

LE SOUS-SOL, SITE DES TREMBLEMENTS DE TERRE

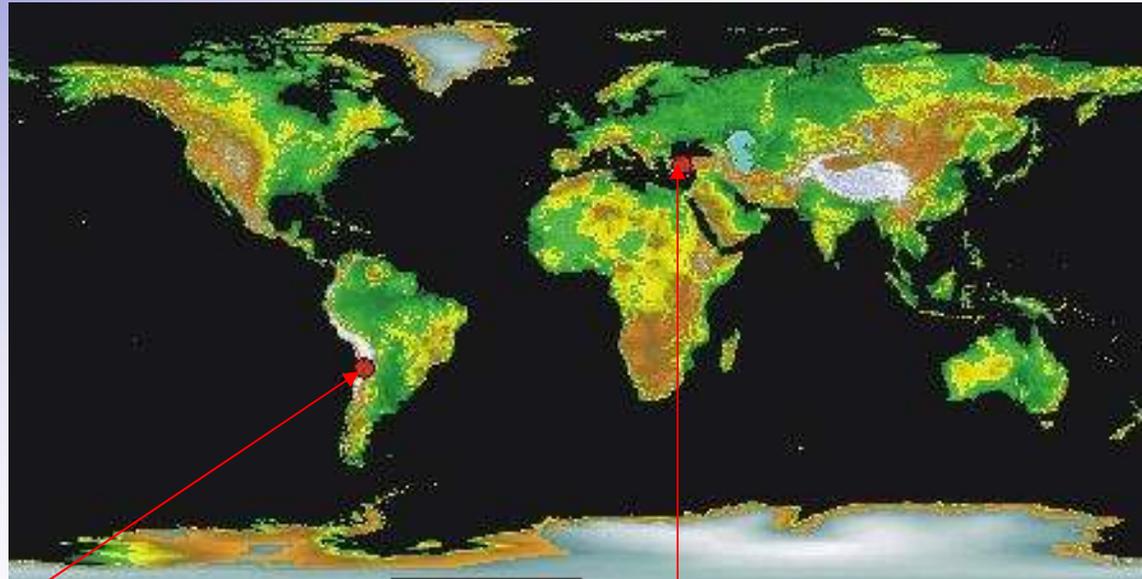


La rupture brutale entre deux morceaux élastiques de la croûte terrestre provoque un séisme.

Les déplacements associés à l'accumulation des séismes modifient la position de la ligne de rivage.

DES EXEMPLES DE SEISMES

6

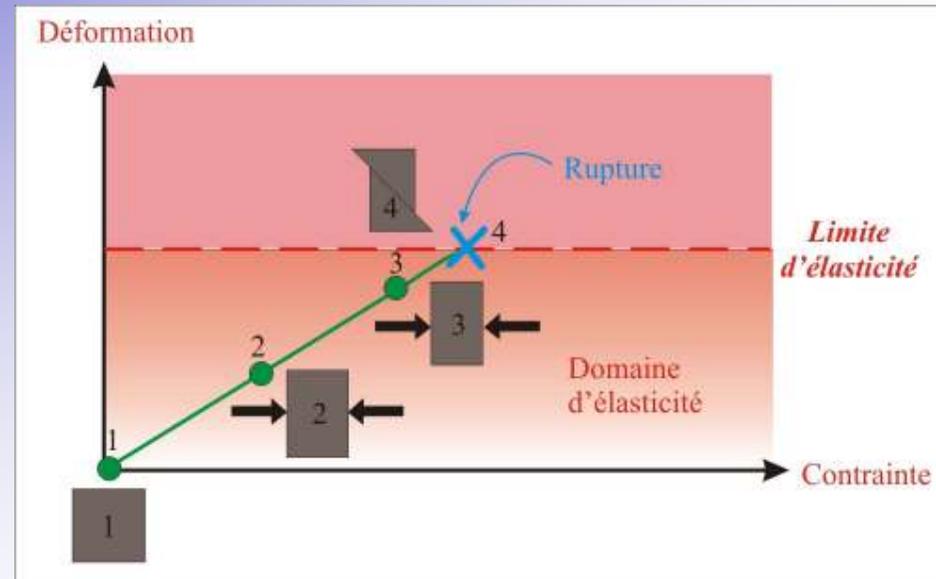


**Séisme d'Antofagasta
(magnitude 8,1)**

**Séisme d'Izmit
(magnitude 7,4)**



La déformation élastique de la croûte



Soumis à une contrainte, les terrains de la croûte supérieure relativement froide se déforment d'abord comme un **corps élastique** : si la contrainte cesse, le corps déformé revient à son état initial (c'est l'élastique que l'on tire et que l'on relâche !).

Passée la « limite d'élasticité », la **rupture** se produit (l'élastique casse !), donnant naissance à un **séisme**. Dans la nature, le lieu de rupture est une faille.

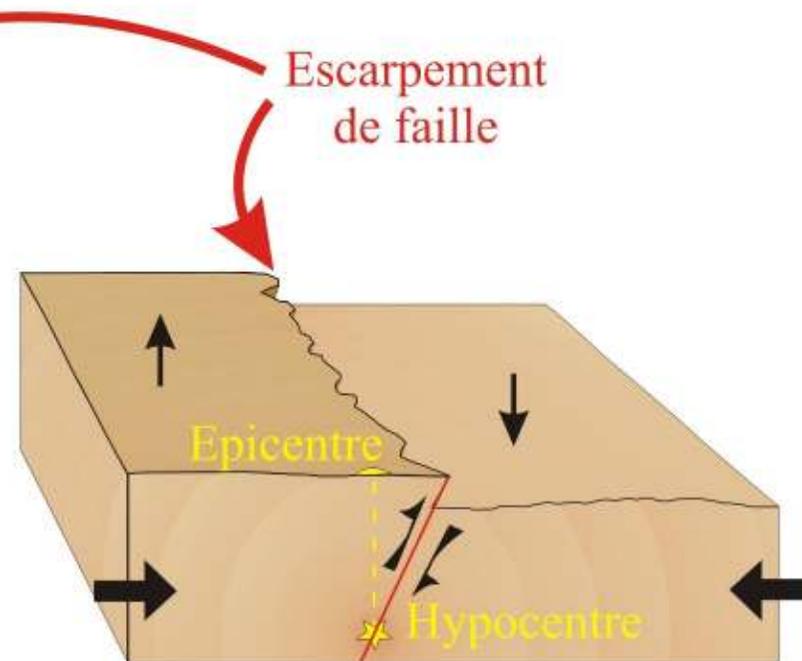
Ce phénomène se reproduit tant que des contraintes s'exercent sur la croûte.

LES FAILLES ACTIVES

Une conséquence de la rupture :
l'apparition de failles en surface



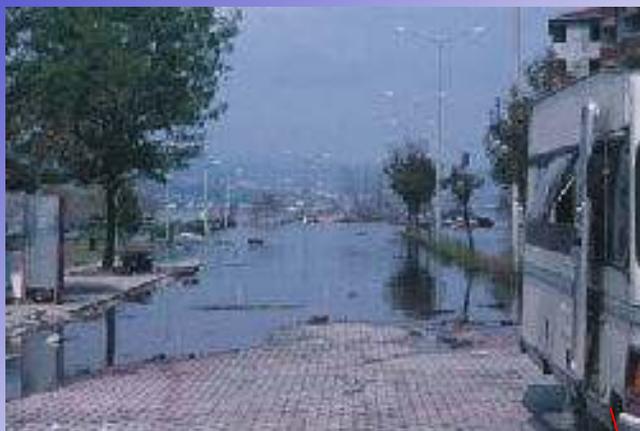
Escarpement de faille de 2m de hauteur, visible en surface après le séisme d'El-Asnam (Algérie, 1980).



Faille inverse ou chevauchement

LES MOUVEMENTS COSISMQUES I

Le séisme peut provoquer un affaissement



Lors du dernier grand tremblement de terre en Turquie (Izmit, 16 août 1999), de nombreux rivages ont été submergés.

Sur cette image-satellite Landsat, deux photographies (l'une prise avant et l'autre prise après le séisme) ont été superposées, montrant en bleu la zone affaissée sur laquelle est construite la ville de Golcük (photo).

La flamme rouge visible à gauche de l'image est la trace de l'incendie de la raffinerie d'Izmit.

LES MOUVEMENTS COSISMIQUES II

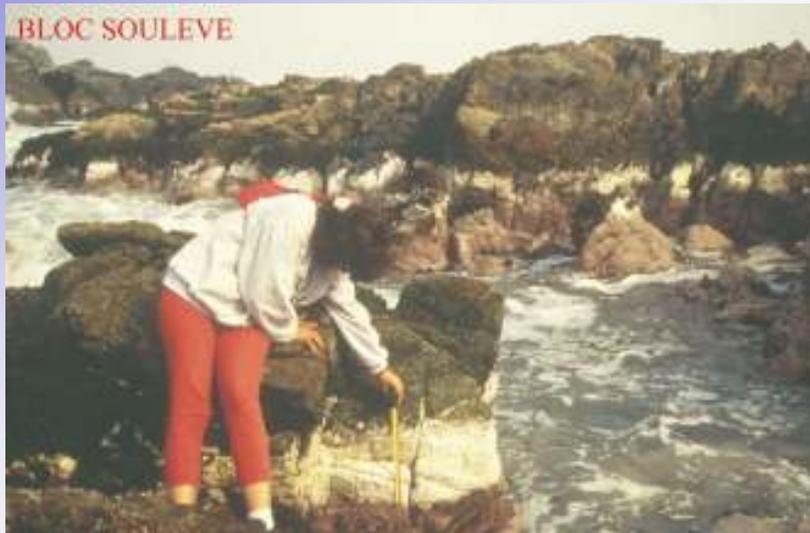
Le séisme peut provoquer une surrection



Le très fort séisme d'Antofagasta a eu lieu en juillet 1995 dans le Nord du Chili et a donné lieu à un soulèvement de la côte.

Les algues calcaires qui vivent normalement dans la zone de balancement des marées ont été soulevées d'environ 30 cm, ce qui a entraîné leur mort par émergence.

Ces valeurs de surrection données par la ceinture d'algues ont été confirmées par des mesures d'altitudes effectuées sur certains points de la côte entre 1992 et 1995, avec le système de positionnement par satellite GPS (panneau 9).





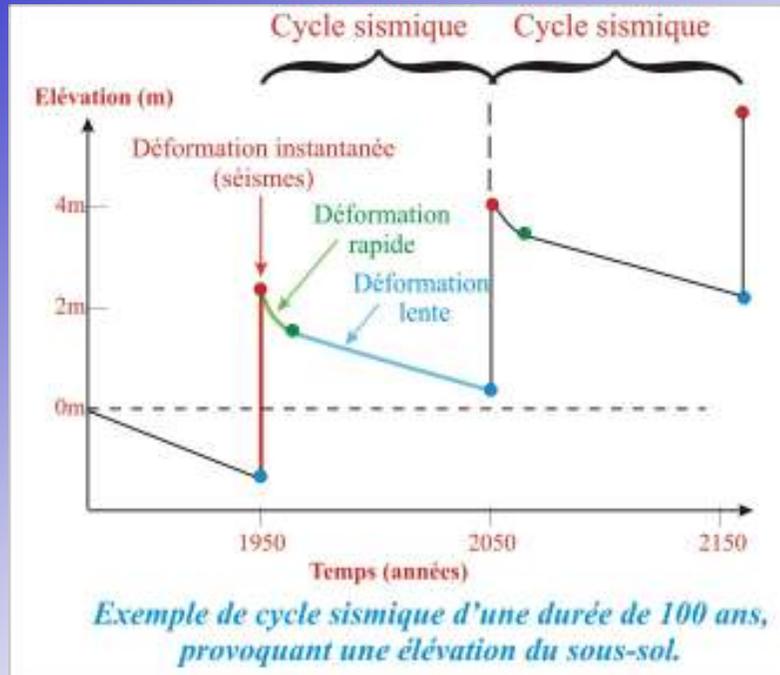
Qu'est-ce qu'un cycle sismique ?

Le déplacement des plaques tectoniques, expression en surface du mouvement thermique que représente la tectonique des plaques, est inexorable (les variations se comptent suivant des échelles dépassant le million d'années). Ainsi, la rupture sismique accommodant ce déplacement va se répéter sur des échelles se comptant en siècles. Selon l'intensité de la rupture et la dimension de la zone de rupture, l'intervalle de temps séparant deux séismes varie de quelques dizaines d'années à quelques milliers d'années. On parle de temps de retour caractéristique.

Ces **cycles sismiques** permettent une prédiction à long terme car nous pouvons identifier les zones sismiques et caractériser l'ampleur des séismes dans ces zones.

Cette caractérisation des séismes correspond à la prédiction à moyen terme, importante pour l'aménagement du territoire car elle fixe le séisme maximal attendu dans la zone.

LE CYCLE SISMIQUE II



Les conditions mécaniques sont très variées aux limites des plaques: ainsi, la nature n'est pas une horloge bien réglée :

les cycles sismiques sont irréguliers et ne permettent pas pour l'instant une prédiction à court terme des tremblements de terre.

Chaque cycle sismique se déroule en 3 temps :

6

✎ La rupture libère l'énergie auparavant accumulée sous forme d'énergie élastique au contact des deux plaques. Cette rupture se traduit par des mouvements brutaux du sous-sol.

✎ Le retour à l'équilibre se traduit par des ajustements locaux générateurs de petits séismes (répliques). Cette période dure de quelques semaines à quelques années.

✎ La déformation élastique des terrains soumis au déplacement continu des deux plaques se poursuit jusqu'à une nouvelle rupture. C'est la partie du cycle la plus longue.

LE SOUS-SOL, UN MILIEU PROPAGEANT LES EBRANLEMENTS SISMIQUES



Les ondes sismiques générées lors de la rupture du sous-sol se propagent dans toutes les directions et sont responsables des effets destructeurs des séismes, amplifiés ou diminués selon la nature et la topographie des terrains.

LES ONDES SISMIQUES

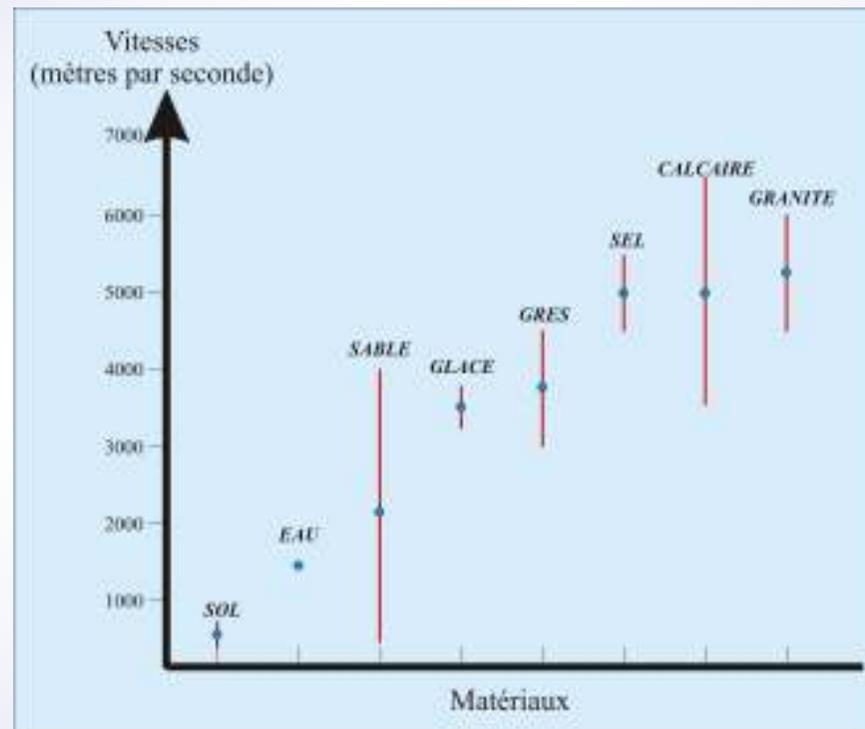


Qu'est-ce qu'une onde sismique ?

C'est un ébranlement élastique engendré par un séisme, qui se propage dans les roches, comme le son, ébranlement acoustique, dans l'air.

Après le passage de ces ondes, le sol reprend généralement sa forme initiale sauf dans la zone source.

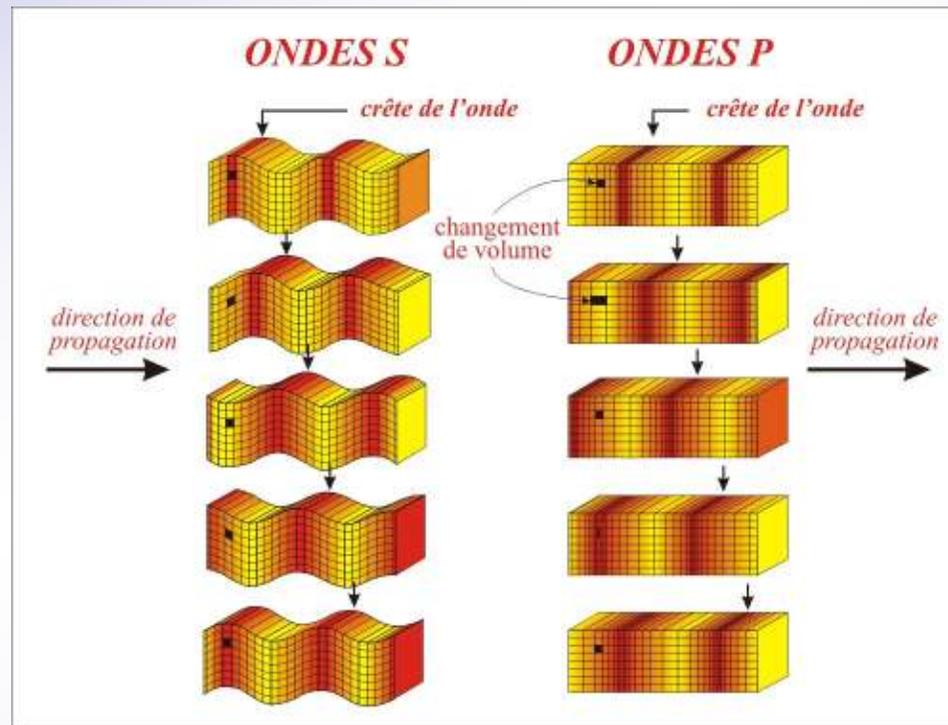
La propagation des ondes est plus ou moins rapide selon le milieu traversé.



LES ONDES DE VOLUME

Parmi les principales ondes sismiques, les **ondes P** (les premières arrivées, les plus rapides) soumettent le sous-sol à des compressions et des dilatations successives.

Les **ondes S** (les secondes arrivées) font bouger le sous-sol suivant un mouvement cisailant.

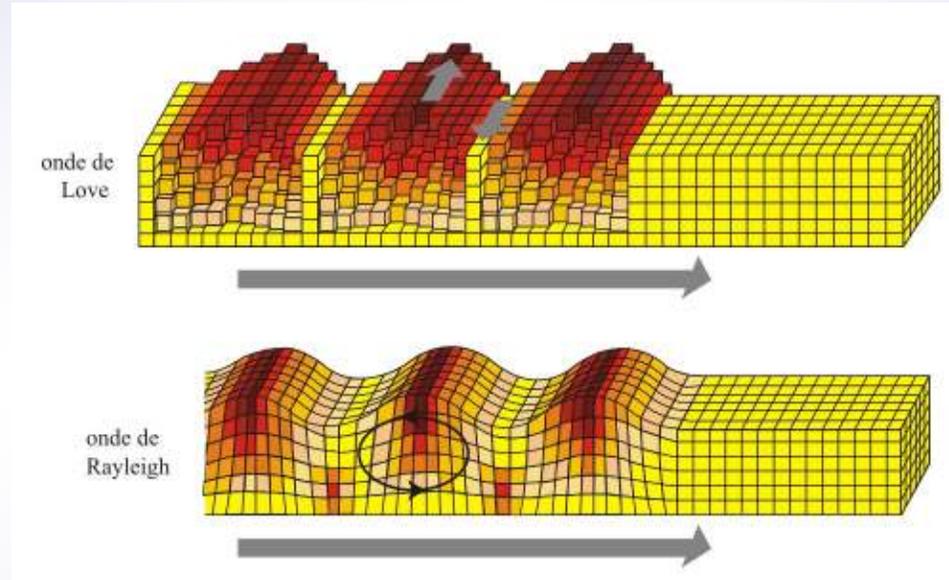


Comme elles se propagent dans tout le milieu, on les appelle ondes de volume

LES ONDES DE SURFACE



D'autres ondes se propagent uniquement à la surface de la Terre. De ce fait, elles sont d'une amplitude plus grande que les ondes de volume et provoquent la majorité des dégâts. On distingue les ondes de Rayleigh et les ondes de Love.

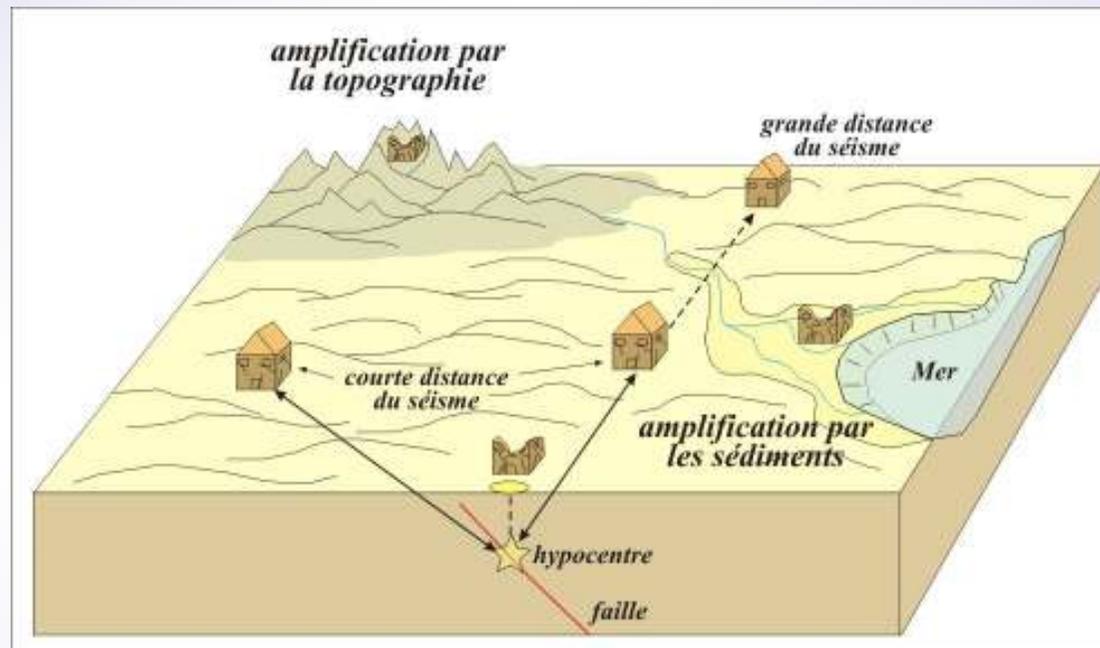




Les effets des séismes

Lorsqu'une onde sismique se propage dans le sous-sol, ses effets en surface sont amplifiés ou décroissent en fonction de plusieurs facteurs :

- ✎ La **distance au lieu de la rupture** (le « foyer » du séisme ou hypocentre)
- ✎ Les **effets de site** dus au comportement souvent non-linéaires des ondes dans les couches géologiques superficielles peu consolidées.



LA MAGNITUDE DES SEISMES



Qu'est-ce que la magnitude d'un séisme ?

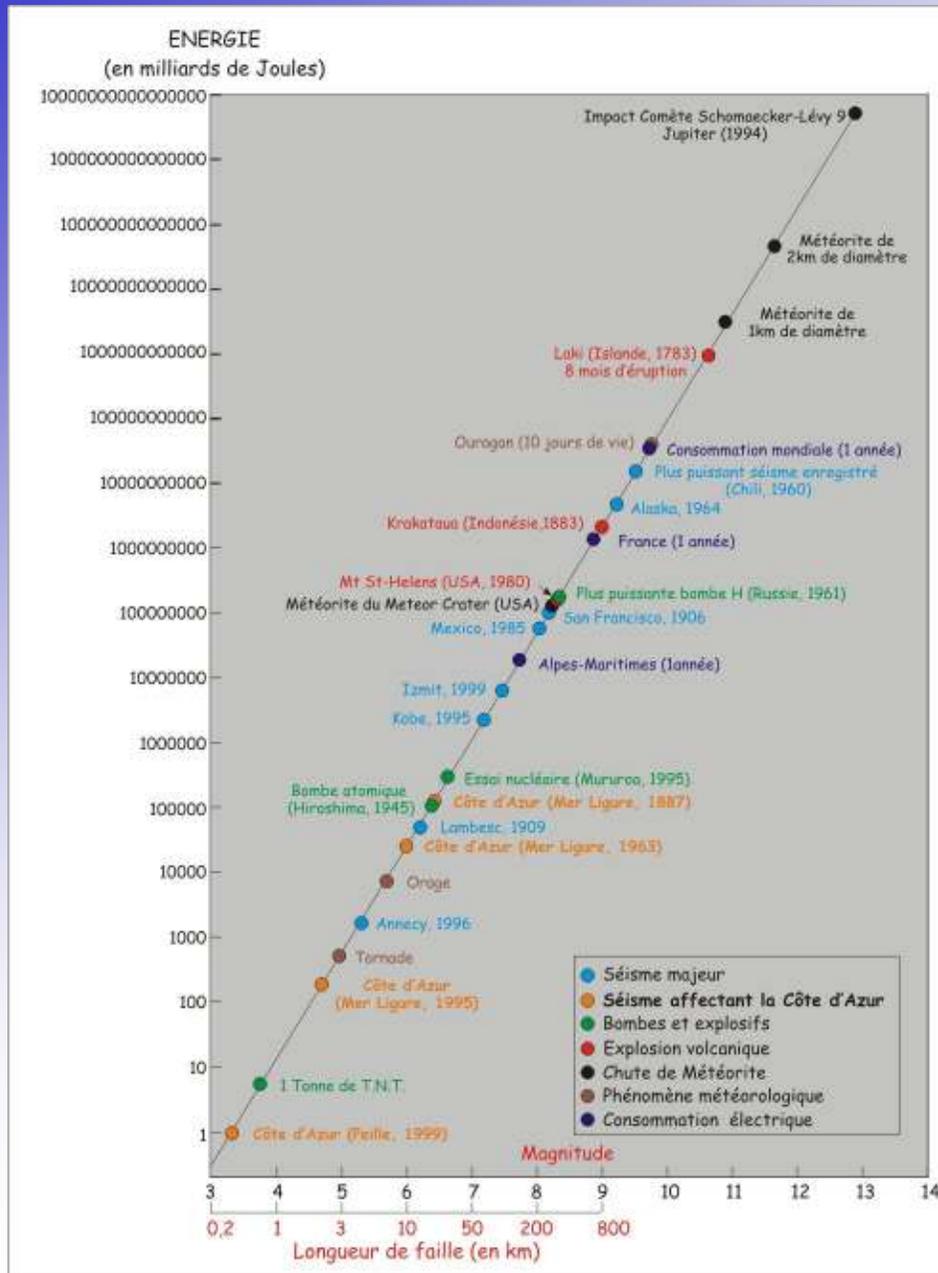
Une mesure de la quantité d'énergie élastique libérée pendant le séisme, obtenue par l'analyse des ondes sismiques. Cette énergie augmente avec la surface de la faille activée de la rupture.

Petite faille (quelques kilomètres), peu d'énergie, *danger modéré* (exemple : la Côte d'Azur)

Grande faille (plus de cent kilomètres), beaucoup d'énergie, *danger fort* (exemples : la Californie, la Turquie)

Figure montrant l'énergie dégagée par les séismes, comparée à l'énergie dissipée par d'autres phénomènes.

La magnitude des séismes peut être négative. Le plus fort séisme a eu une magnitude de 9,5.

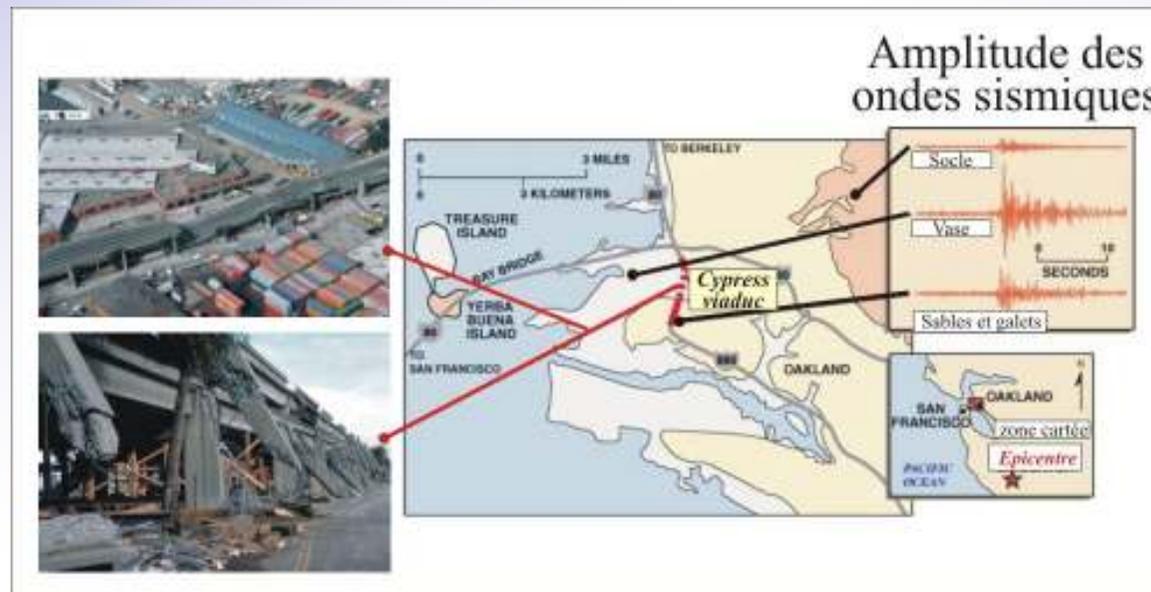


LES EFFETS DE SITE I

Effet de site dû au remplissage sédimentaire

Les ondes sismiques sont ralenties à la traversée d'un bassin sédimentaire. Leur amplitude augmente, et par conséquent l'intensité des mouvements du sous-sol augmente aussi. C'est **l'effet d'amplification**.

Les ondes sont également en quelque sorte prisonnières du bassin, ce qui allonge la durée locale du séisme. C'est **l'effet de piégeage** des ondes.



Effondrement de la Cypress Highway près de San Francisco après le séisme dit de Loma Prieta du 17 Octobre 1989 (magnitude 7,1).

Ce viaduc a été bâti sur un sol vaseux gorgé d'eau qui a fortement amplifié les ondes provenant du foyer du séisme pourtant distant de plus de 90 km.



LES EFFETS DE SITE II



Effet de site dû à la topographie



Les ondes sismiques peuvent être piégées au sommet d'une montagne où se trouve alors concentrée une grande quantité d'énergie.

C'est l'effet de focalisation.

Vue récente du village de Baiardo (photo du haut), situé sur une colline à 910 m d'altitude et à 31 km de Menton.

Le 23 Février 1887, un séisme de magnitude 6,4 provoqua l'effondrement de la voûte de l'église (photo ci-dessus).

220 victimes qui participaient à une messe furent retirées des décombres.



LES COLERES DE LA MER QUAND BOUGE LE SOUS-SOL



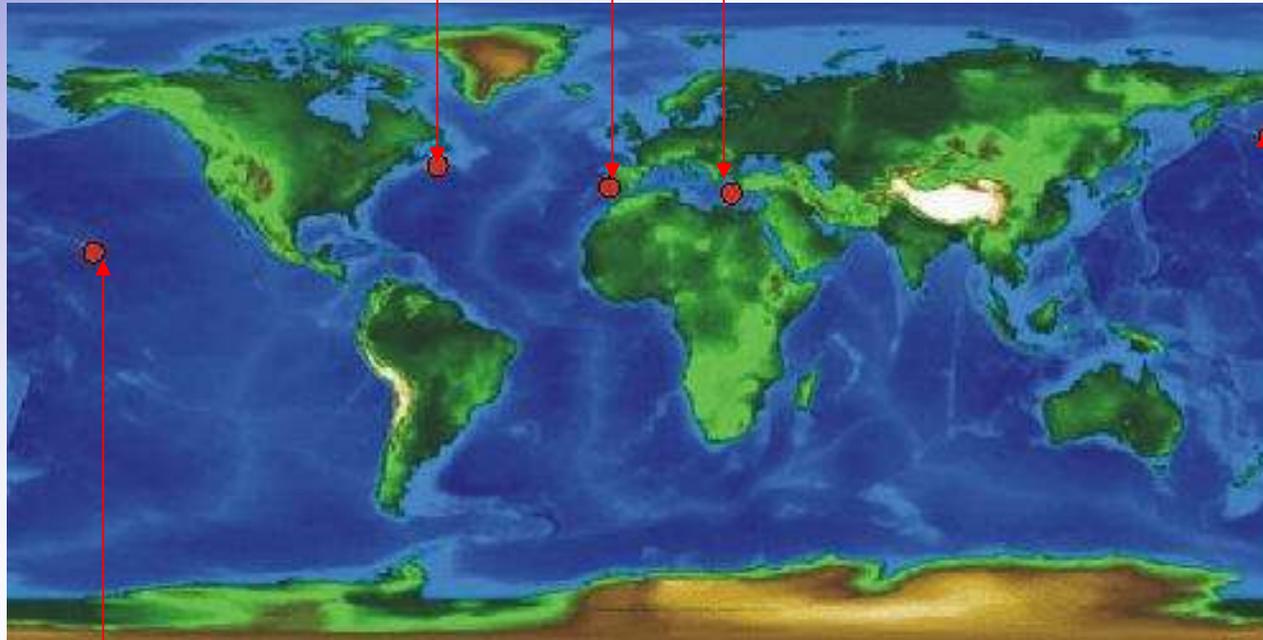
En milieu sous-marin, les mouvements du sous-sol produisent un déplacement brutal de l'eau.
Des vagues naissent ainsi et s'amplifient en approchant de la côte.
Elles sont à l'origine de raz-de-marée (tsunamis).

LES TSUNAMIS

Lisbonne (Portugal)

Grands bancs(Canada)

Santorin (Grèce)



Hawaiï

Aléoutiennes

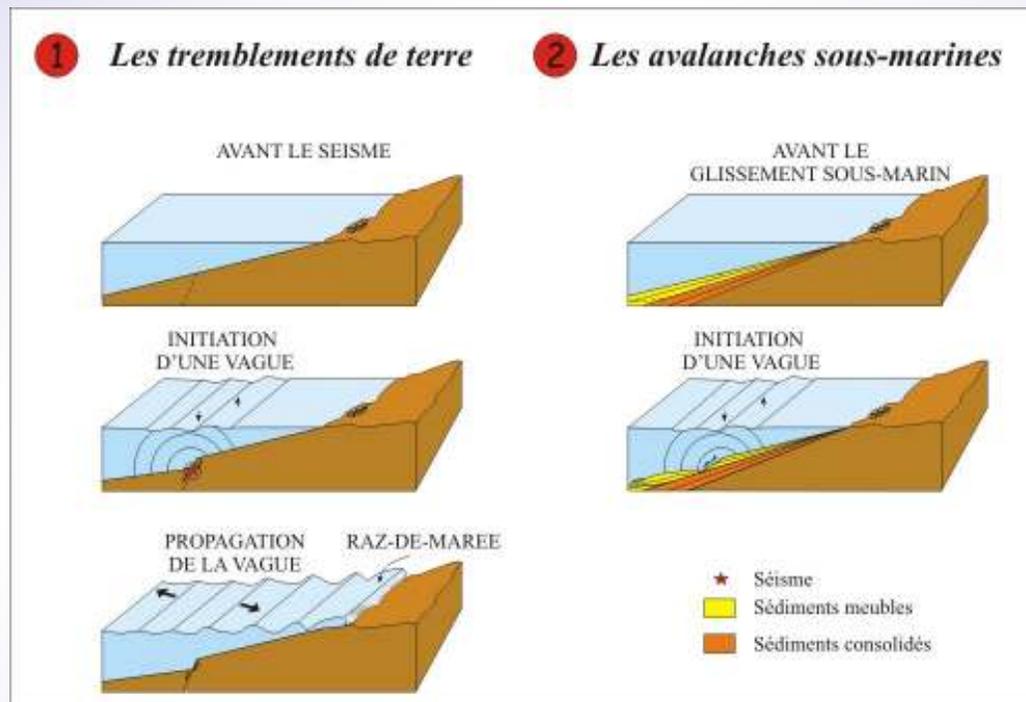
LES RAZ-DE-MAREE

Pourquoi des raz-de-marée ?



Le brusque mouvement du fond marin génère une vague qui se propage en pleine mer à des vitesses variant entre 500 et 800 km/h pour des longueurs d'ondes pouvant atteindre 160 km.

En approchant de la côte, la diminution de la profondeur provoque un accroissement de la hauteur de la vague, puis son déferlement sur le rivage. Ainsi se produisent les raz-de-marée.



SEISMES et TSUNAMIS

Les tremblements de terre et raz-de-marée



Le séisme de Lisbonne et le raz-de-marée qui suivit marquèrent pendant longtemps les esprits des artistes européens.

De nombreuses représentations de la catastrophe ont été imaginées, dont cette peinture anonyme de 1887.

Un fort séisme et un raz-de-marée frappèrent Lisbonne le 1er novembre 1755.

Voltaire raconte les aventures de Candide à Lisbonne ce jour-là. Aujourd'hui, on sait que le foyer du séisme responsable du raz-de-marée était situé à 200 km au sud-ouest de la ville.

La vague produite par le séisme a été amplifiée par la forme et la faible profondeur de l'estuaire du Tage. Elle atteignit une hauteur de 5 m.

LA VAGUE

La vague d'un tsunami induit par un séisme

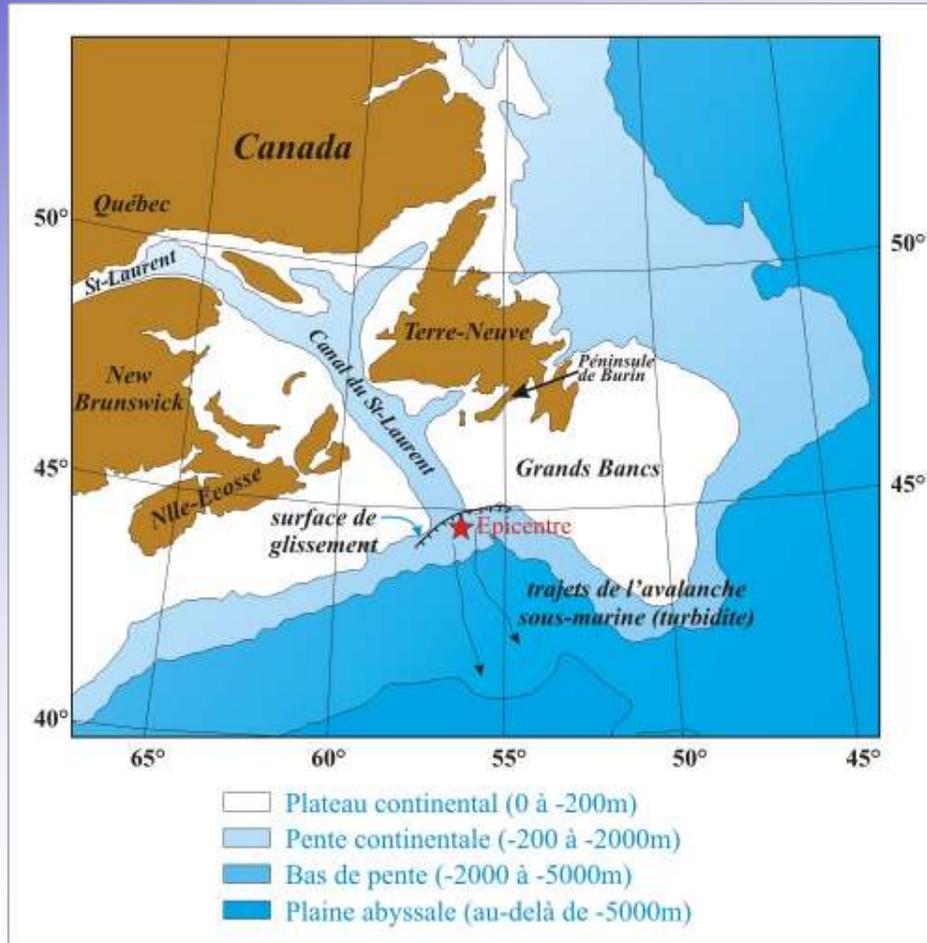


Un séisme au large des îles Aléoutiennes provoqua un raz-de-marée à Hawaï, pourtant distant de 3600 km (9 mars 1957).

Cette succession de trois images montre l'arrivée d'une énorme vague sur l'île d'Oahu dans l'archipel d'Hawaï. La vague a atteint une amplitude de 2 m à cet endroit, mais près du lieu du séisme, une vague de 8 mètres de hauteur a été observée.

LES AVALANCHES

Les avalanches sous-marines et les séismes



Le 18 Novembre 1929, un séisme de magnitude 7,2 localisé près des Grands Bancs de Terre-Neuve déstabilisa les sédiments de la pente sous-marine dont une grande partie glissa brutalement vers les abysses.

Cette avalanche sous-marine eut deux conséquences :

✎ La rupture de douze câbles de liaisons télégraphiques trans-atlantiques.

✎ La formation d'une vague d'une hauteur de 5 mètres qui déferla sur la péninsule de Burin (Terre-Neuve) et fit 29 victimes.

ERUPTIONS ET TSUNAMIS



Les éruptions volcaniques induits par raz-de-marée

Des raz-de-marée peuvent être provoqués par une éruption volcanique, lorsque elle s'accompagne parfois de mouvements verticaux du fond sous-marin.



Selon la légende rapportée par Platon, l'Atlantide fut détruite par un raz de marée.

Cette légende est parfois associée à la disparition subite de la civilisation minoenne qui s'était développée sur l'île grecque de **Santorin**. L'explosion vers 1500 av. J.-C. du volcan qui constituait l'île pourrait en être responsable.

Aujourd'hui, les cinq îlots (photo ci-dessus) de l'archipel de Santorin constituent les restes de ce volcan.

LES MOUVEMENTS ACTUELS DU SOUS-SOL SOUS SURVEILLANCE



Deux techniques de pointe sont utilisées pour observer et mesurer les mouvements actuels du sous-sol :

Le GPS (Global Positioning System) et l'interférométrie radar

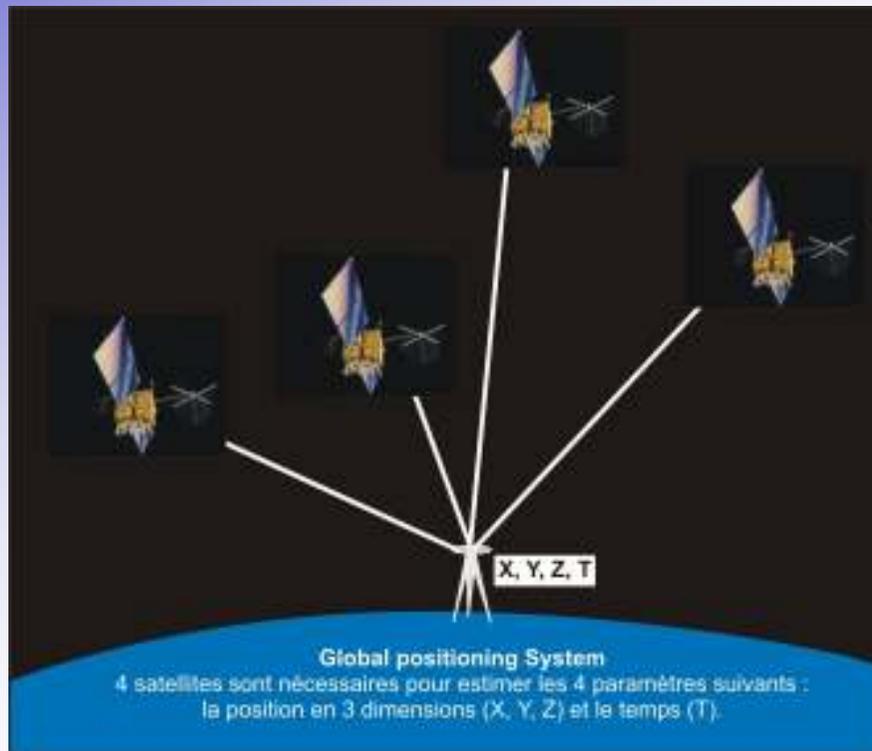
mais les techniques de géodésie permettent de répondre encore aux besoins d'aménagement

LE GPS

Le principe du GPS



Le GPS (Global Positioning System) est un système satellitaire qui permet à chaque instant le positionnement dans l'espace (latitude, longitude, altitude) de tout point situé à la surface de la Terre.



Actuellement 27 satellites sont opérationnels. Le positionnement d'un point nécessite de déterminer sa distance à 4 satellites au moins.

Récepteur GPS sur le terrain

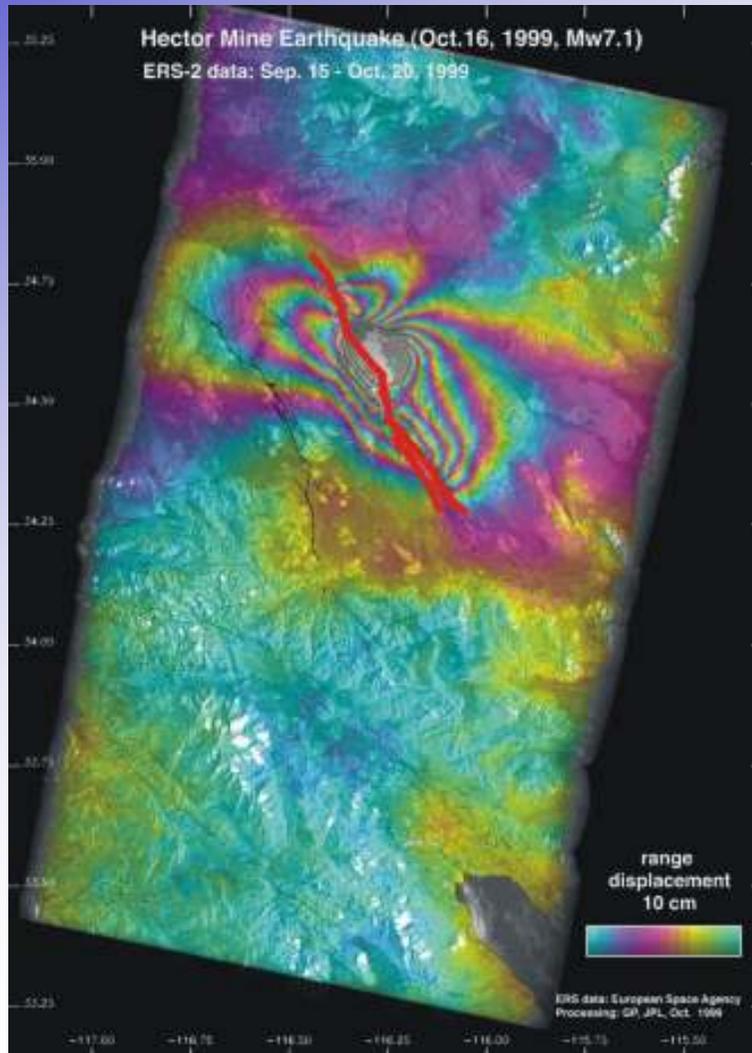


Un traitement complexe des données permet ensuite de calculer les positions relatives de plusieurs sites de mesure.

La précision est de quelques mm !

L'INTERFEROMETRIE

Le principe de l'interférométrie



L'interférométrie radar utilise les échos de signaux radars émis par des satellites et réfléchis à la surface de la Terre. En mesurant la distance Terre-satellite avant et après le séisme, on calcule la déformation de la surface terrestre. On obtient ainsi une image de cette déformation plus complète que celle donnée par l'outil G.P.S.

Sur cette image, chaque frange (cycle de couleur du bleu au bleu ?) correspond à un mouvement du sol quasi-vertical de 10 cm. Les principales failles actives lors de ce séisme sont en rouge.

LA MESURE DU DEPLACEMENT PAR GPS I

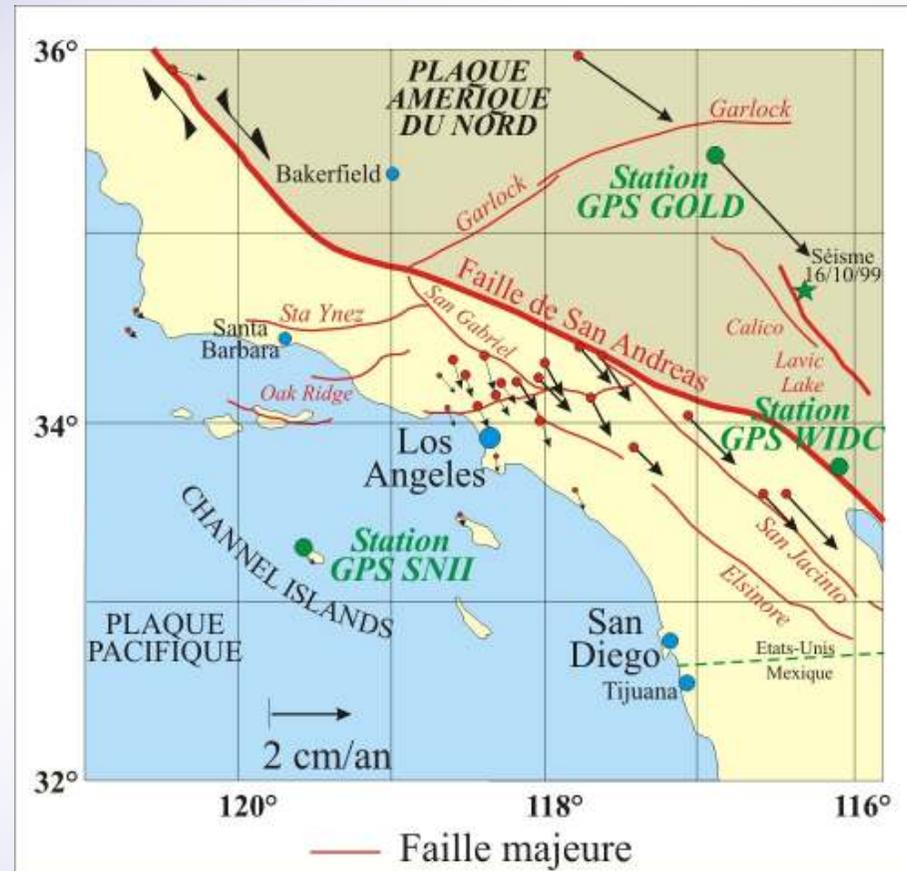
La mesure continue du déplacement du sol par GPS



1°) A l'échelle régionale

Sur des frontières de plaques comme en Californie du Sud, les déformations sont intenses et sont étudiées par un réseau très dense de stations GPS permanentes.

En Californie, les stations les plus éloignées de la faille de San Andreas, et situées de part et d'autres de celle-ci (SNII et GOLD), montrent une différence de vitesse de 3,5 cm par an, ce qui correspond à la valeur de coulissement le long de la frontière de plaques.



Une flèche indique la direction et la vitesse de déplacement de chaque station par rapport à la plaque Pacifique supposée fixe.

LA MESURE DU DEPLACEMENT PAR GPS II

La mesure continue du déplacement du sol par GPS

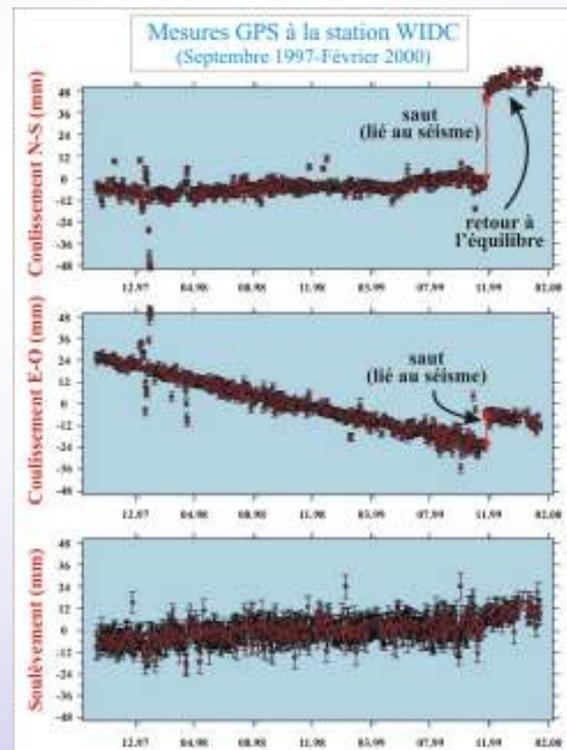
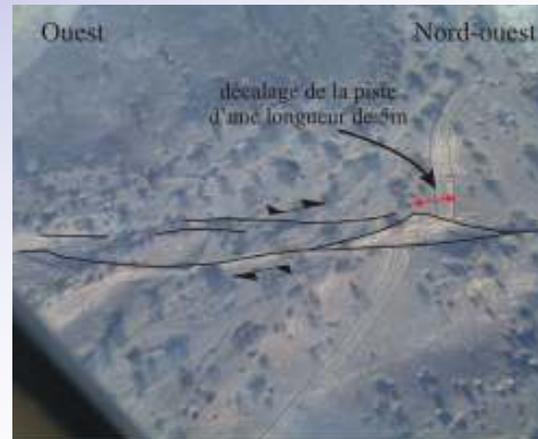


2°) A l'échelle locale

Le 16 octobre 1999, un séisme de magnitude 7,1 se produit dans le désert du sud de la Californie (séisme d'Hector Mine).

La faille de Lavic Loke coulissa de 3 à 5 m au cours du séisme (photo aérienne).

Ce mouvement a particulièrement affecté la position d'une station GPS permanente (WIDC sur la figure ci-dessous) située sur le compartiment ouest de la faille.



Au moment du séisme, la position du site WIDC a subi un saut vers le nord d'environ 55 cm. Le mouvement s'est ensuite poursuivi de manière plus lente pendant environ 1 mois (retour à l'équilibre).

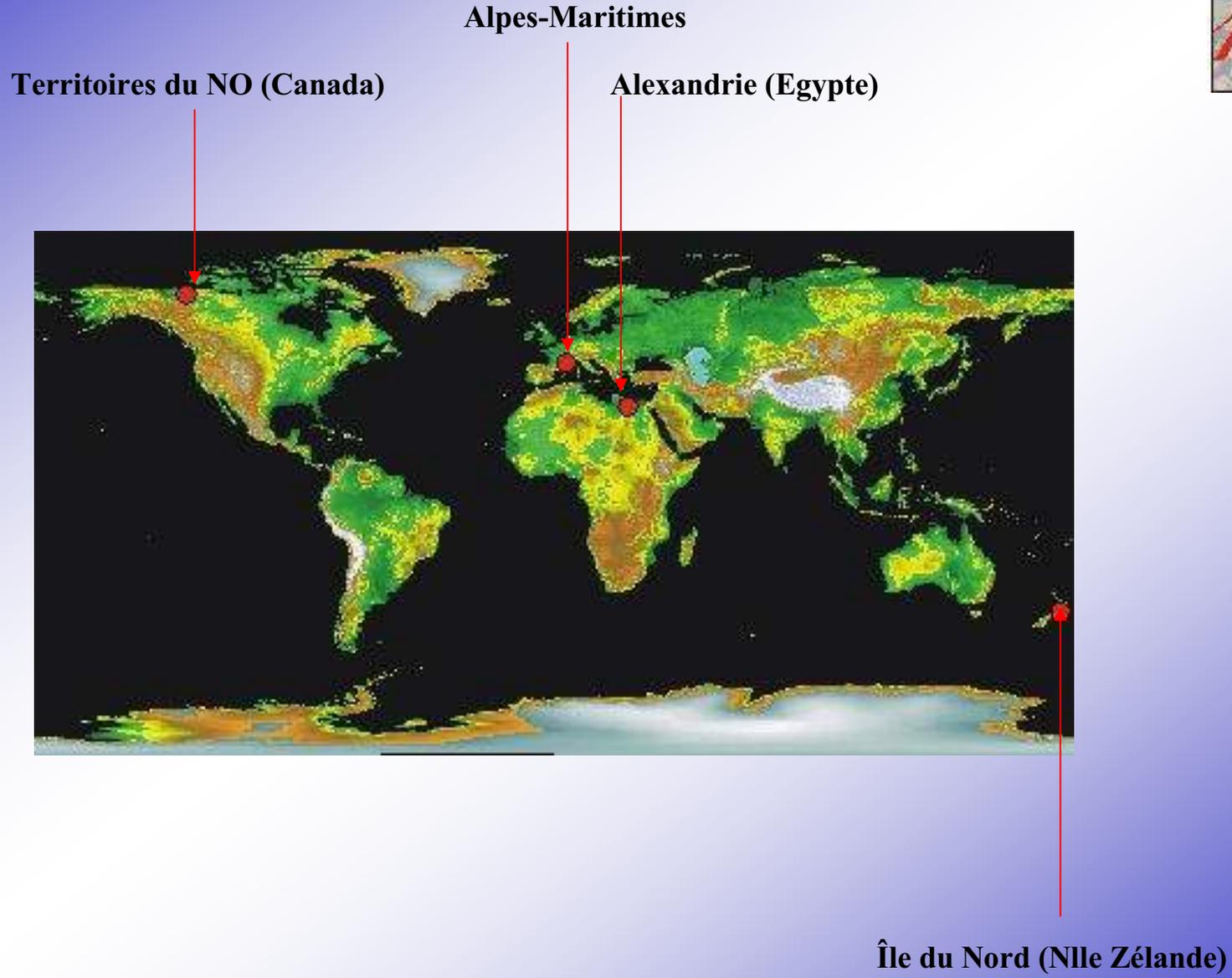
Avant le séisme, le site se déplaçait de manière continue et régulière, sous l'effet de l'accumulation des déformations élastiques précédant la rupture.

LES MOUVEMENTS VERTICAUX DU SOUS-SOL ET LA POSITION DE LA LIGNE DE RIVAGE



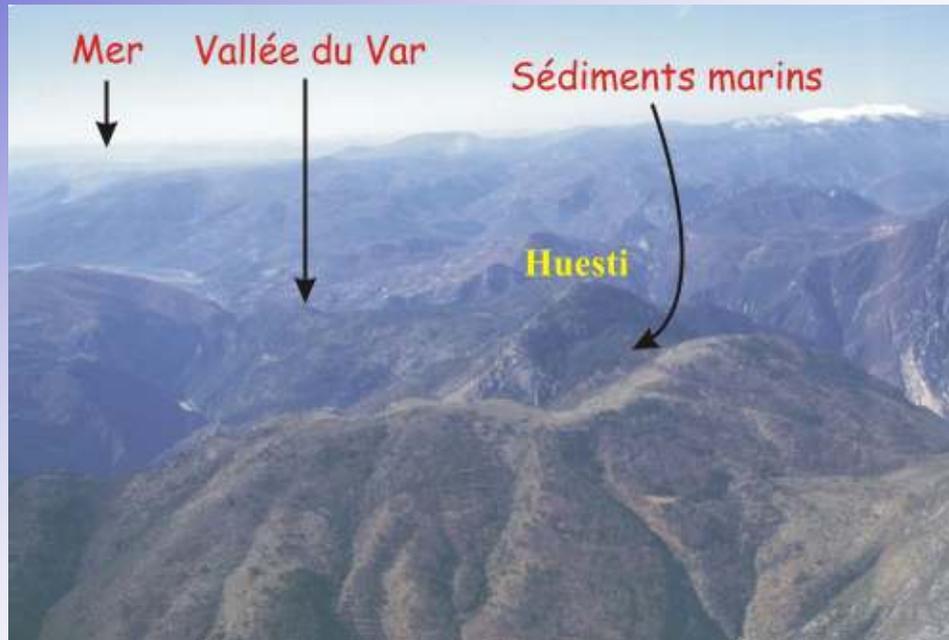
Lorsque la lithosphère se soulève ou s'abaisse, la position du rivage put être modifiée. Ces mouvements verticaux s'effectuent lentement et de manière continue, ou brusquement à l'occasion de tremblements de terre.

LE MOUVEMENT VERTICAL I



LE MOUVEMENT VERTICAL II

Les mouvements verticaux de la lithosphère s'effectuent selon quatre échelles de temps.



Sur cette photo aérienne, des sédiments marins pliocènes sont visibles sur le flanc du Mont Huesti, à une altitude de 1030 m.

1°) A l'échelle des temps géologiques (+ de 1 million d'années)

Au cours des 5 derniers millions d'années, le sous-sol s'est soulevé dans les Alpes-Maritimes.

Il y a 4 à 5 millions d'années (Pliocène), la Méditerranée occupait l'actuelle basse vallée du Var jusqu'à St-Martin du Var et au-delà vers le nord.

Une partie des sédiments marins déposés dans cette « ria » se trouve aujourd'hui perchés à plus de 1000 m d'altitude, à la suite d'un soulèvement local du sous-sol.

LA SURRECTION PAR EROSION



Les cordons de galets visibles au bas de cette photo aérienne correspondent à d'anciennes plages qui ont été soulevées lors de séismes successifs.

Le niveau situé le plus près de la mer a été soulevé de 2,70 m au cours du grand séisme de 1855.



2°) A l'échelle des temps longs (de l'ordre de 100 000 ans)

De la surrection du sous-sol peut aussi résulter l'émersion d'anciennes lignes de rivage (l'exemple de la Nouvelle-Zélande)

La Nouvelle-Zélande est traversée par une frontière de plaque. Elle subit une déformation active, qui s'exprime par une surrection régionale et de nombreux tremblements de terre.

A proximité de la capitale **Wellington**, la région du cap Turaleirae présente des indices de surrection depuis au moins 100 000 ans.

LE REBOND GLACIAIRE I



3°) A l'échelle des temps courts (de l'ordre de 10 000 ans)

La lithosphère se soulève après la fonte des glaciers à la manière d'un navire que l'on décharge (l'exemple du Canada)

La grande surface ensablée visible sur cette photo correspond à des plages formées il y a environ 10 000 ans, lorsque la calotte glaciaire qui recouvrait alors le Canada a commencé à fondre et à reculer.



LE REBOND GLACIAIRE II



La fonte de cette calotte et l'allègement de la lithosphère qui s'en est suivi ont permis au sou-sol de se soulever comme un navire que l'on décharge. Le rivage a alors reculé et les anciennes plages sont désormais situées à environ 100 mètres d'altitude.

Le soulèvement se poursuit encore de nos jours à une **vitesse d'environ 1 cm/an.**

Le même phénomène se produit autour de la Mer Baltique où il est de tradition, côté finlandais, de se répartir tous les 50 ans les nouvelles terres ainsi gagnées sur la mer.

Enfin, les vallées glaciaires se referment après la fonte du glacier provoquant des glissements de terrain (Clapière à Saint-Etienne de Tinée (Alpes Maritimes, France)).

LA SUBSIDENCE

4°) A l'échelle des temps historiques (- de 5 000 ans)
L'exemple de l'affaissement du port d'Alexandrie
(Egypte).



La cité antique d'Alexandrie, construite en 332 av. J.C. par Alexandre le Grand, était célèbre pour son quartier royal, son port et son phare.

Sous l'effet de l'affaissement du sous-sol, la vieille ville s'est progressivement enfoncée sous la mer.

Ce phénomène s'est accentué lors du séisme de l'an 335.

De nos jours, la plupart des quartiers antiques sont situés à une profondeur de 4 à 6 mètres. Ils sont explorés et étudiés par des archéologues qui travaillent en plongée.

Sur cette figure sont représentés, en jaune-orangé, les domaines du quartier royal d'Alexandrie et du port antique découverts en plongée par des équipes d'archéologues.





Réalisation scientifique

Laurent Olivier (Post-doctorant à Géosciences Azur)

Gilbert Boillot (Professeur Université Pierre et Marie Curie, Paris)

Mise en forme graphique

Véronique Pisot (Infographiste Université de Nice-Sophia Antipolis)

Aide scientifique

Jean Virieux (Professeur Université de Nice-Sophia Antipolis)

CREDITS PHOTOGRAPHIQUES

- Images de Kobe et d'Indonésie : NOAA – site web <http://www.ngdc.noaa.gov/seg/fliers/se-0801.shtml#eqslides>; Cliché du Monts-St-Michel : site web désactivé; Cliché des falaises d'Etretat : site web <http://www.etretat.com>; Cliché de Pillow-lavas : NOAA photo library – site web <http://www.photolib.noaa.gov>; Cliché de Péridotite : ODP.Tamu.edu; Cliché du Mercantour : Olivier Sardou, Géosciences Azur – site web <http://www.photolib.noaa.gov>; Carte du Bassin Ligure : Jacques Déverchère, Géosciences Azur; Clichés du Mont-St Hélens : USGS-Cascades Volcano Observatory – site web <http://www.photolib.noaa.gov>; Carte du Bassin Ligure : Jacques Déverchère, Géosciences Azur; Photos satellites du Rift Est-Africain et de la Mer Rouge : NASA Photo Gallery; Coupe et carte du Bassin Ligure : Nadège Rollet, Géosciences Azur; Carte en relief de la Terre : NOAA – site web <http://www.ngdc.noaa.gov/seg/topo/globe.shtml>; Photo satellite d'Izmit : EURIMAGE – site web fourni par Nicole Béthoux, Géosciences Azur; Clichés de la Cypress Highway : USGS – site web <http://wrgis.wr.usgs.gov>; Cliché du Nord-Chili : Tony Monfret, Géosciences Azur; Cliché d'El-Asnam : fourni par Nicole Béthoux, Géosciences Azur. Clichés de la cypress Highway : USGS – site web <http://wrgis.wr.usgs.gov>; Clichés de Bañardo : Olivier Laurent, Géosciences Azur; Cliché de Santorin : site web <http://www.geo.aau.dk/palstrat/tom>; Gravure de Lisbonne : Earthquake engineering Earthquake Center, University of California, Berkeley – site web <http://www.eerc.berkeley.edu/kozak>; Clichés de tsunami à Hawaï : NOAA – site web <http://www.ngdc.noaa.gov/seg/fliers/se-0801.shtml#eqslides>. Schéma GPS, cliché d'un GPS et carte de Californie du Sud : Eric Calais, Géosciences Azur; Données GPS (station WIDC) : Southern California Intergrating GPS Network – site web <http://www-social.wr.usgs.gov/scign/Analysis>; Cliché de Nouvelle-Zélande : I.G.N.S. – Nouvelle Zélande; Cliché du Mont Huesti : Olivier Laurent, Géosciences Azur; Cliché du Canada : Commission Géologique du Canada – site web http://sts.gsc.rucan.ca/tsdsvr/landf_new.asp; Carte d'Alexandrie : Fondation HILTI – site web <http://www.hilti.com/foundation/images/961.jpg>; Catres de L'Europe et des Alpes : Eric Calais, Géosciences Azur; Carte des séismes en PACA : Laboratoire de Géodynamique (LDG); Schéma structural des Alpes-Maritimes : Christophe Larroque, Géosciences Azur; Cliché des concrétions : Eric Gilli, Centre d'Etudes du Karst; Clichés de Diano Marina et Menton : André Laurenti; Cliché des capteurs sismique : Jean Virieux, Géosciences Azur; Cliché d'un OBS : Jacques Deverchère, Géosciences Azur; Carte de localisation des stations : Christophe Larroque, Géosciences Azur; Sismogrammes et accélérogrammes : Françoise Courboux, Géosciences Azur; Clichés de Données marégraphiques : The Global Sea Level Observing System – Site web <http://www.pol.ac.uk/psmsl/gloss.info.html>; Données Topex-Poseidon : CNES – site web http://sirius-ci.cst.cnes.fr:8090/HTML/information/frames/news/image_du_moisfr.html; Données de température : Climatic Research Unit – site web <http://www.cru.uea.ac.uk/~mikeh/research/wwfscenarios.html>; Données de gaz carbonique : Carbon Dioxide Information Analyse Center – site web <http://www.cdiac.esd.ornl.gov/trends/co2/contents.htm>; Gravure du Glacier d'Argentière : fourni par Olivia Lesne, Géosciences Azur; Cliché du glacier d'Argentières : Madame Fiagro, N°17113, 21/08/1999 – Clichés des puits de pétrole du Koweït : Pentagon – site web <http://web.patcafe.b.net/Pentagon/1012/leaf9.html>; Image satellite d'Utique : NASA Photo Gallery; Cliché de la digue d'Asfsluitdijk : site web <http://www.drf.nl/images/diversen>; Clichés de Biarritz et de la plage de Nice : Andrée Dagome, laboratoire ESPACE; Cliché de la côte des Basques : site web désactivé; Cliché de la Falaise Aval : site web <http://www.earthshots.com>; Clichés des îles barrières : USGS – site web <http://www.cru.uea.ac.uk/~mikeh/research/wwfscenarios.html>; Cliché de Tuvalu : site web <http://members.xoom.com/XMCM/tuvaluonline/ww2-index.htm>; Cliché de la Grande Motte : Andrée Dagorne, laboratoire ESPACE; Cartes du champ d'inondation de la Siagne et du PPR de la commune de Mandelieu : fournis par Andrée Dagorne, laboratoire ESPACE.