



COUNCIL OF EUROPE CONSEIL DE L'EUROPE

**ACCORD EUR-OPA
RISQUES MAJEURS**

Strasbourg, le 15 juin 2005

AP/CAT (2005) 28

ACCORD PARTIEL OUVERT EN MATIERE DE PREVENTION, DE PROTECTION ET D'ORGANISATION DES SECOURS CONTRE LES RISQUES NATURELS ET TECHNOLOGIQUES MAJEURS

« Vers des “Systèmes d’alerte précoce” : matériaux collectés à partir du cas des séismes »

Document de reflexion pour la reunion
du Groupe de travail
SYSTEME D'ALERTE PRECOCE

1^{ère} Réunion d'Experts
Bureau du Conseil de l'Europe, Paris
24 juin 2005

*Prof. Jean Bonnin
Institut Physique du Globe, Strasbourg*

I. Introduction

A/ Le concept d'“early warning”

Quelle que soit l'échelle de temps imposée par la nature du désastre, un “*early warning system*”¹ peut être décomposé en plusieurs éléments. On peut, bien sûr, débattre du nombre de phases à prendre en compte; il est suggéré, dans un premier temps, d'en considérer trois :

- i) la prévision ou la détection si la prévision n'est pas faisable;
- ii) l'élaboration des données de base, qui caractérisent la source du désastre, et de l'information recueillie en général;
- iii) la diffusion de l'information élaborée aux différentes catégories d'utilisateurs et aux populations-cibles en général.

Si ce découpage est applicable, *mutatis mutandis*, à tous les désastres, nous ne retiendrons ici que les cas où la prévision n'est pas faisable (il s'agit de la situation présente aujourd'hui, ce qui ne préjuge pas des progrès éventuels en matière de prévision, lesquels peuvent intervenir à tout moment).

B/ Le risque sismique comme référence

Typiquement, les tremblements de terre ne sont pas prévisibles présentement, au sens où leur moment et lieu d'occurrence ne peuvent être prédits, dans l'état actuel des connaissances, avec une précision qui rend les prédictions utiles, commensurables avec les contingences des activités humaines (tout au plus pourrait-on espérer, dans l'état présent des connaissances, avoir de vagues idées sur un accroissement significatif de la probabilité d'occurrence d'un séisme à l'échelle de quelques mois/années et de quelques centaines de kilomètres); ce sont, par ailleurs, des phénomènes de très courte durée dont les effets directs sont quasiment instantanés, toujours à l'échelle temporelle humaine.

D'autres phénomènes naturels pouvant entraîner des catastrophes ont des caractères comparables (mais pas toujours identiques) aux séismes.

On peut citer :

- les avalanches de neige,
- les écroulements massifs de falaises (ou de glaciers),
- certains glissements de terrain (en particulier sous-marins) rapides,
- les tsunamis (qui sont la conséquence d'autres phénomènes catastrophiques),
- les explosions massives de volcans,
- les chutes de météorites massives (qui ont existé et existeront certainement, mais ont rarement été véritablement observées) ,
- les inondations torrentielles dans certains bassins, *etc.*

Des catastrophes d'origine anthropique peuvent aussi montrer des caractères similaires (ruptures de barrages hydrauliques, explosions chimiques accidentelles, éventuellement ruptures d'alimentation électrique, ...).

¹ Pour un bref historique du concept de “*early warning systems*”, voir l'annexe correspondante.

II. Détection et données de base

La détection d'un séisme² est évidemment une question d'expérience pour tout individu situé dans la zone où les effets du séisme atteignent un certain degré; dans cette zone et au-delà, les séismes sont détectés par des instruments (sismographes qui permettent de quantifier les effets locaux du séisme; sismoscopes qui permettent une détection qualitative plutôt que quantitative).

A/ Le concept d'intensité

Rappelons que, dans le premier cas, les observations sont faites par des êtres humains et portent sur les effets ressentis par ceux-ci ou sur les désordres infligés aux artefacts³. Typiquement, il est observé qu'un certain pourcentage de la population d'un lieu donné a ressenti des secousses; ou bien que 55 % des constructions en maçonnerie datant de la seconde moitié du XX^{ème} siècle sont fissurées; ou encore que 10 % des constructions de 30 à 50 ans d'âge à structure en béton armé montrent de graves désordres. Ce type d'observations est connu sous le nom de "données macrosismiques"; elles caractérisent l'"intensité d'un séisme" en un lieu donné; il serait sans doute plus correct de parler d'"intensité des effets d'un séisme" sur un échantillon donné d'artefacts; en tout cas, il faut retenir qu'on ne peut définir l'intensité des effets d'un séisme sans prendre en considération les objets exposés à ces effets; en particulier, l'intensité d'un séisme ne peut pas être définie là où il n'y a pas d'objets anthropiques.

Par commodité et pour comparer les effets des séismes, les observations macrosismiques possibles ont été regroupées en catégories qui décrivent des effets croissants sur les artefacts humains; ces catégories ne se recouvrent pas (sont "disjointes") et constituent une échelle à proprement parler; le plus souvent, les catégories sont repérées par des chiffres romains : une portion de territoire affectée par un séisme et comportant des objets anthropiques subit donc une certaine intensité, V par exemple, déterminée par la statistique des observations macrosismiques faites sur ce territoire. Une intensité fractionnaire n'a aucun sens, par conséquent; tout au plus peut-on hésiter sur l'interprétation de la statistique des observations macrosismiques dans une zone donnée : on dira alors que le séisme a eu une intensité V-VI, par exemple, dans cette zone.

Utilisé à bon escient, l'intensité est un paramètre simple et commode : tout un chacun peut faire ses propres observations macrosismiques et l'énoncé de l'intensité observée en un lieu donné renseigne directement sur l'importance des dommages subis (au moins pour ceux qui ont déjà de l'expérience). La situation se complique un peu du fait que plusieurs échelles macrosismiques (= échelles d'intensité) ont été définies qui diffèrent les unes des autres (souvent bien peu, d'ailleurs); en simplifiant à l'extrême, les deux échelles d'intensité le plus couramment utilisées actuellement sont l'"échelle de Mercalli modifiée" (MMI : *Mercalli modified intensity*), principalement par les écoles américaines, et l'"échelle européenne" mise au point assez récemment en Europe.

B/ Observations instrumentales des séismes

² Le terme "séisme" est utilisé ici de préférence au terme "tremblement de terre" : le premier fait référence à la source du phénomène (l'évolution du volume dans lequel le matériau contraint subit une rupture) et à ses effets; le second peut être interprété comme se référant aux seuls effets des ondes progressives générées par la source. Le plus souvent, les deux termes sont utilisés sans distinction.

³ Au sens "produits de l'art ou de l'industrie", ce qui suppose l'intervention active de l'Homme.

Si la quantification des effets des séismes sur les êtres humains et leurs artefacts est importante parce qu'elle rappelle que l'objectif principal visé est de protéger les populations et les biens plus que de développer une connaissance scientifique des séismes (elle permet aussi d'introduire la notion d'intensité [voir plus haut]), il reste que la détection de ces événements est avant tout une affaire d'instruments, plutôt complexes; les détails sur la manière dont sont construits les sismographes n'ont pas leur place ici; quelques précisions sont cependant utiles.

a) Les instruments

Les sismomètres (= les capteurs des stations sismographiques) sont sensibles, le plus souvent, à la vitesse de déplacement du sol sur lequel reposent les instruments (il peut arriver qu'ils reposent sur les éléments d'une construction, pour des applications particulières) dans une direction donnée (ils sont souvent groupés par trois, orientés par construction dans trois directions orthogonales : "sismographes 3C"), quelques fois au déplacement lui-même du sol, ou encore à l'accélération du sol (= accéléromètres).

Tous les sismomètres ne répondent pas de la même façon à un mouvement comportant des fréquences variées; les sismographes utilisés pour surveiller localement l'activité sismique sont surtout sensibles aux "hautes fréquences" (au-delà de 1 à 10 Hz, par exemple) : ils sont dits à "courte période"; les ondes de haute fréquence s'atténuant plus rapidement que les ondes de basse fréquence, les sismomètres "longue période" sont utilisés pour enregistrer les ondes de basse fréquence générées par des séismes relativement énergétiques et qui se propagent plus facilement à grande distance. Tous les appareils intermédiaires peuvent exister; mieux, les techniques de traitement électronique du signal permettent depuis quelques dizaines d'années de construire des sismographes "à large bande" qui cumulent les capacités des sismographes à courte et longue périodes.

b) La sensibilité des mesures

Les sismomètres sont des instruments souvent extrêmement sensibles : ils captent des mouvements du sol beaucoup plus faibles que ce que peuvent détecter les êtres humains; ils détectent même le "bruit sismique", cette agitation permanente du sol que l'Homme ne ressent évidemment pas. Les sismomètres sont associés à des horloges très précises (de nos jours, la même horloge sert à beaucoup de stations sismographiques, celles qui sont équipées de "récepteurs GPS" : c'est l'horloge du système de positionnement global, dit "*Global Positioning System*") qui permettent de dater les paquets d'énergie vibratoire émis par les sources sismiques qui se propagent à travers la Terre dans toutes les directions jusqu'aux sismographes. Si l'on connaît la valeur des vitesses des ondes sismiques en tout point de la Terre, si l'on fait l'hypothèse que le séisme a une source ponctuelle (dans l'espace et le temps; cette hypothèse est essentielle), il suffit idéalement de connaître les heures d'arrivée d'un type d'onde en quatre stations sismographiques pour calculer l'heure origine du séisme et la position du foyer (c'est-à-dire ce point auquel on réduit la source).

Les données utilisées étant entachées d'incertitudes, comme n'importe quelle mesure, et les modèles de Terre n'étant pas parfaits, ce système de quatre équations à quatre inconnues n'a, en général, pas de solution; on est donc amené à utiliser des techniques beaucoup plus complexes, en introduisant beaucoup plus de données d'observation et en recourant à des méthodes d'optimisation des écarts entre les observations (temps d'arrivée mesurés des paquets d'énergie aux stations sismographiques) et les temps d'arrivée calculés aux mêmes

stations pour un foyer donné ; on cherche en quelque sorte, par des moyens convenus, d'approcher au mieux le foyer du séisme (dans le temps et dans l'espace); on ne saura jamais formellement de combien on se trompe : ceci tient au fait que l'hypothèse d'un foyer ponctuel n'est qu'une grossière approximation des phénomènes physiques qui génèrent le séisme, et aussi que le modèle de distribution des vitesses sismiques à l'intérieur de la Terre n'est qu'une médiocre approximation de la réalité; en particulier, la Terre est supposée sphérique (ce qu'elle n'est pas tout à fait) à vitesse de propagation des ondes sismiques fonction du seul rayon (autrement dit une Terre sphérique à distribution de vitesse radiale), sans variations latérales, ce qui n'est évidemment pas le cas (par exemple, au voisinage de la surface externe de la Terre, on trouve suivant les cas des océans ou des continents, ou les transitions latérales des uns aux autres).

C/ Paramètres de la source d'un séisme

a) La position du foyer

Quelques détails ont été donnés à ce propos parce qu'ils entraînent que le foyer estimé d'un séisme dépendra naturellement des valeurs des données utilisées pour le calculer, mais aussi de la nature des données disponibles (par exemple de la distribution spatiale des stations sismographiques par rapport au foyer estimé) et, dans une certaine mesure, des modèles de calcul. Autrement dit, le foyer estimé d'un séisme peut varier au cours du temps en fonction des données introduites dans le calcul, sans pour autant qu'il y ait erreur de la part des opérateurs : une estimation calculée dix minutes après l'occurrence d'un séisme (alors que quelques dizaines d'observations sont disponibles) peut être sensiblement modifiée trente minutes plus tard quand plusieurs centaines d'observations deviennent utilisables. La qualité des opérations de localisation du foyer n'est pas en cause : la nature des choses est seule responsable.

Il est clair que cet état de choses est particulièrement déroutant pour un utilisateur non averti : comment concilier (ou interpréter) deux localisations sensiblement différentes reçues à trente minutes d'intervalle ? Laquelle est la bonne ? Décidez-vous, Messieurs les sismologues ! Ceux-ci n'en peuvent mais, évidemment. Des situations particulièrement troublantes peuvent se présenter, comme ce séisme au Costa Rica dont l'épicentre⁴ a oscillé entre l'océan et le continent pendant plusieurs heures après son occurrence : les conséquences à craindre n'étaient évidemment pas les mêmes dans les deux cas. Seul un dialogue permanent et confiant entre spécialistes et utilisateurs peut permettre de dépasser la confusion créée par ce type de situation.

L'exemple, développé plus haut, de la localisation est relativement simple. Il ne peut être question de multiplier ici les développements ; cependant, d'autres paramètres caractérisant un séisme ont leurs propres difficultés d'interprétation, la profondeur et la magnitude d'un séisme introduisant des problèmes particuliers.

b) La profondeur du foyer

La profondeur du foyer a naturellement une importance considérable : à énergie libérée semblable, les effets d'un séisme seront différents à la surface de la Terre suivant que le foyer sera superficiel ou plus profond; en raison de la distance à parcourir, pour les ondes

⁴ L'«épicentre» d'un séisme est le point de la surface de la Terre (connu par sa latitude et sa longitude) qui se trouve à la verticale du foyer du séisme.

sismiques, du foyer jusqu'à un point donné de la surface où se trouve un artefact exposé aux effets du séisme : l'atténuation des ondes par le milieu de propagation sera d'autant plus grande que la distance parcourue elle-même est plus grande; mais surtout parce que le front des ondes radiées par un point source est sphérique dans un milieu continu homogène, et l'énergie de l'impulsion initiale se répartit sur le front d'onde sphérique, de rayon croissant : l'énergie est plus concentrée pour une portion de la surface sphérique du front d'onde, si le rayon est petit (foyer superficiel) que si le rayon est plus grand (foyer plus profond ; phénomène dit de l'“expansion sphérique”).

La connaissance de la profondeur du foyer est donc essentielle ; pourtant, celle-ci est le plus souvent difficile à déterminer (les explications de cet état de choses dépassent le cadre fixé ici); en particulier en mode urgence, la profondeur du foyer, dans la pratique, n'est déterminable avec une précision acceptable que si l'on dispose des données d'une station sismographique dont la distance à l'épicentre est inférieure à la profondeur à déterminer ; il est assez rare de disposer de telles données en mode urgence. Que faire, alors ? Il n'y a pas d'autres moyens que de procéder à une estimation probabiliste de cette profondeur, d'où la nécessité de bases de données bien renseignées à cet égard (à noter que la détermination de l'épicentre et de la profondeur du foyer ne sont pas indépendantes, ce qui ne simplifie pas les choses).

c) La magnitude

Evidemment, la quantité d'énergie mise en jeu par le séisme est un autre paramètre important et qui crée pas mal de confusion ; cette énergie est estimée en mesurant l'amplitude des ondes enregistrées par les sismographes ; mais tous les sismomètres ne réagissent pas de la même manière aux différents types d'ondes sismiques : il a donc fallu fixer des conventions sur les ondes à considérer avec tel ou tel sismomètre pour que les mesures soient comparables d'un observateur à un autre, d'une station sismologique à une autre ; beaucoup de conventions de ce genre ont été mises en avant : le résultat est qu'il y a une multitude de types de magnitude.

On ne peut entrer ici dans les détails ; il faut cependant être conscient que les estimations de magnitude sont souvent très dispersées (une dispersion d'une “unité de magnitude”⁵ n'est pas rare); en mode urgence, le temps manque évidemment pour chercher un consensus. Des techniques sophistiquées permettent maintenant d'avoir une estimation mieux affinée de la magnitude des séismes importants; elles supposent des données très modernes et nécessitent pas mal de temps d'élaboration.

La magnitude fournit des informations sur l'énergie dissipée à la source du séisme sous forme d'ondes sismiques; il s'agit, d'autre part, d'une mesure d'amplitude qui suppose l'existence de sismographes; ce paramètre diffère donc radicalement de l'intensité définie plus haut : il repose directement sur les effets des ondes sismiques, sans l'intermédiaire des artefacts; de plus, il n'y a pas d'“échelle de magnitude”, contrairement à une idée très répandue : ce paramètre peut prendre toute valeur, y compris fractionnaire, et même négative (ce qui caractérise des séismes dissipant peu d'énergie) [ceci est dû au fait qu'un logarithme intervient dans sa définition]; l'expérience montre qu'on ne connaît pas de séisme ayant eu une magnitude (sans préciser le type, intentionnellement) supérieure à 9,5 (qui est peut-être la magnitude atteinte par le récent séisme catastrophique d'Asie méridionale, le 26 décembre 2004). C'est bien un certain Charles F. Richter qui a introduit le concept de magnitude en

⁵ Cette expression est couramment utilisée, mais elle devrait être proscrite : la magnitude est une grandeur sans dimension ; il n'y a pas d'“unité de magnitude” à proprement parler.

étudiant des séismes de Californie au milieu des années 30, mais l'expression "échelle ouverte de Richter", devenue si commune, est dénuée de tout sens.

d) Le mécanisme au foyer

Un autre paramètre a une grande importance mais est rarement disponible en mode urgence : le mécanisme au foyer du séisme. Il ne peut être question ici d'entrer dans les détails. Un sismologue américain, Harry F. Reid, a montré, au début du XX^{ème} siècle, à la suite du séisme de San Francisco (1906), que la rupture qui constitue la source du séisme pouvait être représentée par un glissement brusque simultanément sur deux plans perpendiculaires; cette paire de plans peut avoir une orientation quelconque dans l'espace qu'elle divise en quatre secteurs dans lesquelles l'énergie vibratoire est radiée, mais de manière différente d'un secteur à l'autre; l'observation des arrivées des paquets d'ondes aux stations sismographiques permet de déduire l'orientation de la paire de plans dans l'espace et donc de savoir si le glissement le long des plans a ou n'a pas de composante verticale. Là encore des techniques sophistiquées permettent d'atteindre le même type de conclusions à partir d'enregistrements très avancés techniquement mais qui sont loin d'être partout disponibles.

Cette question du mécanisme au foyer n'est pas anecdotique, ni destinée aux élucubrations des seuls sismologues : un séisme pour lequel la rupture affecte le fond d'un océan est susceptible de mettre en mouvement vertical la masse d'eau sus-jacente si les deux compartiments séparés par la rupture ont un mouvement relative à composante verticale significative ; si tel est le cas, une vague est créée en surface de la masse d'eau et va se propager horizontalement à travers celle-ci : un tsunami a été généré. Si, au contraire, le mouvement relatif des deux compartiments du fond océanique n'a qu'une composante horizontale, il n'y aura pas de tsunami généré. On comprend l'importance du mécanisme au foyer par rapport aux conséquences possibles d'un séisme.

En résumé

Le premier volet d'un système d'alerte suppose une détection efficace et intelligente de la cause physique d'un désastre potentiel et la maîtrise des paramètres de base qui ont été passés en revue à travers les développements qui précèdent, sans doute un peu longs et techniques; il est évident, cependant, que cette maîtrise ne sera jamais absolue, que de nombreux problèmes se posent qui doivent être étudiés plus avant, que certains d'entre eux sont directement liés à une connaissance des phénomènes de base manifestement insuffisante, et que, par suite, des compromis devront être trouvés entre les besoins et les éléments disponibles (peut-être en procédant à quelques recherches ciblées et limitées). Tout cela n'est concevable qu'à travers un dialogue préalable certes, mais aussi permanent entre les fournisseurs de données (les scientifiques/ingénieurs en charge des systèmes d'observation) et les utilisateurs de l'information. Naturellement, les utilisateurs de l'information élaborée sont divers; divers aussi seront les besoins dont il faudra bien faire un relevé détaillé, sinon exhaustif.

III. Extraction et diffusion des informations pertinentes

Une fois les paramètres de la source acquis (ou ce qui, par convention, en tient lieu, compte tenu de ce qui précède), ils doivent être transformés pour en extraire l'information nécessaire aux différentes catégories d'utilisateurs. Celles-ci devront être clairement définies ; de même que le type d'informations que chacun souhaite.

A/ Un dialogue difficile

En fait, de nombreuses tentatives ont déjà été conduites dans ce sens; bien peu ont donné des résultats intelligibles ; on se heurte ici à la difficulté du dialogue entre ceux qui sont susceptibles de détenir de l'information (disons, les scientifiques/ingénieurs, pour simplifier) et ceux qui auront besoin d'information un jour ou l'autre pour prendre des décisions en urgence; la question est d'abord de trouver, en termes d'information, le dénominateur commun aux interlocuteurs; or, les premiers se départissent rarement de leur jargon et de leurs précautions sémantiques que les seconds ne comprennent pas ou ne tentent pas de comprendre. Ceux-ci réclament des informations d'une précision et d'une rapidité impossibles à atteindre par ceux-là. La convergence a peu de chances de venir spontanément : que faire dans ces conditions ?

Peut-être tenter d'amorcer le dialogue avec un très petit nombre de bonnes volontés décidées à progresser quoi qu'il en coûte. Une autre piste est sans doute plus prometteuse mais nécessite beaucoup d'efforts et de patience : la formation professionnelle pour éveiller l'intérêt du plus grand nombre. Dans tous les cas, les choses doivent être délibérément vues à long terme, parce que les processus de formation sont intrinsèquement longs, mais aussi parce que, surtout dans le haut de la hiérarchie, les têtes changent plus rapidement qu'il ne faut de temps pour former les intéressés : le processus est donc potentiellement sans fin.

Les choses ne sont d'ailleurs pas à sens unique : s'il est à peu près sans objet de vouloir inculquer aux scientifiques/ingénieurs les éléments de l'activité courante des utilisateurs de l'information, il est de la première importance de pousser les premiers à trouver des éléments de solutions, sans doute incomplets et probablement temporaires, aux questions non résolues : l'exemple de la profondeur du foyer est instructif à cet égard; s'il est clair que cette question ne peut être idéalement résolue dans les conditions actuelles (sauf à couvrir les zones sismiquement actives de sismographes à la maille de 5 km, ce qui n'est sûrement pas faisable avec les technologies connues présentement : trop cher !), il faut chercher des chemins de traverse du genre : quelle est la profondeur du foyer d'aujourd'hui la plus probable compte tenu des profondeurs observées dans la région dans le passé ?

B/ Les estimations d'impact a priori

Outre l'occurrence du séisme, information essentielle évidemment, beaucoup d'utilisateurs souhaiteront avoir des indications sur les conséquences vraisemblables d'un séisme qui vient d'avoir lieu. Plusieurs états se sont donné les moyens de répondre à cette question au plan national; la réponse à cette question dans ce contexte requiert des connaissances détaillées sur le territoire national, la répartition de sa population, de ses équipements, des biens exposés en général, *etc.*, qui représentent une masse de données colossale, que les états rechignent à rendre publique (à supposer que ce soit matériellement faisable). Il est d'ailleurs à peu près impossible de se faire une idée des performances de ces systèmes nationaux dont le secret est le plus souvent jalousement gardé.

Un autre aspect est à prendre en compte : un séisme majeur est souvent d'une ampleur telle que les états, quels qu'ils soient, ont du mal à faire face avec leurs seules ressources, surtout dans les premières heures : l'entraide est une quasi nécessité; beaucoup d'états se tiennent prêt à aider un autre en cas de survenue d'une catastrophe; ils doivent se faire une idée des besoins engendrés, et donc de l'ampleur de la catastrophe, pour se préparer à intervenir, mais ne recherchent pas une grande précision dans l'information; d'ailleurs, l'état frappé peut avoir aussi l'usage d'une référence extérieure pour calibrer ses propres estimations. Il y a donc là une réponse à apporter, aussi vite que possible après la détection de l'évènement.

a) Quelques modèles existants

Quelques tentatives sont connues à travers le monde pour estimer les dégâts potentiels; certaines ne sont pas à proprement parler des tentatives de scénario des dégâts, mais plutôt des "carnets de notes" intelligents où sont consignées et organisées les observations faites sur le terrain. Une tentative chinoise s'est intéressée aux très gros séismes et essaie d'estimer l'impact sur l'économie globale du pays. Les deux tentatives les plus élaborées ont été conduites en Russie et, plus récemment, aux Etats-Unis.

Cette dernière, menée par le *US Geological Survey*, est organisée autour de la construction de "shake maps" : les données disponibles sont tellement abondantes en Californie que, à partir des paramètres à la source du séisme, on peut se faire une idée de ce que sera, selon toute probabilité, l'accélération du sol en un point quelconque; les mêmes données californiennes sont utilisées pour d'autres régions, avec un certain succès, semble-t-il ; aujourd'hui, le modèle n'a pas encore été développé au-delà : quels seraient les dégâts causés par le champ probable d'accélération ?

Le modèle construit en Russie est sensiblement différent; il a été conçu initialement, il y a une dizaine d'années, sous le nom d'"Extremum", comme un système national, qui a été appliqué en Russie avec succès apparemment, en particulier pour des séismes du Kamchatka. Depuis, de nombreuses versions ont été développées, améliorées et appliquées à de nombreux séismes en dehors de la Russie.

b) Les principes de calcul

Les ingrédients nécessaires au fonctionnement des codes du type "Extremum" sont, comme on peut s'y attendre, nombreux et variés. Un premier groupe de données est constitué des paramètres décrivant la source : épicentre, profondeur du foyer, énergie dissipée par la source, mécanisme à la source (tous ces paramètres ont été discutés plus haut); toutes ces quantités apportent avec elles les incertitudes associées, qu'elles soient liées aux calculs effectués, qu'elles soient "épistémiques" (c'est-à-dire liées au mode même de description des phénomènes physiques par un ensemble arbitraire de paramètres), ou même que les valeurs des paramètres ne puissent tout simplement pas être estimées (la profondeur du foyer quand on n'est pas dans de bonnes conditions d'observation).

Les codes calculent le champ d'accélération créé par un modèle simple de source, auquel on attribue les valeurs des paramètres dont on dispose, ou des valeurs arbitraires quand on ne peut faire autrement. Ce champ dépend évidemment de la propagation des ondes sismiques à travers le milieu : il faut donc connaître les lois d'atténuation des ondes dans la région où a lieu le séisme; l'atténuation est fonction de la nature géologique de la région et dépend donc le

plus souvent de la direction de propagation des ondes à partir de la source; la plupart du temps, cette fonction d'atténuation est assez mal connue (par manque de données fiables); on est donc réduit à imposer une loi d'atténuation qui est d'autant plus arbitraire que la structure géologique de la région est moins bien connue; il est fréquent d'utiliser une fonction d'atténuation assez bien contrainte pour une région donnée (par exemple, la Californie) pour des régions moins bien documentées (c'est, en particulier, ce que fait l'approche “*shake-map*” de l'US GS).

On obtient alors, en tout point d'une région potentiellement affectée par un séisme, l'accélération du sol qui serait la plus probable compte tenu de toutes les hypothèses accumulées. Il faut noter ici un paradoxe, déroutant au premier abord : alors qu'il a été fortement souligné plus haut que l'“intensité” d'un séisme, en un point donné, ne pouvait être définie qu'en présence d'artefacts exposés aux effets du séisme, l'accélération du sol probable estimée est souvent donnée en “intensité” alors que le modèle n'a fait jusqu'à présent aucune référence à un quelconque artefact exposé. Le paradoxe n'est qu'une apparence : de nombreuses observations macrosismiques, à proprement parler, ont été confrontées aux mesures d'accélération effectuées sur le terrain (malheureusement beaucoup moins nombreuses); d'où des relations empiriques entre les deux paramètres qui font le pont entre les deux quantités (observations macrosismiques d'une part, accélérations mesurées de l'autre) mais qui ne prétendent pas à rendre compte d'une liaison physique entre la cause (l'accélération imposée par le sol) et les effets sur les artefacts.

c) Les limitations du modèle

* Les effets de site

Il y a, de toute façon, beaucoup d'autres limitations à cette approche : les lois d'atténuation sont en fait des règles approximatives qui ne prennent pas en compte beaucoup de détails (dont les effets sont parfois bien connus). Pour ne citer que quelques effets : la géométrie de détail de la structure géologique peut créer des effets locaux de convergence/divergence des ondes sismiques, modifiant localement l'énergie des vibrations (il existe des méthodes de calcul pour ces effets, au moins pour les signaux de basse fréquence; elles seraient peut-être adaptables à des ondes de fréquence plus élevée entraînant des effets sismiques, et surtout aux conditions des calculs en urgence); les effets de la topographie, en particulier de la pente; les effets dus aux sols et à leurs qualités de propagation/atténuation des ondes de cisaillement.

Tous ces effets peuvent être regroupés sous le nom général d'“effets de site” qui sont bien connus des ingénieurs/sismologues. Leur prise en compte suppose des calculs lourds (voire très lourds), pas forcément compatibles avec les situations d'urgence; il faudrait aussi s'assurer que les inclure dans les calculs mis en œuvre en urgence a un quelconque sens : les (grossières) approximations cumulées par ailleurs ne les rendent-elles pas illusoires ?

* La réponse des artefacts

Quand on connaît l'accélération du sol imposée par les effets de la source sismique, on est amené à s'intéresser aux artefacts que supporte le sol. Se posent alors les questions de transfert de l'énergie entre le sol et les artefacts, c'est-à-dire de couplage sol/structures par l'intermédiaire des fondations de l'artefact; ces questions sont difficiles. Plus difficile encore est de savoir quelle sera la réponse de l'artefact à la sollicitation transmise par les fondations; si l'on dispose des algorithmes nécessaires (d'ailleurs très lourds) pour calculer la réponse de

certaines structures très particulières (les structures en métal ou en béton armé, pour l'essentiel), il reste encore beaucoup de progrès à faire (par exemple, sur le rôle du remplissage constructifs entre les éléments structuraux, sur les liaisons entre les éléments verticaux [piliers] et horizontaux [poutres]).

De plus, l'endommagement des éléments structuraux peut être estimé tant qu'il reste relativement faible; pour des raisons évidentes, on peut difficilement procéder à des expériences nombreuses sur l'endommagement grave pouvant entraîner l'effondrement de la structure : on est limité à quelques expériences contrôlées sur quelques éléments et/ou sur modèles réduits, et aux observations de terrain après un séisme grave. Autrement dit, la fragilité/vulnérabilité d'une telle structure en fonction de la sollicitation est assez mal connue ; or ces structures idéales ne sont qu'une petite minorité dans l'ensemble des artefacts exposés aux effets des séismes.

La plupart des types de constructions sont hors de portée des méthodes de calcul actuellement disponibles, et sont, de plus, extrêmement divers en ce sens que les paramètres qui permettraient de décrire leur comportement en cas de sollicitation dépendent très fortement de la qualité initiale de leur construction, des conditions de leur vieillissement (en particulier l'histoire de leur entretien). Il ne peut être question, en situation d'urgence, de tenir compte (dans la faible mesure où l'on sait le faire) des caractéristiques de chaque artefact : une approche statistique s'impose; la connaissance statistique sur les artefacts exposés aux effets du séisme doit donc porter sur leur nombre et leurs distribution géographique, mais aussi sur certaines de leurs caractéristiques physiques.

* L'usage disparate des artefacts par les populations

Par ailleurs, toutes les structures n'ont pas le même usage : certaines servent au logement des populations, d'autres à des usages industriels; certaines peuvent recevoir du public à certaines heures (services publics, écoles, *etc.*) ou même certaines époques de l'année (installations touristiques), d'autres peuvent avoir des fonctions très spécifiques (hôpitaux, services de santé en général, centres de décisions administratives/politiques, services de secours, de police, pénitenciers, *etc.*).

Il faut donc estimer une sorte d'indice d'exposition des populations concernées pour évaluer les dommages corporels éventuels (avec des degrés dans la gravité des conséquences : décès, blessures lourdes, blessures légères, *etc.*); il n'est évidemment pas question de penser à lier en détail les blessures subies avec le degré d'endommagement des constructions, endommagement qui est pourtant la cause directe des premières (à l'exception de quelques effets bien connus d'un séisme, comme les crises cardiaques, qui ne mettent pas en cause le bâti); aussi, la traduction des effets d'un séisme sur le stock de constructions en termes de victimes probables (de différentes catégories) ne peut-elle être envisagée que sur la base de statistiques, elles-mêmes fondées sur des observations dûment consignées.

* Les effets secondaires

Dans l'estimation des dégâts probables, il convient de prendre en compte les effets "secondaires" des séismes qui peuvent se révéler très dangereux. Parmi eux, il faut distinguer les effets secondaires "naturels" des effets secondaires d'origine anthropique. Dans la première catégorie, les tsunamis sont assurément les plus redoutables; ils sont dus au déplacement vertical brusque du fond de l'océan (causé par exemple par un séisme) qui

entraîne la colonne d'eau sus-jacente, laquelle provoque une déformation brusque de la surface libre de l'eau; la déformation de surface se propage horizontalement à une vitesse qui dépend de la profondeur d'eau; quand cette dernière diminue (à l'approche des côtes), le phénomène prend la forme de vagues déferlantes de très grande longueur d'onde qui peuvent être énormes, dissipent beaucoup d'énergie et causent des dégâts considérables sur les rivages. D'autres effets secondaires, moins dangereux que les tsunamis, ont parfois des conséquences dramatiques : chutes de rochers/écroulements de falaises; glissements de terrain qui peuvent être massifs en zone accidentée (zones montagneuses à matériau peu cohérent; zones de pentes sous-marines qui peuvent d'ailleurs déclencher des tsunamis locaux).

Un séisme peut endommager des installations de toutes sortes créées par l'Homme. Le cas est très connu des incendies qui ont ravagé, en 1923, une grande partie de la ville de Tokyo construite pour l'essentiel en matériaux éminemment inflammables; les exemples sont nombreux, même à une période récente (Northridge CA). Beaucoup d'installations industrielles sont aussi susceptibles de multiplier par un facteur élevé le nombre de victimes directes d'un séisme; chacun a en tête les usines nucléaires; il faut cependant noter que celles-ci ont très souvent bénéficié à la construction d'un sur-dimensionnement des structures de sécurité; la centrale nucléaire de Leninakan a cependant frisé la catastrophe, en 1988, lors du séisme de Spitak en Arménie (soviétique à l'époque). On n'ose imaginer ce qu'un séisme sérieux pourrait provoquer sur certains complexes chimiques traitant des produits très agressifs.

Des installations d'apparence plus placide sont cependant très exposées aux séismes : les grands barrages hydrauliques sont évidemment construits dans des sites favorables, c'est-à-dire dans des vallées étroites très souvent associées à des zones faillées qui pourraient éventuellement provoquer la rupture du barrage; et l'on connaît malheureusement les conséquences probables d'un tel événement pour les sites en aval de l'ouvrage. Les mêmes installations sont aussi en danger pour d'autres raisons : les retenues en amont des barrages se trouvent souvent en zones à relief très accidenté, éventuellement susceptibles de subir des glissements de terrain massifs, brusquement mis en mouvement par un séisme; l'arrivée brutale de la masse de terrains dans la retenue d'eau peut créer une onde, qui elle-même peut submerger le barrage ou encore entraîner sa rupture

En résumé

Il ressort évidemment de ce qui précède que, sauf à considérer un territoire limité dont les caractéristiques sont connues en grand détail (ce qui suppose de très grosses bases de données, contenant éventuellement des informations "sensibles", mises à jour constamment), tout le processus d'estimation des conséquences vraisemblables d'un séisme ne peut produire que des résultats en ordre de grandeur quand on dispose du temps nécessaire pour développer des "scénarios", *a fortiori* dans le cas d'une estimation en urgence; dans ce dernier cas, seuls sont utilisables des modèles d'estimation très simplifiés, des fonctions de fragilité/vulnérabilité très simples, des distributions de populations (en fonction du temps) très moyennées. Il faudra bien se contenter d'une estimation du type : "moins de cent morts", "entre mille et cinq mille victimes", ou "plus de trente mille morts", *etc.* Toute tentative pour atteindre quelque précision sera illusoire.

Même très grossières, il y a dans ces estimations *a priori* des éléments d'information très précieux pour certains utilisateurs : par exemple, faut-il préparer un, ou deux (ou plus) avions porteurs de matériel et de personnel d'intervention urgente ? Se pose alors la question difficile

de trier les informations pertinentes, de les acheminer aux utilisateurs intéressés, de façon qu'elles soient correctement interprétées et comprises; un dialogue soutenu entre les différents acteurs et les fournisseurs d'informations est évidemment une base nécessaire; de même que la formation continue du personnel concerné, à tous niveaux.

Le concept d'*“early warning system”* ne doit pas être pris dans un sens trop restrictif : s'il est évident que les mécanismes du transfert d'information perdent progressivement leur caractère d'urgence à mesure que le temps s'écoule après l'évènement majeur, il reste que, pendant un laps de temps que l'on peut fixer arbitrairement à douze ou vingt-quatre heures après l'évènement, les canaux “normaux” de communication de l'information ne sont pas rétablis, ou s'ils le sont, sont complètement saturés. Pourtant, certaines informations gardent pendant cette période, un caractère d'urgence et doivent être traitées pratiquement de la même manière que les informations tout à fait initiales.

ANNEX 1**The concept of 'early warning systems'**

(First draft)

Jean Bonnin

23 May 2005

Historically, the concept of 'early warning system' derives from a specific prevention concern: taking in consideration that prediction of earthquake occurrence is out of reach presently, how to protect the populated zones in California against the effects of the shaking of certain objects at risk. A typical example is the dense gas-pipe web, largely developed because gas is the main source of energy used in urban areas for heating : if shaken to a certain degree, pipes can break and fires result (like in Northridge); hence, shutting down valves on gas-mains before the shaking damage them is likely to limit the danger of big gas-fires in the cities just after an earthquake. It obviously requires that a procedure be established which includes several steps : detection of the occurrence of an earthquake; evaluation of its parameters and its capability to generate certain types of progressive seismic waves (declaration of the alert); transmission of the alert to the control room(s) of the objects at risk, within a time delay shorter than the seismic wave propagation time between where the wave front was at the time of detection and the location of the objects at risk; shutting down of the gas-valves. Assuming an average wave propagation velocity of 8 km/sec (depends on the type of waves considered) gives a delay of about 30 sec maximum if to shut down gas-valves in Los Angeles upon detection (right at its source) of an earthquake occurred in the Parkfield region (a well renown seismogenic zone in California). It is clear that the whole procedure must be automated (and/or very efficiently supervised by well-trained persons on 24 hrs duty) to be effective; in particular, the detection of the earthquake and evaluation of its parameters must be entirely automated : this has been possible roughly in the 80ies when very dense seismographic networks have been operated in California, and the corresponding data management software developed. At the same time, the whole procedure must have been carefully designed and tested, owing to the potential economic impact of shutting down gas delivery.

The concept of 'early warning system', as defined above, is also applied to the control of the potential effects of earthquake shaking on hazardous industrial plants; the goal being to mitigate the consequences of failure of industrial systems triggered by the shaking; examples are many and very diverse : one of the most well-known case (because very much frightening) is the falling down of control-bars in the heart of an atomic reactor in an attempt at avoiding over-heating which could lead to destruction/explosion. Of course, many other industrial facilities would require similar protection (like the oil refineries) and very few are properly

equipped; most often, systems are designed to trigger if integrity of the plant is affected in some of its parts, not as a prevention measure.

In a few cases, regions have been instrumented in order to protect populations and goods against the effects of earthquakes (Japan, Taiwan, Istanbul [Turkey more recently]); systems require highly-automated functioning mode and extreme rapidity; there exist systems in which data transmission is based on cell-phone technology : it is assumed that data be transmitted to the processing centre(s) within the few seconds preceding the likely failure (through over-saturation, for example) of transmission facility. Fastness and robustness of the systems are obviously essential, and the above-concept of 'early warning system', *mutatis mutandis*, does apply. In other cases, the words have been kept, but the concept has been largely expanded. Applied to tsunami in the Pacific Ocean, it is valid and close to its initial meaning in the case of local tsunami affecting the coasts of Japan with a triggering earthquake source 'nearby', so to speak; it is valid as well concerning a tsunami which has travelled the whole Pacific Ocean from offshore Chile to Japan where it arrives many hours later. The concept has been also commonly extended to part of the response phase to a just occurred disaster; in the case of an earthquake disaster, the causative event cannot be predicted within our present knowledge; 'early warning systems' include collecting information on the occurred event (earthquake source parameters), on the possible consequences in terms of modeled extent of damage and loss; eventually on the first clues of the field truth; all that encompasses several hours after the event's occurrence itself.
