, afin d'harmoniser la terminologie. La classification des failles actives proposée (groupe REGINE, sous presse) tient compte de 2 types de critères principaux :

- la présence ou l'absence de sismicité, en tant qu'expression manifeste de leur activité,
- l'observation ou non d'une trace de rupture à la surface.

La faille de la Moyenne Durance et la faille de Salon-de-Provence sont citées dans cet article comme exemples de référence du fait, notamment, de la sismicité et des déformations du Pléistocène supérieur associées (en particulier celles mises en évidence par TERRIER et GERAUD, 1988, TERRIER, 1989 ; TERRIER et LENOTRE, sous presse).

De plus, la faille de Salon-Cavaillon illustre à la fois la notion de "faisceau d'indices", (tels qu'ils ont été recensés sur son tracé par SAURET et TERRIER, 1988) et les possibilités pour un accident :

- d'être constitué de plusieurs segments de différents "niveaux d'activité" (segment nord "actif", segment sud "potentiellement actif") ;
- d'évoluer d'une catégorie à l'autre de la classification, en fonction de la découverte d'affleurements nouveaux de terrains pléistocènes déformés (cas du front de la carrière de Grand Vallon avant et après excavation).

CONCLUSION

Cet article confirme l'intérêt des études néotectoniques. En particulier, il est montré que, même en zone réputée de sismicité faible à modérée, des déformations quaternaires peuvent être mises en évidence et corrélées avec des failles sismiquement actives. Dans ce cas, l'approche de terrain classique a bénéficié de méthodes d'investigation "indirectes" (comparaison de nivellements, étude morphostructurale) qui ont ainsi, montré leurs avantages (mises en évidence d'indices néotectoniques) mais aussi leurs limites (incertitude sur les causes des mouvements). Gageons que les méthodes les plus modernes de métrologie utilisées sur le réseau géodésique local de la Moyenne Durance et de la Trevaresse (IGN/IPG Paris/CEA), alliées à une réitération des profils de nivellement de l'IGN, permettront à moyen ou long terme d'obtenir une quantification des déformations horizontale et verticale.

D'ores et déjà, l'établissement d'un nouveau bilan sismotectonique représente un atout notable puisqu'il est synonyme d'une évaluation de l'aléa sismique plus fiable, tant à l'échelle locale qu'à l'échelle régionale. Dans un tel cadre, des études néotectoniques à caractère fondamental nécessairement marqué, ont montré qu'elles pouvaient appuyer efficacement deux types d'études techniques issues, l'une d'une loi nationale (les P.E.R. pour les communes), l'autre d'une directive européenne (les études de dangers sur les sites industriels à haut risque) qui font actuellement de la Provence une région pilote en France dans le domaine de la protection parasismique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASSOCIATION FRANCAISE DE GENIE PARASISMIQUE, 1990 - Recommandations pour la rédaction de règles relatives aux ouvrages et installations à réaliser dans les régions sujettes aux séismes. Document D.T.U. (à paraître).
- ARLHAC P., GERAUD Y., RAYNAUD S., TERRIER M., 1987 - Néotectonique dans les terrains quaternaires de la Basse Durance (France) : premiers résultats - C.R. Acad. Sc., t. 304, série II, n°16.
- BARD P.Y, DURVILLE J.L., MENEROUD J.P., MOUROUX P., 1986 - Plan d'exposition aux risque sismiques. Guide méthodologique pour la réalisation des études techniques - Délégation aux Risques Majeurs, Rapport GST 86 484
- BAUDRIMONT A. F. et DUBOIS P., 1977 - Un bassin mésogéen péri-alpin : le Sud-Est de la France - Bull. Centres Rech. Explor. Prod. Elf-Aquitaine, I, 1, pp. 261-308.
- BRGM/CEA/EDF, 1981 - Carte sismotectonique de la France à 1/1 000 000 et notice - Mémoire du BRGM n°111, 36 p.
- COLOMB E., ROUX R.M., 1978 - La Crau. Données nouvelles et interprétations. Géol. Méditerranéenne, Tome V, n°3, pp. 303-324.
- COMBES P., 1984 - La tectonique récente de la Provence occidentale : microtectonique, caractéristiques dynamiques et cinématiques. Méthodologie de zonation tectonique et relations avec la sismicité - Thèse 3ème cycle, Univ. de Strasbourg.
- COMBES P., GODEFROY P., GOULA X., LEVRET A., SAURET B., TERRIER M. - An example of the contribution of neotectonic date to an engineering geology study : the assessment of seismic hazard at the "high-risk" industrial facilities sites of the Bouches-du-Rhône department (France) - Soumis à Tectonophysics.
- COMBES P., GOULA X., 1988 - Contribution à un zonage sismotectonique de la France : Définition des paramètres pour un zonage tectonique, calcul des caractéristiques sismiques pour une évaluation probabiliste de l'aléa sismique. Réunion-débat: Les mouvements sismiques pour l'ingénieur. Saint-Rémy-les-Chevreuses, 16 mars 1988. Ass. Fr. du Génie Parasismique - pp. 320-329.
- COVA R., 1965 - Etude hydrogéologique de la partie septentrionale de la Crau et des reliefs de bordure. Thèse 3ème cycle, Univ. Montpellier, 105 p.
- DAVIDOVICI V. et coll., 1985 - Le Génie parasismique - Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1105p.
- DEFFONTAINES B., 1986 - Proposition d'une méthode géomorphologique permettant une approche de la tectonique en pays tempéré. Exemple d'application : région de Fougères (France) - Rapport BRGM 85 SGN 659 GEO.
- DELLERY B., DUROZOY G., KUCHARSKA J., GOUVERNET C., MARGAT J., 1964 - Etude hydrogéologique de la Crau - Rapport BRGM DSGR 64A49, 201p. et planches.

- EVIN J., MARECHAL J., MARIEN G., 1983 - Lyon natural radiocarbon measurements - *Radiocarbon*, vol. 25, n°1, 1983, p. 59-128.
- FOURNIGUET J., 1977 - Mise en évidence de mouvements actuels, verticaux dans le Sud-Est de la France par comparaison de nivellements successifs. *C.R. somm. Soc. Géol. France*, 5, p. 266-268.
- FOURNIGUET J., 1987 - Géodynamique actuelle dans le Nord et le Nord-Est de la France. Apport des comparaisons des nivellements. *Mémoire du BRGM*, n°127.
- FREYTET P., LEROUGE G., QUENARDEL J.M., BOGDANOFF S., BOUVIER P., COHEN-JULIEN M., LEMAIRE D., ROLIN P., SCHMITT P., 1985 - Esquisse néotectonique des pays limousin, marchois et bourbonnais (Nord du Massif Central français). *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 301, série II, n°15, pp. 1163-1168.
- GABERT P., 1965 - Phénomènes périglaciaires du Quaternaire supérieur et néotectonique dans la région de l'Etang de Berre (Basse-Provence occidentale) - *90ème Congrès des Sociétés Savantes*, t. II, p75-88
- GIGOT P., GUBLER Y., KANDEL J.C., TRIAT J.M., TRUC G., 1975 - Alpes de Provence - Régions Forcalquier, Manosque, Apt, Cavailon - Excursion n°2, *IX Congr. int. Sedim.*, Nice.
- GODEFROY P., MENEROUD J.P., MOUROUX P., PAULY J.C., PEREZ J.L., SAURET B., SEDAN O., TERRIER M. - How taking into account "active faults" in microzonation applied to land-planning and building? The example of the "Risk Exposure Plans" (P.E.R.) established in the Bouches-du-Rhône and Alpes Maritimes french departments. *Soumis à Tectonophysics*.
- GOUVERNET C., 1957 - Histoire géologique de la Crau, in *Sallonensa*, 1er cahier, Salon-de-Provence.
- GRUPE P.E.R. - Plans d'Exposition aux Risques Sismiques - *Rapport BRGM/CETE Méditerranée*, 1986, 1987, 1988.
- PRUD'HOMME R., 1972 - Analyse morphostructurale appliquée à l'Aquitaine occidentale et au Golfe de Gascogne. Définition d'une méthodologie cartographique interprétative. *Thèse d'Etat, Bordeaux I*, 405 p.
- REGINE - Proposal for classification of fault activity in an intraplate collision setting - Definitions and examples. *Soumis à Tectonophysics*.
- REGLE FONDAMENTALE DE SURETE N° I-2c, 1981 - Détermination des mouvements sismiques à prendre en compte pour la sûreté des installations nucléaires comportant un réacteur à eau sous pression. Ministère de l'Industrie, Direction de la qualité et de la sécurité industrielle, Service central de sûreté des installations nucléaires, réf. SIN n° B 5141/81, 1er octobre 1981.
- REGLES PARASISMIQUES, 1969 - Revisées 1982 et annexes 1984 - Document Technique Unifié, Ed. EYROLLES.
- ROUSSET C., 1986 - Le cadre linéamentaire du Sud-Est de la France, à partir d'observations nouvelles sur son rôle dans la sédimentation tardi et post-hercynienne - *Bull. Soc. Géol. France* (8), t. II, n°3, p. 487-497.

SAURET B., 1988 - La prise en compte des "failles actives" dans le cadre des P.E.R. sismiques des Bouches-du-Rhône et des Alpes Maritimes - Réunion-débat : les mouvements sismiques pour l'ingénieur - Saint-Rémy-les-Chevreuses, 16 mars 1988 - Ass. Fr. du Génie Parasismique, p. 361-372.

SAURET B., TERRIER M., 1988 - Contribution à l'étude néotectonique de la région nord-orientale de la Crau et de la Basse Durance - Application pratique au Plan d'Exposition aux Risques Sismiques de Salon-de-Provence - Rapport BRGM 88 SGN 313 GEG.

TERRIER M., 1989 - Déformations tectoniques würmiennes aux abords de l'accident de Salon-Cavaillon - Rapport BRGM 89 SGN 092 GEG.

TERRIER M., GERAUD Y., 1988 - Contribution à la connaissance néotectonique de la Provence - Apports de la télédétection, des nivellements, de la microtectonique - Rapport BRGM 88 SGN 388 GEG.

TERRIER M., LENOTRE N. - Reconnaissance néotectonique d'un accident majeur en Provence (France) : Utilisation de la comparaison des nivellements et de l'analyse morphostructurale - Bull. Ass. Fr. Et. Quat. (à paraître).

VILLEGER M., 1984 - Evolution tectonique du panneau de couverture Nord-Provençal (Mont Ventoux, Luberon, Moyenne Durance) - Thèse de 3ème cycle, Univ. de Paris Sud-Orsay, 174 pp.