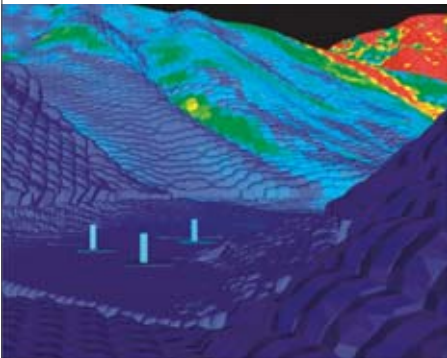
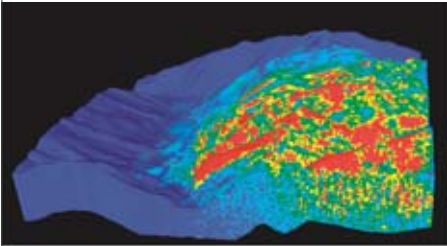


De l'observation sismologique à l'évaluation du risque sismique

S'il reste illusoire d'espérer disposer rapidement d'une méthode fiable de prévision de l'occurrence imminente d'un séisme, l'évaluation du risque de sa survenue réalise de réels progrès auxquels contribue le pôle aléa sismique du CEA.

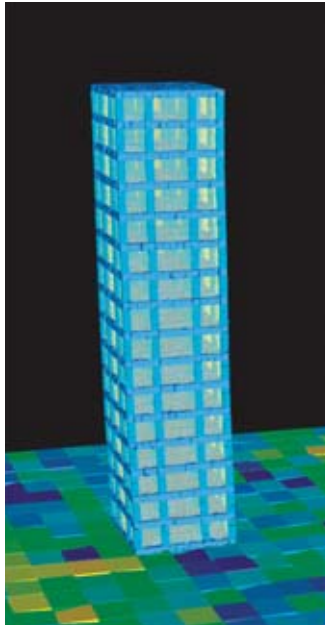


Simulation numérique Grand Challenge réalisée sur le supercalculateur Tera-10 du CEA.

En haut, début de la propagation des ondes à partir de la faille située en bas à droite de l'image. La couleur rouge correspond aux ondes les plus fortes.

Les variations locales des amplitudes sont dues en particulier aux variations de topographie. En bas, le même instant vu du fond de la vallée, là où sont placés les *buildings*.

À droite, un instantané sur un *building* au moment du passage des ondes sismiques : la tour se déforme.



Simulations CEA

La **tectonique des plaques** est la théorie qui explique actuellement au mieux les diverses observations des phénomènes mécaniques qui affectent les couches superficielles de notre planète. Établie dans les années 1960, elle résulte de la synthèse d'observations et de mesures effectuées systématiquement par de nombreux observatoires. Les deux grands domaines couverts par ces observations ont été, d'une part, l'exploration du fond des océans – qui a permis de découvrir une structure ordonnée des roches, mettant ainsi en évidence l'**expansion des fonds océaniques** – et, d'autre part, l'analyse systématique et de plus en plus détaillée des **ondes sismiques** – qui a conduit à révéler la structure en plaques de la surface de la Terre et à préciser les mouvements relatifs de ces plaques – (Mémo A, *Voyage au centre de la Terre et aux confins de l'atmosphère*, p. 21 et Mémo D, *Tectonique des plaques et séismes*, p. 90).

Détecter et analyser finement les événements sismiques

Dès la fin des années 1950, le CEA est présent dans cette thématique, en particulier par le biais de sa mission de détection des expérimentations nucléaires. En effet, une explosion de ce type, effectuée en souterrain, est aussi génératrice d'ondes sismiques. Compte tenu de la diversité des milieux traversés par celles-ci, c'est bien souvent à l'issue d'une analyse complexe que sera réalisé le diagnostic sur

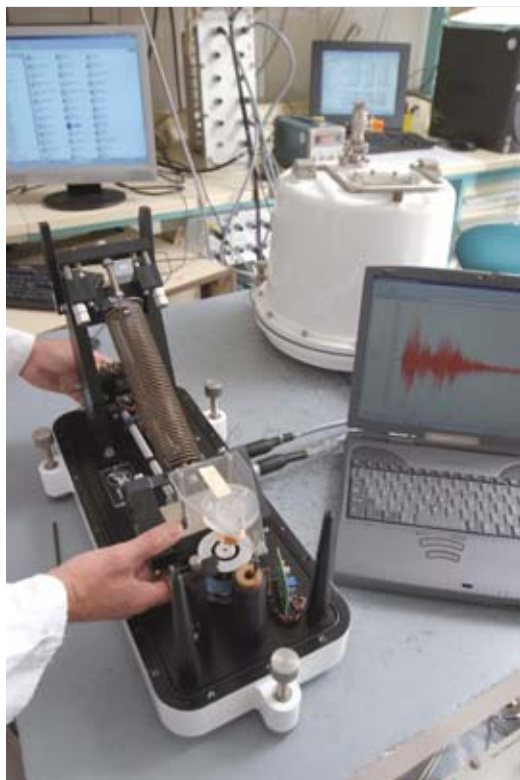
l'origine – naturelle (**séisme**) ou artificielle (explosion) – de ces ondes. C'est pour ces raisons que, dès l'installation des premières **stations sismiques** en métropole, le Laboratoire de détection et de géophysique du Département analyse, surveillance, environnement (Dase/LDG⁽¹⁾) s'est intéressé à l'ensemble des **événements** qu'il détectait sur ce réseau de surveillance et a publié ainsi un bulletin d'activité sismique (figure 1). Ce travail n'a jamais été interrompu depuis cette date, et les stations de Lormes (dans la Nièvre) ou de Flers (dans l'Orne) sont en France parmi les plus performantes statistiquement au vu du nombre de mesures répertoriées dans le catalogue mondial de l'*International Seismological Center*. La base de données constituée au LDG, riche de plus de 140 000 événements et s'enrichissant annuellement d'environ 7 000 nouveaux, a permis de connaître avec précision la sismicité métropolitaine, ce qui est un élément essentiel à la définition du risque sismique.

Le travail d'analyse des enregistrements sismiques consiste principalement à mesurer deux paramètres caractéristiques des ondes sismiques : l'heure d'arrivée et l'amplitude. La combinaison de ces informations obtenues sur plusieurs stations, complétée par un **modèle** de propagation à l'intérieur de la **Terre**, offre alors la possibilité de localiser l'événement qui les a engendrées, et d'en donner une estimation de sa **magnitude** (Mémo D, *Tectonique des plaques et séismes*, p. 90).

Cette activité de surveillance a conduit le LDG à être en charge de l'alerte aux séismes forts pour le compte de la sécurité civile. Dans le cadre de cette mission d'alerte, le sismologue d'astreinte doit fournir les caractéristiques préliminaires (localisation et magnitude) de tout événement sismique susceptible d'être ressenti sur le territoire métropolitain, dans l'heure qui suit l'événement.

Pour les grands séismes, cette description sous forme de coordonnées et de magnitude n'est pas suffisante. Pour mieux en estimer les effets – en particulier pour évaluer le risque de **tsunami** (voir *Comment prévenir et prévoir les tsunamis ?* p. 101 et Mémo E, *Comment naît et se propage un tsunami ?* p. 105) – il est indispensable de connaître les caractéristiques de la rupture, telles que la position et l'extension de la **faille** qui a rompu, le mode, la vitesse et la durée de rupture, la chute de contrainte provoquée par le séisme. De même, lorsque l'événement détecté est susceptible d'être une expérimentation nucléaire, il est nécessaire de poursuivre son analyse. Les

(1) Site Web : <http://www-dase.cea.fr/>



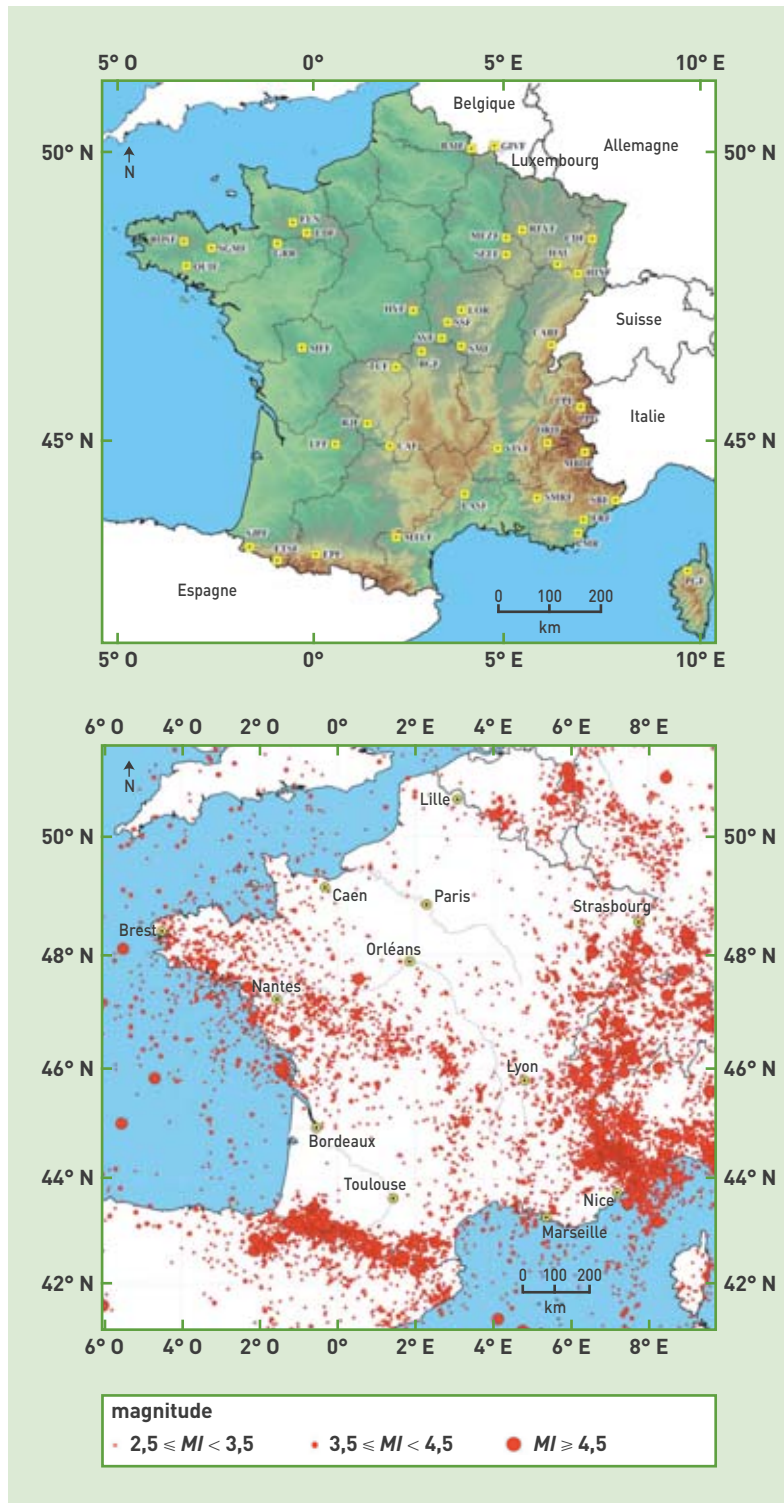
C. Dupont/CEA

Le capteur sismique longue période permet de mesurer les mouvements du sol dont la période est supérieure à 1 seconde. Il est particulièrement adapté à l'étude des ondes de surface et de volume générées par les séismes, la marée terrestre et les oscillations propres de la Terre.

sismologues recherchent alors des éléments particuliers, comme la mise en évidence d'une profondeur de quelques centaines de mètres seulement (les séismes pouvant avoir lieu jusqu'à 700 km de profondeur), ou bien une distribution **isotrope** de l'amplitude des **ondes P** de compression et la faible amplitude des **ondes S** de cisaillement, éléments qui sont typiques d'une source explosive. Ce travail d'analyse détaillée fait appel à des techniques variées qui procurent à l'analyste les outils les plus performants pour l'aider dans son interprétation (encadré 1). Le traitement du signal est utilisé pour rechercher certains éléments caractéristiques des enregistrements. La **simulation numérique** donne les moyens de tester une hypothèse (source explosive ou source sismique, par exemple) en confrontant les résultats des simulations aux enregistrements sismiques. Enfin, les méthodes modernes d'analyse de données, comme les **techniques d'inversion** non linéaire, les réseaux de neurones, la logique floue, sont employées pour comparer l'ensemble des paramètres obtenus sur un événement aux mêmes paramètres caractérisant des événements similaires de la base de données.

La sismicité et l'aléa sismique

Il est encore illusoire d'espérer disposer d'une méthode de prévision fiable de l'occurrence imminente d'un séisme ; c'est la raison pour laquelle l'évaluation du risque d'apparition d'un séisme en un lieu donné ne peut se faire que d'un point de vue statistique. La méthode utilisée est fondée sur la

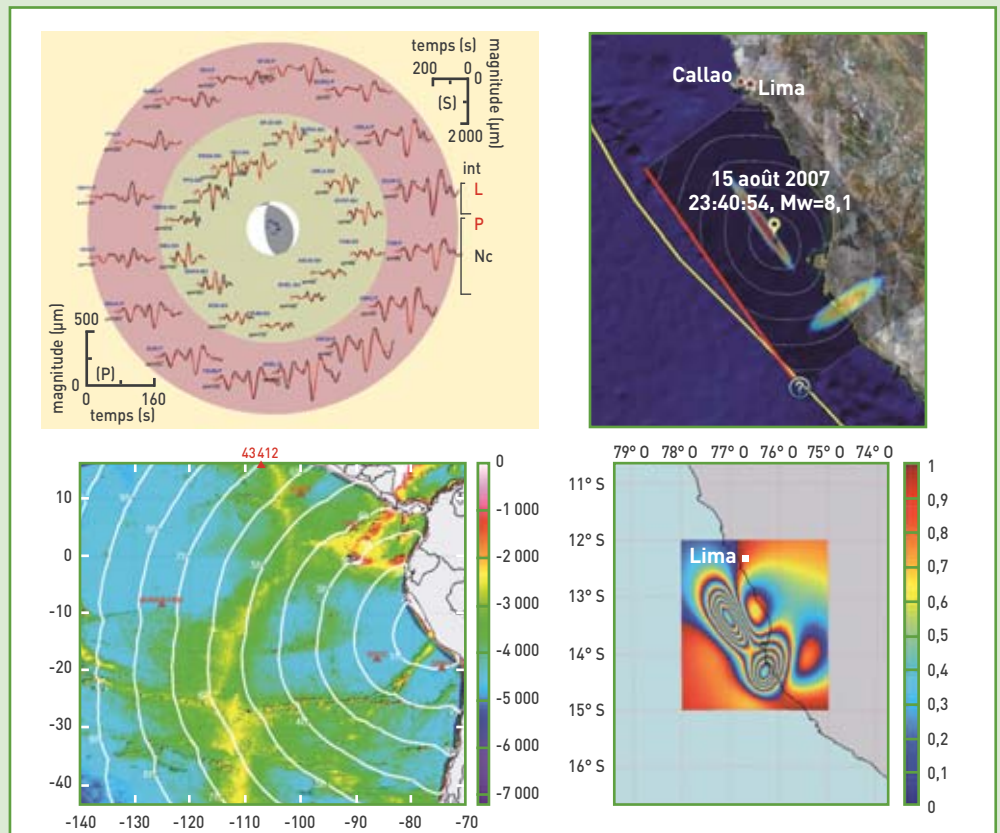


CEA/DAM

Figure 1. En haut, réseau de surveillance sismique du Dase [carrés jaunes] en France métropolitaine. Les 40 capteurs répartis sur le territoire français permettent de recueillir près de 200 000 mesures par an. En bas, sismicité mesurée par ce réseau depuis 1962 (limitée aux événements de magnitude supérieure à 2,5).

notion d'événement sismique de référence pour une région donnée, qui est à la base des études de risque sismique. En France, la réglementation impose que les installations soient construites de façon à résister aux plus forts mouvements sismiques qui pourraient les solliciter. C'est pourquoi la définition, pour chaque site, de l'événement de référence est complétée par l'étude des effets de site qui peuvent, selon

L'analyse détaillée d'un fort séisme



Cette fiche de synthèse détaillée de l'analyse du **séisme de magnitude 8,1**, qui a eu lieu au large du Pérou le 15 août 2007, révèle les différentes étapes de traitement, depuis l'analyse des formes d'**ondes**, la description de la rupture, obtenue par **inversion** des formes d'ondes, et les conséquences attendues de cet **événement** en termes de **tsunami** et de déplacement du sol en surface. En haut à gauche apparaissent les enregistrements (en noir) et les signaux synthétiques (en rouge) calculés pour la source sismique issue de l'inversion et représentée sur la carte en haut à droite. La **faille**

s'étend sur une longueur de 200 km et est composée de 2 "patches" (ellipses colorées) sur lesquels le mouvement le plus fort a atteint 8 m de glissement pour une durée totale de rupture de 100 s environ. À partir de ces résultats d'inversion, il est possible de calculer les effets engendrés par le séisme. L'image en bas à gauche montre les temps de propagation du tsunami (courbes blanches) et celle en bas à droite indique le déplacement du sol sous la forme de l'**interférogramme** simulé tel qu'il pourrait être obtenu par l'exploitation des images satellites avant et après le séisme.

la nature des terrains, amplifier ou atténuer de façon notable l'amplitude des ondes sismiques engendrées. La définition des événements de référence s'appuie d'abord sur une analyse détaillée des catalogues de sismicité. Toutefois, ceux-ci ne représentent qu'une petite partie du cycle qui gouverne à grande échelle les mouvements des plaques. Il est alors nécessaire

de les compléter par la recherche des événements qui ont affecté une région à l'échelle humaine (sismicité historique) mais aussi dans un passé plus lointain (**paléosismicité**). En France, ces effets sont difficiles à identifier compte tenu de la faible sismicité. Il est par conséquent indispensable d'étudier des régions plus actives, comme le Népal et la Mongolie (voir *Mesures de déformation par GPS : une méthode d'investigation des mouvements tectoniques à grande échelle*, p. 95).



Cette station sismique à Madagascar fonctionne de façon autonome grâce à des panneaux solaires et une antenne parabolique VSAT.

CEA/DAM

participe aussi au **Réseau accélérométrique permanent (RAP)** à l'échelle nationale.

Tous ces travaux permettent au LDG – pôle de compétence aléa sismique du CEA depuis 1996 – de réaliser pour le compte des autorités de sûreté les études de site nécessaires dans le cadre de la législation en vigueur.

L'apport de la simulation numérique

Dès que les principaux types d'ondes ont pu être identifiés, les sismologues se sont attachés à en donner une formulation théorique, qui a ensuite servi à calculer les formes d'ondes. Depuis les années 1960 jusqu'aux années 1980, de nombreux **algorithmes** ont été publiés permettant, pour les différents types d'ondes sismiques, de fournir des **sismogrammes** synthétiques de plus en plus réalistes, en incluant des modèles des structures internes de la Terre de plus en plus précis. Néanmoins, toutes ces méthodes supposent une structure stratifiée et régulière des couches de terrains. Pour une approche plus réaliste, intégrant par exemple un modèle tridimensionnel de propagation, il est nécessaire de mettre en œuvre des méthodes discrètes – c'est-à-dire basées sur un maillage de l'espace et du temps – calculant l'évolution des ondes sismiques de proche en proche en tout point du maillage. Récemment, un nouveau **code de calcul**, développé au Dase et dénommé Mka3D, permet d'utiliser ce formalisme pour traiter simultanément les problèmes de rupture – par exemple au niveau de la faille ou bien de la chute de blocs instables sollicités par la propagation des ondes sismiques – et de mécanique élastique – comme la propagation des ondes dans les terrains ou bien dans les structures des bâtiments – (encadré 2).



CEA/DAM

Entrée d'une cave sismique en Mongolie.

Une synergie de compétences

Les missions confiées au CEA permettent au Dase d'être présent dans un large spectre d'activités relevant du domaine des sciences de la Terre. Celles-ci mettent en jeu des compétences dans des domaines variés, dépassant le cadre strict des sciences de la Terre. Cette synergie de compétences, regroupées dans une même unité, offre à chaque chercheur ou ingénieur la possibilité de disposer des outils les mieux adaptés aux problèmes qu'il se pose, ou en tout cas de participer à leur élaboration avec une grande garantie d'efficacité.

> **Yves Cansi, Jocelyn Guilbert et Marc Nicolas**
Département analyse, surveillance, environnement
Direction des applications militaires
CEA Centre DAM Ile-de-France

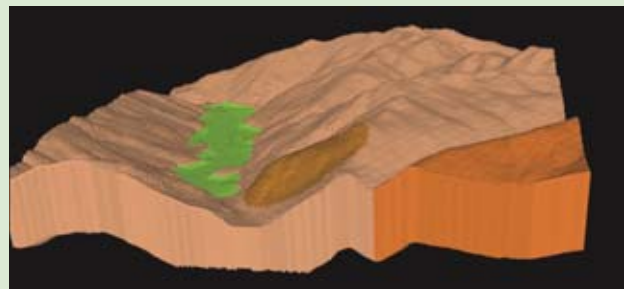
Grand Challenge : des simulations très réalistes

2

La propagation des mouvements élastiques, la rupture des milieux continus, les mouvements de blocs... tous ces phénomènes sont du ressort de la mécanique des milieux continus. Cependant, selon ces divers domaines d'application, les développements théoriques complémentaires et les solutions des équations associées diffèrent et finalement ne relèvent plus du même formalisme. Dans le cas du **risque sismique**, il est nécessaire de prendre en compte l'ensemble des phénomènes, depuis la rupture jusqu'à la sollicitation des bâtiments, en passant par la propagation des **ondes élastiques** dans un milieu géologique complexe. C'est ce qui a été réalisé dans le **code Mka3D**, basé sur une approche de la **modélisation** fine de l'ensemble des phénomènes, et qui permet donc de les appliquer dans un milieu réaliste.

Dans l'exemple présenté, qui a nécessité l'utilisation de 500 processeurs pendant 40 heures sur les supercalculateurs Tera du CEA (soit un total de 20 000 heures de calcul), une **faille** génère un **séisme** d'une **magnitude** de 5,5 sur l'échelle de Richter. Les ondes sismiques vont alors se propager dans un milieu tridimensionnel, complexe à la fois par sa forme (topographie) et par sa composition (nature des milieux géologiques). Le domaine étudié est ici à l'échelle d'une ville (11 x 11 km² sur 2 km d'épaisseur). Les ondes sismiques arrivent au pied des bâtiments, également modélisés dans le même calcul, ce qui permet l'interaction directe du sol avec la structure. Une des originalités du logiciel réside justement en sa capacité à gérer

un changement d'échelle très important, entre celle des bâtiments et celle du domaine de propagation des ondes sismiques. L'approche numérique du code Mka3D rend par ailleurs possible la prise en compte d'une physique complexe afin, par exemple, de prévoir les ruptures éventuelles et de suivre l'effondrement d'une structure ou la formation d'un glissement de terrain.



CEA/DAM

Simulation Grand Challenge. L'image représente simplement le milieu de propagation, incluant la faille (séparant les zones orange et brun clair en bas à droite), une topographie détaillée, la présence d'un bassin sédimentaire (en vert) et d'une zone superficielle (en marron au centre) dont les caractéristiques mécaniques sont telles que sa sollicitation par des ondes élastiques est susceptible de provoquer un glissement de terrain. Enfin, des bâtiments sont positionnés au loin, sur la zone sédimentaire.