

Les précurseurs dans la prévision du risque sismique : état des connaissances

Philippe Jousset¹.

Cet article présente les principes et la fiabilité de différentes méthodes explorées pour essayer de prévoir l'occurrence des séismes (Jousset *et al.*, 2009). Il s'agit d'apporter quelques éléments pour essayer de répondre à la question : un séisme est-il prédictible ?

Aléa et risque sismique

Dans les années 1960, il a été compris que les séismes étaient liés au mouvement des plaques tectoniques se déplaçant les unes par rapport aux autres, par libération des contraintes, accumulées progressivement, le long d'une zone de rupture. Ce sont généralement aux frontières des plaques, dans les zones de collision, que les séismes de plus forte magnitude se produisent, mais il y a aussi des séismes intra-plaques majeurs, comme en Chine.

Le séisme, déclenché par la rupture brutale dans la lithosphère, libère de l'énergie notamment sous la forme d'ondes sismiques dont la quantification se fait par la **magnitude**. Celle-ci est par exemple calculée à partir de la mesure de l'amplitude du mouvement du sol en surface déterminée d'après l'enregistrement des sismomètres. Différents types de magnitudes existent, la plus connue étant celle dite de Richter², mais elles ont toutes une forme logarithmique. Ainsi, un accroissement de magnitude de 1 correspond à une multiplication environ par 30 de l'énergie et par 10 de l'amplitude du mouvement. La magnitude n'étant pas une échelle mais uniquement une formule mathématique paramétrée, elle n'est pas fermée, mais le séisme le plus fort jamais mesuré jusqu'à présent

a été celui du Chili, le 22 mai 1960, qui a atteint la magnitude de 9,5.

Lorsque l'hypocentre³ du séisme est proche de la surface de la Terre et de zones habitées, les ondes sismiques peuvent provoquer des dégâts importants sur le bâti et de nombreuses victimes. Ce qui est en cause ici relève alors du **risque sismique**, c'est-à-dire du **croisement de l'aléa et des enjeux**. La difficulté majeure de l'étude des séismes est de répondre aux interrogations sur la date ou même seulement la fourchette d'échéance (court, moyen ou long terme) de l'occurrence d'un séisme.

Les prévisions à long terme, voire moyen terme, sont souvent réalisées suivant une approche probabiliste de l'aléa sismique. Les **prévisions à long terme** s'appuient essentiellement sur les données issues d'études géologiques et tectoniques des failles, les témoignages historiques de la sismicité par l'analyse d'archives et enfin sur les enregistrements par des instruments de mesure installés depuis quelques dizaines d'années. Les prévisions probabilistes ne permettent pas de prévoir le moment exact d'un séisme, mais de préciser les zones où on peut s'attendre à des séismes majeurs. C'est sur cette base que peut alors être conduit, dans les zones les plus sensibles, une politique de prévention du risque sismique notamment via l'application de règles de construction parasismique, comme en témoigne l'exemple du Japon engagé de longue date dans cette logique d'objectif de performance : résister aux niveaux des sollicitations sismiques définies par les études d'aléa.

1. BRGM – RNSC.

2. Créée en 1935 par Charles Francis Richter et Beno Gutenberg, deux membres du California Institute of Technology (Caltec).

3. L'hypocentre (ou foyer) du séisme correspond au point de départ de la rupture sismique sur la faille. La projection de l'hypocentre sur la surface terrestre s'appelle l'épicentre.

Les **prévisions à court terme** mettent en exergue de nombreux verrous scientifiques et sont très controversées. Le débat s'est développé à la fin des années 1990 notamment autour des interrogations suivantes : la dépendance ou non du temps de l'aléa sismique, la clarté des signes précurseurs, la pertinence de la prévision déterministe des séismes.

Méthodes utilisées pour détecter des précurseurs de séismes majeurs

Dans l'approche des précurseurs à long et moyen termes, les méthodes statistiques ou probabilistes sur l'analyse de la sismicité (précurseurs sismiques et répliques sismiques) et le cycle sismique sont souvent utilisées. Dans le cas des précurseurs à court terme, l'essentiel des méthodes explorées est fondé sur l'analyse des signaux pouvant résulter de la modification du milieu avant le séisme proprement dit : changement local de contraintes, ouverture de micro-fractures, dégagement de gaz piégé, libération de fluides piégés, etc. Ces analyses peuvent être classées comme suit :

- observation de la déformation du sol durant le cycle sismique : géodésie, sismicité et émissions acoustiques ;
- observations thermométriques ;
- observations hydrogéochimiques ;
- observations d'émission de gaz ;
- observations électromagnétiques au sol et dans l'ionosphère ;
- observations dans l'atmosphère ;
- observations du comportement des animaux.

Nombre d'auteurs insistent sur la nécessité de disposer de résultats obtenus par plusieurs méthodes (donc plusieurs réseaux) et sur longue durée, afin d'augmenter la fiabilité de la prévision.

Sismicité et déformation : cycle sismique, précurseurs, répliques

Il est difficile de localiser avec précision le lieu où va s'initier un séisme. Une première approche consiste à localiser les hétérogénéités géologiques (tectoniques) et ainsi de sélectionner les secteurs dans lesquels installer les instruments de mesure au sol. L'étude de la sismicité historique locale peut permettre de préciser les caractéristiques du cycle sismique ainsi qu'éventuellement le stade dans lequel se trouve une faille supposée sismogène (Sieh, 1996).

Certains séismes majeurs sont précédés de petits

séismes précurseurs (« *foreshocks* ») quelques jours avant qu'ils se produisent, d'autres par une augmentation de la sismicité sur quelques années, une « préactivité » de quelques mois ou un calme sismique relatif. Pour Lin (2009), les *foreshocks* interviennent à court terme, mais ils ne sont en général identifiés et étudiés comme tels qu'*a posteriori*, même s'ils peuvent représenter une manifestation du comportement en essaim des séismes. En outre, ils sont loin de se produire systématiquement.

Dans la prévision à **long terme**, l'objectif est de localiser des failles actives et d'évaluer la taille des séismes attendus. À **moyen terme**, des ruptures analogues (magnitude, distribution, type de glissement sur la faille) sur au moins deux événements consécutifs (Sieh, 1996) peuvent être observées par des réseaux denses d'observation sur certaines failles. Dans la région de Parkfield, au niveau de la faille de San Andreas (Californie), il semble que les séismes de 1922, 1934, 1966 et, dans une moindre mesure, 2004 présentent des caractéristiques communes. Cependant, les prévisions à moyen terme ne peuvent pas répondre à la question : quand et où un grand séisme s'initiera.

Les progrès de l'instrumentation permettent de réaliser des études de plus en plus fines de la sismicité. Ainsi, il a été possible d'observer une période de calme sismique de plusieurs années au niveau d'une région assez large autour d'un futur épicycle, éventuellement suivie d'une période rapide d'augmentation de l'activité sismique autour d'un futur hypocentre. C'est ce qui a été observé *a posteriori* avant les séismes de Kobe (1995) et Izmit (1999) par exemple.

L'analyse de la sismicité historique (voir article dans ce numéro) constitue une autre source d'information, en particulier pour mettre en évidence des variations de la sismicité dans l'espace et dans le temps avant la rupture d'un grand séisme ou la survenue de séismes précurseurs. Le processus de génération d'un séisme ne semble pas être totalement aléatoire. Ainsi, la localisation probable des répliques suivant un grand séisme en Italie ou en Californie a pu être prévue, de façon relativement probante (Vorobieva and Panza, 1993 ; Gerstenberg *et al.*, 2005 ; Murru *et al.*, 2009), permettant ainsi d'actualiser des cartes de probabilité de survenue de répliques. Une telle approche a été mise en place lors de la crise sismique italienne de l'Aquila en 2009. De même, les travaux de Romashkova (2009) sur le grand séisme de Sumatra en 2004 ont montré une instabilité de comportement de la lithosphère, soulignant que le processus de génération des séismes se localiserait, non pas à proximité immédiate de la source, mais au sein d'une zone beaucoup plus étendue et une dizaine d'années avant la date du séisme.

Le long de failles majeures atteignant la surface, on peut observer des phénomènes de glissement aismiques continus ou transitoires, sur quelques kilomètres ou sur toute l'épaisseur de la croûte (Nadeau et McEvilly, 2004). Grâce à la densification des réseaux GPS, on observe aussi des séismes « lents » ou « silencieux » sous la forme de glissements basse fréquence transitoires⁴, accompagnés de tremors (vibrations sismiques faibles), pouvant se produire sur les failles pendant quelques minutes (Linde *et al.*, 1996). De tels phénomènes transitoires pourraient, dans certains cas, correspondre à des signaux précurseurs de grands séismes de subduction (Hirn et Laigle, 2004). L'eau, issue de la déshydratation des roches sous certaines conditions de pression et de température, pourrait jouer un rôle dans la genèse de ces phénomènes.

Avec le développement de la télédétection (GPS et interférométrie radar notamment), les mesures de déformation du sol, autrefois coûteuses en temps et ne permettant pas un échantillonnage fin, contribuent à présent à la prévision de séismes, notamment en permettant de localiser les segments de failles les plus bloqués ou les plus couplés. Certains séismes majeurs ont été précédés par des déformations lentes ou rapides du sol, mesurées par des réseaux d'instruments (sismomètres large-bande, GPS permanents...) sur de vastes étendues (dizaines de kilomètres). Les réseaux de mesures de vibrations du sol ont permis de détecter des tremors et des séismes lents qui font aussi partie du processus de sismogenèse⁵.

DeMichele *et al.* (2008) ont montré que les mesures de la déformation autour de la faille de San Andreas sur des images InSAR avant le séisme leur ont permis de localiser le futur épïcentre du séisme de Parkfield de 2004 (Mw6.3), là où la faille semble bloquée (Fig. 1). D'après la compilation de Cicerone *et al.* (2009) sur des événements de magnitudes 3 à 7.1 et des mesures faites principalement à des distances inférieures à 100 km de l'épïcentre, sur des périodes allant de plusieurs mois à plusieurs jours, il semble que les observations de plus grande déformation précédant un séisme correspondent aux plus grands événements.

Thermométrie

L'analyse des variations anormales de la température et de la conductivité thermique du sol et de la basse atmosphère, par des capteurs de température et des satellites infrarouges, s'est développée depuis plusieurs décennies. Comme pour les précurseurs ionosphériques, la difficulté principale porte sur la discrimination du signal escompté des variations de fond dues à la complexité des flux de l'atmosphère et du sol. La compréhension des anomalies thermiques n'est pas suffisante, à ce jour, pour

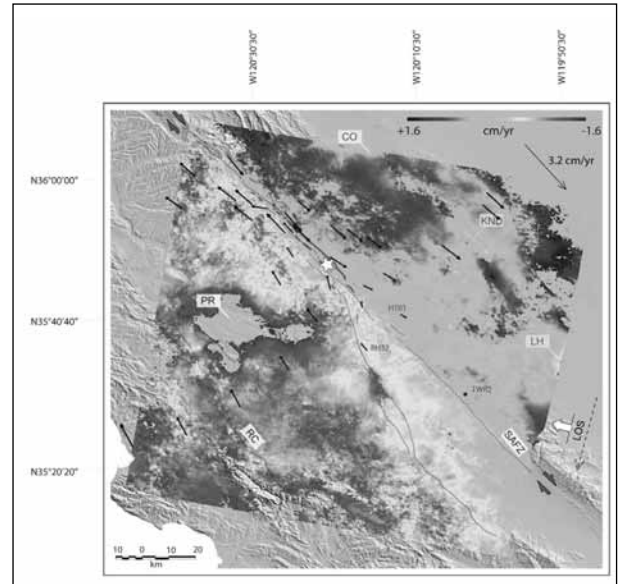


Figure 1. Accumulation de la déformation pré-sismique observée sur une image représentant une moyenne de 20 interférogrammes déroulés (DeMichele *et al.*, 2008).

qu'elles soient utilisées comme précurseurs opérationnels afin d'alerter des populations. Dans le futur, l'utilisation plus fréquente des données satellitaires, devrait permettre de faire progresser cette méthode.

Hydrogéochimie et émission de gaz

Cette approche repose sur l'hypothèse que le réajustement des contraintes provoque de la microfracturation, donc des changements de perméabilité et de porosité, permettant la circulation des fluides. Les mesures portent sur les niveaux d'eau enregistrés dans les forages, la composition chimique de ces eaux et la mesure des gaz libres : radon (Ra) surtout, mais aussi hélium (He), hydrogène (H₂), dioxyde de carbone (CO₂). Des effets précurseurs ont été remarqués pour diverses magnitudes, pas seulement les plus fortes. Les expériences ont été menées en laboratoire et sur le terrain.

Électromagnétisme au sol et satellitaire (ionosphère)

Divers mécanismes ont été proposés pour expliquer la génération de signaux électriques et électromagnétiques dans le sol et dans l'atmosphère pendant la phase préparatoire d'un séisme :

- les effets électrocinétiques issus d'une interface liquide/solide où se forme une double couche d'ions (cations essentiellement). Le surplus d'anions dans le liquide provoque un potentiel électrique en cas de circulation

4. Glissements de quelques centimètres sur plusieurs semaines.

5. Des épisodes répétés de glissement lent sur quelques centimètres, d'une plaque sur une autre, pendant plusieurs semaines sont accompagnés d'un bruit sismique puissant, nommé « tremor », qui diffère nettement des signaux sismiques produits par les séismes.

- du fluide sous un gradient de pression ;
- les effets piézoélectriques : une roche soumise à contrainte génère un courant électrique ;
- le mouvement rapide de fluides ou de roches chargées électriquement, provoquant des signaux magnétiques ;
- l'ionisation de l'air par des électrons émis par la roche en fracturation.

La méthode VAN⁶, développée en Grèce au début des années 80, consiste à observer en continu les variations naturelles de résistivité dans le sous-sol et à relier des anomalies à des séismes. Depuis, elle a été rebaptisée SES (« *Seismic Electric Signals* »). Au cours de la période 1990-2010, un système d'observation couplé VAN et champ magnétique (bande ULF) a été installé dans la zone centrale de Honshu (Uyeda, 2000 ; Uyeda *et al.*, 2009) et a permis, entre 1992 et 2000, d'enregistrer des signaux de type SES et des signaux ULF précurseurs lors d'une quinzaine de séismes de magnitudes comprises entre 4.7 et 6.6. Dans les années 2000, lors d'une grande série de séismes en essaim (7 000 événements de magnitude supérieure à 3 et cinq séismes de magnitude supérieure à 6) dans la région de l'île d'Izu (Japon), des perturbations électriques significatives ont été enregistrées avant le séisme (Fig. 2).

Les résultats ne sont pas toujours aussi probants, mais de nombreux cas en Indonésie, Japon et Grèce font état de signaux perturbés au moment du passage des ondes sismiques. Pour Uyeda (2000), les succès de la méthode VAN sont incontestables car elle a permis de sauver de nombreuses vies humaines lors de séismes destructeurs. Malgré les résultats obtenus, des questions demeurent : existence ou non de signaux électriques sis-

miques dans la méthode VAN, décalage entre les signaux précurseurs ULF, SES et VAN, soulignant la possibilité que le mécanisme à l'origine de chaque fréquence ne soit pas le même, persistance des hautes fréquences dans l'air malgré l'épaisseur de terrains traversés.

Observations atmosphériques (effets lumineux, nuages...)

Les travaux concernent les perturbations électromagnétiques des couches ionisées de l'ionosphère sur une large aire d'extension, comme observées avant les séismes de Kobe (1995) et Sumatra (2004). Les perturbations électriques engendrées par le sol avant les séismes seraient susceptibles d'influencer les couches de l'ionosphère en raison de leur composition ionisée. La discrimination entre signaux perturbés et signaux normaux est délicate en raison de la complexité des phénomènes intervenant dans l'atmosphère, notamment les décharges lumineuses observées depuis des siècles et attribuées à l'accumulation et à la décharge d'électrons, ainsi qu'aux conséquences de l'émanation de gaz (dont CO₂ et radon) sur la stabilité de clusters d'ions.

Comportement des animaux

Parmi les signes précurseurs des séismes, le comportement anormal et massif d'animaux est souvent signalé, comme ce fût le cas notamment pour les vers de terre avant celui de Lisbonne en 1755 ou pour celui de Haicheng, en 1975. Ces types d'observations, débutées évidemment bien avant celles fondées sur les instruments de mesures physicochimiques, concernent une grande variété d'espèces : reptiles, oiseaux, mammifères, insectes... Aujourd'hui, seuls quelques auteurs, notamment Sheldrake (1999 ; 2003) et Ikeya (2004), sont reconnus pour étudier ce sujet suivant une approche scientifique. Pour Ikeya (2004), qui s'appuie sur des expériences *in vivo*, le vecteur électromagnétique semble le plus plausible pour expliquer le comportement des animaux, qui réagiraient nerveusement au champ électrique créé par le milieu avant un séisme. Les émanations de gaz ou, de manière moins justifiée, la propagation plus rapide des ondes P (longitudinales, parallèlement à la direction de propagation de l'onde) par rapport aux ondes S (transversales) ont également été évoquées pour expliquer ces comportements.

Ces phénomènes ont été observés entre quelques secondes et quelques jours avant le séisme, et jusqu'à des centaines de kilomètres du lieu du séisme. En Chine, la population est formée à détecter et signaler toute anomalie animale. Au Japon, des réseaux expérimentaux universitaires existent et analysent par exemple le com-

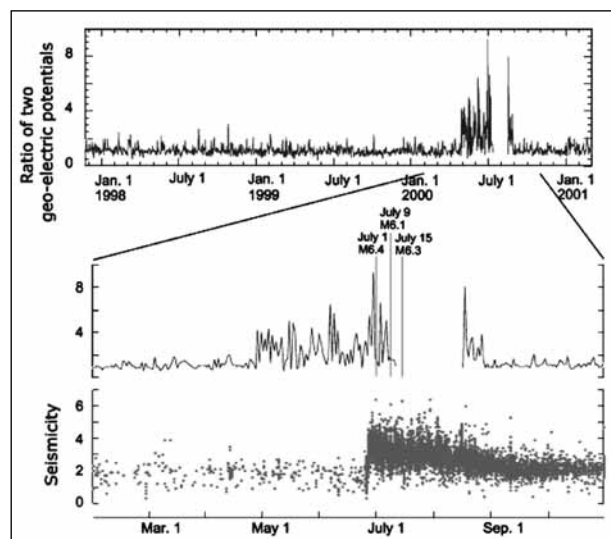


Figure 2. Anomalies du potentiel géo-électrique avant l'essaim sismique dans la région de l'île Izu au Japon (Uyeda *et al.*, 2009).

6. Du nom de 3 physiciens grecs : Varotsos, Alexopoulos et Nomicos.

portement des poissons-chats. Les principaux obstacles à l'utilisation des comportements animaliers comme précurseurs (qui sont également ceux attribués aux autres méthodes fondées sur des observations physico-chimiques du milieu) semblent être : la manifestation non systématique de ces précurseurs avant tous les séismes, la difficulté à décrypter l'anomalie du « bruit de fond » et la durée et l'extension des anomalies, très variables d'un séisme à l'autre. En outre, l'objectivité du processus humain d'observation est mise en cause et certains biais de mémoire ne sont pas à exclure (Sheldrake, 1999).

Conclusions

La priorité étant de réduire les pertes en vies humaines en limitant les dommages aux constructions et aménagements, il est primordial que les normes parasismiques pour les constructions neuves soient appliquées et que les bâtiments existants fragiles soient renforcés. En parallèle, l'amélioration de la prévision à court terme des séismes et l'identification de précurseurs pertinents opérationnels pour l'alerte des populations sont des éléments essentiels pour la réduction de ce risque.

Si aucune méthode n'est à éliminer, aucune ne semble fiable dans tous les cas, l'utilisation conjointe de plusieurs méthodes ne garantissant pas non plus la réussite d'une prévision. Les travaux de recherche sur les phénomènes physiques concernant la faille elle-même butent sur l'identification des précurseurs. Jusqu'à présent, il semble que les observations sur les grandeurs physiques et les modifications du comportement du vivant ont apporté le plus d'avancées, même s'il n'y a pas encore de méthode opérationnelle. Toutefois, on manque encore d'un modèle complet, incluant toutes les observations.

Les observations faites sur une grande variété de phénomènes montrent que certains phénomènes peuvent paraître pertinents dans certains cas, pas dans d'autres. La tendance semblant se dégager, est que dans les zones à risque identifiées par les prévisions à moyen ou long terme, il devra être mis en place des réseaux de mesures diversifiées d'enregistrement continu utiles sur le moyen à long terme, mais utilisables au premier chef sur le court terme. Aucune mesure seule ne saurait prévaloir, une approche multi-paramètres a plus de chances de permettre l'identification d'un précurseur fiable.

Plus spécifiquement, pour le territoire français, dans les zones soumises à un risque sismique important (Antilles, ouest de l'arc alpin, Pyrénées), il pourrait être

intéressant d'instrumenter un site pilote et de surveiller les signaux avec des méthodes multi-paramètres, géochimiques et géophysiques.

Références citées dans le texte

- Cicerone R. D., Ebel J. E., Britton J., 2009 : A systematic compilation of earthquake precursors. *Tectonophysics*, Accepted manuscript.
- DeMichele M., D. Raucoules, J. Salichon, A. Lemoine and H. Aochi : 2008 : Using Insar for seismotectonic observations over the Mw6.3 Parkfield earthquake (28/09/2004, California, The International archives of photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII, Part B4, Beijing 2008.
- Gerstenberger M. C., Wiemer S., Jones L. M. *et al.*, 2005 : Real-time forecasts of tomorrow's earthquakes in California. *Nature*, 435, 328-331.
- Hirn A. & M. Laigle, 2004 : Silent heralds of megathrust earthquakes? *Science*, 305 (5692), 1917-1918.
- Ikeya M., 2004 : Earthquakes and Animals: from Folk Legends to Science. World Scientific Pub. Co, 296 p.
- Jousset P., 2009 : Précurseurs de séismes majeurs : un état de l'art et étude bibliographique. Rapport final BRGM/RP-58282-FR, 134 p. + annexes.
- Linde A. T., M. J. S. Jonhston, R. L. Guyther, R. G. Bilham, 1996 : A slow earthquake sequence on the San Andreas fault, *Nature*, 383(6595), 65-68.
- Murru M., Console R., Falcone G., 2009 : Real time earthquake forecasting in Italy. *Tectonophysics*, 470, 214-223.
- Nadeau R. M. and T. V. McEvilly, 2004 : Periodic pulsing of characteristic microearthquake on the San Andreas fault, *Science*, 303 (5655), 220-222.
- Romashkova L. L., 2009 : Global-scale analysis of seismic activity prior to 2004 Sumatra-Andaman mega-earthquake. *Tectonophysics*, 470, p. 329-344.
- Sheldrake R., 1999 : Dogs That Know When Their Owners Are Coming Home: And Other Unexplained Powers of Animals. Three Rivers Press, 368 p.
- Sheldrake R., 2003 : The Sense of Being Stared at: And Other Unexplained Powers of the Human Mind. Three Rivers Press, 384 p.
- Sieh K., 1996 : The repetition of large-earthquake ruptures. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 93, p. 3764.
- Uyeda S., 2000 : In defence of VAN's earthquake prediction. *EOS*, 81, 3.
- Uyeda S., Nagao T., Kamogawa M., 2009 : Short-term earthquake prediction: current status of seismo-electromagnetics. *Tectonophysics*, 470, 205-213.
- Vorobieva I. A., Panza G. F., 1993 : Prediction of the occurrence of related strong earthquakes in Italy. *Pure and Applied Geophysics*, 141, 25-41.