



HAL
open science

Prévoir le mouvement du sol

Jean Virieux, Christophe Larroque

► **To cite this version:**

Jean Virieux, Christophe Larroque. Prévoir le mouvement du sol. Pour la science, 1995. hal-02918385

HAL Id: hal-02918385

<https://hal.science/hal-02918385>

Submitted on 14 Sep 2020

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

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

Prévoir le mouvement du sol

Jean Virieux et Christophe Larroque

Le séisme meurtrier de Kobé est la preuve cuisante de notre impuissance face à ces catastrophes. Quand pourrons-nous prévoir les séismes comme les météorologues prévoient les cyclones ?

Les tremblements de terre superficiels de forte magnitude (supérieure à 7) transforment des paysages en quelques secondes : ils déplacent des collines, dévient le cours des rivières, détruisent des villes. Le récent séisme, le 10 janvier 1995, de Kobé, au Japon (magnitude 7,2) pose encore cette question lancinante : les effets destructeurs des séismes sont-ils inévitables ? Le Japon prend très au sérieux le risque sismique : des normes parasismiques rigoureuses sont imposées pour les constructions, la population est entraînée à réagir lors de séismes. Pourtant ce tremblement de terre a fait 6 000 victimes et a gravement perturbé l'économie du pays : il a causé plus de 100 milliards de francs de dégâts, les voies de communication ont été coupées, l'arrêt de toute activité a entraîné une perte d'un milliard de francs par jour pendant les jours qui ont suivi la catastrophe.

Pouvait-on prévoir ce désastre dans un pays où les risques sismiques sont importants ? Une préoccupation plus égoïste est de déterminer si notre situation, en France, est aussi précaire. Le récent séisme d'Annemasse (le 14 décembre 1994, de magnitude de 4,5), l'activité sismique inhabituelle de la Haute Provence (séisme de Castellane du 24 novembre 1994 de magnitude 3,1) et les inquiétudes des habitants de la Côte d'Azur indiquent que cette crainte n'est pas académique.

La prévision à court terme est exclue pour le moment. Cela étant, sommes-nous protégés de la catastrophe sismique ? Cette interrogation en amène d'autres : qu'est-ce que l'on entend par protection ? L'évaluation du risque sismique est-elle possible ?

Aléa sismique et vulnérabilité

Deux facteurs composent le risque sismique : l'aléa sismique regroupe l'amplitude, la durée et la fréquence du mouvement du sol lors des séismes, et la vulnérabilité sismique estime les effets induits par le mouvement du sol sur les constructions et par conséquent sur les vies humaines. L'aléa sismique est caractéristique de l'évolution dynamique de la Terre dont on mesure les variations en millions d'années ; cet aléa demeure quasi constant à l'échelle humaine. En revanche la vulnérabilité sismique varie sur de courtes périodes : elle a fortement augmenté ces dernières décennies en raison de la croissance de la population mondiale et de l'évolution des modes de vie de nos sociétés. Notre plus grande vulnérabilité, nous impose une meilleure estimation de l'aléa sismique dans les régions au potentiel sismique reconnu.

Les sismologues chiffrent l'aléa et la vulnérabilité sur les deux échelles caractéristiques des tremblements de terre : l'échelle des magnitudes, anciennement dite échelle de Richter, graduée de 0 à 9, mesure l'amplitude des secousses ; l'échelle des intensités chiffre les dégâts matériels et humains. Certains séismes, imposants selon l'échelle des magnitudes, sont peu crédités sur l'échelle des intensités ; ce fut le cas du séisme survenu le 4 octobre 1994 dans une zone non urbanisée des îles Kouriles. A l'opposé, des séismes de magnitude modérée, survenus dans des zones urbaines, ont eu des effets dévastateurs. La liste est longue mais rappelons le séisme d'Agadir (le 29 février 1960, 12 000 morts, magnitude 5,9), le séisme du Caire (le 12 octobre 1992, 580 morts,

magnitude 5,6), le séisme du Maharashtra (le 30 septembre 1993, 20 000 morts, magnitude 6,4), le séisme de Northridge (le 17 janvier 1994, 51 morts, 30 milliards de dollars de dégâts, magnitude 6,6). Souvenons-nous du désastre de Lisbonne, le 1^{er} novembre 1755, qui fit plus de 20 000 victimes. Toute l'Europe s'en émut et les intellectuels s'interrogèrent sur la destinée de l'Homme, la fatalité et la vengeance divine. Pensons-nous encore, comme le déclarait Voltaire, que «le livre du sort se ferme à notre vue» ? Le séisme de Kobé a frappé, pour la première fois depuis 1948, une région très urbanisée et a fait un grand nombre de victimes alors que sa magnitude est relativement faible pour le Japon.

Déterminer le risque sismique revient à estimer conjointement l'aléa sismique et la vulnérabilité sismique. La vulnérabilité sismique s'évalue à partir d'une connaissance historique des effets de la sismicité sur une région, et dépend de la vétusté des constructions et infrastructures de communication. On sait la jauger pour des bâtiments neufs et la réduire en imposant des normes de construction, dites normes parasismiques. C'est la prévention.

On ne peut évaluer la vulnérabilité que lorsqu'on connaît l'aléa sismique, c'est-à-dire les caractéristiques du mouvement du sol lors d'un éventuel séisme. L'estimation de l'aléa sismique en un lieu donné consiste à prédire le mouvement du sol que provoquera «le futur» séisme affectant ce lieu. Le rêve de tout sismologue est de formuler des prévisions à la manière d'un météorologue ; on n'évite pas un cyclone mais on estime sa puissance et sa trajectoire pour anticiper les dégâts et ainsi les réduire.

Le sismologue souhaite dresser une carte des mouvements possibles du sol. Les ingénieurs parasismiques ont établi, entre 1960 et 1980, des cartes d'accélération maximales du sol, qui ont abouti à des normes en cours de validation ; mais comment pouvons-nous décrire le mouvement du sol pour un séisme à venir alors qu'on ne sait pas le faire après qu'un séisme a eu lieu, faute d'un nombre suffisant de points de mesure ?

Les accélérographes

Les protocoles de protection contre le risque sismique pour les ouvrages d'art sensibles tels que les barrages et les centrales nucléaires sont élaborés à partir des accélérographes (voir la figure 2) des séismes passés. Ces protocoles ont évolué et comportent plus de paramètres que l'accélération maximale du sol. Pour chaque période d'oscillation du sol, on tient compte, en plus, de l'amplitude maximale du mouvement dans un site, estimée par diverses méthodes (analyse tectonique, approche statistique...). Les constructions doivent résister aux séismes dont les signaux auront des amplitudes inférieures aux maximales enregistrées pour chaque période : elles respectent ce que l'on appelle un spectre de réponse.

Le manque d'observations nous place dans une incertitude qui nous oblige, par sécurité, à surestimer le mouvement du sol probable, différent par exemple en bas d'une colline et à son sommet. Cette surestimation est respectée pour des ouvrages d'art (centrales nucléaires, barrages, ponts) mais elle implique des coûts trop élevés pour les habitations, à moins d'interdire toute construction dans une zone à risque (manière efficace de supprimer le problème sismique en créant d'autres problèmes sociaux).

Ces réflexions ont conduit les ingénieurs à proposer des normes parasismiques révisées périodiquement, prenant en compte de plus en plus finement la nature du sol et de ses possibles vibrations. Ainsi les sismologues ont divisé la France métropolitaine en quatre zones sismiques (voir la figure 3) ; des mesures administratives et économiques suivent ce zonage sismique.

De plus les reconnaissances géologiques et l'analyse des accélérographes ont montré qu'un sous-sol constitué par un remplissage sédimentaire peu consolidé (c'est-à-dire une roche contenant 20 à 40 pour cent d'eau) amplifie fortement la secousse sismique. Ces traits devront être considérés lors des révisions périodiques des normes parasismiques.

Les ingénieurs qui mesuraient des accélérographes ne se préoccupaient pas de la source des vibrations que sont les séismes. Leur souci était de connaître le mouvement du sol sur un site de construction, mais que la cause de ce mouvement soit un séisme ou tout autre phénomène, la réalisation du bâtiment n'en était pas modifiée. On a peu analysé les séismes et leurs effets car, bien que répandus à la surface de la Terre, les séismes surviennent brutalement. La

fenêtre d'observation est courte (inférieure à quelques minutes) et il serait coûteux de garder des instruments en alerte durant toute l'année pour ces rares instants.

Ce déficit de données sur les séismes s'explique aussi par la jeunesse de l'observation des ondes sismiques, qui ne date que du début du siècle. L'observation universitaire s'est développée dans la première moitié de ce siècle et nous a conduits à mieux connaître la structure de notre Globe et l'activité sismique qui lui est associée. Les expérimentateurs ont mis au point des sismographes de plus en plus lourds (plusieurs tonnes pour certains) pour traquer les ondes, notamment dans les basses fréquences (inférieures à un hertz).

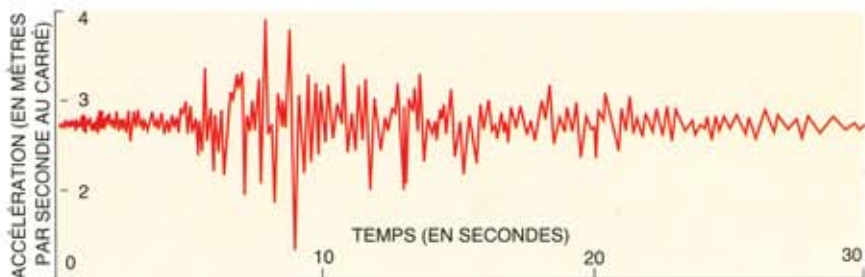
Dans les années 1960, la guerre froide a entraîné un gros effort d'équipement destiné à détecter les explosions nucléaires, qui engendrent des ondes semblables aux séismes. L'effort techno-

logique entrepris a conduit au développement du réseau *wwssn* (*World Wide Seismic Station Network*), dont on se sert pour étudier les séismes ; les sismologues ont tiré avantage de la guerre froide !

On a installé des réseaux de surveillance nombreux et sensibles afin de localiser les séismes et de révéler leur répartition géographique et temporelle le plus finement et le plus rapidement possible : la rapidité des secours détermine leur efficacité. Toutefois la sensibilité des capteurs sismiques nuit à la qualité d'enregistrement du signal sismique à proximité de l'épicentre : l'appareil très sensible a un fort gain et sature aux fortes amplitudes. C'est pourquoi ces réseaux sont inefficaces pour la réalisation de cartes locales des mouvements significatifs. Les ingénieurs parasismiques, déplo- rant cet état de fait, avaient construit des instruments enregistrant la totalité du signal ; ils déterminaient ainsi l'accéléra-



1. LE SÉISME DE KOBÉ a coûté la vie de milliers de personnes et de lourds dégâts matériels. Il était pourtant de magnitude modérée, pour ce pays particulièrement préparé aux tremblements de terre. Resterons-nous impuissants devant ces catastrophes ?



2. ACCÉLÉROGRAMME du tremblement de terre de Loma Prieta (Californie, 1989). Ces mesures indiquent les accélérations maximales du sol et les durées des secousses.

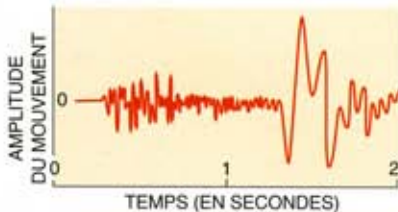
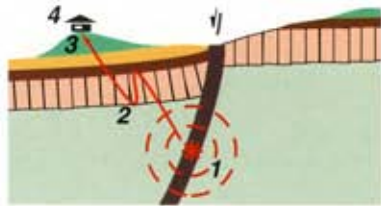
L'OBSERVATION SISMOLOGIQUE DES FAILLES ACTIVES

Pour étudier l'activité d'une faille, le sismologue analyse un sismogramme enregistré à la suite d'un séisme produit par la rupture des matériaux de la croûte terrestre. Un séisme est une source de vibrations (ondes sismiques) qui se propagent à l'intérieur de la Terre et qui provoquent des mouvements du sol à la surface.

Les capteurs d'ondes sismiques constituent les «yeux» du sismologue qui observe les failles. Ils enregistrent des sismogrammes, qui reflètent le mouvement du sol au passage des ondes sismiques.

Le signal caractérise divers éléments :

1. la source (une rupture),
 2. le milieu de propagation (les hétérogénéités du sol),
 3. le site d'enregistrement (les formations superficielles),
 4. La réponse des instruments utilisés.
- L'analyse des sismogrammes permet d'éliminer les effets du milieu, du site et des instruments, qui perturbent le signal émis par la source. L'enregistrement des effets de la source caractérise le glissement sur le plan de la faille (à l'hypocentre). Bien sûr, seules les failles actives sont «vues».



tion quand un séisme avait lieu mais, au grand dam des sismologues, ils n'avaient pas prévu de mesurer le temps absolu, mesure indispensable pour localiser la source de ces accélérations.

Sismologues et ingénieurs parasismiques se côtoient mais interagissent peu, tant différents leurs démarches. Après la secousse du 26 décembre 1989, près de Nice, qui avait mis en émoi les autorités locales, on avait proposé la création d'un centre de recherche sur les tremblements de terre, regroupant les deux catégories de chercheurs et ménageant un lien direct entre la recherche fondamentale et ses applications. Ce centre n'a pas vu le jour.

Les réseaux de sismographes

Avec les capteurs des années 1980, surveillance et mesures ne sont plus incompatibles. Ces nouveaux capteurs enregistrent les mouvements du sol dans une large bande de fréquences (de 0,005 à 70 hertz) couvrant la majeure partie du spectre de fréquence des ondes sismiques (de 0,002 à 100 hertz). De plus, ces nouveaux capteurs sont fort sensibles : ils détectent des déplacements d'un micromètre, et peuvent enregistrer des accélérations de l'ordre du g sans saturation (g est l'accélération de la pesanteur et vaut 9,81 mètres par seconde au carré). Ces instruments fonctionnaient lors du séisme de Kobé, au Japon et ailleurs. Des

réseaux mondiaux tels que le réseau français GEOSCOPE ou le réseau américain IRIS les utilisent quotidiennement.

Certains pays ont déployé des réseaux régionaux permanents : POSEIDON au Japon, TERRASCOPE aux États-Unis et MEDNET en Italie. La France, plus timorée, a investi dans un réseau national large-bande et des réseaux régionaux comme le réseau TGRS (Très grande résolution sismique) implanté entre la France et l'Italie dans les Alpes Méridionales. Le réseau TGRS géré par l'Université de Nice-Sophia Antipolis travaille ainsi avec le réseau des accélérographes permanents (RAP, géré par l'Observatoire de Grenoble) pour assurer la meilleure couverture possible d'une nouvelle écoute sismologique dans le Sud-Est de la France en collaboration avec le ReNaSS (Réseau national de surveillance sismique) géré par l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg.

Récemment le CNRS a mené une expérience originale dans les Alpes Maritimes. Pendant trois mois, un réseau dense de stations sismologiques (21 stations concentrées dans un cercle de 250 mètres de diamètre) a enregistré précisément la propagation en surface des trains d'ondes sismiques, en fonction du type de sol traversé. La seule limitation rencontrée provient de la rareté des séismes locaux (heureusement !) : le sismologue ne peut faire autant de mesures que le météorologue.

On peut regretter que l'effort technologique n'ait eu lieu que dans les années

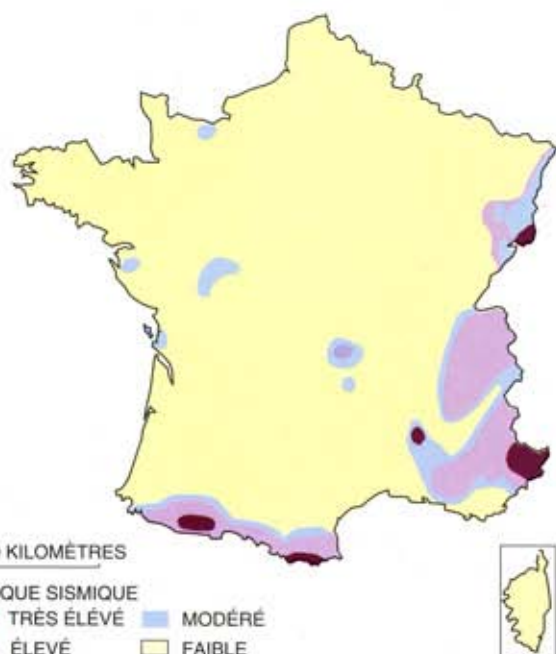
1980. La révolution informatique de ces années-là, notamment pour l'acquisition de grandes quantités de données sur le terrain, dans la boue et le froid, n'est pas étrangère à ce bond en avant. Cependant le renforcement de l'observation sismologique reste l'un des défis à relever dans le cadre de la socialisation de l'espace par l'Homme, de la maîtrise de l'environnement et des catastrophes naturelles. Cette motivation sera-t-elle aussi puissante que la nécessité, ressentie dans les années 1960, de détecter les explosions nucléaires ? Espérons-le, pour nous, nos enfants et nos petit-enfants.

La sismotectonique

La détermination de l'aléa sismique local passe par la compréhension du fonctionnement des failles actives. Ainsi l'énorme instrumentation sismologique de Californie n'a pas reconnu le segment de faille responsable du séisme de Northridge. L'étude des déformations nécessite l'intervention d'autres disciplines comme la tectonique (étude de la géométrie et de la dynamique des failles, des plis, etc.) et la géodésie (étude des mouvements horizontaux et verticaux de la surface terrestre).

Assez logiquement, pour une même magnitude, plus un séisme est proche de la surface plus le mouvement du sol est fort, et plus la faille responsable est proche des zones urbaines, plus les dégâts sont importants. On comprend la nécessité de la cartographie géologique des réseaux de failles. De nombreux spécialistes ont en mémoire le terrible tremblement de terre de Tangshan en Chine (le 28 juillet 1976) : 500 000 personnes périrent lors de cette catastrophe. Les géophysiciens travaillant dans cette région avaient pourtant détecté de nombreuses anomalies quelques mois avant le séisme, mais la faille responsable n'était pas répertoriée. Les sismologues doivent donc aussi admettre l'éventualité de mouvement du sol dans une zone supposée sans risque, à partir des données fournies par les tectoniciens. Cette étape est nécessaire à la détermination de l'aléa sismique (voir la figure 4).

Bien sûr la recherche se focalise sur la géométrie et la mécanique des failles actives ; mais la complexité des régimes de déformation dans l'écorce terrestre implique que toute faille, même ancienne et apparemment inactive, est une zone de faiblesse susceptible de provoquer un séisme. Toutes les failles d'une région à risque doivent être identifiées par une cartographie de terrain ou par l'utilisation de photographies aériennes ou d'images satellites.

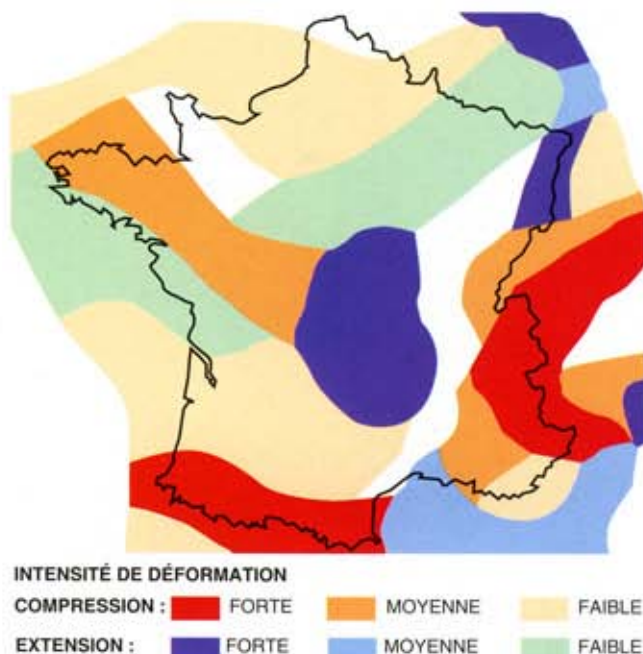


3. ZONAGE SISMIQUE DE LA FRANCE MÉTROPOLITAINE imposant les normes parasismiques de construction. On distingue quatre grandes zones sismiques, où les réglementations sont de plus en plus contraignantes.

Souvent les failles, en particulier les failles actives, ont une expression de surface facilement identifiable par les géologues. Cependant certaines failles sont cachées (c'est le cas de la faille responsable du tremblement de terre de Tangshan, enfouie sous une épaisse couverture de sédiments). Comment identifie-t-on ces failles cachées ? Actuellement, certains scientifiques proposent d'étudier systématiquement les régions à risque et de reconstituer des images du sous-sol : cette prospection géophysique pourrait déceler la présence de failles, comme on détecte du pétrole ou des minerais.

La sismicité du passé

La description des zones actives ne suffit pas : il faut aussi évaluer l'importance des séismes possibles et en déduire l'ampleur du mouvement du sol en tout point. Pour cela, nous faisons appel aux ressources historiques. Nous élargissons ainsi notre fenêtre d'observation, de quelques dizaines d'années pour l'instrumentation à quelques siècles pour l'histoire ; mais il faudrait des données sur des milliers d'années. Le sismologue ressemble à un gendarme à qui l'on demande de prédire la circulation autour de Notre-Dame de Paris vers 20 heures, alors qu'il ne connaît que l'état de la circulation à l'Arc de Triomphe vers 19 heures 59.



4. ZONAGE SISMOTECTONIQUE DE LA FRANCE MÉTROPOLITAINE. La superposition des données tectoniques et sismiques aide à déterminer la localisation et l'intensité de la déformation actuelle de la croûte terrestre en France.

Pour des périodes plus anciennes, la paléosismicité reconstitue les séismes passés, soit à partir des données historiques et archéologiques (on cartographie alors l'extension et l'intensité des dégâts occasionnés par un séisme identifié), soit à partir de l'analyse des paysages et des roches à proximité du plan de faille lorsque celui-ci affleure. Certains séismes laissent en effet des traces visibles à la surface de la terre (voir la figure 5) ; la datation des roches permet de reconstituer leur passé.

L'observation sismologique actuelle et la paléosismicité s'éclairent mutuellement et nous montrent que là où il y a des

séismes, il y a eu des séismes et donc il y aura des séismes. Ces dernières années, on a déterminé, grâce à la paléosismicité, la périodicité des séismes de certaines régions à risque. Ainsi, dans la région d'El Asnam, en Algérie, les géologues ont recensé, par un travail sur des tranchées, six séismes sur 10 000 ans. Dans le Sud-Est de la France, l'étude paléosismique de la faille de Nîmes montrerait, dans le segment de Courthézon, la récurrence de séismes de magnitude supérieure à 6 avec une périodicité de dizaines de milliers d'années. On n'a pas eu l'occasion d'enregistrer les effets d'un séisme majeur en France. Comment anticiper les effets d'un



5. CASSURE DE LA SURFACE DU SOL formée lors du séisme de Spitak (Arménie, 1988). L'escarpement mesure 1,6 mètre.



6. LIQUÉFACTION DU SOL lors du séisme de Nueva Ecija (Philippines, 1990). La liquéfaction ressemble au phénomène des sables mouvants : lorsque la pression augmente brutalement sur le sol (ici l'augmentation de pression est liée à la secousse) celui-ci perd sa cohésion et devient liquide. Le rez de chaussée de l'immeuble a presque totalement disparu dans le sol sableux qui s'est liquéfié lors de la secousse, alors que la structure d'ensemble de l'immeuble n'a pas été affectée.

tel séisme ? En extrapolant les sismogrammes provenant de petits séismes, plus nombreux que les séismes intenses, ou des vibrations de faible amplitude engendrées par diverses sources (les vagues, le vent, des phénomènes thermiques, l'activité humaine, etc.), qui constituent le bruit de fond microsismique. On suppose alors que les phénomènes physiques mis en jeu sont linéaires.

L'étude du bruit de fond améliore la définition du zonage sismique et permet de distinguer dans une même ville des zones aux vibrations sismiques différentes. On pourra alors adapter la prévention à ces diverses zones et diminuer les coûts de protection : c'est le principe du microzonage ; il complète harmonieusement l'analyse du zonage sismique à une échelle plus locale. Toutefois, l'examen de l'aléa sismique local, n'est pas la panacée

qui ferait oublier l'enregistrement des séismes dans une région ; on en reviendrait au manque d'interaction entre les sismologues et les ingénieurs qui a sévi dans les années 1960 et 1970. Pour une meilleure efficacité, les chercheurs doivent comparer la partition du microzonage à la nature du sous-sol que révèlent les prospections géologiques et géophysiques.

Cette approche néglige les phénomènes non linéaires tels que la liquéfaction du sol (voir la figure 6). Ces phénomènes surviennent dans le cas des mouvements forts et leur amplitude dépend de la nature des roches superficielles. Tel fut l'enseignement du séisme de Mexico de 1985. Il est probable que ces effets furent également meurtriers pour le séisme de Kobé de 1995.

Enfin, pour anticiper les risques à plus long terme, les tectoniciens s'inter-

rogent aussi sur les mécanismes d'évolution des réseaux de failles dans l'espace et dans le temps. Par exemple, comment les déformations de l'écorce terrestre liées au plissement actif des Alpes se propagent-elles ? Quelles seront les prochaines régions touchées par ces déformations ? Depuis deux décennies, les études sur modèles réduits en laboratoire ont apporté une moisson d'informations et le développement de ces techniques suscitent des espoirs multiples parmi les scientifiques. Ces questions font appel à une meilleure compréhension de la propagation de la rupture dans les matériaux constituant l'écorce terrestre.

Les prédictions

La prédiction des séismes à court terme, à savoir la date, le lieu et l'importance, n'est pas encore envisageable. Les caractéristiques des séismes étant disparates, il est probable qu'il n'y aura pas une méthode de prédiction mais un faisceau d'indices conduisant à un avis. Nous en sommes actuellement à une étape de recherche et non d'application.

En revanche, la prédiction du mouvement du sol ou du maximum de ce mouvement dans des régions sismiques est un objectif déjà atteint en partie. L'amélioration de cette prédiction sera le défi de l'an 2000 et un thème majeur de la décennie pour la prévention des catastrophes naturelles.

L'estimation du mouvement du sol s'affinera à mesure que s'accumuleront les enregistrements de séismes, et s'améliorera grâce à une meilleure connaissance des structures traversées par les ondes sismiques, qui les amplifient ou les amortissent. C'est pourquoi les techniques de prospection active du sous-sol importent tant.

La conquête et le contrôle de la troisième dimension est l'affaire de notre génération qui a vu un accroissement important de la population mondiale (elle frôlera les six milliards d'individus en l'an 2000) et qui verra le doublement de la population mondiale en 30 ans si le taux de croissance actuel se maintient. Pour le stockage des matières premières et des déchets, pour une meilleure gestion de l'environnement et un meilleur contrôle des catastrophes naturelles, nous devons percevoir, analyser, pressentir ce qui se passe sous nos pieds. Le risque sismique ne sera pas maîtrisé sans cette observation dense du sous-sol qui demandera des hommes et des femmes formés et imprégnés de la culture scientifique des Sciences de la Terre.