

# ÉTUDE DU POTENTIEL SISMIQUE et de l'enracinement de la faille de la Moyenne Durance

---

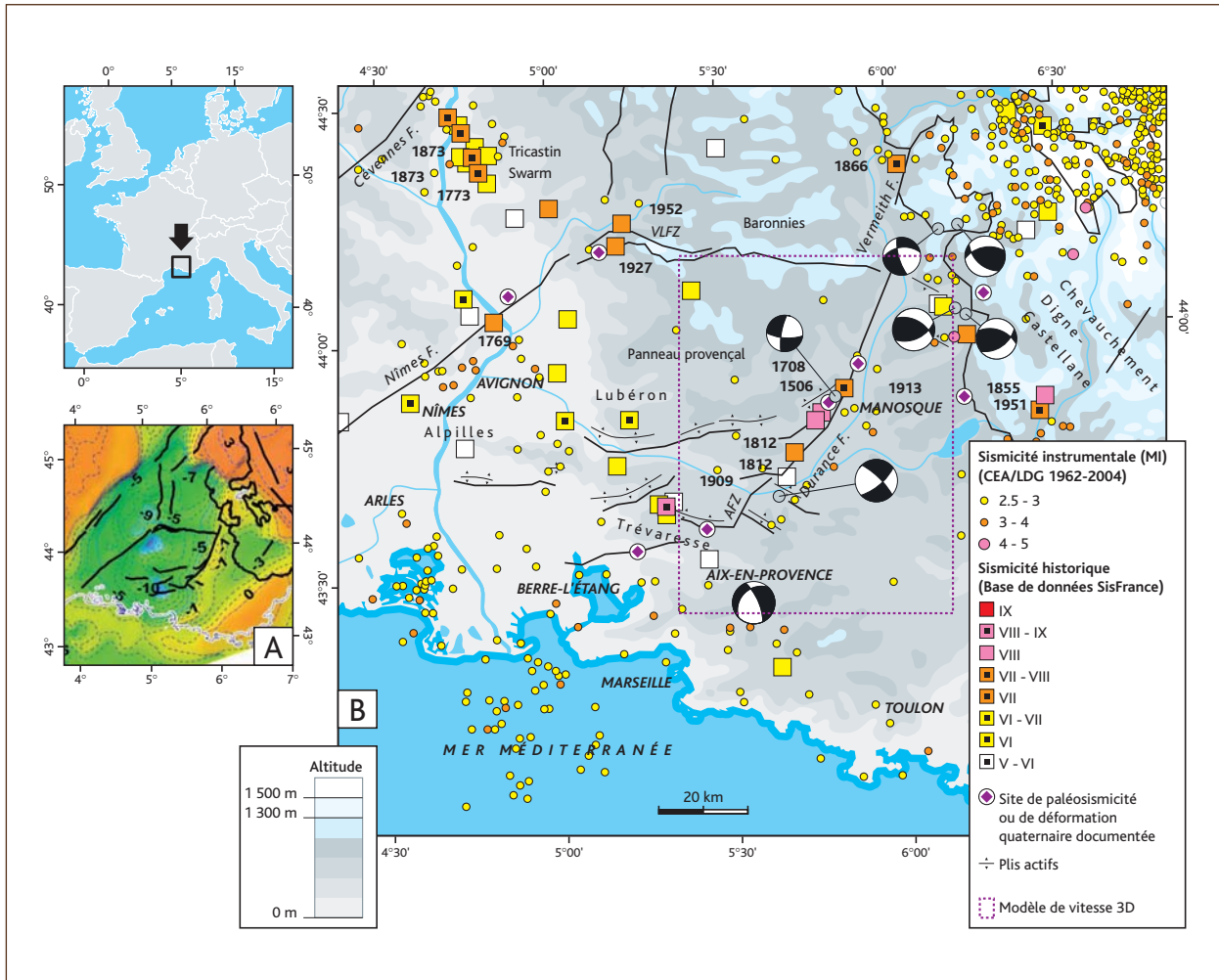
Edward Marc CUSHING, Stéphane BAIZE, Stéphane NECHTSCHHEIN, Pierre DERVIN, Philippe VOLANT  
Bureau d'évaluation des risques sismiques pour la sûreté des installations

---

Le Sud-Est de la France est fréquemment cité comme étant une des régions françaises (hors territoires d'outre-mer) présentant un niveau d'aléa sismique certes modéré, mais non négligeable si l'on en juge à partir des données de sismicité historique (figure 1). Deux séismes ont ainsi eu des conséquences sévères sur les vies humaines et les constructions : le séisme du 23 février 1887 en région Ligure, au sud-est de Nice, et celui du 11 juin 1909 dans les chaînons calcaires de la région de Lambesc et de Salon-de-Provence. Ce dernier a provoqué la mort d'environ 40 personnes.

Outre ces deux séismes d'intensité exceptionnelle, une sismicité régulière de plus faible niveau se produit ; elle s'exprime principalement dans l'arrière-pays niçois et le long d'un axe reliant la région aixoise aux confins des Alpes-de-Haute-Provence et s'étendant jusqu'à la région de la Motte-du-Caire. Sur ce dernier axe, qui correspond à la trace d'une faille très ancienne (300 millions d'années), les séismes modérés se sont produits presque régulièrement depuis le XVI<sup>e</sup> siècle. Cette faille, ou plutôt cet ensemble de failles, est dénommée par les géologues « faille de la Moyenne Durance » (FMD). Si la magnitude des séismes destructeurs de Ligurie et du pays niçois est estimée à environ 6, celles des séismes de la FMD sont plus faibles, inférieures à 5,3. Le système de failles est par ailleurs caractérisé par une microsismicité régulière. Depuis le début des années 90, les géologues ont également mis en évidence, à l'échelle régionale et sur la FMD en particulier, des traces de séismes préhistoriques qui auraient pu atteindre ou dépasser les magnitudes des séismes de Lambesc et de la région Ligure.

Bien que la région du Sud-Est de la France ait déjà été beaucoup étudiée par les sismologues et les géologues, la connaissance des failles et la quantification de leur « potentialité » à générer des séismes restent encore insuffisantes pour définir précisément l'aléa sismique qui leur est associé. Des études approfondies sont actuellement en cours dans la communauté scientifique nationale. L'IRSN y contribue largement depuis une quinzaine d'années, dans le cadre de ses activités de recherche. L'effort a jusqu'à présent été focalisé sur le système de failles de la Moyenne Durance en tant que cas d'étude typique d'une « faille lente en contexte intracontinental ». L'IRSN a installé depuis une dizaine d'années un réseau de mesures sismiques et un ensemble de stations équipées de récepteurs GPS (de façon permanente ou temporaire). Cette instrumentation a pour but de caractériser l'activité des différents segments constituant le système de failles de la FMD. En participant aux réseaux nationaux (géodésique et sismologique) et en développant des réseaux locaux, l'IRSN contribue ainsi à la recherche en tectonique à différentes échelles, tout en poursuivant son objectif principal : l'estimation de l'aléa sismique pour la sûreté des installations à risque.



**Figure 1** Carte générale de la sismicité régionale et des principales failles.

## Caractérisation de l'aléa sismique : les questions posées

Parmi les missions de l'IRSN concernant la sûreté des installations nucléaires, l'une d'elles consiste à évaluer le niveau de protection vis-à-vis de « l'agression externe » que peuvent constituer les séismes. Le risque sismique résulte de la combinaison de l'aléa (mouvement du sol généré par un séisme) et de la vulnérabilité du bâti ou des infrastructures. La pratique réglementaire prévoit que le maintien des fonctions importantes de sûreté d'une installation nucléaire de base en surface, notamment et selon ses caractéristiques précises, l'arrêt sûr, le refroidissement et le confinement des produits radioactifs, puisse être assuré pendant et/ou à la suite de séismes plausibles pouvant affecter le site de l'installation considérée.

La pratique actuelle d'évaluation de l'aléa sismique en France pour les installations à risque (installations nucléaires et chimiques, barrages) est une approche déterministe. Cette approche estime le niveau d'accélération qui serait produit par le plus fort séisme historique ramené au plus près du site, augmenté d'une marge de sécurité. Cette marge est définie en augmentant d'un demi-degré la magnitude du séisme retenu.

D'une manière générale, pour évaluer l'aléa, il est nécessaire d'identifier les « sources » capables de produire les séismes agresseurs et de caractériser leur potentialité. Généralement, dans les zones de faible sismicité où les failles sont mal connues, l'approche déterministe revient à considérer des régions comme sources possibles de séismes. Ces zones sont définies sur la base de leur homogénéité en termes de géologie et de sismicité. Dans les régions un peu plus actives comme la Provence, l'Alsace et les Pyrénées par exemple, les failles sont souvent mieux connues et, surtout, des

séismes importants peuvent être associés (par leur position cartographique) à ces failles-sources.

Il reste qu'estimer l'aléa relève d'une démarche plus large qui nécessite d'apporter des réponses aux questions suivantes :

- quelle est la taille des failles qui peuvent générer des séismes ? La magnitude d'un séisme, et donc sa dangerosité, est directement liée à ce paramètre. La taille et l'extension d'une faille active peuvent être déterminées par la cartographie en surface et la localisation des microséismes, ainsi que par l'imagerie en profondeur. La caractérisation de séismes majeurs « préhistoriques » permet également d'évaluer ce paramètre ;

- avec quelle vitesse se déforme la région affectée par les failles en question ? Il s'agit d'un critère important pour savoir avec quelle périodicité reviendront les séismes majeurs. En plus de la datation des marqueurs géologiques, les mesures géodésiques apportent des données utiles pour évaluer cette vitesse.

Évaluer l'aléa sismique associé à un système de failles actives consiste à répondre aux questions précédentes grâce à la mise en œuvre d'études. Les principaux résultats de celles menées par l'IRSN sur la FMD sont présentés ci-après, avec la description et l'analyse des données récentes concernant la microsismicité, la géométrie en profondeur de la faille, la vitesse de déformation. L'approche correspondante est complémentaire de l'approche réglementaire mentionnée ci-avant et permet d'appréhender l'aléa spécifique d'une faille lente active, pour laquelle la sismicité historique donne accès à une période trop courte pour être représentative de l'historique complet de son activité.

## Taille des failles du système FMD pouvant produire les séismes

### Potentialité de séismes majeurs liée à la connaissance de l'enracinement des failles

La FMD n'est pas une structure unique et continue. Il s'agit d'un système complexe de failles plutôt discontinues, pour la plupart héritées d'épisodes tectoniques anciens, qui s'étend sur 70 km et qui affecte vraisemblablement toute l'épaisseur de la croûte jusqu'à une trentaine de km de profondeur. Ce système de failles a joué un rôle majeur pendant l'ère Mésozoïque (250 à 65 Ma), puis à l'Oligo-Miocène (35 à 15 Ma) lors de la formation des bassins sédimentaires de Manosque-Forcalquier et d'Aix-en-Provence, puis du bassin de Valensole (de 10 Ma à maintenant). À ces époques, les failles ont joué en étirement pendant la formation de la Méditerranée. Par la suite, ces mêmes failles ont joué en raccourcissement pendant les épisodes alpins (Mio-Pliocène, entre 15 et 2 Ma). Elles ont donc été récemment remobilisées en failles inverses ou décrochantes, suivant

leur orientation par rapport à la direction de raccourcissement de la croûte.

Des études de paléosismicité (étude des traces des séismes « préhistoriques » dans les couches géologiques récentes) ont révélé une déformation qui a été interprétée comme la preuve d'un paléoséisme près de Manosque. D'après les auteurs [Sébrier *et al.*, 1997], un déplacement vertical métrique aurait pu se produire pendant un événement sismique entre 27 000 ans BP et 9 000 ans BP. La FMD aurait donc été capable de produire un séisme important, dont la magnitude est estimée entre 6,0 et 6,5 en s'appuyant sur des relations empiriques reliant dimension de la faille et énergie du séisme. Une telle magnitude conduit à admettre que la faille a affecté, lors de ce séisme majeur, non seulement la série sédimentaire superficielle (entre 0 et 5 km), mais aussi une partie profonde jusqu'à 10-15 km. Ceci implique que la FMD serait une faille « enracinée » dans le socle cristallin.

Les interprétations des déformations superficielles sont souvent ténues et leur signification en termes de paléoséismes (surtout de magnitude) est délicate et parfois sujette à caution. Si les déformations observées près de Manosque ne correspondaient pas à une trace de paléoséisme, aucune autre preuve de rupture impliquant largement la croûte n'existerait pour la FMD.

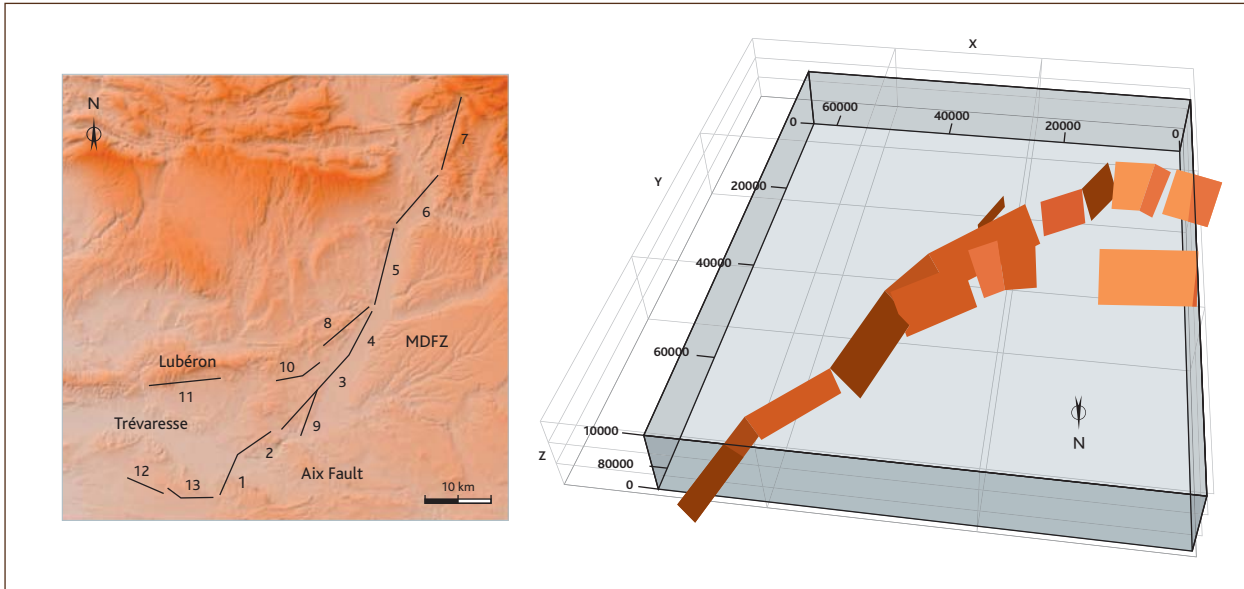
Dans ce contexte, les seules données qui permettent de déterminer les caractéristiques des séismes maximaux sont les observations historiques (1509, 1708, 1812, 1913). Elles conduisent à des magnitudes voisines de 5 et à des séismes de faible profondeur. Dans ce cas, seule la partie supérieure de la croûte (couverture sédimentaire) serait active.

La levée de l'indétermination entre ces deux hypothèses d'activité superficielle ou profonde sur l'enracinement est importante en termes d'aléa sismique puisqu'elle conditionne, *in fine*, le choix des caractéristiques des séismes à prendre en compte pour la FMD.

Deux approches complémentaires ont été mises en œuvre afin d'évaluer les dimensions des sources sismogéniques : d'une part, l'examen des lignes sismiques disponibles pour imager les failles en profondeur, d'autre part, l'étude de l'activité microsismique pour bien localiser en profondeur les zones actives des segments de faille.

### Connaissance de la structure (3D) de la FMD à partir de l'imagerie géophysique (dont données pétrolières)

Les dimensions des sources sont conditionnées par la répartition spatiale des « segments » de faille. Décrire cette segmentation revient donc, dans un premier temps, à détailler les traces des branches de faille qui peuvent être cartographiées en surface. Dans un deuxième temps, il faut évaluer l'extension en profondeur des différents segments de faille qui constituent autant de zones possibles de rupture individuelle. L'aire de chacun de ces segments



**Figure 2** Segmentation de la FMD (détail de la région de Manosque). Segmentation simplifiée en vues 2D & 3D.

conditionne la taille des séismes maximaux susceptibles de se produire sur la faille. On dispose de relations empiriques reliant certains paramètres géométriques tels que la surface de la rupture instantanée lors d'un séisme, la longueur de la trace de la faille en surface pendant cette rupture, à l'énergie du séisme exprimée par sa magnitude. Ces relations ont été établies à partir d'observations géologiques et sismologiques, pendant les trente dernières années, lors de séismes survenus en différentes régions de la planète.

Depuis la fin des années 50, les compagnies pétrolières se sont intéressées aux réserves en hydrocarbures sur le territoire national et, dès 1960, un certain nombre de forages d'exploration ont été réalisés dans le sous-sol provençal, notamment dans la région de la Durance. On dispose ainsi aujourd'hui de données géologiques détaillées sur les séries sédimentaires qui constituent cette région. Ces forages ont localement atteint le « substratum cristallin » de la série sédimentaire, en particulier à l'est de la vallée de la Durance. En plus de l'étude de la géométrie des couches sédimentaires, preuve a été apportée de la forte dissymétrie géologique entre la couverture sédimentaire épaisse à l'ouest de la FMD (bassin de Forcalquier) et une couverture plus mince (1 à 2 km) à l'est (*figure 2*).

Les recherches pétrolières ont ensuite été poursuivies par des campagnes exhaustives de sismique-réflexion, visant à imager les premiers kilomètres des séries sédimentaires. Ces campagnes, réalisées dans les années 1970 et 1980, ont amélioré significativement la connaissance structurale régionale. Si les données interprétées sont toujours non publiques, les données brutes sont, en revanche, disponibles et peuvent être « déstockées » (dix ans

après leur acquisition selon la loi). Jusque dans les années 1980, la représentation de la structure de la FMD a reposé sur l'hypothèse d'une faille à fort pendage, s'ancrant profondément dans la croûte cristalline, affectant de concert le socle pré-Mésozoïque et sa couverture sédimentaire. Cette interprétation reposait sur les données de forages et les campagnes de sismique des années 1970 (société Elf).

L'analyse des données de sismique-réflexion acquises par la société Total en 1985-1986 a permis à Benedicto-Esteban (1996) de proposer une nouvelle interprétation structurale de la FMD entre Saint-Paul-lez-Durance et Peyruis. Par rapport à l'interprétation initiale, cette nouvelle représentation décrit un système de failles inclinées s'aplatissant vers la base de la série sédimentaire dans les niveaux ductiles de gypses et de sel du Trias (faciès parfois qualifiés de « couches-savons »), réputés pour favoriser le glissement en masse de la pile sédimentaire sus-jacente. Dans l'interprétation de Benedicto-Esteban (1996), ces failles dites listriques surplombent d'autres failles qui provoquent l'enfoncement vers l'ouest du socle cristallin.

L'IRSN a également interprété quelques autres lignes sismiques. Le CEA a fourni quatre lignes de 1971, tandis que la société Coparex en a fourni trois (campagne Total de 1985-1986). Sur la base de ces sept profils et de sa connaissance géologique de la région, l'IRSN a lui aussi identifié deux ensembles de failles superposées. Ainsi, sur la base de l'ensemble des données précédentes, l'existence de failles profondes ne peut pas être écartée et la question

de leur activité reste en suspens. C'est pour répondre à ces incertitudes que l'IRSN a décidé de tirer également parti des données instrumentales disponibles depuis l'installation dans les années 1990 de son réseau sismométrique.

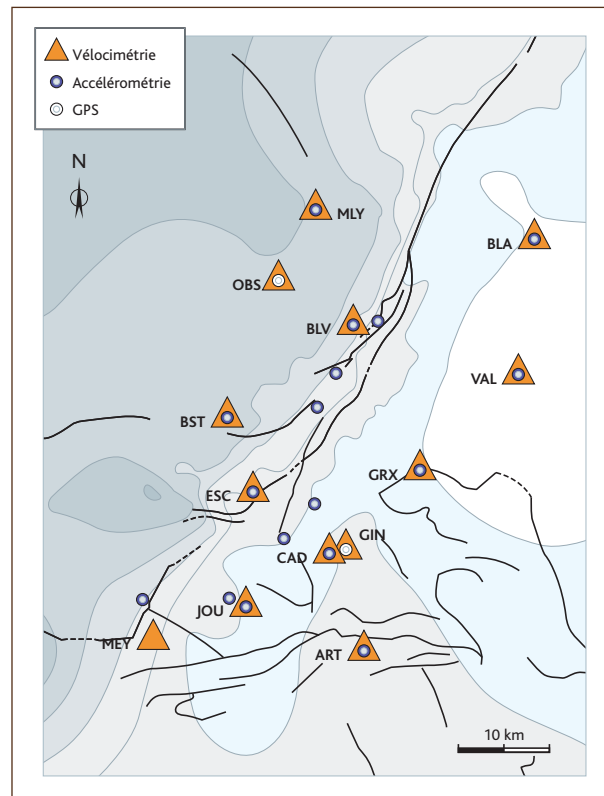
### Utilisation par l'IRSN de la microsismicité pour connaître la géométrie de la faille et le mécanisme de déformation Moyens mis en œuvre

L'IRSN étudie la sismicité de la FMD afin d'améliorer la compréhension de sa structure et de son fonctionnement. C'est en 1992 que l'IRSN a entrepris la conception et la mise en place de son réseau de surveillance sismique, constitué alors de six points de mesure et centré sur le village de Beaumont-de-Pertuis (Vaucluse). L'objectif de ce dispositif était de pouvoir localiser les séismes se produisant sur la FMD et d'en calculer la magnitude afin de connaître le plus finement possible le fonctionnement de cette faille active.

Le réseau sismique IRSN de la Durance est actuellement composé de 12 vélocimètres et de 18 accéléromètres (*figure 3*). Les stations vélocimétriques comprennent des capteurs « L4 » de fréquence de résonance 1 Hz, associés à des chaînes d'acquisition « M88/MC » de fabrication Lennartz. Le parc accélérométrique est composé d'instruments « Etna » et « K2 » fabriqués par Kinematics. Toutes ces stations sont à trois composantes (deux composantes horizontales, une composante verticale). L'ensemble des vélocimètres, ainsi que les accéléromètres de Cadarache, Pierrevert, Manosque, Jouques, Saint-Michel-l'Observatoire et la Vigie sont télé-métrés. La combinaison de ces deux types d'instrument permet, d'une part, de surveiller la sismicité locale avec une très haute sensibilité grâce aux vélocimètres, d'autre part, d'avoir des signaux non saturés en cas de mouvement fort grâce aux accéléromètres.

### Premiers résultats

Les premiers résultats sur la microsismicité de la FMD ont été publiés par Volant [Volant *et al.*, 2000 et 2003]. Un travail plus exhaustif sur l'activité sismique enregistrée de 1999 à 2006 a été réalisé en 2006. Cette étude a permis de localiser la microsismicité plus finement et de préciser les modalités de répartition des contraintes autour de la FMD (Cushing *et al.*, 2008). Auparavant, il a été nécessaire de réaliser une synthèse des données géologiques et géophysiques disponibles afin d'établir, d'une part, un modèle à petite échelle de la segmentation de la FMD [Cushing et Bellier, 2003] et, d'autre part, un modèle de vitesse « 3D » (des ondes P) à l'échelle régionale. Ce modèle s'attache à décrire la géométrie de la croûte terrestre en termes de superposition et de juxtaposition de couches de propriétés différentes (notamment en termes de vitesse de propagation des ondes sismiques). Compte tenu du faible nombre de lignes sismiques et de forages disponibles, ce modèle reste schéma-



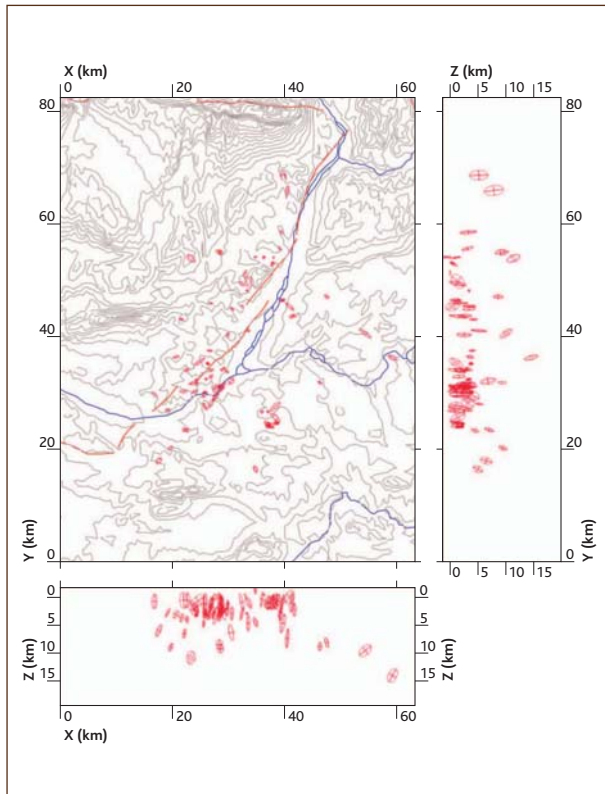
**Figure 3** Réseaux instrumentaux de la FMD (accélérométrie, vélocimétrie, GPS).

tique, mais il est plus adapté pour la localisation de la microsismicité que le modèle « 1D » utilisé auparavant.

La localisation des séismes a été obtenue en utilisant ce modèle de vitesse 3D et le programme d'inversion « NonLinLoc » développé par A. Lomax [Volant *et al.*, 2003]. La méthode utilisée permet de minimiser les incertitudes sur la localisation en trois dimensions. Ainsi, 155 événements ont été localisés. Leur magnitude de moment a été calculée à partir des spectres de déplacement [Nechtschein, 2003 ; Volant *et al.*, 2003] : elle est comprise entre 1 et 3. Pour réaliser une interprétation sismotectonique, seuls les « meilleurs » séismes remplissant les deux conditions suivantes ont été retenus : ils ont été enregistrés par au moins cinq stations et ils ont été suffisamment bien localisés (incertitude inférieure ou égale à 2 km). Ces critères ont conduit à ne conserver que 59 événements localisés correspondant à des séismes « tectoniques ». Il n'a été possible de calculer des mécanismes au foyer<sup>(1)</sup>, décrivant la cinématique du déplacement de la faille mobilisée pendant le séisme, que pour 27 d'entre eux, en utilisant le code « FPFIT » [Reasenber & Oppenheimer, 1985].

### Répartition de la sismicité

La distribution des épicentres (*figure 4*) montre une image moins diffuse que celle de la microsismicité décrite par les réseaux nationaux



**Figure 4** Localisation 3D de la microsismicité enregistrée par le réseau IRSN.

(Rennas, CEA/LDG). L'activité microsismique est quasi nulle sous le panneau provençal (à l'ouest de la FMD), sous la montagne de Lure et le Lubéron. La majorité des événements se produit dans une bande de 5 km de large environ, tout au long des 50 km des branches du système de failles entre Peyruis et Meyrargues. Une densité plus marquée est notée entre Saint-Paul-Lez-Durance et Oraison.

La grande majorité des événements se situe à une profondeur inférieure à 4 km ; l'activité microsismique se produit donc majoritairement dans la couverture sédimentaire, au-dessus du *substratum* antétriasique. Un essaim de sismicité est localisé au sud-est du secteur, dans les environs du chevauchement à vergence sud du Mont Major. La sismicité y est très superficielle et traduit vraisemblablement l'activité du décollement de cette structure au-dessus du trias salifère peu profond à cet endroit. Quelques événements sont situés dans le prolongement méridional de la FMD (au niveau de la faille de Jouques), entre 4 et 9 km de profondeur. Ils se sont vraisemblablement produits dans le socle antétriasique, puisque le toit du socle est assez superficiel dans

ce secteur, comme l'atteste le sondage de Jouques (socle à 2 km). Des événements profonds (entre 8 et 15 km) ont été localisés au nord du plateau de Valensole. Ils pourraient attester le fonctionnement de failles profondes, non localisées car n'émergeant pas à la surface, situées sous les plis de Mirabeau et Lambruissier.

### Processus de déformation

La majorité des 27 mécanismes au foyer associés aux événements enregistrés montre des axes en compression subméridiens, induisant pour l'essentiel des cinématiques en coulissage (*figure 5*). Ceci est cohérent avec le régime tectonique en décrochement senestre de la FMD, déduit des données géologiques qui indiquent un raccourcissement méridien. Quelques mécanismes correspondent toutefois à des cinématiques en failles inverses ou en failles normales. Les jeux inverses sont localisés sur l'ensemble du secteur d'étude, alors que les jeux normaux se trouvent uniquement près de l'extrémité méridionale de la FMD. Cette particularité peut résulter d'une modification locale du régime des contraintes à la terminaison de faille. L'analyse de la distribution des axes de contrainte conduit à proposer une direction moyenne de compression N-S à NNO-SSE autour de la faille. La forte proportion de séismes localisés dans la couverture suggère l'existence d'un découplage mécanique situé au niveau des évaporites triasiques. Par ailleurs, la différence de distribution des axes de compression entre le socle (NE) et sa couverture (NNO) pourrait indiquer l'existence d'un découplage des régimes tectoniques entre le *substratum* et le panneau provençal chevauchant. L'étude des mécanismes au foyer déduits de l'analyse de la microsismicité conduit à caractériser une contrainte maximale horizontale moyenne orientée N165°E, c'est-à-dire SSE.

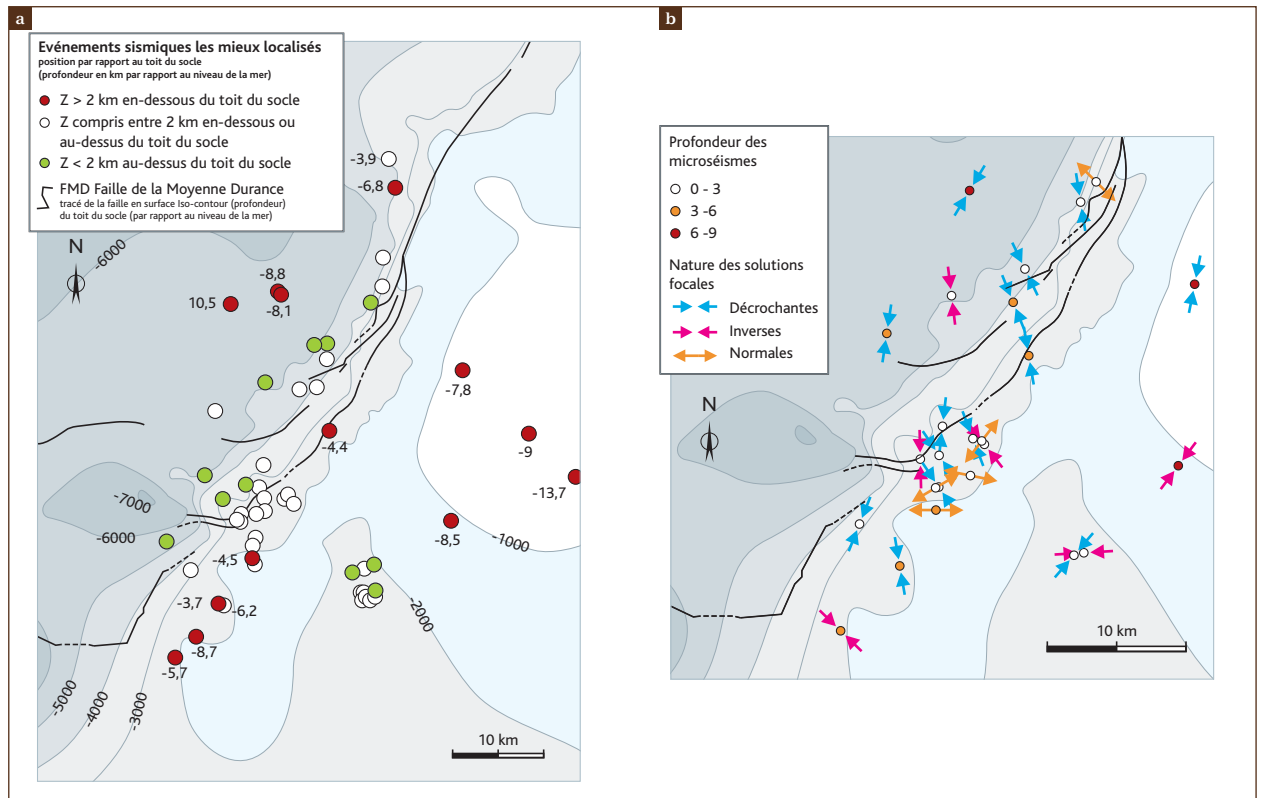
## Évaluation de la vitesse de glissement de la FMD

### Vitesse de la faille et période de retour

Les séismes de magnitude importante ( $M > 6,0$ ) peuvent produire une rupture en surface. La taille de cette rupture reflète le déplacement instantané des lèvres de la faille. Plus la magnitude est élevée, plus le déplacement (ou « dislocation ») est important. Par exemple, un séisme de magnitude 6,0 provoquera un déplacement en surface de l'ordre de 20 à 50 cm, un séisme de magnitude 6,5 provoquera un déplacement de 0,5 à 1 m. Après un tel séisme, il est possible que la faille se « bloque » et que les contraintes s'accumulent sans provoquer de glissement ultérieur. C'est au déclenchement du séisme suivant que les contraintes sont libérées par le glissement de la faille. Ce processus est appelé cycle sismique.

Le déplacement cumulé intégrant plusieurs cycles sismiques peut être déterminé directement en mesurant le déplacement de mar-

(1) Un mécanisme au foyer consiste en la détermination de l'orientation de la faille qui glisse lors du séisme, ainsi que de la direction de glissement relative des blocs le long de cette faille.



**Figure 5** a : Localisation des événements sismiques vis-à-vis de la position de la segmentation et du socle cristallin. La profondeur du toit du socle cristallin est indiquée par des courbes isobathes en pointillés (altitude de référence = niveau de la mer).  
 b : direction des axes principaux des contraintes déduites des mécanismes au foyer des séismes.

queurs géologiques assez anciens et datés. Les vitesses de glissement des failles peuvent également être estimées à partir de mesures indirectes de plus court terme, issues des méthodes géodésiques. Compte tenu des déplacements unitaires associés à chaque classe de magnitude, on peut calculer une période de retour pour la classe de séismes correspondante, et ainsi évaluer la durée du cycle sismique.

Cette démarche est appliquée aux failles rapides des contextes très actifs (Californie par exemple), mais reste discutable pour un contexte intra-plaque où le cycle sismique peut être très long. Faute de disposer de méthode spécifique pour évaluer des périodes de retour pour les failles lentes, les paramètres du cycle sismique sont évalués à partir d'estimations de la vitesse de glissement à long terme de la faille et de la taille unitaire des dislocations sismiques maximales possibles.

#### Décalage de marqueurs géologiques

Depuis le milieu des années 1990, l'IRSN collabore avec les institutions universitaires Orsay-Terre puis Cerege pour caractériser le contexte géologique et cinématique de la FMD. Ces études ont été

concrétisées par une thèse [Baroux, 2000] et par une étude de quantification cinématique [Siame *et al.*, 2004]. Ces travaux, fondés sur la quantification du déplacement de marqueurs géologiques datés (utilisation de cosmonucléides), conduisent à proposer un taux de glissement à long terme de la FMD inférieur au millimètre par an.

#### Géodésie spatiale (GPS)

La géodésie spatiale, mise en œuvre pour l'étude de la tectonique active depuis le début des années 1990 en France, constitue une approche complémentaire des études géologiques et permet d'accéder aux champs de déplacement « instantanés ». Elle fait l'objet de recherches à l'IRSN depuis de nombreuses années. L'Institut a ainsi procédé à l'installation d'un réseau de mesures temporaires (dans les Pyrénées-Orientales), semi-permanentes et permanentes (dans le Jura et en Provence). Grâce aux mesures continues des stations Gina (Ginasservis, Var) et Mich (observatoire de Saint-Michel-de-Provence, Alpes-de-Haute-Provence), il dispose aujourd'hui d'environ sept années et demie d'observations à proximité de la FMD, de part et d'autre de celle-ci. Cette longue série temporelle, l'une des plus longues d'Europe, permet d'évaluer la

vitesse de rapprochement relatif des deux points concernés à  $-0,1 \pm 0,6$  mm/a à  $2 \sigma$  compte tenu du modèle de bruit utilisé. L'extrapolation de ces vitesses « géodésiques » au glissement « long terme » reste pour le moment délicate. Le résultat obtenu montre cependant que la tendance est très faible, mais cohérente avec les vitesses de glissement long terme. Par ailleurs, l'analyse en tenseur de déformation sur différentes paires de stations en Provence donne toujours la même direction de raccourcissement Nord-Sud.

Concernant cette instrumentation géodésique, l'IRSN a installé, en collaboration avec l'UMR Géosciences Azur (université de Sophia-Antipolis, Alpes-Maritimes), un réseau de sites semi-permanents régulièrement implantés autour du segment de Manosque. Ce réseau permettra, en cas de séisme majeur sur la FMD, de mesurer précisément les déplacements induits et ainsi de mieux comprendre la cinématique des failles associée aux événements sismiques locaux.

## Premières réponses apportées en termes d'aléa sismique

### Concernant la magnitude maximale des séismes

Toutes les études et travaux mentionnés précédemment, combinés avec la connaissance géologique de la région, permettent de proposer un modèle géométrique de segmentation 3D du système de failles de la Durance. Sur la base de ce modèle, il est possible d'évaluer l'aléa sismique associé à la FMD. À la suite des travaux de Baroux [Baroux, 2000] et de l'interprétation susmentionnée des lignes sismiques par l'IRSN [Aochi *et al.*, 2006] a été estimée la potentialité maximale de la FMD à une magnitude de 6,9. Cette estimation est en accord avec celles obtenues par d'autres études académiques [voir par exemple Sébrier *et al.*, 1997]. Dans tous les cas, l'estimation repose sur l'hypothèse de failles actives profondément enracinées dans le *substratum* cristallin.

L'étude de la microsismicité montre qu'au niveau de la FMD, l'activité réside, pour l'essentiel, dans la couverture sédimentaire « décollée » sur le Trias salifère et gypseux. En considérant ce résultat et les données cartographiques, ainsi que celles obtenues par l'interprétation des profils sismiques, la dimension maximale du plus grand segment cartographié est de 18 km  $\times$  6 km. En utilisant les relations empiriques reliant magnitude de séisme et dimension de faille [Wells et Coppersmith, 1994], cela implique que la magnitude maximale individuelle par segment ne peut pas dépasser  $M_w = 6,0 \pm 0,2$ . Une autre estimation de  $M_w$ , suivant la relation de [Hanks et Kanamori, 1979] donne  $M_w = 6,1$  avec un coulissage de l'ordre de 0,5 m (dislocation co-sismique) le long de la faille. Bien entendu, le déclenchement d'un séisme peut impliquer

simultanément plusieurs segments de faille ; dans cette configuration, la magnitude maximale sera plus importante.

### Au sujet de la période de retour des événements maximaux

Différentes approches géologiques ou géomorphologiques convergent vers une vitesse de glissement « long terme » inférieure au millimètre de la FMD entre 0,01 et 0,07 [Baroux, 2000 ; Siame *et al.*, 2004]. L'analyse des données GPS aboutit aussi à une vitesse de glissement « très court terme » inférieure à 0,1 mm/an.

Les périodes de retour de séismes peuvent être estimées à l'aide de relations empiriques reliant dislocation co-sismique et surface des failles mobilisées. Ces estimations conduisent à proposer des scénarios impliquant un ou plusieurs segments de faille, avec des périodes de retour comprises entre 5 000 et 10 000 ans pour des magnitudes comprises entre 5,8 et 6,5 respectivement, cette dernière valeur étant considérée comme une borne supérieure, puisqu'elle correspond à la dislocation de la totalité des segments identifiés.

L'utilisation des relations empiriques mentionnées précédemment reste toutefois délicate pour des failles « lentes », notamment à cause de la méconnaissance de leur comportement. De plus, aucun élément ne permet d'inclure ou d'exclure une part de glissement asismique (glissement continu d'une faille sans séisme). Malgré toutes ces incertitudes, l'utilisation de relations empiriques permet au moins de donner un ordre de grandeur majorant de la magnitude et de la période de retour des séismes attendus sur la FMD.

## ■ Conclusion

La localisation fine de la microsismicité à l'aide du réseau IRSN permet de considérer aujourd'hui que l'activité actuelle de la faille est principalement localisée dans la partie supérieure de la croûte (dans la pile sédimentaire), impliquant une dimension réduite des segments de faille actifs du fait de leur faible profondeur d'enracinement. Ce résultat permet d'estimer une magnitude maximale compatible avec les caractéristiques géométriques retenues aujourd'hui. Associé aux résultats issus de nombreuses études géologiques et de l'interprétation des données géodésiques acquises par l'IRSN, il permet également d'estimer la période de retour des événements maximaux plausibles. Les études montrent, d'une part, que la FMD est une faille « lente » apte à produire des séismes avec des ruptures en surface (comme à Valvèranne, près de Manosque), d'autre part, que la dimension des sources est cependant limitée par la forte segmentation verticale et horizontale, conduisant à estimer des séismes maximaux de l'ordre de  $M_w \sim 6,5$ .



La localisation 3D des séismes enregistrés entre 1999 et 2006 a révélé l'existence d'une activité sismique profonde. Cette activité n'est pas directement associée à des failles connues en surface et se situe à la périphérie du système de failles, notamment au nord du plateau de Valensole.

Un certain nombre d'actions relatives à la caractérisation des failles du secteur de la Moyenne Durance est en cours (interprétation de 400 km de lignes sismiques dans le cadre d'une collaboration CEA-Cadarache/IRSN/BRGM/Cerege ; relocalisation fine de la microsismicité enregistrée par le réseau IRSN dans le cadre d'une collaboration IRSN/Collège de France ; synthèses géologiques dans le cadre de la thèse (CEA/Cerege) de S. Molliex ; tirs de nouveaux profils sismiques par le CEA dans le cadre du programme CASHIMA (programme de R&D du CEA dédié à l'étude de l'aléa sismique autour du site de Cadarache). L'ensemble de ces actions devrait permettre d'améliorer encore la connaissance des failles actives du secteur.

Les résultats acquis par le réseau de surveillance sismique de l'IRSN ont permis de caractériser la microsismicité de la FMD et des structures environnantes et de proposer une évaluation de l'aléa sismique plus précise. Une acquisition de plus longue donnée de cette surveillance sismique ne devrait pas modifier l'image d'ores et déjà obtenue, sauf peut-être en cas de crise sismique majeure. Compte tenu de la sismicité historique récurrente observée sur la FMD, il est envisagé que le réseau IRSN soit reconfiguré en accélérométrie uniquement afin d'enregistrer d'éventuels mouvements forts lors d'événements significatifs possibles. Pour ce qui concerne l'évolution du réseau vélocimétrique, une discussion est en cours quant à son devenir avec la communauté académique.

#### Références

- H. Aochi, M. Cushing, O. Scotti & C. Berge-Thierry, 2006, *Estimating rupture scenario likelihood based on dynamic rupture simulations: the example of the segmented Middle Durance fault, southeastern France*. *Geophysical Journal International*, 165 (2), 436-446.
- E. Baroux, 2000, *Tectonique active en région à sismicité modérée : le cas de la Provence (France)*. Apport d'une approche pluridisciplinaire. Thèse université Paris-Sud, France.
- A. Benedicto-Esteban, 1996, *Modèles tectono-sédimentaires de bassins en extension et style structural de la marge passive du Golfe du Lion (partie Nord), Sud-Est, France*. Thèse université de Montpellier II, France.
- E.M. Cushing & O. Bellier, 2003, *La Faille de la Moyenne Durance : précision concernant le tracé en surface de la faille entre Pertuis et Château-Arnoux*. Rapport interne IRSN DPRE/SERGD n° 03-21.
- E.M. Cushing, O. Bellier, S. Nechtschein, M. Sébrier, A. Lomax, Ph. Volant, P. Dervin, P. Guignard, L. Bove, 2008, *A multidisciplinary study of a slow-slipping fault for seismic hazard assessment: the example of the Middle Durance Fault (SE France)*. *Geophysical Journal International* 172 (3), 1163-1178. doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03683.x
- T.C. Hanks & H. Kanamori, 1979, *A moment-magnitude scale*. *J. Geophys. Res.*, 84, 2348-2350.
- S. Nechtschein, 2003, *Calcul d'une magnitude de moment Mw pour les séismes enregistrés par le réseau de la Durance*. Rapport interne IRSN DEI/SARG n° 03-01.
- P.A. Reasenber & D. Oppenheimer, 1985, *FPPIT, FPLOT, & FPPAGE: Fortran computer programs for calculating & displaying earthquake fault-plane solutions*. *U.S. Geol. Surv. Open File Rep.* 85-739.
- M. Sébrier, A. Ghafiri & J.-L. Blès, 1997, *Paleoseismicity in France: fault trench studies in a region of moderate seismicity*. *J. Geodyn.*, 24, 207-217.
- L. Siame, O. Bellier, R. Braucher, M. Sébrier, M. Cushing, D. Bourles, B. Hamelin, E. Baroux, B. De Voogd, G. Rasebeck & F. Yiu, 2004, *Local erosion rates versus active tectonics: cosmic ray exposure modelling in Provence (south-east France)*. *Earth Planet. Sci.*, 220, 345-364.
- Ph. Volant, C. Berge-Thierry, P. Dervin, M. Cushing, G. Mohammadioun & F. Mathieu, 2000, *The South Eastern Durance fault permanent network: Preliminary results*. *Journal of Seismology*, 4, p. 175-189.
- Ph. Volant, A. Lomax, S. Nechtschein, M. Cushing, T. Ait-Ettajer, C. Berge-Thierry & P. Dervin, 2003, *Localisation 3D et calcul de magnitude pour les événements du réseau Durance*. 6<sup>e</sup> colloque national de l'Association française de génie parasismique, École Polytechnique, Palaiseau (France), 1-3 juillet 2003. I, 21-32.
- D. Wells, K.J. Coppersmith, 1994, *New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Area & Surface Displacement*. *Bull. of Seismol. Soc. Am.*, 84, 4, p. 974-1002.