

FICHE TECHNIQUE :
INTRODUCTION AUX ONDES SISMIQUES, DE LA SOURCE A LA STATION SISMOLOGIQUE

Les plaques lithosphériques (communément appelées plaques tectoniques) constituent la couche la plus superficielle de la Terre (la lithosphère), et sont en permanence soumises à des contraintes (des forces) qui les animent de mouvements verticaux et horizontaux, et qui les déforment. Bien qu'elles soient effectivement capables de se déformer, elles finissent par se casser à des intervalles très irréguliers.

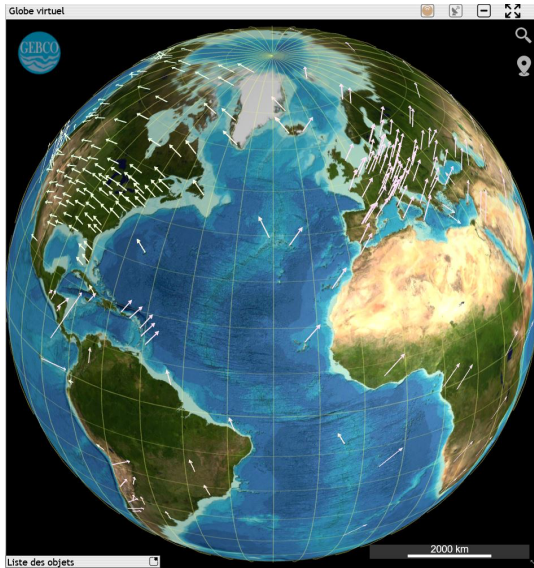


Illustration de mouvements horizontaux des plaques lithosphériques (Tectoglob3D)

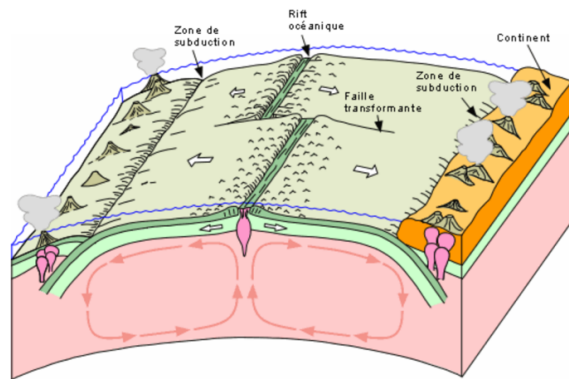
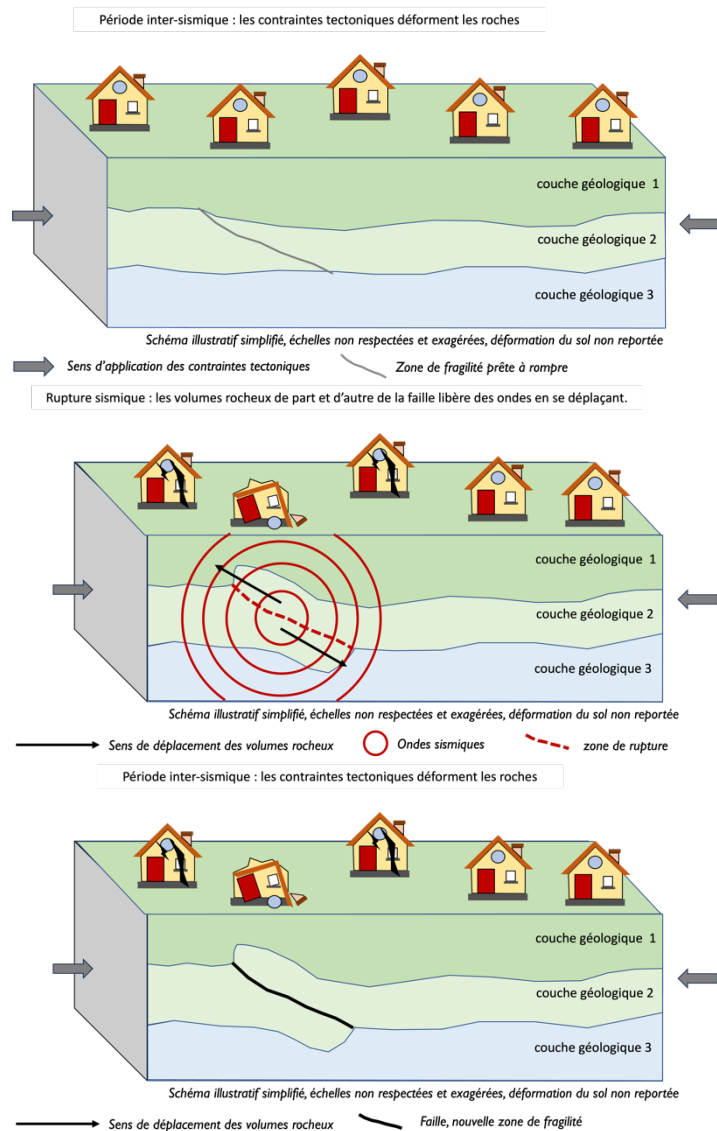


Illustration de mouvements horizontaux et verticaux des plaques lithosphérique (U. Laval)

Ces ruptures se mettent en place dans le volume des roches sous la surface de la Terre, et vont séparer deux zones rocheuses qui vont glisser l'une par rapport à l'autre. Ce glissement, qui se fait de façon soudaine, est appelé un séisme.

La friction des deux zones rocheuses qui se déplacent broie les roches en place, et libère de l'énergie sous forme de chaleur, et aussi sous forme de vibrations qui vont se propager tout autour de la zone de rupture. Ces vibrations sont nommées ondes sismiques.

Le déplacement des roches à proximité de la zone de rupture, considérée de façon simplifiée comme une surface nommée faille, déforment définitivement les roches à proximité de la faille. Mais au-delà d'une certaine distance, les particules de roches sont aussi déformées, mais elles sont la possibilité de revenir à leur position initiale. Ces particules étant jointives avec les autres particules environnantes, elles vont propager la perturbation. L'amplitude de cette perturbation diminue en partie à cause des forces de frottement, jusqu'à devenir nulle. Cette propagation de la perturbation (du changement de position avec un retour à la position de départ des particules), ou onde sismique, est possible en considérant la Terre comme un milieu élastique.



Il existe deux grandes familles d'ondes sismiques : les ondes de volume, et les ondes de surface.

Les ondes de volume

Comme leur nom l'indique, elles se propagent dans le volume de la Terre. Ces ondes naissent du broyage des roches lors d'un séisme. Chaque particule broyée va générer une onde, dont le nombre devient très important lorsque l'on considère la surface totale de la rupture. Les recherches en sismologie ont montré que l'ensemble de ces ondes peuvent être regroupé sous deux catégories (dont deux catégories d'ondes dans la famille des ondes de volume) : les ondes P et les ondes S.

Ce qui va distinguer l'ensemble des ondes P et l'ensemble des ondes S, c'est la façon dont elles vibrent en se propageant.

Les ondes P vibrent la direction de leur propagation. C'est comme-ci, de façon très simplifiée, les particules de roches font des aller-retours autour de leur position initiale : en avant de la

propagation il y a compression des particules (elles se rapprochent), et en arrière il y a une dilatation (elles s'éloignent, mais sans se séparer). Ce mode vibratoire dans la direction de propagation (direction longitudinale) fait que les ondes P sont aussi dites ondes P longitudinales. Leur vitesse moyenne de propagation en surface est de 6 km.s^{-1} .

Pour les ondes S, c'est un mode de vibration plus complexe. En effet, la vibration ne se fait pas dans la direction de propagation, mais dans un plan autour de cette direction, avec comme caractéristique d'être orthogonal (à cette direction). Les particules vont bouger perpendiculairement à la direction de propagation. On pourrait imaginer ça avec les ondulations du corps d'un serpent, ondulations perpendiculaires (à peu près) par rapport à la direction dans lequel il avance. D'une onde S à une autre, leur mode de vibration peut se faire dans n'importe quel plan orthogonal autour de la direction de propagation. Ce mode vibratoire fait que les ondes S sont moins rapides que les ondes P : leur vitesse moyenne en surface est de 3.4 km.s^{-1} . Pour vraiment simplifier, c'est comme comparer deux personnes qui courent, une en ligne droite et l'autre en faisant de petits sauts de droite à gauche. Ce comportement est dit cisailant, c'est pour cela qu'on les nomme aussi onde S cisailantes. Cette caractéristique fait que ces ondes ne peuvent pas se propager dans les liquides.

Les ondes de surface

Comme leur nom l'indique, elles se propagent en surface. Elles sont générées à partir des ondes de volumes qui vont arriver en surface de la lithosphère, en contact avec un autre milieu : l'atmosphère. Une de leur caractéristique est de se propager le long de cette interface, en déformant la matière rocheuse, sur une certaine épaisseur (liée à leur longueur d'onde). Leur vitesse de propagation peut aller jusqu'à 90% de la vitesse des ondes S. Comme pour les ondes de volume, il existe deux catégories d'onde de surface.

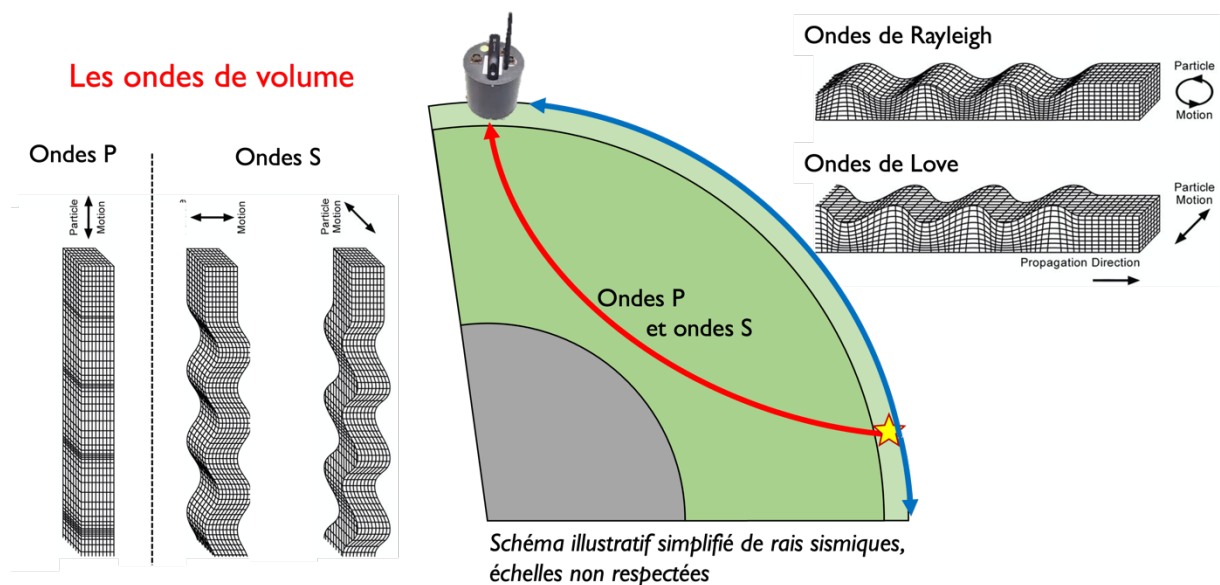
Les ondes de Rayleigh

Elles ne se propagent qu'en surface d'un solide. Leur mode vibratoire est assez particulier. Si on regarde de profil une particule, elle va entamer un mouvement rotatif rétrograde (vers l'arrière) avant de montrer un mouvement prograde (vers l'avant) selon le sens de propagation. Ce mouvement elliptique d'avant en arrière s'inscrit dans un plan vertical à la surface de la Terre.

Les ondes de Love

Ce sont des ondes cisailantes (comme les ondes S). La vibration se fait horizontalement par rapport à la surface de la Terre. Ce sont les ondes qui ont la plus grande capacité à générer des dégâts. Elles sont plus rapides que les ondes de Rayleigh.

Les deux grandes familles d'ondes sismiques

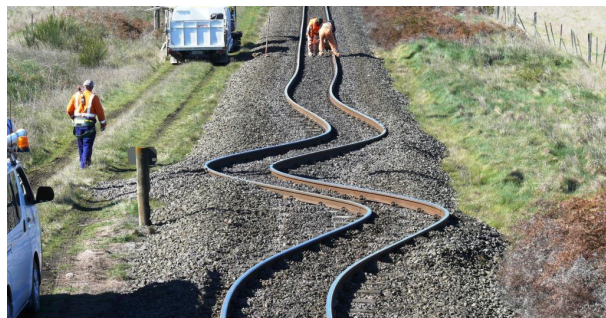


Arrivée en surface

Les ondes sismiques sont donc responsables du tremblement du sol après qu'un séisme se soit produit. Parfois leur amplitude de vibration est tellement faible que nous ne les sentons pas. A l'autre extrémité, leur énergie est tellement puissante qu'elles ont la capacité de déformer des matériaux non élastiques comme des rails, des pistes d'athlétisme.



Taiwan, M7.6 (1999)



Nouvelle Zélande, M7.1 (2010)

Dans tous les cas, elles sont détectées par des appareils : les stations sismologiques, dont la conception est dédiée à la capacité de détecter les vibrations du sol. Toutes les vibrations :

- Naturelles : induites par la houle, la marée, le vent, les racines des arbres agités par le vent, la pluie, le volcanisme, les chutes de météorites, les cours d'eau,..., et bien entendu par les séisme ;
- Anthropiques : activité urbaine, tirs de carrières pour récupérer des roches pour la construction, les injections de fluides en profondeur pour la géothermie, l'extraction de gaz, etc.

Cette capacité à détecter les vibrations et les convertir en un signal « lisible » par l'humain, dit sismogramme, a permis de mettre en lumière une chose : bien longtemps, les ondes avaient toujours un temps de retard, ou un temps d'avance par rapport leur heure d'arrivée prévue. En effet, les caractéristiques physico-chimiques des roches vont influencer sur la vitesse de propagation. Mais pas que : la profondeur et la température entre aussi en jeu. Les dizaines d'années d'observation des temps d'arrivée des ondes sismiques ont permis d'imager un modèle de la structure interne de la planète : graine, noyau liquide, manteau inférieur, asthénosphère, lithosphère terrestre, lithosphère océanique, leur distribution verticale et horizontale.

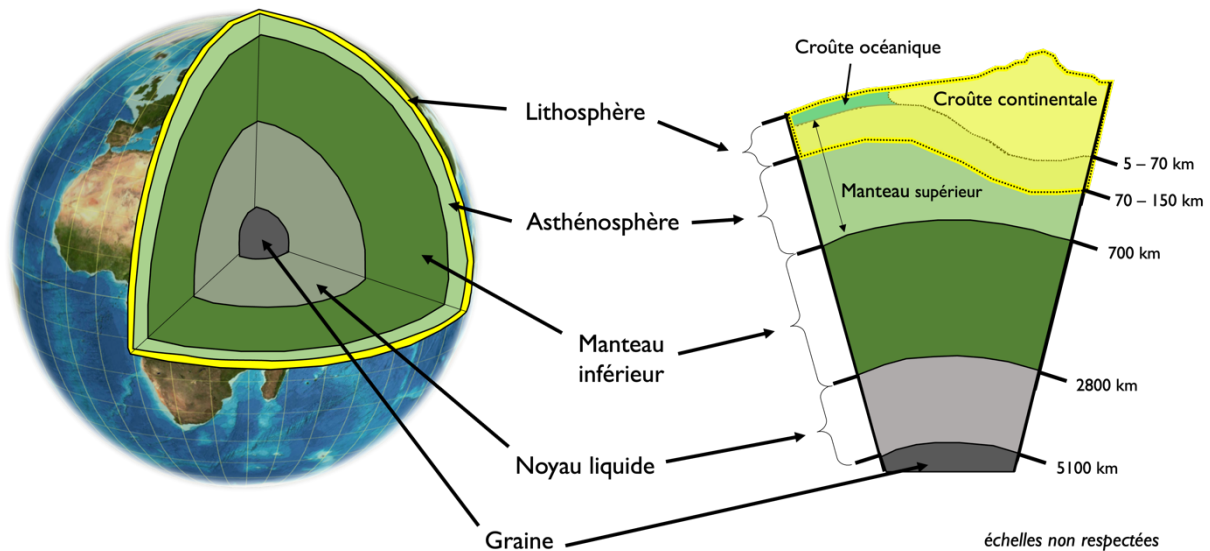


Illustration simplifiée de la structure interne de la Terre. Échelles non respectées.

Un sismogramme, des ondes sismiques.

Un sismogramme est un graphique qui met en lumière la variation de l'amplitude de vibration du sol (en ordonnées) au cours du temps (en abscisses). En période dite calme, les valeurs d'amplitudes sont plutôt régulières, on parle de bruit de fond sismique. C'est comme si nous étions dans un restaurant, avec des personnes qui parlent calmement. Parfois, dans cette quiétude sonore, des vibrations aux amplitudes différentes peuvent faire leur apparition. Comme si à une table des personnes commençaient à parler plus fort. Cela peut durer plus ou moins longtemps pour revenir au niveau du bruit sismique. En fonction de la forme de ces signaux qui sortent du bruit, les sismologues sont capables de dire si il s'agit de l'influence d'une forte pluie, d'une éruption volcaniques, de l'agitation des élèves au réfectoire, ou d'une séisme.

Dans le cas simple d'un passage d'ondes sismiques sous une station sismologique, la forme du signal va montrer différentes ondes : les ondes P, S, de Rayleigh, de Love, etc.

Données brutes de la station TIO – Séisme Al Haouz du 08 septembre 2023

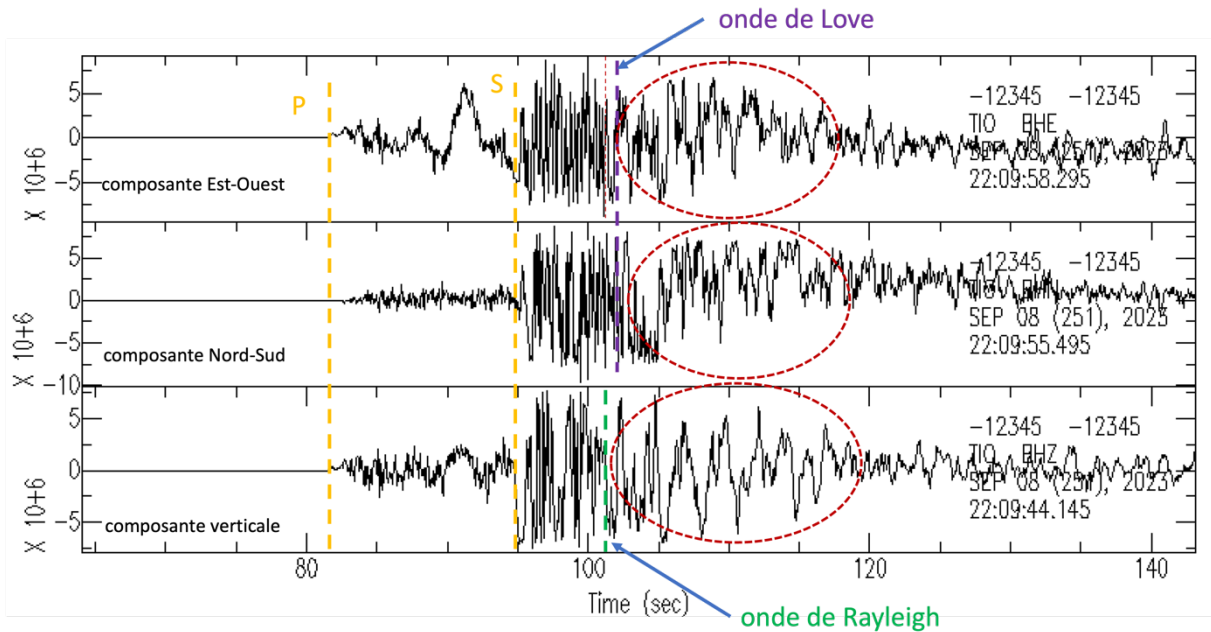
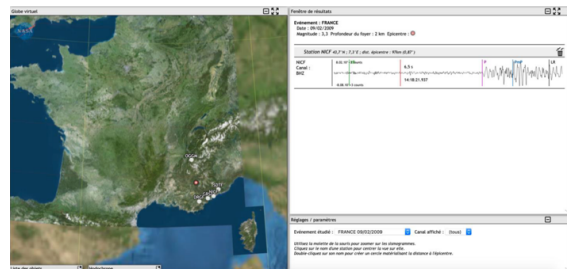
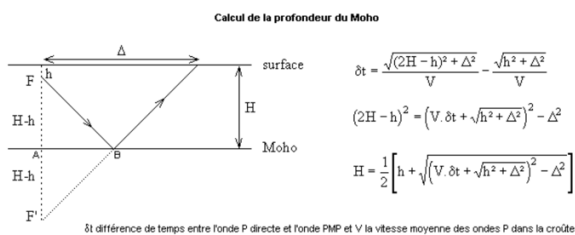


Illustration de l'arrivée des ondes P, S, de Rayleigh et de Love sur trois composantes d'une même station. Les ondes de Rayleigh s'observent sur la composante (ou capteur) qui détecte les vibrations dans la direction verticale. Les ondes de Love s'observent sur les capteurs en position horizontale (direction nord-sud, et est-ouest).

L'heure d'arrivée de l'onde P peut être utilisée pour tenter d'en savoir un peu plus sur la structure des plaques lithosphériques. Dans le cadre scolaire, ce travail peut facilement être réalisé, avec la connaissance de quelques métadonnées comme le temps origine du séisme, la distance entre la station et l'épicentre, et la profondeur de l'hypocentre.

Évolution de la profondeur du Moho sous les Alpes Maritimes, dualité de la croûte terrestre, tout ceci peut être mis en lumière avec quelques sismogrammes !



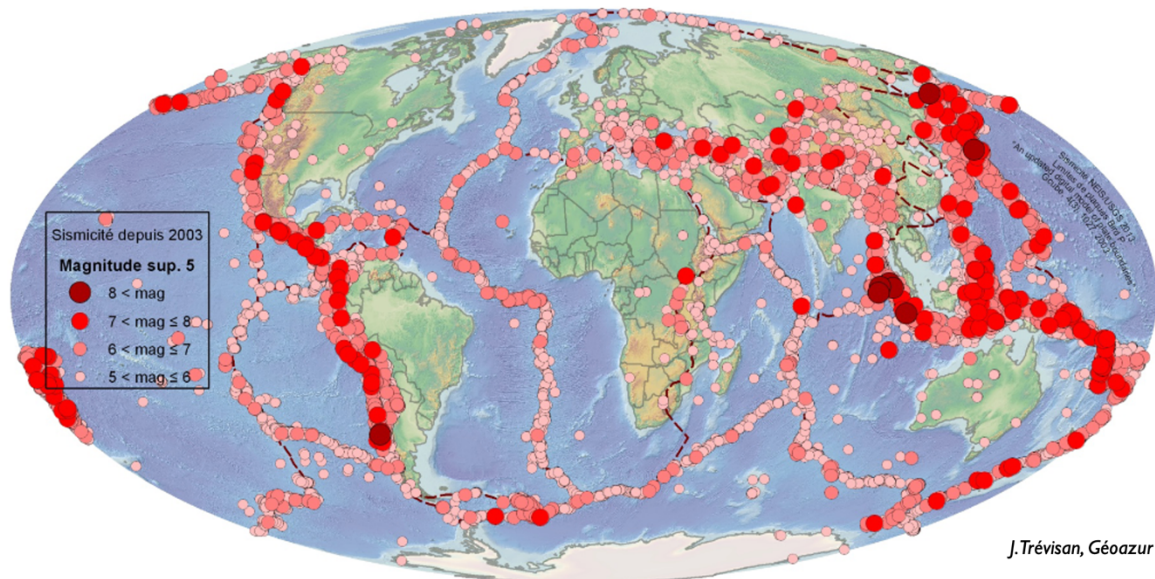
Étude de la profondeur du Moho avec le logiciel en ligne Tectoglob3D (@P. Cosentino)

Ondes sismiques et sismicité

L'analyse des ondes sismiques permet aussi d'estimer la localisation des séismes qui se produisent, donc des failles qui les génèrent. La connaissance de l'existence des failles et de leur activité sismogénique est très importante pour la gestion du risque sismique.

En effet, même si à l'heure actuelle il est toujours impossible de savoir où, quand et avec quelle puissance un séisme va se produire, les sismologues ont quand même une visibilité sur la capacité d'un territoire à produire des séismes.

La distribution spatiale et en magnitude des séismes au cours du temps, ou sismicité, permet de mettre en lumière les caractéristiques sismiques principales d'un territoire donné. Très sismique, peu sismique, fortes magnitudes ou faibles magnitudes, tous ces cas et leurs intermédiaires sont archivés dans des catalogues de sismicité. Ces catalogues sont utilisés pour construire des cartes de sismicité. Une des plus connues est la suivante :



Distribution mondiale des séismes de magnitude supérieure à 5

La distribution des séismes de magnitude supérieure à 5 reportés sur ce planisphère montrent qu'ils sont concentrés le long de grandes lignes qui découpent la surface de la Terre, grandes lignes qui rappellent les contours de structures bien connues : les plaques lithosphériques !

Et dans les Alpes Maritimes, que nous apprend la sismicité locale ?