



Séismes géants et symphonie tellurique

La partition sismique

Les notes *pizzicato* évoquent délicatement une pluie d'hiver. Après chaque pincement, la corde du violon vibre librement à des fréquences qui lui sont propres. Ces vibrations dépendent de la longueur de la corde, de sa composition et de sa tension. Lorsque le violoniste accorde son instrument en tournant les chevilles, il modifie simplement la tension des cordes. Lorsqu'il joue, il en modifie la longueur par le mouvement des doigts pour générer différentes fréquences, ou, en d'autres termes, différentes notes.

Confortablement assis à l'écoute du concerto de Vivaldi, le mélomane distinguera aisément les tonalités aiguës engendrées par les cordes fines, des sons plus graves issus des cordes plus épaisses. Par ailleurs, l'oreille sera capable d'apprécier non seulement le talent des musiciens, mais aussi la qualité des cordes. Ainsi, simplement à l'écoute du son produit par la corde, on peut s'informer sur sa composition, sa taille et sa tension.

A l'instar des cordes de violon, tout corps peut résonner à des fréquences qui lui sont propres, que ce soit une cloche, un bâtiment, un pont, ou ... la Terre. En effet, notre globe peut vibrer librement à des fréquences déterminées par sa forme, sa constitution et ses propriétés physiques, et donc, l'enregistrement de ces vibrations nous permet d'ausculter l'intérieur de la planète. Vu sa taille, la Terre produit des sons bien plus graves que ceux perceptibles par l'oreille humaine : pour donner une idée des ordres de grandeur, comparons les fréquences terrestres à celle du « Do 256 Hertz », qui occupe le centre du clavier d'un piano. Pour reproduire les sons telluriques les plus graves, inférieurs au millième de Hertz, il faudrait diviser cette fréquence dix-huit fois par deux, ou en termes plus musicaux, descendre de 18 octaves¹, alors que le clavier d'un piano n'en compte au total que huit. Prenons encore un autre exemple, celui de la guitare : ses cordes devraient s'étendre sur plusieurs dizai-

nes de kilomètres pour générer des fréquences aussi basses, à supposer qu'il soit possible de tendre une corde sur une telle distance !

Mais quel est le musicien capable de jouer des mélodies cent mille fois plus graves qu'une contrebasse et perçues dans une salle de concert grande comme la Terre ? Un séisme violent ! Lui seul est capable de frapper notre planète suffisamment fort pour la faire résonner dans son entièreté et osciller librement à des périodes comprises entre 54 minutes et quelques secondes, pendant des jours voire des semaines.

Les vibrations propres de la Terre

Prédites à la fin du XIX^e siècle, il fallut attendre le séisme géant du Chili en 1960 pour pouvoir observer les oscillations libres de la Terre pour la première fois. Avec l'évolution des techniques, de nombreux séismes de magnitude supérieure à 6,5 permirent d'étudier en détail ces tonalités terrestres, révélant de nombreuses informations sur l'intérieur du globe. Par exemple, c'est par l'étude de ces vibrations que l'on a pu prouver en 1971 l'état solide de la graine au centre de la Terre.

La station de Membach

Séismes et barrages

Voici une quarantaine d'années, il fut décidé de rehausser le barrage de La Gileppe, construit sous le règne de Léopold II. Comme il était beaucoup question dans la littérature scientifique de l'influence des grands réservoirs d'eau sur le déclenchement de tremblements de Terre, le ministère des Travaux publics construisit une station de surveillance géophysique à Membach, entre les barrages de La Gileppe et d'Eupen. Cette station est composée de deux chambres auxquelles on accède par une galerie longue de 130 mètres. L'ensemble a été creusé entre 1975 et 1977 dans la roche sous le plateau des Hautes Fagnes.

¹ Monter d'une octave correspond à doubler la fréquence



L'entrée de la station de Membach.



Un studio d'enregistrement exceptionnel

La station de Membach est l'une des meilleures parmi les quarante stations sismiques du réseau belge, à laquelle n'échappe aucun séisme de magnitude supérieure à 5, où qu'il se produise dans le monde. La plupart des stations sismiques ne comporte qu'un sismomètre, uniquement sensible aux signaux aigus de la croûte terrestre. Par contre, outre plusieurs sismomètres, Membach abrite aussi depuis 1995 un gravimètre relatif à supraconductivité (ou cryogénique) et accueille régulièrement un gravimètre absolu depuis 1996. Cette panoplie d'instruments donne à l'Observatoire une oreille absolue à l'écoute des bourdonnements terrestres et ce dans toute leur gamme de fréquence. Cette gamme s'étend depuis les frémissements ténus de périodes séculaires jusqu'aux vibrations destructrices et rapides, de fréquences supérieures à 1 Hertz.

Cette association d'instruments divers est exceptionnelle et permet de mener à Membach des recherches tout à fait originales. Seuls quelques rares observatoires, comme ceux de Piñon Flat en Californie et de la Forêt noire en Allemagne, sont également à l'écoute d'une aussi large gamme de fréquences.

Le séisme de Sumatra

> Le gravimètre cryogénique de Membach.

>> Le gravimètre absolu de Membach.

Comme d'autres séismes géants, tels ceux du Chili en 1960 ($M_w=9.5$) et d'Alaska en 1964 ($M_w=9.2$), le tremblement de terre du 26 décembre 2004 de Sumatra-Andaman ($M_w=9.1$ à 9.3) a été causé par une rupture en zone de subduction, là où

une grande plaque rocheuse océanique plonge sous une plaque continentale. Ces mouvements impliquent des zones de failles gigantesques, larges de 200 Km, longues de 1.000 Km et s'accompagnent de glissements d'une plaque par rapport à l'autre d'une dizaine de mètre. Lors de l'événement de Sumatra, la rupture s'est étendue en 10 minutes sur plus de 1.300 Km, depuis le nord de Sumatra jusqu'aux îles Andaman à la vitesse moyenne de 2 Km/s. Cette déchirure, la plus longue connue à ce jour, s'est produite à la frontière de la plaque indo-australienne et de la partie sud-est de l'Eurasie, laquelle se morcelle entre les microplaques Birmane et de la Sonde.



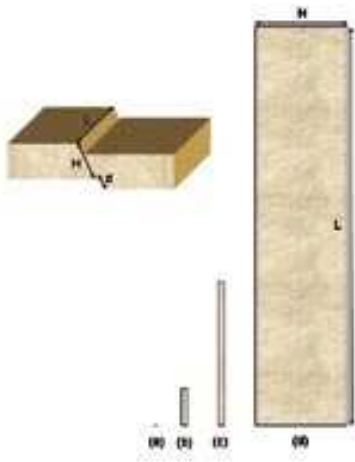
Contexte tectonique à l'origine du séisme de Sumatra-Andaman du 26 décembre 2004 (avec l'aimable autorisation de Kris Vanneste, ORB).

A titre de comparaison, le séisme de Roermond ($M_S = 5.4$), qui ébranla la Belgique en 1992, a été causé par une rupture se propageant en profondeur sur 4 Km en 2 secondes. Quant à celui d'Izmit, qui frappa cruellement la Turquie en août 1999 ($M_W = 7.4$), il fut causé par une rupture qui a déchiré en 40 secondes la croûte depuis la surface jusqu'à une profondeur de 15 Km, sur une distance de 120 Km.

La magnitude: violons ou contrebasses ?

La magnitude d'un séisme reflète la physique de la source sismique. Elle est liée à la surface du plan de faille qui s'est mis en mouvement (équivalente à la moitié de la superficie de la France dans le cas de la secousse de Sumatra!), ainsi qu'au déplacement moyen: la magnitude caractérise donc un séisme en terme de déplacement final. Cependant, cette valeur n'est pas directement accessible et se calcule sur la base d'ondes sismiques à longue période. Les magnitudes des séismes du Chili, d'Alaska et de Sumatra furent déterminées à l'aide de mesures d'ondes de 300 secondes de période. Comme la rupture est plus longue que celle du Chili en 1960





Magnitude et plan de faille. La magnitude est liée à la largeur l , la longueur L et au déplacement d . Comparaison de différents séismes : (a) Roermond, 1992, MS = 5,4 ; (b) Izmit, 1999, MW = 7,4 ; (c) San Francisco, 1906, MW = 7,9 ; (d) Sumatra-Andaman, 2004, MW = 9,1-9,3.

En conclusion, il n'est en réalité pas possible de départager les séismes de 1960, 1964 et 2004. En fait, vu les dimensions des failles en jeu, la solution la plus sage est qu'ils se tiennent ensemble en haut du podium. Ajoutons qu'un chiffre définitif ne sera vraiment disponible pour l'événement de Sumatra que lorsque le mécanisme de rupture sera mieux compris, ce qui pourrait encore prendre des mois voire des années.

ou de l'Alaska en 1964, on peut s'étonner d'une magnitude moindre. Cependant, des mouvements particulièrement lents se sont produits lors de la rupture de 2004, favorisant la production d'énergie à longue période, et donc, un calcul exact de magnitude doit considérer les mouvements les plus lents, de périodes comprises entre 500 secondes et une heure. Sur base de l'étude des oscillations libres (voir paragraphe suivant), la magnitude a pu être réévaluée plusieurs jours après entre 9.1 et 9.3. Si une telle méthode avait été applicable il y a 40 ans, les magnitudes du Chili et d'Alaska pourraient pu s'avérer plus faibles.

En d'autres termes, si l'on compare ces tremblements de Terre à des orchestres symphoniques, l'un a probablement joué davantage dans les aigus, privilégiant les violons, alors que l'autre a donné davantage de puissance aux contrebasses. Malheureusement, en 1960, personne n'avait l'oreille absolue; en d'autres termes, on ne disposait pas des « récepteurs » adaptés à ces sons graves qui auraient permis un calcul correct. Et de toutes façons, les incertitudes liées au peu de données disponibles dans les années 60 rendent caduque toute comparaison au niveau du dixième ou des deux dixièmes de magnitude.

Pour compliquer le tout, notons aussi que le contexte tectonique est très différent. Au Chili, la plaque plongeante est jeune de 15 millions d'années et la convergence est perpendiculaire à la plaque chevauchante. Dans le cas de Sumatra, la convergence est oblique, surtout dans le nord, et la plaque plongeante est plus âgée, de 60 millions au sud à 90 millions au nord de la rupture de Sumatra. Ces différences rendent encore plus complexes les comparaisons entre ces séismes, car le couplage mécanique entre plaques chevauchante et plongeante, et donc, les glissements associés, sont fonction de leur âge.

Une gigantesque salle de concert

Outre le tsunami dévastateur causé par les déplacements brutaux du fond océanique, cet événement a également ébranlé la Terre dans sa totalité, excitant une multitude d'oscillations libres, également dénommées modes propres². La plupart du temps, les modes ne sont pas directement observables dans les sismogrammes et seule une analyse mathématique (dite « spectrale ») fait ressortir les différentes tonalités. Cependant, l'événement de Sumatra ébranla si fort la planète que des modes ont été directement visibles dans les enregistrements de certains sismomètres et des gravimètres cryogéniques, dont celui de Membach.

Comme le montre la figure, certains de ces modes sont restés observables des semaines durant, avant d'être faiblement réanimés par le nouveau séisme de Sumatra du 28 mars 2005.

La grande qualité des enregistrements de ce séisme, en particulier par les gravimètres cryogéniques, permettra de raffiner les modèles de Terre et peut-être, de lever certaines controverses, par exemple celle de savoir si, au sein de la graine terrestre, les cristaux de fer sont alignés avec l'axe de rotation.

La mesure du séisme

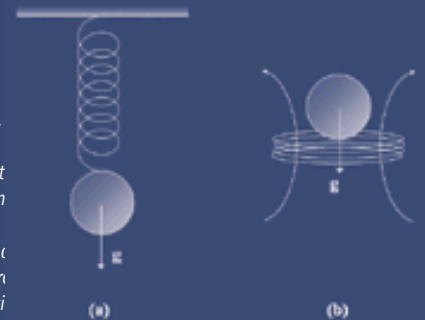
L'événement de Sumatra a mis en évidence des problèmes d'étalonnage des sismomètres du réseau mondial, dont certains présentent jusqu'à 10 % d'erreur. Ce n'est pas négligeable, car comme on le montre dans la revue Science, dans le cas du séisme de Sumatra, une telle incertitude représente l'équivalent d'un séisme de magnitude Mw = 8.4, supérieur à

2 Michel Van Camp, Les oscillations libres de la Terre, Ciel et Terre, 117 (3), 98-102, 2001

Schéma de la suspension classique à ressort et magnétique.

Le gravimètre cryogénique à l'écoute

Comme un sismomètre, un gravimètre classique mesure les déplacements d'une masse suspendue à un ressort. Il n'en diffère que par sa sensibilité particulière aux variations lentes de la pesanteur, de quelques heures à plusieurs mois. Dans un gravimètre cryogénique, la suspension à ressort, purement mécanique, a été remplacée par la lévitation magnétique d'une sphère engendrée par les courants permanents circulant à l'intérieur de deux bobinages. L'ensemble, rendu supraconducteur et maintenu à une température de -269 °C, assure une grande stabilité qui permet de mesurer les variations temporelles de la pesanteur g avec une précision cent fois plus élevée que celle des gravimètres à ressort conventionnels. Cependant, contrairement aux gravimètres à ressort, les gravimètres cryogéniques ne sont actuellement pas transportables. A l'origine, dans les années 1970 et 1980, ces instruments étaient principalement dédiés à l'étude des déformations lentes de la Terre, de périodes supérieures à l'heure, principalement liées aux forces de marées. C'est à la fin des années 1990 que les recherches menées à l'Observatoire royal de Belgique et à l'Observatoire de la Forêt noire ont montré que les nouveaux gravimètres cryogéniques présentent de meilleures performances que les sismomètres utilisés classiquement pour l'étude de certaines oscillations libres de la Terre. Comme le montrent les lignes qui suivent, le séisme de Sumatra du 26 décembre 2004 a confirmé les qualités sismométriques des gravimètres cryogéniques.



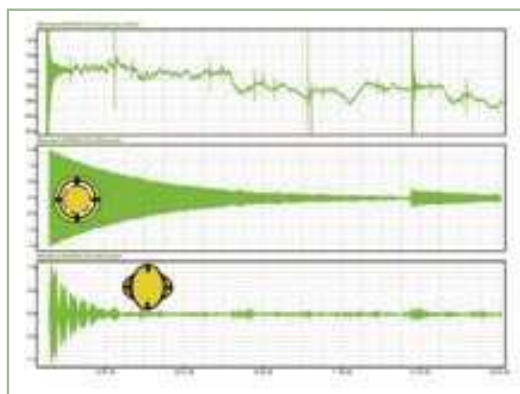
tout ceux s'étant produits entre 1965 et 2001. Cela limite également la compréhension des mouvements des plaques pendant le tremblement de Terre.

Contrairement à ces stations du réseau sismométrique mondial, la vingtaine de gravimètres cryogéniques répartis dans le monde ont reproduit les déplacements du sol avec une précision de 0,1 %, qui ont atteint le centimètre à Membach le 26 décembre 2004. En comparant les enregistrements sismométriques et gravimétriques, il est heureusement possible de corriger ces problèmes d'étalonnage.

Au niveau international

L'Observatoire envoie depuis longtemps des données gravimétriques et sismiques aux centres internationaux. En particulier, nous avons proposé début 2004 de fournir en temps réel les données de Membach au centre américain IRIS (*Incorporated Research Institutions for Seismology*), qui collecte entre autres des données de sismomètres dans le monde entier et les met à la disposition de la communauté scientifique.

L'Observatoire a ainsi été la première institution à fournir les mesures d'un gravimètre cryogénique aux sismologues du monde entier par l'intermédiaire du centre IRIS, qui nous est très reconnaissant d'avoir ouvert cette nouvelle branche. L'intérêt suscité par ces mesures a été confirmé par le séisme



Haut : Enregistrement du gravimètre cryogénique de Membach du 26-12-2004 au 20-04-2005. On observe le choc principal et ses nombreuses répliques, ainsi que d'autres séismes. Une version « sonore » d'un enregistrement semblable, accéléré 200.000 fois, est disponible sur http://www.iris.washington.edu/about/ENO/iows/2_2005a.htm. **Bas** : Même série temporelle après filtrage, afin d'isoler les modes « ballon » $0S_0$ (au milieu) et « rugby » $0S_2$ (en bas). $0S_0$ de 20,9 minutes de période, consiste en un mouvement de la Terre semblable aux gonflements et dégonflements successifs d'une baudruche. $0S_2$ de période égale à 53,8 min, est le mode le plus grave. Il est surnommé « rugby » en raison des mouvements oblates et prolates pris par le Globe. Ces modes ne sont que deux cas particuliers parmi des centaines, mais leur facteur d'amortissement est si ténu qu'ils restent visibles des semaines durant. Seul le séisme de Sumatra du 28 mars de magnitude 8,6 fut assez puissant pour les exciter à nouveau, mais plus faiblement.

de Sumatra, ainsi que l'a montré l'article paru récemment dans *Science*, qui se réfère entre autres aux travaux de Membach.

Michel Van Camp



La page personnelle de Michel Van Camp : homepage.oma.be/mvc/

5 Park, J., Song, T.R., Tomp, J., Okal, E., Stein, S., Rault, G., Clevede, E., Laske, G., Knamori, H., Davis, P., Berger, J., Braitenberg, C., Van Camp, M., Lei, X., Sun, H., Xu, H., and Rosat, S., Long-period behavior of the 26 December 2004 Sumatra-Andaman earthquake from its excitation of Earth's free oscillations, *Science*, 308, 139-1144, 20 May 2005.

Le gravimètre absolu donne le « la »

Comme les sismomètres, le gravimètre cryogénique est relatif : il ne mesure que les variations liées aux mouvements du sol. Pour obtenir ces mouvements en unités pratiques comme le mètre, il faut étalonner ces instruments, par exemple à l'aide d'un gravimètre absolu.

Le gravimètre absolu acquis par l'Observatoire en 1996 donne directement la valeur de la pesanteur g avec une précision du milliardième³. Pour se donner une idée, une telle exactitude correspond à mesurer la distance Terre - Lune à dix centimètres près. Dans ce gravimètre, une masse est en chute libre dans le vide sur une vingtaine de centimètres. La mesure de la distance parcourue en fonction du temps fournit la valeur de la pesanteur g . Cet instrument est principalement destiné à des fins métrologiques, à la cartographie, ainsi qu'à l'étude des déformations tectoniques⁴ et des mouvements des eaux souterraines. La station de Membach, port d'attache de ce gravimètre transportable, est devenue le point de référence belge de mesure de la pesanteur, où g égale en moyenne $9\ 804\ 672\ 500\ \text{nm/s}^2$ et varie de quelques nm/s^2 , soit quelques milliardièmes de g , en fonction des saisons.

Le gravimètre absolu de l'Observatoire, de réputation internationale, participe à de nombreuses campagnes métrologiques, entre autres au Bureau international des poids et mesures. En métrologie, la mesure de g est importante pour les mesures de pression, déterminer le kilogramme² et l'étalonnage des gravimètres relatifs, action primordiale pour mieux contraindre les modèles de Terre, calculer la magnitude des séismes géants et mieux comprendre les mouvements à la jonction des grandes plaques tectoniques.

Ainsi, à l'heure actuelle, les gravimètres absolus fournissent la meilleure méthode d'étalonnage des gravimètres relatifs et sont les diapasons qui permettent aux géophysiciens d'écouter la musique terrestre en haute-fidélité.

3 Michel Van Camp, Thierry Camelbeeck, Tet PRichard, Le kilogramme, la constante de Planck et le soulèvement de l'Ardenne, *Ciel et Terre*, 120 (1), pp. 5-11, 2004.

4 M. Van Camp et O de Viron, La mesure de la Terre est une des bases de son étude physique, *Ciel et Terre* 121 (3), pp 66-78, 2005.