

Ondes et magnitudes

Auteurs : Pascal Bernard(plus d'infos)

Résumé : Les séismes : Chapitre issu de l'ouvrage "29 notions clefs pour savourer et faire savourer la science - primaire et collège", paru aux éditions Le Pommier en août 2009.

Publication : 8 Avril 2014

Des ondes dans les roches

La production de grands glissements sur les failles n'explique pas tout le potentiel destructeur des séismes : c'est la capacité des roches à propager des ondes, grâce à leur élasticité, qui leur permet de transporter au loin ces brusques mouvements, qui sinon resteraient confinés au voisinage immédiat de leur source. Que sont donc ces ondes ?

Pour bien le voir, prenez un de ces longs ressorts cascadeurs que l'on trouve parfois dans les magasins de gadgets. Attachez-en une extrémité au mur, tendez-le et secouez-le d'un geste brusque de la main : la vibration se propage rapidement le long du ressort. Le mouvement d'un élément du ressort force le mouvement de son voisin, lequel se met en branle avec un léger retard lié à son inertie, et ainsi de proche en proche... Selon la direction de votre geste, vous obtiendrez une onde de compression, qui, dans un mouvement longitudinal, comprimera et dilatera alternativement le ressort, ou une onde de cisaillement, qui déplacera le ressort latéralement, comme le cinglement d'un fouet. Ces deux types d'ondes existent tout aussi bien dans les roches, mais elles y voyagent mille fois plus vite : dans la croûte terrestre, au lieu de quelques mètres par seconde dans le ressort, les ondes de compression, dites P, font du 6 km/s, et les ondes de cisaillement, dites S, du 3 km/s. Dans un liquide, comme l'eau, ou dans un gaz, comme l'air, les ondes P se propagent sans problème, mais bien moins vite : 1,5 km/s dans l'eau, 300 m/s dans l'air, bien plus compressible. Ces ondes P dans l'air, vous en avez l'expérience quotidienne : ce sont elles qui « transportent » le son depuis sa source vibrante jusqu'à vos oreilles... Mais les liquides et les gaz ne permettent pas aux ondes S d'exister, car la très faible viscosité de ces fluides les empêche de transmettre des forces cisailantes de proche en proche.

La mesure des ondes sismiques produites par des ruptures de failles ou par des explosions artificielles a permis de préciser peu à peu les vitesses des ondes P et S à l'intérieur du globe, car les séismes, même modérés, produisent des ondes détectables aux antipodes sur des sismomètres très sensibles! Notez bien qu'à la différence des ondes dans le ressort, qui ne peuvent voyager que le long du ressort, les ondes sismiques P et S dans la Terre partent dans toutes les directions – tout comme le son sortant de votre gorge est entendu tout autour de vous. Pour traverser la Terre de part en part, il ne faut que quarante minutes de propagation pour l'onde P, car les vitesses sismiques augmentent avec la profondeur et atteignent 12 km/s dans le noyau de fer très rigide. Mais les ondes S ne peuvent passer dans la couche de fer liquide, et c'est justement leur absence des sismogrammes à certaines distances qui a permis de conclure à l'existence de cette couche liquide.

Un sismogramme n'est malheureusement pas seulement composé d'une belle onde P, impulsive, suivie quelque temps plus tard d'une belle onde S. Secouez à nouveau votre ressort : un écho y est généré à son extrémité et, après quelques allers-retours, votre onde perd bien vite sa simplicité originelle. De même, les couches multiples de la Terre et leurs irrégularités, ainsi que sa surface, vont réfléchir les ondes P et S, les dévier, les diffuser, transformer part de la compression en cisaillement et inversement, parfois les piéger et les amplifier dans des poches molles tels des bassins sédimentaires, ou les guider le long de la surface de la Terre... Ces ondes multiples rendent délicate l'interprétation des sismogrammes, de plus en plus complexes au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source, brouillant le signal de la faille par leurs multiples échos.

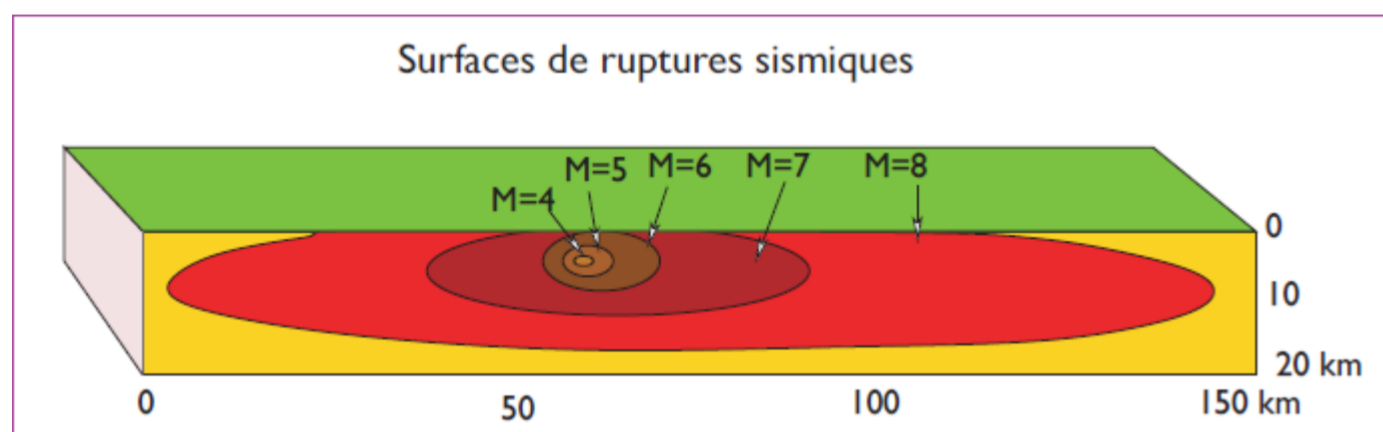
Mais le malheur des uns fait le bonheur des autres : les sismologues intéressés non pas par les failles mais par la structure et la composition interne de la Terre seront ravis de trouver les structures profondes de la planète responsables de tous ces échos...

Plus la faille sismique est située loin du sismomètre, plus les ondes arrivent tardivement. C'est ce qui permet au sismologue de localiser le lieu de démarrage des ruptures sismiques, ou hypocentre, en mesurant l'instant d'arrivée de l'onde P à de nombreuses stations sismologiques. La précision de la localisation est de 1 à 10 km, selon la proximité des réseaux de surveillance. Mais ce n'est pas tout. Reprenez votre ressort, et observez bien son extrémité : la direction du mouvement de l'onde y trahit celle de la première impulsion que vous lui avez donnée. Sur un sismogramme, en mesurant la direction du premier mouvement de l'onde P, voire de l'onde S, on peut en déduire la direction du mouvement de la face la plus proche de la faille, et, par recoupement avec plusieurs enregistrements dans différentes directions, connaître l'orientation de cette faille et la direction du glissement sur sa surface. C'est ainsi que l'on peut tout savoir, ou presque, d'une faille sismique cachée à des kilomètres dans l'opacité de la Terre.

La magnitude des séismes

Laissons de côté les ondes et revenons à leur source, ce glissement brutal entre deux blocs. Depuis les années 1980, la multiplication des mesures sismologiques et géodésiques au voisinage des failles sismiques a permis d'en révéler le détail de plus en plus finement. Prenez du papier absorbant et étirez-le progressivement pour en séparer une feuille : la déchirure se propage rapidement le long du pointillé, du point le plus faible – ou le plus étiré – à ses voisins... De même pour les failles, où la rupture commence sur une toute petite surface, plus fragile ou plus déformée. En y relâchant les contraintes, ces dernières sont reportées très rapidement en sa périphérie, à une vitesse proche de celle des ondes S, fracturant les surfaces voisines, et ainsi de proche en proche : un front de rupture se propage sur la faille, à environ 3 km/s, derrière lequel le glissement se met rapidement en place, à près de 1 m/s. Mais la rupture peut se bloquer en rencontrant la surface plus résistante d'une de ces aspérités causées par les irrégularités géométriques de la faille, ou bien en atteignant une zone qui a déjà glissé lors d'un séisme récent, et a donc relâché ses contraintes.

La longueur finale de la rupture sismique définit l'énergie relâchée par le séisme. Cette dernière est proportionnelle d'une part à la surface de la faille (de l'ordre de L^2 si L est sa longueur) et d'autre part à l'amplitude du glissement (lui-même proportionnel à L). L'énergie est donc proportionnelle à L^3 : une faille de 100 km de long libérera un million de fois plus d'énergie qu'une faille de 1 km de long (100^3) ! Pour éviter de manipuler des chiffres sur une échelle aussi grande, les sismologues ont défini la magnitude par une mesure logarithmique de cette énergie. On peut ainsi montrer que gagner un point de magnitude correspond à multiplier la longueur de la faille par 3. Typiquement, une faille d'1 km de long correspond à un séisme de magnitude 4, alors que 100 km de rupture correspondent à un séisme de magnitude 8. Les plus grands séismes connus ont atteint la magnitude 9,5, au Chili en 1960 et en Alaska en 1964. Le troisième du classement, de magnitude 9,3, est de sinistre mémoire: c'est celui de Sumatra, en 2004, dont on a surtout retenu le monstrueux tsunami associé, responsable de la majorité des 225 000 morts. Ces trois séismes ont tous rompu plus de 1 000 km de faille dans des zones de subduction et ont produit des glissements atteignant une vingtaine de mètres ! Une magnitude 2 correspond plus modestement à une faille de 100 m qui glisse de quelques centimètres.



La relation magnitude-longueur

Les ondes sismiques émises par les failles

Lors du glissement, les deux blocs séparés par la faille frottent l'un contre l'autre : les multiples aspérités de toutes tailles qui forment leur contact s'accrochent et se décrochent vivement, produisant une vibration persistante des roches dans une large gamme de fréquences, jusqu'à ce que la faille se bloque. Le raclement de votre brique glissant sur le sol en est le témoin sonore. Ces vibrations vont se propager au loin, dans toutes les directions, sous forme d'ondes P et d'ondes S. Mais dans certaines directions, les ondes P seront dominantes, et dans d'autres, ce seront les ondes S, dépendant du sens du mouvement sur le plan de faille lui-même, et de son orientation.

Forte au voisinage de la faille, l'amplitude de ces ondes diminue en proportion inverse de la distance parcourue par simple effet géométrique – tout comme pour la lumière émise par une lampe. Mais la diffusion des ondes sismiques par les hétérogénéités et leur amortissement par la mise en jeu et le frottement des myriades de petites fissures dans les roches à leur passage produisent une atténuation supplémentaire. Cette atténuation est d'autant plus grande que la fréquence (nombre d'oscillations par seconde) est élevée. Ainsi, les vibrations à 100 ou 1 000 Hz, émises lors du glissement deviennent indétectables à quelques kilomètres de la faille. De même, pour les séismes lointains, les sismomètres ne mesurent que les ondes de fréquence inférieure à 1 Hz (période supérieure à 1 seconde), les vibrations à 10 Hz (0,1 seconde) ayant été bien plus fortement atténuées. C'est d'ailleurs par la mesure de ces ondes de période 1 s, corrigées de leur atténuation avec la distance, que le géophysicien Charles Francis Richter a défini en 1935 la première échelle de magnitude.

Addons

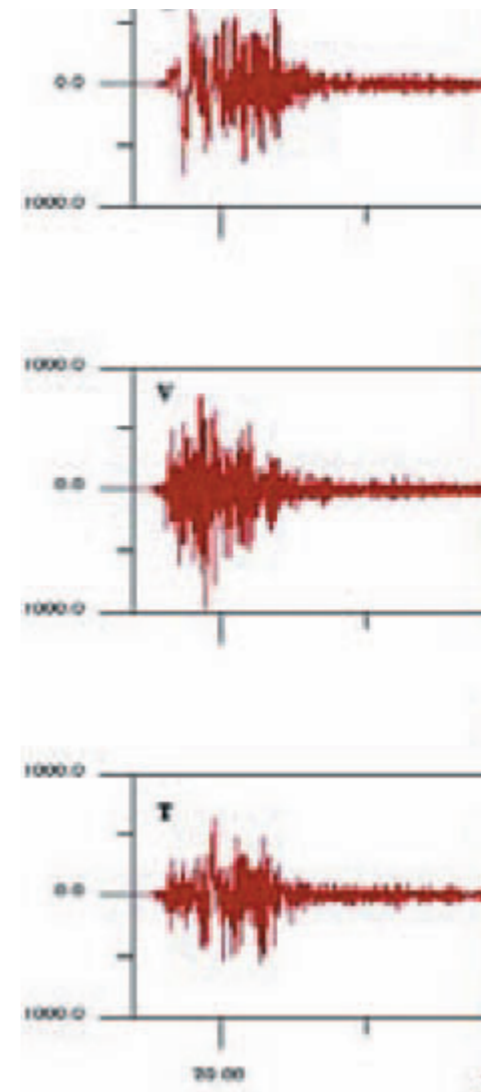
Cette décroissance des amplitudes des ondes sismiques avec la distance fait que les séismes ne sont généralement destructeurs que dans leur voisinage immédiat, jusqu'à quelques dizaines de kilomètres pour les plus grands. Que valent donc ces amplitudes à proximité de la faille ?

Reprenons le séisme de magnitude 2 vu plus haut. Comme le front de rupture se bloque au bout de 100 m de course, le glissement irrégulier émet des vibrations pendant environ 0,3 s (100 m à 3 km/s). Bien que le glissement final sur la faille atteigne quelques centimètres, les vibrations du sol, à une dizaine de kilomètres de distance, n'atteignent que quelques fractions de millimètre. Bien détectées par des sismomètres, elles restent imperceptibles pour l'homme et n'ont bien sûr aucun effet destructeur.

Si le front de rupture n'est arrêté qu'au bout de 10 km, le séisme parvient à la magnitude 6, dure 3 s, et le glissement final sur la faille atteint 1 m. C'est ce qui s'est passé à L'Aquila, en 2009. À moins de 10 km de la faille, les vibrations émises dépassent la dizaine de centimètres. La vitesse du sol peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres par seconde. La rupture peut même fracturer la surface de la Terre, au grand plaisir des géologues qui voient enfin leur faille apparaître.

Le séisme d'Izmit de 1999, de magnitude 7,5, a duré une vingtaine de secondes, le temps que le front de rupture balaie la faille de l'hypocentre jusqu'à ses extrémités est et ouest, sur 150 km de long ! Les vibrations du sol furent destructrices jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres de la faille, avec des vitesses maximales de plus d'un mètre par seconde. Ce tremblement de terre a ravagé plusieurs villes et fait près de trente mille morts. En 2004, la rupture de la faille à l'origine du séisme de Sumatra a duré 6 minutes, le temps de sa propagation sur ses 1 200 km de long.

Les mouvements peuvent aussi être décrits par l'accélération du sol, en m/s^2 : pour Izmit, ils ont dépassé $5 m/s^2$, soit la moitié de l'accélération de la pesanteur, g . Lors du séisme de Bam de 2003, les accélérations verticales mesurées ont atteint $1 g$: leur effet est tel que les bâtiments sont passés en une fraction de seconde de leur poids normal à un poids apparent deux fois plus grand, lorsque le sol remontait, et à un poids nul, lorsqu'il redescendait ; et ainsi de suite plusieurs fois par seconde, pendant plusieurs secondes – comme dans une sorte d'ascenseur frénétique. On comprend bien que seuls des bâtiments particulièrement bien construits sortent intacts d'une telle épreuve !



Trois composantes de l'accélération du sol, dans la direction nord, verticale, et est, enregistrée dans la ville de Bam, pour le séisme du 26 décembre 2003.

L'hypocentre est situé 8 km sous la ville. Les valeurs sont en accélération (cm/s^2). 1000 cm/s^2 correspond à $10 m/s^2$, soit environ l'accélération de la pesanteur (celle que vous avez en sautant d'une chaise...).

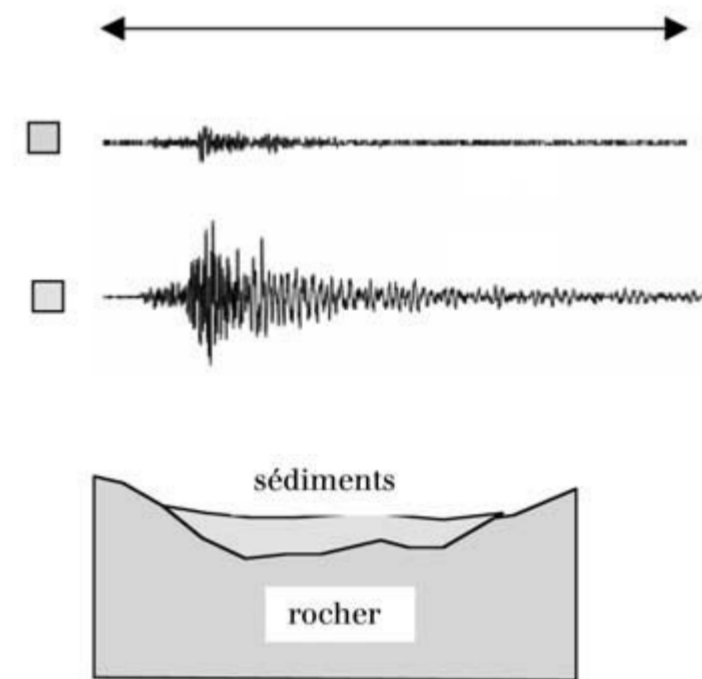
Source BHRC

Ces mouvements violents produits par les séismes ont une période dominante comprise entre 0,1 et 1 s, précisément la gamme de sensibilité de la plupart des bâtiments, qui peuvent dès lors être endommagés, voire détruits. Cette sensibilité est due au phénomène de résonance, que vous pouvez reproduire facilement avec une longue baguette de bois en la secouant par une extrémité : à une certaine période d'excitation, d'autant plus grande que la baguette est longue, la baguette se met à osciller bien plus que votre main. Pour les bâtiments d'un seul niveau, la période de résonance est de 0,1 s ; pour ceux de dix étages, elle est dix fois plus grande, soit 1 s.

En un site donné, après le passage des ondes, le sol s'immobilise dans une position nouvelle, en raison de la distorsion élastique des roches imposée par le glissement sur la faille. Cet effet diminue très vite avec la distance à la faille. À 10 km de distance, le déplacement résiduel est typiquement de quelques millimètres pour un séisme de magnitude 5, de dizaines de centimètres pour un séisme de magnitude 6 et de 1 m pour un séisme de magnitude 7. Ces déplacements, notablement plus faibles que sur la faille elle-même, sont parfaitement détectables au voisinage de la faille par la géodésie par GPS, ce qui permet aux chercheurs de mieux connaître la faille activée, même si la rupture n'a pas atteint la surface. Mais ils deviennent très vite négligeables à grande distance de la faille.

La décroissance géométrique de l'amplitude des vibrations avec la distance est fort bienvenue pour la bonne tenue de nos constructions. Mais elle est malheureusement souvent contredite par les observations. On note en effet que les ondes sismiques sont systématiquement amplifiées d'un facteur 2 à 10, lorsqu'elles passent du rocher rigide et profond aux couches très superficielles et peu rigides des sols sédimentaires (argiles, sables, moraines...)

Ainsi, à 50 km d'un séisme de magnitude 6, un site où le rocher affleure (le bord de votre assiette) ne verra aucune destruction, alors que de forts dommages seront observés à la même distance sur un sol sédimentaire récent (la gélatine), qui se mettra en résonance. Cette forte amplification, dite aussi « effet de site », est ignorée de la réglementation parasismique française actuelle mais les futures normes devraient mieux la prendre en compte.



Amplification des ondes sur les sédiments à Nice

Voir Aussi
Aucun résultat

Du même auteur

[Découvertes en pays d'islam](#)

02/06/16

[L'Océan, ma planète... et moi !](#)

02/06/16

[L'Océan, ma planète... et moi ! - L'Océan et le Cl...](#)

15/10/15

[29 notions-clefs : les séismes](#)

08/04/14

[29 notions-clefs : la gravitation](#)

07/04/14

Commentaires

Aucun commentaire