

- 1 → L'atome
- 2 → La radioactivité
- 3 → L'homme et les rayonnements
- 4 → L'énergie
- 5 → L'énergie nucléaire : fusion et fission
- 6 → Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire
- 7 → Le cycle du combustible nucléaire
- 8 → La microélectronique
- 9 → Le laser
- 10 → L'imagerie médicale
- 11 → L'astrophysique nucléaire
- 12 → L'hydrogène
- 13 → Le Soleil
- 14 → Les déchets radioactifs
- 15 → Le climat
- 16 → La simulation numérique
- 17 → Les séismes



DE LA RECHERCHE
À L'INDUSTRIE



17

→ Les séismes



DES CAPTEURS
À L'EXPLOITATION DES MESURES
ANTICIPER
SURVEILLER
COMPRENDRE



© Commissariat à l'énergie atomique, 2008
Direction de la communication
Bâtiment siège
91191 Gif-sur-Yvette - www.cea.fr



ISSN 1637-5408.



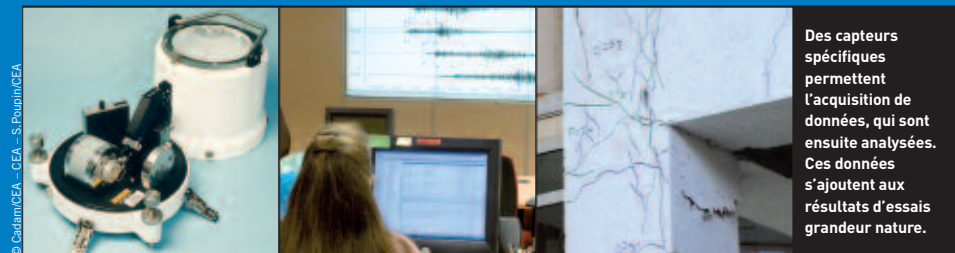
Les séismes

DES CAPTEURS À L'EXPLOITATION DES MESURES	4
Conception des capteurs	5
Analyse des signaux	7
Archivage des données	13
ANTICIPER	16
Aléa et risque	17
Gestion des risques : de multiples paramètres	20
Le laboratoire Tamaris	22
SURVEILLER	24
À l'écoute en continu	25
Réseaux d'alerte tsunamis	27
COMPRENDRE	29
La sismotectonique : trois disciplines en une	30
Simulation : de la faille à la structure	31



Séisme en Italie du nord en 1976.

© D.R.



Des capteurs spécifiques permettent l'acquisition de données, qui sont ensuite analysées. Ces données s'ajoutent aux résultats d'essais grandeur nature.

“Un séisme résulte de la libération brutale d'énergie accumulée par les déplacements et les frictions des différentes plaques.”

des signes aux séismes

À l'échelle des temps géologiques, la surface de la Terre est en permanente évolution : les plaques tectoniques qui constituent sa surface bougent les unes par rapport aux autres. À l'échelle humaine, ces mouvements se traduisent par des séismes qui, brutalement, libèrent l'énergie accumulée au cours du temps. Les vibrations ainsi produites se propagent à l'intérieur de la Terre : ce sont les ondes sismiques. Mais d'autres phénomènes peuvent les engendrer, tels que les volcans, les tirs de carrière... La houle océanique, le vent dans les arbres ou l'activité humaine (industries et circulation routière) constituent ce que l'on appelle le « bruit de fond sismique ». Des capteurs permettent de détecter les signaux qui seront discriminés, analysés et localisés.

Les séismes et les volcans actifs ne sont pas répartis au hasard à la surface du globe : ils sont principalement alignés au niveau des chaînes de montagnes, près des fosses océaniques et le long

de l'axe des dorsales. L'étude de la propagation des ondes sismiques a permis de délimiter les plaques en profondeur et de mettre en lumière leurs mouvements. Ces plaques (on en compte sept majeures) entrent en collision, divergent ou coulisent entre elles. Chaque année, les continents bougent de quelques centimètres les uns par rapport aux autres. Ce processus, connu sous le nom de « dérive des continents », est finalement expliqué par la tectonique des plaques, science dont les hypothèses, qui datent du début du xx^e siècle, ne furent confirmées que dans les années 1960 (voir encadré page 14). Elle révèle que la convection interne terrestre est à l'origine des forces nécessaires à ces déplacements. Cette science, outre le fait qu'elle explique le mouvement des plaques, a fourni un cadre cohérent, unificateur et quantitatif, qui regroupe toutes les manifestations sous un unique mécanisme.

L'HOMME DISPOSE AUJOURD'HUI D'OUTILS TRÈS PRÉCIS POUR MESURER LES MOUVEMENTS DU SOL. DES MESURES QUI SONT ENSUITE ANALYSÉES ET ARCHIVÉES.

Des capteurs à l'exploitation des mesures



“Les capteurs sont placés dans des lieux isolés, à l'abri des bruits urbains et/ou humains.”

CONCEPTION DES CAPTEURS

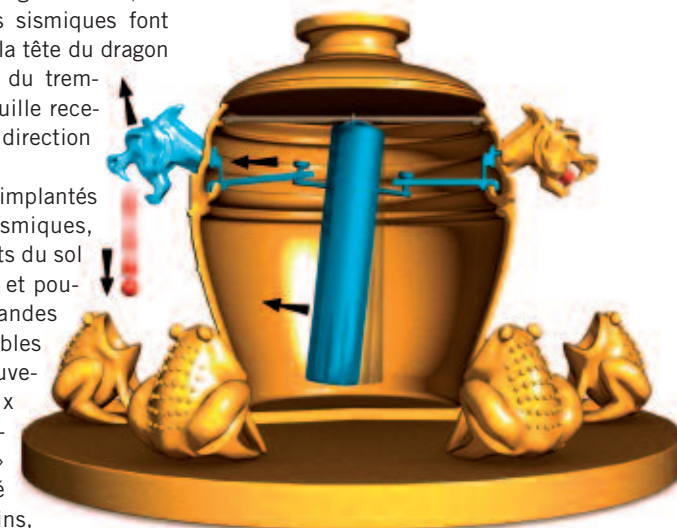
La Terre serait-elle vivante ? Dans l'Antiquité, les « palpitations terrestres » intriguaient nos ancêtres qui croyaient que la Terre était en proie aux colères des dieux.

Pour en savoir davantage et percevoir ses moindres mouvements, des capteurs, plus communément appelés « sismomètres » ou « sismographes », ont été conçus et développés. Le premier connu date de l'an 130 avant J.-C. : il s'agit d'un vase en bronze qui est doté en haut et sur son pourtour de huit têtes de dragon contenant chacune une bille. Au sol sont positionnées huit grenouilles, la gueule ouverte. Les ondes sismiques font vibrer le vase et la bille de la tête du dragon tombera dans la direction du tremblement de terre. La grenouille recevant la bille indique donc la direction approximative du séisme.

Les capteurs sont conçus et implantés pour mesurer les ondes sismiques, c'est-à-dire les mouvements du sol engendrés par les séismes et pouvant se propager sur de grandes distances. S'ils sont très faibles ou très lointains, les mouvements seront faibles eux aussi, à peine plus importants que le « bruit de fond » provoqué soit par l'activité humaine (vibrations des trains, des routes, des mines...), soit par la nature (vent fort dans une forêt, vagues sur

une plage ou des falaises...). Pour limiter ce bruit de fond, les capteurs sont placés dans des lieux isolés, à l'abri des bruits industriels et/ou humains. Ils sont couplés au mieux avec la roche et parfois enterrés. Ils doivent être fiables et capables de fonctionner de façon autonome (leur alimentation électrique est principalement fournie par l'énergie photovoltaïque).

Afin de diffuser rapidement une alerte après un séisme, les informations fournies par les capteurs doivent être transmises dans un

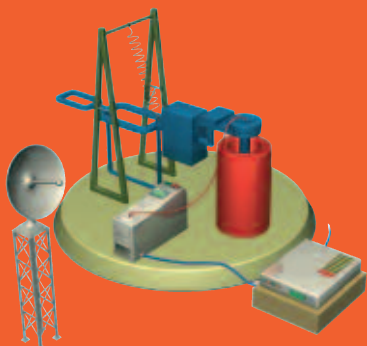


Le premier sismographe connu a été imaginé par les Chinois au deuxième siècle avant notre ère.



Cette station sismique en Mongolie fonctionne en autonome grâce à des panneaux solaires et un relais satellite.

FONCTIONNEMENT D'UN CAPTEUR SISMIQUE



Un sismomètre exploite le principe d'inertie d'une masse assez lourde, fixée sur un bras suspendu par un ressort au-dessus d'un bâti solide du sol. À l'autre extrémité du bras, une bobine conductrice est plongée dans un aimant qui repose sur le bâti. Lorsque le sol tremble, la masse reste immobile en raison de son inertie, tandis que le bâti suit les vibrations provoquées par le passage des ondes sismiques. L'aimant bouge autour de la bobine qui perçoit une variation du champ magnétique. Celle-ci produit alors des impulsions électriques, amplifiées électroniquement et traitées par un boîtier de numérisation. Ces signaux sont ensuite transmis par satellite aux centres de surveillance.

centre de traitement qui les centralise pour qu'elles soient ensuite étudiées par les analystes. Des lignes téléphoniques ou des satellites sont utilisés pour ces transmissions.

L'évolution des technologies (mécanique, électronique, traitement du signal...) permet de disposer actuellement de capteurs très sensibles, c'est-à-dire capables de mesurer des mouvements d'amplitude inférieurs au nanomètre (milliardième de mètre).

Les sismomètres modernes mesurent le mouvement du sol dans ses trois dimensions (verticale et horizontales) et le caractérisent par son déplacement, sa vitesse ou son accélération.

Ceux dits de « courte période » sont destinés à la mesure des ondes de volume, dont les périodes sont principalement situées au-dessous de 2 secondes (fréquence supérieure à 0,5 hertz). D'autres, dits de « longue période »,

enregistrent des mouvements plus lents et sont notamment destinés à l'enregistrement des ondes de surface, dont les périodes sont supérieures à 20 secondes (fréquence inférieure à 0,05 Hz). Ils permettent aussi d'étudier les séismes de forte magnitude.

Nombre d'oscillations par seconde.

ANALYSE DES SIGNAUX

Les séismes, les vagues, le vent, les éruptions volcaniques, les tirs de carrière, les trains, la circulation routière, les explosions peuvent chacun provoquer des mouvements du sol, des ondes sismiques. Les signaux seront d'amplitudes et de fréquences différentes en fonction de l'énergie de l'événement, de sa distance et de sa nature. La géologie des milieux traversés par les ondes modifie également leurs caractéristiques...

Lorsque des signaux sont reçus sur les capteurs et transmis au centre de traitement situé au CEA DAM-Ile de France, à Bruyères-le-Chatel, ils sont analysés automatiquement par des logiciels informatiques pour rechercher l'origine, principalement la localisation et la magnitude

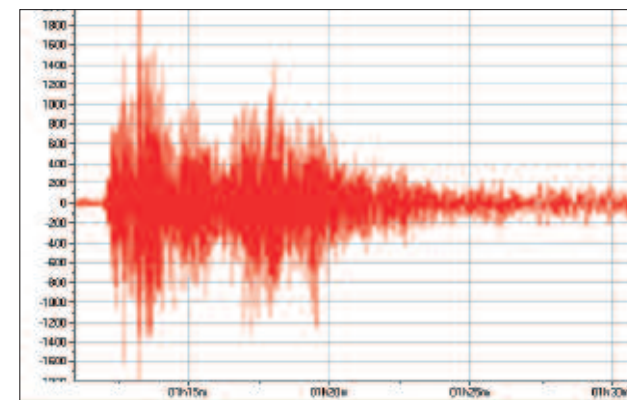
du séisme qui les a engendrés. L'objectif prioritaire est d'alerter les autorités locales et la population le plus rapidement possible. En cas d'événement suffisamment fort, un analyste d'astreinte est automatiquement appelé et apporte son expertise pour affiner ou valider ces résultats, puis prévenir les autorités. Toutes ces analyses sont ensuite archivées dans des bases de données qui sont essentielles pour enrichir notre connaissance en sismologie et pour étudier l'aléa sismique (voir page 17).

Le premier objectif du travail d'analyste consiste à reconnaître les sismogrammes – les signaux utiles –, dans les enregistrements continus. La deuxième étape sera de reconnaître les différentes ondes dans cette

Enregistrement graphique des mesures fournies par un sismomètre.



© C. Dupont/CEA



Ce type de capteur sismique (photo de gauche) est particulièrement adapté à l'étude des ondes de surface et de volume générées par les séismes. Ce signal (photo de droite) dû au séisme de Sumatra a été enregistré à la station de Flers, située dans l'Orne.

séquence constituant le signal enregistré :

- les ondes P (primaires) sont des ondes de compression. La propagation de l'onde est parallèle au déplacement du sol qui est successivement dilaté et comprimé. Ce sont les plus rapides, de l'ordre de 6 km/s (dans les couches de terrain proches de la surface), et celles que le sismographe perçoit en premier.
- les ondes S (secondaires) sont des ondes de cisaillement. Les roches sont cisailées et travaillent en distorsion, entraînant des vibrations perpendiculaires au sens de propagation de l'onde. Elles sont plus lentes que les ondes P.
- les ondes L ou R, dites « ondes de surface », se propagent à la surface de la Terre et sont les plus destructrices.

Les ondes sélectionnées sont liées à un événement important : séisme, explosion... Reste à déterminer sa localisation, sa magnitude et sa nature.

Localisation par les ondes

En réalité, la reconnaissance du type d'ondes ne suffit pas à localiser l'événement. Il est aussi nécessaire d'identifier le trajet parcouru par l'onde entre l'épicentre et la station.

La structure interne de la Terre est répartie en plusieurs enveloppes successives, dont les principales sont la croûte terrestre, le manteau et le noyau. Au début de l'histoire de la sismologie, pour repérer ces couches, les sismologues ont utilisé les ondes sismiques et une loi : un changement rapide et brutal des caractéristiques d'une onde sismique est un

DIFFÉRENTS TYPES D'ONDES

Ondes P : primaires

Ondes S : secondaires

Ondes L : Love

Ondes R : Rayleigh

indice fort indiquant qu'il y a changement de milieu, donc de couche. Cette méthode a permis de déterminer l'état de la matière à des profondeurs que l'homme ne peut atteindre, le plus profond sondage géologique étant à ce jour de 12 km. Chaque couche a ainsi pu être modélisée en termes de vitesse et d'atténua-

tion des ondes sismiques et participe ainsi à une représentation de la Terre qui est intégrée aux méthodes de localisation. Toutes les stations de mesures sont dotées d'une référence horaire GPS qui permet de dater avec une grande précision les signaux transmis aux analystes. Les temps d'arrivée des

LA PROPAGATION DES ONDES DE L'HYPOCENTRE À L'ÉPICENTRE

intensité décroissante

épicentre

hypocentre

propagation des ondes

mouvements le long de la faille

- Les ondes sismiques partent du foyer puis se propagent dans toutes les directions. Leurs effets s'atténuent avec la distance.
- Foyer ou hypocentre : point de rupture des roches, origine du séisme, pouvant se trouver entre la surface et 700 km.
- Faille : cassure provoquée par un brusque déplacement latéral ou vertical de plaques. Cette cassure provoque des vibrations, les ondes sismiques.
- Épicentre : lieu en surface, à la verticale du foyer.

ondes sont mesurés en **temps universel**. Ensuite, connaissant la position des capteurs sismiques sur la Terre, l'origine de l'événement peut être calculée selon plusieurs méthodes, comme la triangulation (voir encadré ci-dessous). Les événements artificiels comme les tirs de carrière se produisent à la surface du globe (ou pas très loin). En revanche, les séismes, eux, peuvent être beaucoup plus profonds. On distingue usuellement :

Temps utilisé par les astronomes afin d'obtenir des données précises sans décalage horaire.

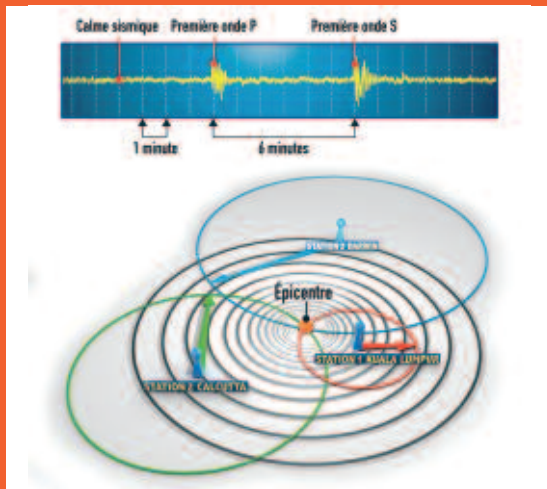
- les séismes peu profonds, dits de surface, qui se situent entre 0 et 60 km ;
- les séismes intermédiaires qui se produisent entre 60 et 300 km ;
- les séismes profonds qui se localisent entre 300 et 700 km.

La magnitude, mesure de l'énergie

La magnitude mesure l'énergie dégagée lors d'un séisme ou d'une explosion. L'échelle de Richter, la plus connue et la plus utilisée,

COMMENT LOCALISER UN SÉISME

La méthode de triangulation, dite aussi des cercles et décrite ci-contre, a longtemps été utilisée pour les séismes peu profonds. Les différentes ondes sismiques peuvent être identifiées sur un sismogramme. L'écart de temps entre l'arrivée des ondes P et S permet de déduire la distance du capteur à l'épicentre. Puisque plusieurs stations sismiques donnent une valeur de la distance, la position de l'épicentre est localisée à l'intersection des cercles tracés ayant pour centre les stations et pour rayon les distances trouvées à chaque station. Actuellement, des calculs automatiques et informatiques, qui incluent des modèles de propagation plus précis, permettent de prendre en compte tous les types d'ondes et un très grand nombre de mesures.



indique la magnitude à partir de la mesure de l'amplitude du mouvement du sol, déterminée d'après l'enregistrement obtenu sur un sismomètre d'un type particulier (Wood-Anderson) à 100 kilomètres de l'épicentre. Créée en 1935 par Charles Francis Richter et Beno Gutenberg, il s'agit d'une échelle logarithmique: les ondes sismiques d'un séisme de magnitude 6 ont une amplitude dix fois plus grande que celles d'un séisme de magnitude 5 et un séisme de magnitude 6 libère environ trente fois plus d'énergie.

Contrairement à une idée reçue, l'échelle est ouverte et sans limite supérieure. Toutefois, les séismes de magnitude 9 sont exceptionnels, le plus fort jamais mesuré a atteint la valeur de 9,5 et s'est déclenché le 22 mai 1960 au Chili. Une magnitude 10 semble être une limite raisonnable si l'on tient compte de la solidité des roches et de la fragmentation des failles. Pour les explosions, on traduit la magnitude en énergie ramenée en tonnes de TNT (explosif). Pour décrire les dégâts d'un séisme, on utilise

LES DIFFÉRENTS TYPES DE SÉISMES ET LEURS CARACTÉRISTIQUES

(SELON L'ÉCHELLE DE RICHTER)

MAGNITUDE	DESCRIPTION	EFFETS CONSTATÉS	FRÉQUENCE DANS LE MONDE
moins de 2,0	Micro	Microséisme, non ressenti.	8 000 par jour
2,0 à 2,9	Très mineur	Généralement non ressenti, mais détecté par les sismographes.	1 000 par jour
3,0 à 3,9	Mineur	Souvent ressenti, causant très peu de dommages.	50 000 par an
4,0 à 4,9	Léger	Objets secoués à l'intérieur des maisons, bruits de chocs, quelques dommages.	6 000 par an
5,0 à 5,9	Modéré	Dommages légers à majeurs selon les habitations.	800 par an
6,0 à 6,9	Fort	Destructeur dans des zones jusqu'à environ 180 kilomètres de l'épicentre.	120 par an
7,0 à 7,9	Majeur	Dommages sévères dans des zones plus vastes.	18 par an
8,0 à 8,9	Important	Dommages sérieux dans des zones à des centaines de kilomètres de l'épicentre.	1 par an
9,0 et plus	Exceptionnel	Dommages très sérieux dans des zones à des centaines de kilomètres de l'épicentre.	1 à 5 par siècle

des échelles dites d'intensité, comme l'échelle de Mercalli ou l'échelle MSK.

L'intensité, de I à XII

L'intensité décrit les effets dus à un séisme sur une échelle allant en général de I à XII. Elle dépend de la distance par rapport à l'épicentre. Pour une intensité égale à I, le séisme n'est pas ressenti. À VI, les cheminées des habitations tombent. À partir de IX, les dégâts sont très importants ; ce fut le cas lors du séisme de Kobé au Japon, en janvier 1995. À XI, la ruine est quasi totale, à XII toutes les constructions sont détruites et les paysages sont complètement bouleversés.



Dégâts provoqués par un séisme.



Station sismique installée dans les Alpes.

Séisme, explosion ou éruption ?

L'observation des ondes sismiques, la localisation de l'événement et sa magnitude vont permettre aux analystes d'en déterminer la nature. Ils ont pu ainsi dégager les principes suivants :

- un séisme est la libération brutale, par un déplacement le long d'une faille, de l'énergie accumulée par les lents mouvements des plaques tectoniques. L'émission des ondes sismiques est conditionnée par l'orientation de ces failles, produisant ainsi, à distances égales, des amplitudes différentes en fonction de l'orientation de la station par rapport à la faille. Notons aussi que les très fortes magnitudes sont toujours d'origine sismique.
- une explosion produit de l'énergie pendant un temps très bref, rayonnée dans toutes les directions. De plus, ce sont principalement des ondes de compression qui sont émises.
- la majorité des éruptions volcaniques génère une énergie sismique très faible, bien qu'une éruption de type phréato-magnétique comme celle du mont Saint Helens (État de Washington) de 1980 ait pu être enregistrée par des appareils distants de plusieurs centaines de kilomètres. Mais la surveillance des volcans est en général réalisée par un ensemble de capteurs assurant des mesures variées (composition chimique des gaz, pression...) permettant parfois

d'identifier des signes précurseurs et d'évacuer les populations concernées.

En fonction des cas, notamment pour des signaux extrêmement faibles, des analyses approfondies sont nécessaires pour aboutir à une détermination sûre.

L'ARCHIVAGE DES DONNÉES

Toutes les analyses et tous les signaux sont archivés. L'Institut de physique du globe de Strasbourg possède des données instrumentales et des intensités pour la France, l'Afrique du Nord et quelques pays étrangers depuis le début du XX^e siècle. Au Département analyse, surveillance, environnement du CEA (Dase), la base de données remonte aux années 1960. Elle s'enrichit de 200 000 mesures par an, correspondant à environ 7 000 événements,

LES DIX PLUS IMPORTANTS SÉISMES ENREGISTRÉS

Lieu	Date	Magnitude
Chili	22/05/1960	9,5
Sumatra	26/12/2004	9,2
Alaska	28/03/1964	9,2
Alaska	03/09/1957	9,1
Kamtchatka	04/11/1952	9,0
Équateur	31/01/1906	8,8
Alaska	04/02/1965	8,7
Sumatra	28/03/2005	8,6
Assam-Tibet	15/08/1950	8,6
Kamtchatka	03/02/1923	8,5

RÉSEAU DE CAPTEURS EN FRANCE MÉTROPOLITAINE



dont 3 500 sont situés en France et en Europe proche, recueillies par le réseau de 40 capteurs répartis sur le territoire français.

En croisant les données historiques comme les écrits et les témoignages, les scientifiques peuvent identifier des séismes bien plus anciens. Les informations ne sont pas aussi précises que celles enregistrées par un capteur, mais elles permettent d'évaluer le risque sismique dans des zones où ils ne surviennent que tous les cent ans, voire plus...

L'activité sismique française la plus forte se situe en Guadeloupe et en Martinique. En France métropolitaine, elle n'est pas aussi importante que dans d'autres régions du globe, comme le Japon, la Californie, la Grèce, la Turquie... C'est une région à sismicité faible. Cependant, les risques restent présents : le séisme de Lambesc (Provence) en 1909 a détruit plusieurs villages et a fait 40 morts. D'autres séismes importants ont eu lieu : Arette (Pyrénées-Atlantiques) en 1967,

DE LA DÉRIVE DES CONTINENTS À LA TECTONIQUE DES PLAQUES

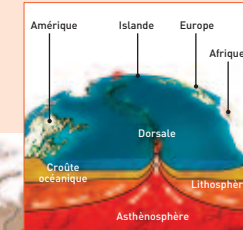
Alfred Wegener, astronome et météorologue allemand, est le fondateur de la théorie de la « dérive des continents » élaborée en 1915. Cette théorie a été complétée dans les années 1960 par celle de la « tectonique des plaques » qui explique l'origine du mouvement des continents.

À partir de l'analyse de différentes données – topographiques (emboîtement des côtes d'Afrique et d'Amérique du Sud), géologiques (même type de roches datant de 650 à 450 millions d'années en Afrique et en Amérique du Sud) et paléontologiques (mêmes fossiles retrouvés) – il a émis l'idée que c'est la fracturation d'un continent unique, la Pangée, qui a été à l'origine de l'existence de plusieurs continents. Cette théorie a été longtemps controversée car il ne savait pas comment expliquer l'origine du mouvement des continents, c'est-à-dire le « moteur » de ces déplacements. Elle a par conséquent été rejetée. De nombreuses observations complémentaires ont été réalisées par la suite; les études associées ont alors permis d'élaborer dans les années 1960 une théorie plus complète, dénommée la tectonique des plaques, qui explique l'ensemble des phénomènes.

La lithosphère, partie supérieure du manteau et de la croûte, est découpée en plaques rigides, épaisses d'une centaine de kilomètres en moyenne. Elles se déplacent extrêmement lentement, de quelques centimètres par an en moyenne, sur l'asthénosphère plus ductile (maillable, elle peut être étirée sans se rompre). Ces déplacements sont responsables de la création des chaînes de montagnes aériennes (comme les Alpes ou l'Himalaya) ou sous-marines (dorsales océaniques) et des volcans. Les forces induites par ces mouvements produisent une énergie considérable qui s'accumule et se relâche brutalement au niveau des failles sismiques sous forme de tremblement de terre. Ces déplacements entraînent des ruptures de la surface terrestre. Ces failles sont des photos d'identité des séismes. Leur forme, leur longueur et les désordres des paysages qu'elles provoquent ont permis de distinguer trois types d'interactions des plaques.

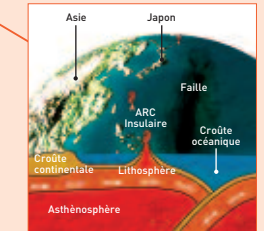
1 – La divergence: lorsque deux plaques s'éloignent l'une de l'autre, laissant le manteau remonter entre elles. C'est le lieu de formation de la lithosphère océanique et le siège d'un volcanisme intense, essentiellement sous-marin.

Divergence



2 – La convergence: lorsque deux plaques se rapprochent l'une de l'autre, pouvant provoquer deux effets différents:

- * une zone de subduction, là où la plaque la plus dense (plaque océanique) « plonge » sous une autre moins dense (océanique ou continentale), entraînant le volcanisme terrestre. Par exemple, la création des arcs insulaires volcaniques du Japon aux îles Kouriles et Aléoutiennes est provoquée par la subduction de la plaque pacifique sous la plaque eurasiennne.

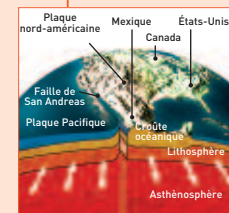


Subduction

- * une zone de collision continentale, lieu de confrontation de deux plaques qui se chevauchent et se soulèvent, qui est à l'origine de la formation des montagnes: l'Himalaya lorsque l'Inde s'est dirigée vers le nord et les Alpes dans le cas de l'Italie. * cas particulier: une zone d'obduction (ou chevauchement) d'une plaque continentale par une plaque océanique, comme les ophiolites d'Oman.

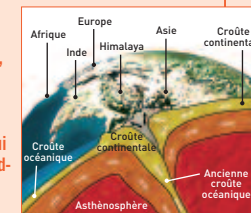


La partie supérieure du manteau et de la croûte terrestre est constituée de plaques rigides, épaisses d'une centaine de kilomètres en moyenne, qui se déplacent de quelques centimètres par an.



Décrochement

3 – Le décrochement (ou transcurrence): lorsque deux plaques glissent horizontalement, l'une à côté et le long de l'autre, le long de grandes failles transformantes. Par exemple, la plaque de l'océan Pacifique qui coulisse le long de la plaque nord-américaine, de chaque côté de la célèbre faille de San Andreas, à l'origine des séismes californiens.



Collision

Oléron (Charente-Maritime) en 1972, Bonnevilliers (Haute-Savoie) en 1994, Rambervilliers (Vosges) en 2003 ou encore Lourdes (Hautes-Pyrénées) en 2006. Ces séismes sont la conséquence du rapprochement entre l'Afrique et l'Eurasie.

Toutes ces informations sont utilisées pour de très nombreuses études, comme:

- l'amélioration de la localisation et la détermination de la magnitude des séismes actuels;
- l'augmentation de la sensibilité des analyses pour permettre de mieux caractériser les détails des sources sismiques;
- l'établissement de la carte des risques sismiques;
- l'approfondissement des connaissances de la Terre.



Poste de travail d'analyste: entre visualisation des sismogrammes et traitement informatique des données.

S'IL EST IMPOSSIBLE DE PRÉVOIR L'ARRIVÉE D'UN SÉISME, LES CONNAISSANCES ACQUISES PERMETTENT D'ÉVALUER LE RISQUE SISMIQUE.

Anticiper

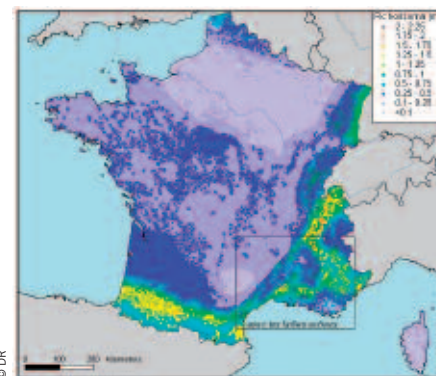


© C. Dupont/CEA

ALÉA ET RISQUE

L'analyse de l'aléa sismique permet de répondre à des demandes du type : Quelles seraient les accélérations du sol attendues à Lourdes dans le cas d'un séisme de magnitude 6 sur telle faille ? Ou : Quels sont les risques de dépasser une accélération donnée du sol à Nice dans les 50 prochaines années ? Elle se base sur les connaissances acquises grâce à la sismicité historique, l'occurrence des tremblements de terre et des mouvements forts du sol qui en découlent. Lorsque le scénario est inédit, la simulation numérique est utilisée. Cette analyse permet, par extension, de réaliser une carte de l'aléa sismique.

Il faut faire la distinction entre aléa et risque. Le risque sismique est l'impact de l'aléa sismique sur l'activité humaine en général. L'aléa



© DR

Carte des aléas sismiques en France.



© D.R. - Photofisc

Paysages dévastés par un séisme.

sismique est élevé dans une région ayant une activité sismique importante. Mais à cet aléa élevé ne correspond pas forcément un risque élevé si la région est déserte ou ne comporte pas de constructions. En revanche, même une zone ayant une sismicité modérée peut être considérée à haut risque du fait de la densité de population, de l'importance des constructions ou de la présence d'infrastructures sensibles (usines chimiques, centrales nucléaires, dépôts de carburant, etc.). Il existe un risque lorsque l'aléa menace des enjeux vulnérables (population, infrastructures).

Déterminer le risque sismique, c'est calculer la probabilité et le niveau des dommages au cours d'une période de référence et dans une région considérée.

NON, ON NE PEUT PAS PRÉVOIR UN SÉISME

Depuis l'Antiquité, on a cherché à prédire les tremblements de terre... sans succès. Les sismologues tentent d'identifier des signes précurseurs, mais aucun ne semble avoir de valeur universelle. Les scientifiques ne peuvent pas indiquer la date, le lieu et la magnitude du prochain tremblement de terre. Ils ne peuvent qu'évaluer le risque sismique au voisinage des failles bien identifiées, en termes de probabilités et de mesures du degré de plausibilité, compte tenu des informations disponibles : activité sismique passée, intervalle de récurrence (intervalle de temps entre deux événements successifs au même endroit)...

Cas particulier à surveiller : les tsunamis

Un tsunami est une série de vagues provoquées à l'origine par un mouvement brusque du fond de l'océan, généralement suite à un séisme, une éruption volcanique ou un glissement de terrain sous-marin ou terrestre (comme, en 1958, le séisme de Lituya Bay en Alaska) ou, beaucoup plus rarement, par des chutes d'astéroïde ou de comète.

Les tsunamis générés par des séismes sont imperceptibles au large : leur amplitude dépasse rarement 10 à 50 cm loin des côtes, et les vagues ne se succèdent que toutes les 20 à 40 minutes. Les tsunamis générés par des glissements de terrain peuvent être beaucoup plus dévastateurs mais leur impact reste très près de la source.

Le tsunami n'a des effets que lorsque le train de vagues s'approche des côtes. En effet,



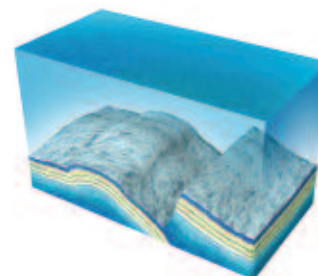
Paysage côtier suite au passage d'un tsunami.

“De nombreuses vagues destructrices peuvent se succéder pendant plusieurs heures, les plus importantes n'étant pas forcément les premières.”

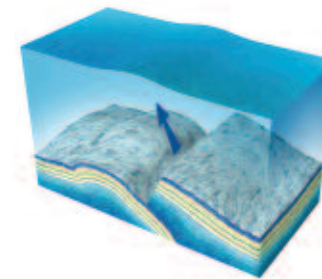
lorsque l'épaisseur d'eau devient plus petite, la vitesse de propagation décroît et, par conservation de l'énergie, les vagues augmentent beaucoup en amplitude. Ainsi, les vagues de 10 à 50 cm au large peuvent monter jusqu'à des hauteurs de 3-5, voire 10 m. D'énormes dégâts peuvent alors se produire, notamment par les très forts courants engendrés lors du flux et du reflux et par leur capacité à happer les personnes au large. Les victimes peuvent recevoir divers objets charriés ou être projetées violemment. Les dégâts matériels sont souvent considérables : habitations, infrastructures, faune et flore (écosystème) sont détruites. Il faut souligner que de nombreuses vagues destructrices peuvent se succéder pendant plusieurs heures, les plus importantes n'étant pas forcément les premières. Lors du grand tsunami du 26 décembre 2004 qui a eu lieu au large de l'île indonésienne de Sumatra, des vagues ont atteint 30 m à la côte et ont envahi les terres avec des hauteurs de 5 à 10 m sur plusieurs kilomètres.

Durant les derniers siècles, 75 % des tsunamis se sont produits dans l'océan Pacifique, notamment en raison de la très forte activité sismique

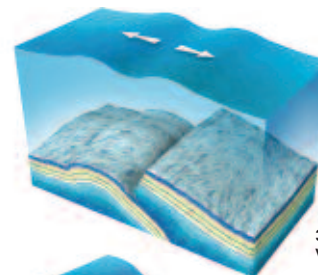
FORMATION D'UN TSUNAMI



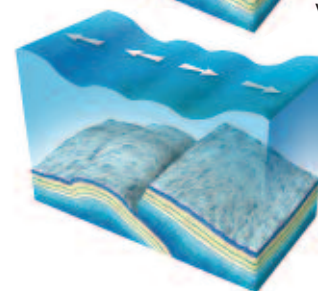
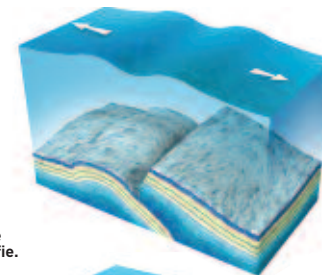
1 – La cause des tsunamis est principalement liée aux séismes sous-marins.



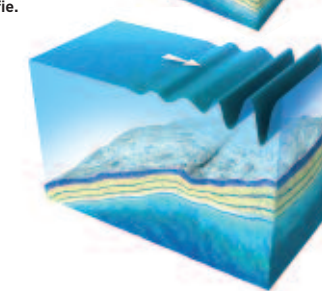
2 – La propagation des ondes sismiques au niveau sous-marin déclenche un train de vagues, représentatif d'un tsunami.



3-4 – Le train de vagues s'intensifie.



5 – Au-delà de l'épicentre du séisme, en eau profonde, le tsunami atteint en général quelques dizaines de centimètres de hauteur, mais la hauteur de ses vagues va augmenter rapidement en eau peu profonde.



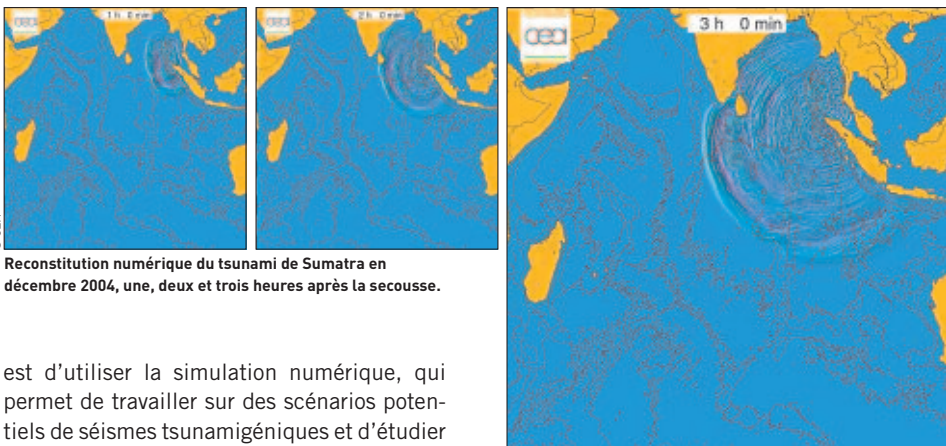
6 – Lorsque le fond sous-marin remonte, à l'approche des côtes, les vagues ralentissent en s'amplifiant. Le niveau de la mer augmente de 1 à 20 m, et l'eau envahit l'intérieur des terres.

autour de cet océan. Le tsunami de Sumatra rappelle que d'autres océans peuvent être touchés, bien que plus rarement. Ce séisme, d'une magnitude de 9,2, a provoqué un tsunami qui a touché l'Indonésie, le Sri Lanka, le sud de l'Inde et le sud de la Thaïlande. Il a été observé sur tout le pourtour de l'océan Indien, jusqu'aux

côtes est-africaines de Somalie, à La Réunion et aux côtes nord-ouest de l'Australie. On a dénombré 280 000 disparus.

Le manque de données historiques ne permet pas toujours de connaître l'exposition potentielle de toutes les côtes. Un bon moyen d'améliorer la connaissance de l'aléa tsunami

“La gestion des risques passe par la prise en compte de très nombreux paramètres géologiques.”



© CEA

Reconstitution numérique du tsunami de Sumatra en décembre 2004, une, deux et trois heures après la secousse.

est d'utiliser la simulation numérique, qui permet de travailler sur des scénarios potentiels de séismes tsunamigéniques et d'étudier en détail les impacts à attendre. Ainsi, les travaux en cours sur le tsunami de 2004 montrent que, en connaissant bien la topographie locale et en utilisant une source décrivant ce séisme exceptionnel, on reproduit de manière satisfaisante le niveau des inondations observées. L'enjeu de la prévention des tsunamis est de pouvoir mener ce type d'études sur tous les sites exposés, et ce avant que les grands séismes ne se produisent.

GESTION DES RISQUES : DE MULTIPLES PARAMÈTRES

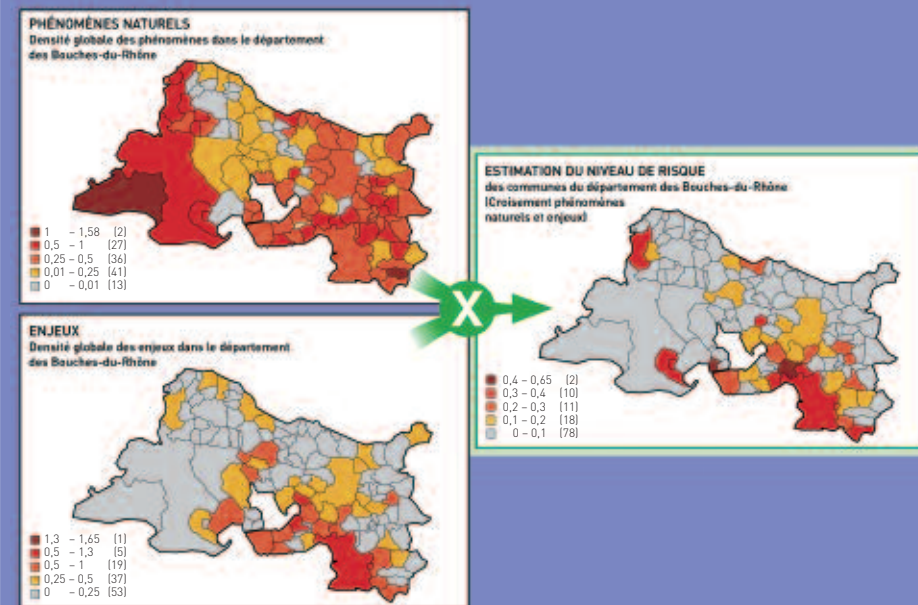
La gestion des risques passe par la prise en compte de très nombreux paramètres géologiques (sismicité, mouvements de terrain, phénomènes de retrait-gonflement des argiles sensibles à la sécheresse, effondrements liés aux carrières souterraines et aux mines abandonnées,

activité volcanique), climatiques, géographiques, démographiques et économiques. Elle porte sur la connaissance de chaque phénomène et sa modélisation, sur l'évaluation des dangers correspondants, par la surveillance, l'étude de la vulnérabilité des sites exposés et l'évaluation du risque. Par exemple, le projet ISARD s'occupe de l'analyse sismique automatique régionale des dommages pour la prévention sismique dans l'est des Pyrénées. L'information géologique bénéficie des apports des programmes de recherche et développement sur la cartographie (campagnes aéromagnétiques et de spectrométrie, travaux de caractérisation physico-chimique). Les vues aériennes et satellitaires sont aussi analysées pour recenser les déformations des paysages telles

que des terrains bombés, de brusques ruptures de couches rocheuses... Compte tenu de tous ces paramètres, il faut construire au bon endroit. Par exemple, lors d'un tremblement de terre, les sols sableux gorgés d'eau se désagrègent sous l'effet des vibrations. S'ils soutiennent des fon-

dations, les constructions s'enfoncent dans ces « sables mouvants ». Mieux vaut donc éviter ces sols « liquéfiables » du bord de l'eau... et se méfier de tous les sols mous. Dans l'argile, les mouvements peuvent être jusqu'à dix fois plus forts que dans des roches rigides, couplant les

LE CAS DES BOUCHES-DU-RHÔNE (SOURCE BRGM)



La combinaison de nombreux paramètres aboutit à des documents cartographiques permettant d'orienter des décisions d'aménagement en fonction des zones vulnérables aux risques

“Les constructions, en particulier les bâtiments publics et les installations à risque, sont soumises à une réglementation stricte dans les zones sismiques.”

effets de séisme lointain et les effets de site (ce fut le cas du séisme de Mexico en 1985, ville construite sur un lac asséché, ou de celui de la Marina de San Francisco édiflée sur des sédiments du bord de la baie).

Dans ce domaine, l'abondance de données numériques et de modèles sophistiqués est de première importance. Ils permettent la réalisation de cartes très fines des aléas et risques sismiques, des mouvements de terrain, des cavités souterraines, et la constitution de banques de données (comme SisFrance pour les séismes). Cette cartographie est utilisée dans la gestion des ressources naturelles, l'environnement et l'aménagement du territoire (de la mise en place de mesures pour la prévention à la restriction des droits d'usage de terrains selon le Plan de prévention des risques).

Les cartes des dommages se calquent souvent sur les cartes des sols. La prévention des risques, qu'ils soient naturels, amplifiés, voire créés par une industrialisation et une urbanisation croissantes, est une composante majeure des décisions d'aménagement du territoire.

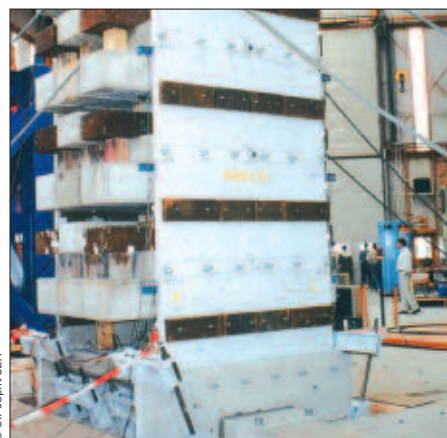
LE LABORATOIRE TAMARIS

Les zones sismiques en France sont soumises à des lois réglementant les constructions, en particulier les bâtiments publics et les installations à risque comme les centrales nucléaires (loi particulière du 22 juillet 1987 et décret du 14 mai 1991).

Les études confiées au laboratoire Tamaris du CEA permettent de mieux comprendre et de

prédire le comportement sismique des structures. L'objectif est de vérifier la conformité d'installations vis-à-vis de ces règles, et donc de réduire les conséquences des séismes pour la population. Pour cela, le laboratoire dispose d'importants moyens expérimentaux et de simulation numérique.

La plateforme expérimentale regroupe quatre tables vibrantes, une fosse et un mur de réaction. Azalée est la plus grande des tables vibrantes : 6 mètres de long et de large, 2 mètres d'épaisseur. Elle peut simuler des séismes de très forte puissance et embarquer des structures allant jusqu'à 100 tonnes (ce qui permet à nombre d'industriels de juger de la résistance de leurs bâtiments et structures).



© S. Poupin/CEA

La table vibrante Azalée a permis de tester cette maquette de génie civil, à échelle 1/3 et d'une masse de 35 tonnes.

La fosse permet, elle, de tester des structures de grande hauteur, comme des barres de contrôle d'un réacteur nucléaire.

Mais avant de commencer les essais, place à la simulation. Le code CAST3M permet d'effectuer des calculs de prédimensionnement, d'interprétation des essais et des simulations numériques. Il établit ainsi des modèles numériques qui définissent la forme du bâtiment, ses dimensions, sa structure... Suivant ce modèle optimisé, une maquette est réalisée et dotée de capteurs. Puis les chercheurs ajustent les niveaux croissants des séismes à appliquer. Entre chaque essai, les mesures expérimentales sont comparées aux prédictions des modèles numériques. Cette démarche



© S. Poupin/CEA

Ces chercheurs vérifient l'état d'une structure d'environ 20 tonnes après les tests.

LES RÈGLES PARASISMIQUES

La majorité des réglementations actuellement en vigueur dans le monde, que ce soit pour le risque « normal » ou les installations à caractère industriel ou nucléaire, repose sur une approche probabiliste dans l'évaluation de l'aléa sismique. En France, le Dase travaille depuis de nombreuses années sur cette méthodologie et dispose aujourd'hui d'un outil opérationnel pour évaluer l'aléa sismique sur un site donné. Depuis les années 1950, il existe des normes françaises de résistance des bâtiments aux séismes. Elles sont progressivement remplacées par les normes européennes Eurocode 8, intégrant des règles d'applications propres à chaque pays. Ces normes prennent en compte l'expérience internationale, notamment celle des pays européens comme le Portugal, l'Italie ou la Grèce, soumis à une forte sismicité. Les essais sur les tables vibrantes du laboratoire Tamaris ont contribué à leur élaboration.

permet de comprendre le comportement de la structure, ses dégradations locales et, pour les derniers essais à forts niveaux, la ruine du bâtiment. Ces études répondent ainsi aux questions : À partir de quelle sollicitation la structure présente-t-elle des dommages ? Jusqu'à quelle sollicitation résiste-t-elle ? Où et comment s'endommage-t-elle ?

Les spécialistes du domaine parasismique prennent en compte l'ensemble des connaissances acquises sur les séismes passés. Ils développent des méthodes de calcul en s'appuyant sur les observations, les retours d'expériences et les conséquences réelles de séismes. Les essais et les calculs effectués permettent de renforcer les installations existantes et d'améliorer, en collaboration avec d'autres organismes, au CEA ou par exemple au BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières), les normes sismiques européennes pour les constructions futures.

LES ÉVÉNEMENTS SISMIQUES SONT DÉTECTÉS
AUTOMATIQUEMENT SUR TOUTE LA SURFACE DU GLOBE.
UN SYSTÈME QUI PERMET DE RÉAGIR TRÈS VITE.

Surveiller



© C. Dupons/CEA

À L'ÉCOUTE EN CONTINU

Au CEA, les analystes et sismologues du Dase surveillent en permanence la sismicité du globe. Pour la France et les régions voisines, ils se tiennent prêts à alerter la sécurité civile dès qu'un séisme de magnitude 4 et plus se produit, soit environ 30 fois par an. Cette mission d'alerte nécessite l'organisation d'une astreinte : 24 heures sur 24, les scientifiques se relaient pour évaluer les événements sismiques détectés automatiquement par les logiciels. Ils déterminent magnitude et localisation et si besoin prennent l'initiative d'alerter les autorités compétentes (sécurité civile et ministères de tutelle) dans un délai inférieur à une heure.

Dès qu'un signal sismique apparaît, il est détecté, filtré et mesuré. Les algorithmes de traitement du signal *made in* CEA s'enrichissent tous les jours de l'analyse des différents signaux significatifs (détection, localisation, magnitude), permettant de réagir de plus en plus rapidement. Ces résultats d'analyse sont consignés dans un bulletin sismique hebdomadaire, consultable sur internet.

Cette expertise trouve de nombreuses autres applications, comme la surveillance, depuis juin 2001, du TGV Méditerranée pour signaler en temps réel les trop forts déplacements et ralentir ou arrêter les rames en cas de risque. Sur les 240 km traversant des zones à risque sismique, des stations de détection en temps réel, constituées d'un accéléromètre et d'une unité d'acquisition, ont été installées tous les 10 km, à proximité des voies. Les données sont



© P. Demas

Le TGV Méditerranée fait l'objet d'une surveillance sur les 240 km du trajet considérés comme zone à risque sismique.

envoyées par fibre optique au PC de Marseille Saint-Charles où elles sont enregistrées et analysées. Le dépassement d'un premier seuil de magnitude déclenche automatiquement un ordre de ralentissement du train de 300 à 170 km/h. Le dépassement d'un second seuil, plus élevé, conduit à l'arrêt des rames. Dans les deux cas, le système interroge les sismologues du CEA qui confirment ou infirment l'alerte. La SNCF décide alors de reprendre le trafic, à vitesse normale ou ralentie et/ou d'inspecter les voies.

LE TRAITÉ TICE ET LA DÉTECTION DES ESSAIS NUCLÉAIRES

En 1996, lors de la Conférence du désarmement, l'ONU a proposé aux pays du monde entier un Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (Tice). Élément essentiel du dispositif international de lutte contre la prolifération de l'armement nucléaire, le Tice interdit tout essai nucléaire, de quelque puissance qu'il soit, dans l'atmosphère, en souterrain ou sous la mer.

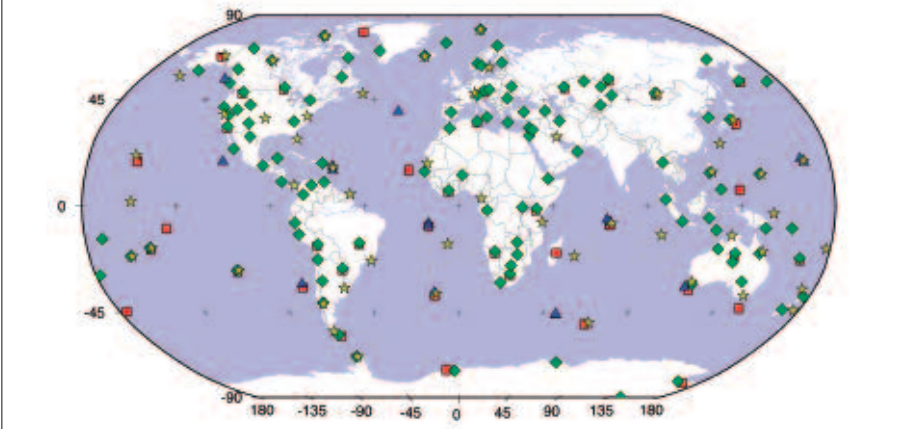
La France l'a signé le 24 septembre 1996 et ratifié le 6 avril 1998.

Au 1^{er} mars 2008, le traité était signé par 178 États, dont 144 l'ont ratifié. Pour qu'il entre en vigueur, les gouvernements des 44 pays susceptibles de détenir l'arme nucléaire doivent l'avoir signé, puis fait ratifier par leurs Parlements respectifs.

Pour vérifier que ce traité est bien respecté, un système de surveillance international (SSI), composé de 321 stations de détection et de 16 laboratoires d'analyses de radionucléides, est en cours de mise en place. Toutes les données collectées par les stations, qu'elles soient sismiques, radionucléides, infrasons ou hydroacoustiques, sont transmises au Centre international de données situé à Vienne.

Experte dans le domaine de la surveillance de l'environnement, la direction des applications militaires du CEA a participé à la définition et au développement du système de surveillance international. C'est le CEA qui est responsable pour la France de l'installation et du fonctionnement de moyens dédiés à la surveillance du respect du Tice. Ainsi le Dase (Département analyse,

LE SYSTÈME DE SURVEILLANCE INTERNATIONAL (SSI)



Carte de l'implantation (au 31 décembre 2007) des stations du SSI (Système de surveillance international) de l'Otice (Organisation du traité d'interdiction complète des essais nucléaires).

■ stations sismiques ■ stations infrasonores ■ stations hydroacoustiques ■ stations radionucléides



© C. Dupont/CEA

Préparation des échantillons pour identifier d'éventuels essais nucléaires. Ces analyses s'inscrivent dans le cadre du contrôle du TNP (Traité de non-prolifération).

surveillance, environnement) a pour mission d'exploiter les 16 stations de surveillance qu'il a installées sur le territoire français (Martinique, Polynésie française, Réunion, Guadeloupe...). Il a également installé 8 autres stations dans le monde (Côte d'Ivoire, Bolivie, Mongolie...) à la demande de pays signataires qui ne possédaient pas la technologie nécessaire.

Les données provenant de ces stations sont transmises sous responsabilité française jusqu'au Centre international de données et, en parallèle, au Centre national de données au CEA à Bruyères-le-Châtel. Ce centre a pour mission principale d'exploiter les données et les signaux fournis par l'ensemble des réseaux de mesures géophysiques accessibles et assure une surveillance 24 heures sur 24 et 365 jours sur 365, pouvant ainsi alerter les autorités en cas d'essai nucléaire potentiel ou de séisme.

Le signal enregistré le 9 octobre 2006 en provenance de la Corée du Nord était caractéristique d'une explosion. Mais sa magnitude relativement faible, entre 3,6 et 3,8, soit une énergie inférieure à une kilotonne, n'a pas permis aux physiciens en charge de l'étude du signal d'identifier clairement l'origine (nucléaire ou chimique) de cette explosion.

RÉSEAUX D'ALERTE TSUNAMIS

Un tel système d'alerte est conçu pour détecter un tsunami quand la vague est encore loin des rivages et pour avertir assez tôt la population concernée afin de sauver des vies. Il est composé de capteurs sismiques et de **marégraphes**

couplés à un système de réception, d'analyse, de prise de décision et d'envoi de messages d'alerte. La réactivité de

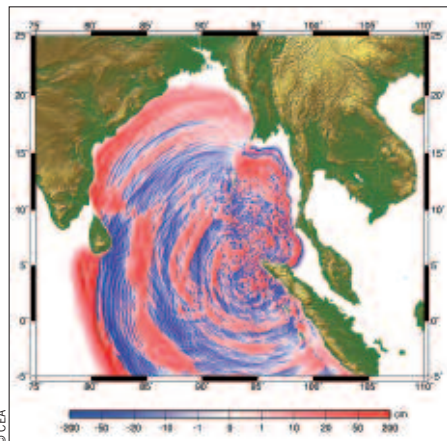
Instruments permettant de mesurer le niveau de la mer à un endroit donné.

ce système doit être très rapide, vu la vitesse de la vague (entre 500 et 1 000 km/h au large). En 1946, la destruction de la baie de Hilo à Hawaii a décidé les États-Unis à créer dans le Pacifique le premier centre d'alerte des tsunamis, qui restent prévisibles sur la ceinture de feu. En 1965, ce centre a été associé à un réseau international de mesure et d'alerte, et c'est l'Unesco (Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture) qui est chargé de le coordonner. Le CEA est un centre d'alerte pour la France en Polynésie. Les scientifiques du QG basé à Ewa Beach à Hawaii :

- récoltent des signaux ;
- localisent, analysent et comparent avec les anciennes données ;
- confirment ou infirment le tsunami ;
- déterminent les baies impactées aux États-Unis ;
- préviennent le(s) pays concerné(s) qui décide(nt) d'une évacuation de ses (leurs) côtes si besoin.

La propagation d'un tsunami prend de 10 à 20 heures d'une côte à l'autre du Pacifique,

“À ces réseaux de surveillance et ces centres d’alerte doivent être associés des plans de prévention des risques et de secours spécialisés.”



© CEA

Modélisation de la propagation du tsunami en 2004 dans l’océan Indien.

ce qui, en dehors de la zone épiscopentrale, laisse le temps de réagir.

Le séisme de Sumatra a malheureusement montré l’urgence à mettre en place un tel réseau de détection et d’alerte dans l’océan Indien. Depuis fin 2005, tous les pays concernés ont déjà nommé des organismes chargés de recevoir les messages d’alerte et de prévenir les protections civiles. Il leur faut initier en parallèle des actions de sensibilisation des populations côtières aux risques et aux gestes de

survie et sécuriser l’habitat. Car le facteur temps est primordial : la propagation jusqu’à la côte la plus proche, en dehors de la zone épiscopentrale, n’a pris ici que deux heures.

Un système d’alerte aux tsunamis est également prévu en Méditerranée et dans le nord-est de l’Atlantique. Toutes les principales régions exposées seront alors surveillées. Dans le périmètre méditerranéen, une des failles les plus dangereuses est proche des côtes algériennes. Les chercheurs ont évalué le temps de propagation de la côte algérienne à la côte française à un peu plus d’une heure. En complément de l’alerte en temps réel, il est primordial de mener une étude des zones à risque. Tous ces réseaux de surveillance et ces centres d’alerte sont inutiles si les autorités et la population ne savent pas comment réagir en cas d’alerte. Il faut donc y associer les plans de prévention des risques (PPR) et les plans de secours spécialisés (PSS) et organiser régulièrement des exercices d’alerte et de mise à l’abri, comme actuellement en Polynésie française, au Japon, aux États-Unis et au Chili.

LA SISMOTECTONIQUE, QUI COMPREND LA TECTONIQUE, LA GÉODÉSIE ET LA SISMOLOGIE, PERMET DE RENDRE COMPTE GLOBALEMENT DU PHÉNOMÈNE DES SÉISMES.

Comprendre



© PhotoDisc

LA SISMOTECTONIQUE : TROIS DISCIPLINES EN UNE

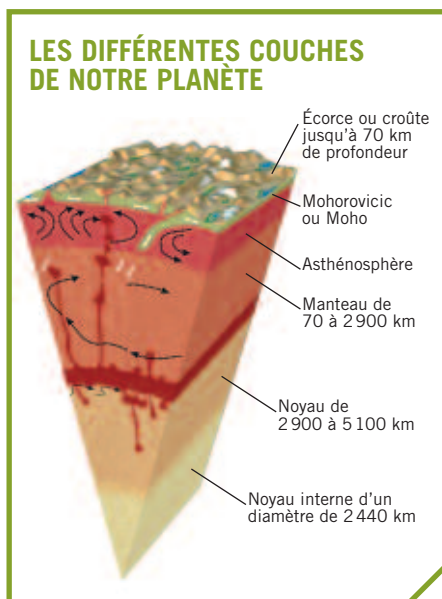
Pour comprendre globalement comment se produit un séisme, la **sismotectonique** concentre trois domaines scientifiques différents et complémentaires : la tectonique (cartographie des failles actives), la géodésie (science qui mesure et représente la surface terrestre), la sismologie (enregistrement et analyse des vibrations du sol).

La géodésie comprend la géodésie globale, qui s'occupe de la détermination de la forme et des dimensions de la Terre, et la géodésie régionale, dont l'un des buts principaux est l'établissement de cartes topographiques à l'échelle d'un pays ou d'une région.

La sismologie a permis de mieux comprendre comment fonctionne notre planète et plusieurs découvertes essentielles ont été faites grâce à la tomographie sismique.

Ces multiples études ont permis de définir les différentes couches qui constituent le cœur de notre planète :

- l'écorce ou croûte, fine et rocheuse, est épaisse de 30 à 70 km (sous les continents) à 5 km (sous les océans). La discontinuité de Mohorovicic, ou Moho, la sépare du manteau ;
- le manteau, très épais (2 900 km), est constitué de roches solides avec une zone au comportement plastique située entre 150 et 650 km de profondeur et appelée l'asthénosphère ;
- du manteau jusqu'à 5 100 km, le noyau, formé de fer et de nickel ;



- le noyau interne, ou graine, de 2 440 km de diamètre, subit des pressions telles qu'il ne peut fondre.

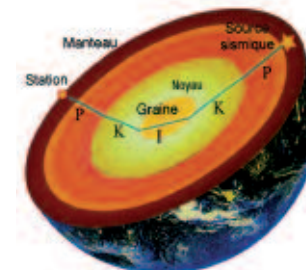
C'est l'analyse des enregistrements des sismographes qui a permis de renouveler le modèle de la Terre au cours du XX^e siècle. Les ondes étudiées dans la tomographie sismique sont les ondes de volume qui parcourent le globe terrestre dans toutes les directions (les ondes de surface ne se propagent que dans la croûte et ne donnent aucune information sur les couches profondes). Pour s'y retrouver, toutes ces ondes ont été désignées par des lettres différentes, combinées au fur et à mesure de leur trajet.

Ainsi, une onde PKP sera une onde P qui ressort en surface après avoir traversé le noyau externe liquide (trajet : manteau/noyau externe/manteau).

LA PROPAGATION DES ONDES

	ONDE P (PRIMAIRE)	ONDE S (SECONDAIRE)
Manteau	P	S
Noyau externe	K	
Noyau interne	I	J

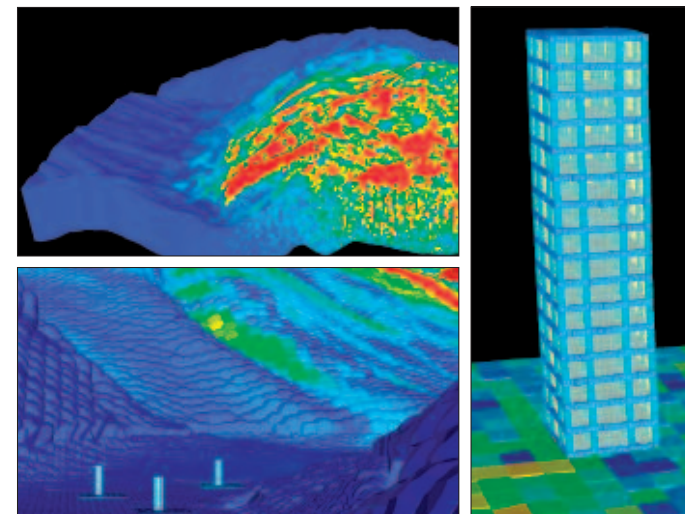
Les différentes couches de la Terre.



SIMULATION : DE LA FAILLE À LA STRUCTURE

La simulation numérique permet de vérifier et de valider complètement la compréhension des phénomènes sismiques. Elle s'appuie sur la description de la rupture de la faille et sur une bonne connaissance des milieux de propagation. Pour la première fois, un calcul complet intégrant les effets de rupture de la faille, de propagation des ondes et même de résonance des bâtiments a pu être réalisé fin 2007 sur le supercalculateur Tera-10 du CEA. La zone dans laquelle ont pu être simulés ces effets avait 10 km de côté et comportait une vallée sédimentaire et une description précise de la topographie des couches de terrain. De plus, une zone dont les

propriétés mécaniques étaient particulières a aussi pu être mise en mouvement, sollicitée par le passage des ondes sismiques. La simulation rend compte de l'ensemble de ces phénomènes.



Simulation numérique réalisée sur Tera-10 et restituée sur un mur d'images. En haut : début de la propagation des ondes (la couleur de plus en plus rouge correspond à des ondes de plus en plus fortes), à partir de la faille qui est située en bas à droite de l'image. 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 ; on note la déformation de la tour.