

## Introduction

Nous avons souvent l'occasion d'entendre parler de grands tremblements de terre qui causent d'importants dommages. Les conséquences tragiques des séismes sont en tête des nouvelles pendant quelque temps. Malheureusement, nous avons tendance à les oublier jusqu'à la prochaine catastrophe. Pourtant le fait est que les tremblements de terre occupent le premier rang parmi les catastrophes naturelles en terme de pertes de vie et pertes économiques. Ils méritent donc qu'on leur prête une attention continue non seulement de la part de la communauté scientifique mais aussi de la société en général. Nous espérons que cette exposition sur les tremblements de terre aidera le public à prendre conscience de cet important phénomène naturel car il fait partie intégrante de la vie sur notre planète.

Pourquoi une exposition sur les tremblements de terre ici, dans un endroit apparemment si tranquille, à Bergen, en Norvège? Tout d'abord, la Norvège n'est pas si tranquille qu'il y paraît. En Norvège même, le long de la côte, on peut s'attendre à des séismes de magnitude 6. Si nous comptons aussi les îles arctiques, nous pouvons avoir des éruptions volcaniques et des tremblements de terre jusqu'à une magnitude de 7. Donc, comparée avec nos voisins scandinaves ou même avec la plupart des pays de l'Europe du nord, la Norvège est frappée plus souvent et plus fortement par des tremblements de terre. Ceci fut reconnu très tôt par un des premiers scientifiques de la terre norvégien, C.F.Kolderup qui établit la première station sismique en Norvège, il y a juste 100 ans, ici dans ce Musée.

Cette exposition "Quand la terre bouge" a pour but de donner une vue générale des tremblements de terre comme phénomène naturel, leurs conséquences et aussi comment préparer nos sociétés aux futurs désastres naturels. Les principes de base des tremblements de terre sont expliqués et démontrés par des exemples. Une partie de l'exposition est consacrée à une meilleure compréhension des tremblements de terre grâce à une participation interactive. Nous saisissons également l'occasion de célébrer le centenaire de l'installation de la première station sismique à Bergen, Norvège. Ceci en soi est une bonne raison de marquer les 100 ans de la sismologie instrumentale à Bergen. Depuis 1905, l'Observatoire de Sismologie (connu auparavant comme "Jordskjelvstasjonen") à Bergen a évolué en un milieu scientifique dynamique et productif à l'Université de Bergen. Ses capacités d'observation, de recherche et d'enseignement sont excellentes.

La sismologie (l'étude des tremblements de terre, ou séismes) est souvent considérée comme une science assez obscure, sans intérêt en dehors de son domaine limité, mais ceci est faux. Les ondes sismiques produites par les grands tremblements de terre se propagent à l'intérieur de la terre et nous permettent d'obtenir des informations précieuses sur les matières profondément enfouies dans notre planète. Grâce aux études des enregistrements des sismographes placés en différentes parties du monde, nous savons maintenant que la terre est composée de différentes couches, croûte, manteau et noyau, chacune ayant des propriétés différentes. Le développement technique du vingt et unième siècle nous permet d'aller étudier la lune et des planètes lointaines, mais cependant ce sont toujours les données

fournies par les tremblements de terre qui sont les sources principales pour comprendre l'intérieur de la terre. Les instruments modernes sismiques ont été essentiels pour tester et prouver les hypothèses scientifiques avancées antérieurement. La théorie des plaques tectoniques est la théorie centrale de notre compréhension des procédés géologiques terrestres. La confirmation de cette théorie est un des remarquables succès de la sismologie où les observations systématiques des locations de séismes autour du monde ont aidé à déterminer les frontières des plaques et leur déformation.

La sismologie est aussi très utilisée en Norvège surtout à cause de son importance comme outil indispensable pour trouver du pétrole (ceci est expliqué dans la section concernant le pétrole), ce pétrole qui est devenu le facteur principal de la prospérité économique de la Norvège. Mais si le public a des questions au sujet des tremblements de terre, soit que quelqu'un ait senti quelque chose ou en relation avec un séisme lointain, l'Observatoire de Sismologie de l'Université de Bergen est une des grandes institutions nationales où s'adresser. Deux exemples récents montrent l'intérêt du public pour la sismologie: le tsunami dans l'Océan Indien déclenché par le très grand tremblement de terre de décembre 2004 et le naufrage du cargo "Rocknes". Ces deux événements furent clairement enregistrés sur nos instruments et les sismologistes ont ainsi pu contribuer à fournir des informations importantes.

Pour comprendre ce que sont les tremblements de terre, nous avons divisé l'exposition en plusieurs thèmes. D'abord nous présentons les séismes comme phénomènes naturels et expliquons les conditions physiques amenant de tels événements. Voir la section des séismes comme phénomène naturel.

La sismologie, vue d'une perspective historique, a plus de 100 ans d'histoire. Les principaux événements qui contribuèrent aux découvertes essentielles sont exposés dans une section dédiée à l'histoire de la sismologie. En plus des faits importants internationaux, le développement spécifique de la sismologie en Norvège est présenté par ordre chronologique pour expliquer pourquoi nous avons un tel intérêt pour les tremblements de terre à Bergen. Pourquoi la sismologie connut-elle un tel "boom" 100 ans auparavant? Surtout parce qu'on put commencer à enregistrer les mouvements du sol à l'aide de sismographes et, par conséquent, étudier en détails à la fois le séisme lui-même et aussi la structure de la terre. Ceci explique pourquoi la Norvège développa une telle position pour chercher du pétrole: au début de "l'ère du pétrole", de nombreux sismologistes qualifiés étaient prêts à se lancer dans l'aventure du pétrole. Cette aventure était si attirante, en fait, qu'il devint difficile de trouver un sismologiste faisant de la "vraie" sismologie, c'est à dire étudiant les tremblements de terre. Plus tard, quand on se mit à construire des plates-formes, les séismes redevinrent importants puisque de nombreux champs de pétrole sont situés dans des zones de hautes sismicité et que les plates-formes doivent être conçues pour résister aux plus grands tremblements de terre possibles à cet endroit. Donc, une plus grande

connaissance des tremblements de terre norvégiens était nécessaire. C'est la raison pour laquelle l'industrie pétrolière norvégienne a aidé les opérations du Réseau Sismique National en Norvège pendant les 25 dernières années, et que l'Université de Bergen a aujourd'hui un réseau sismique moderne de 30 stations couvrant toute la Norvège et les parties off-shore, y compris les îles arctiques. D'où l'importance des instruments sismiques qui ont leur propre section dans cette exposition.

Ainsi, cette première station sismique installée 100 ans auparavant fut le point de départ d'une aventure aboutissant à donner à la Norvège sa position de pointe en sismologie et en exploration pétrolière. Nous espérons que cette exposition non seulement sera attrayante pour les personnes intéressées mais aussi pour les jeunes générations, afin que tous aient l'opportunité de nous rejoindre dans la connaissance des tremblements de terre.

### **Remerciements**

Le support financier est assuré par le Département des Sciences de la Terre, Université de Bergen, le Musée de Bergen, le Fond Universitaire de Bergen, l'Association de l'Industrie Pétrolière. Le texte est écrit principalement par le groupe de sismologie au Département des Sciences de la Terre, Université de Bergen. La traduction française est de Jeannette Havskov, la traduction espagnole de Carolina Granado, la traduction allemande de Julia Schinkel. Corrections d' Eirik Sundvor, Inge Aarseth, Laila Havskov, Katarina Wolff et Erna Atakan. De nombreuses personnes aussi bien du Département des Sciences de la Terre que du Musée de Bergen ont contribué aux différents aspects de l'exposition. Nous les remercions de leurs efforts et de leur enthousiasme tout au long de ce projet. Ce sont, par ordre alphabétique:

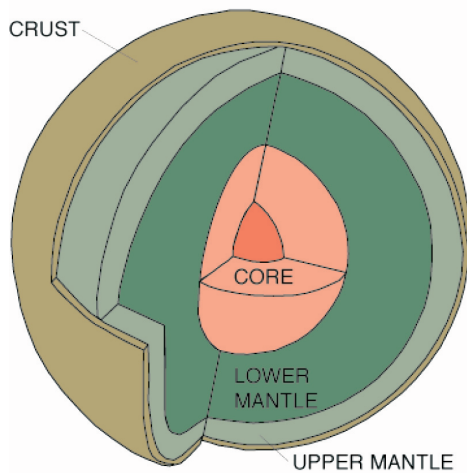
Anne Aspen  
Kuvvet Atakan  
Christian Bakke  
Eva Bjørseth  
Birgit Brühl  
Jane K. Ellingsen  
Grethe Elvenes  
Margareth Haugen  
Jens Havskov  
Kristina Holmefjord  
Geir Hovland  
Øystein Jansen  
Helge Johnsen  
Petter Jordan  
Anne Lise Kjærgaard  
Jozef Kusior  
Sven Maaløe  
Mette N. McDougall  
Jose Åsheim Ojeda  
Kåre Slettebakken  
Morten Steffensen  
Mathilde Bøttger Sørensen  
Terje Utheim

Produit et publié par le Département des Sciences de la Terre en coopération avec le Musée de Bergen, Université de Bergen.

Adresse: Muséplass 3, 5007 Bergen, Norvège

## Les tremblements de terre comme phénomène naturel

La terre est composée d'un certain nombre de couches aux différentes propriétés, voir la figure ci-dessous. En gros, on peut diviser la terre en trois couches : le noyau, le manteau et la croûte. Le noyau est la partie intérieure de la terre et peut être divisé en noyau intérieur solide et noyau externe liquide. De même, le manteau peut être divisé en manteau inférieur et manteau supérieur. La croûte est la partie extérieure de la terre. Elle n'a pas plus de 10 à 80 kilomètres d'épaisseur et ressemble de ce fait à la peau d'une pomme. La croûte se compose d'un certain nombre de plaques, appelées plaques continentales, qui se déplacent les unes par rapport aux autres. C'est ce mouvement de plaques qui est à l'origine de la plupart des séismes.



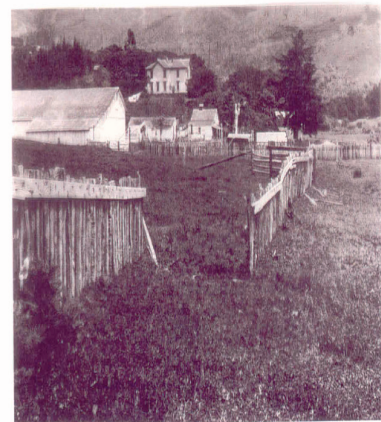
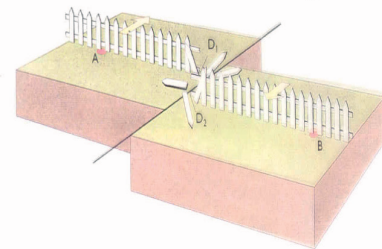
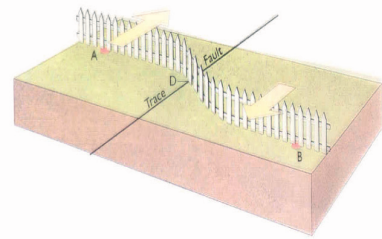
Coupe de la terre



La carte montre la terre, la nuit. Les endroits très peuplés sont visibles en raison de la plus grande intensité de lumière. Les lignes vertes montrent les limites des plaques où se produisent les plus grands tremblements de terre. Les points oranges indiquent les tremblements de terre et les triangles rouges les volcans. Les catastrophes du futur seront aux endroits où les séismes touchent des endroits très peuplés.

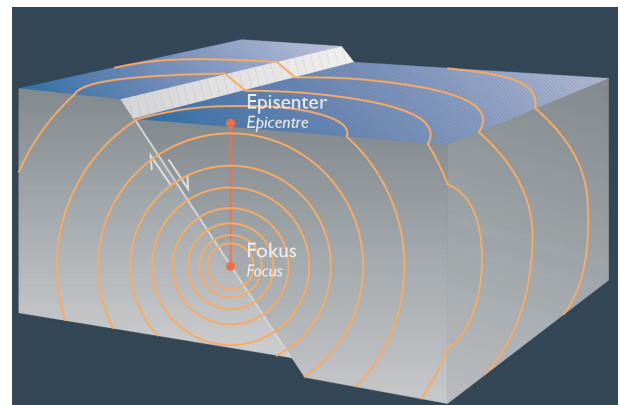
### Les failles sismiques

Les contraintes, qui s'accumulent dans la roche en raison, par exemple, du mouvement des plaques, sont libérées quand la roche ne peut plus leur résister. Il se produit alors un déplacement soudain le long d'un plan appelé fracture. Ceci résulte en un tremblement de terre qui est une libération subite d'énergie qui se déplace à travers la croûte terrestre sous forme d'ondes sismiques. Ce sont ces ondes que l'on ressent à la surface comme les "tremblements" de la terre.



Une fracture

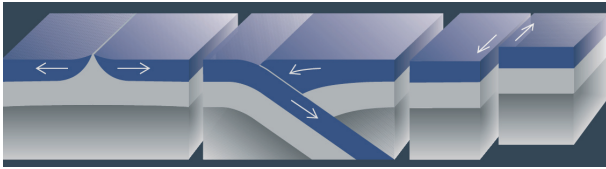
Le foyer (hypocentre) d'un tremblement de terre est le point sur le plan de fracture où la rupture commence. L'épicentre est le point à la surface juste au dessus du foyer. Le plan de fracture est défini par sa direction sur la surface, son inclinaison et la direction du glissement. Lorsqu'il se produit une fracture le long d'un plan de faille, le glissement sera inégalement distribué. La majeure partie de l'énergie sera libérée dans les endroits où la différence de rugosité entre les deux plans est la plus grande. Ces endroits s'appellent des aspérités.



Plan de faille

Il y a trois sortes de limites de plaques, selon que les plaques bougent en s'éloignant l'une de l'autre (limites de plaques divergentes), l'une vers l'autre (limites de plaques convergentes) ou qu'elles glissent dans des

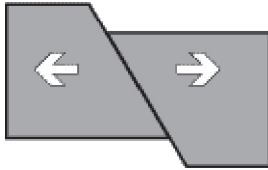
directions opposées, l'une par rapport à l'autre (limites de plaques en décrochement).



### Les différentes sortes de frontières de plaques

Il y a principalement trois sortes de failles, normales, inverses et en décrochement. Une combinaison de deux de ces types résulte en un glissement oblique et est assez courante. Les types de failles dépendent des contraintes tectoniques dans les roches où elles sont principalement contrôlées par le champ de contrainte régional en liaison avec les mouvements de plaques. Les trois sortes de failles sont décrites et illustrées ci-dessous.

Une faille normale se crée lors d'un séisme quand les deux blocs de chaque côté de la faille s'éloignent l'un de l'autre et que l'un des blocs descend par rapport à l'autre. En cas de frontière de plaques divergentes, deux plaques s'éloignent l'une de l'autre et de nouvelles matières montent du manteau. Les tremblements de terre se produisent habituellement sur des failles normales et les volcans sont souvent observés en liaison avec des failles divergentes. Un exemple d'une frontière divergente est la dorsale mi-atlantique où l'Islande est affectée par des séismes et des volcans.

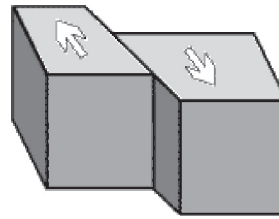


Faille normale



La photo montre une faille normale en relation avec un tremblement de terre destructeur en novembre 1999, près de Düzce en Turquie.

Une rupture avec faille inverse arrive en liaison avec un séisme où les roches sont pressées l'une contre l'autre et où l'un des blocs est déplacé vers le haut le long du plan de rupture. En cas de frontières de plaques convergentes, deux plaques se heurtent. Une plaque bouge sous l'autre et est poussée en bas vers le manteau où elle va se fondre et se dissoudre. Les tremblements de terre qui se produisent dans ces régions ont habituellement des mécanismes inversés. Des exemples de frontières de plaques convergentes sont observés en Alaska, Himalaya, Japon, Taiwan et dans la partie ouest de l'Amérique du Sud. C'est dans ces zones appelées "zones de subduction" que l'on observe la plus grande proportion d'activité sismique globale.



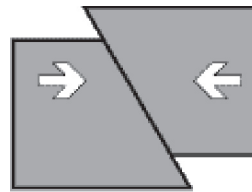
Faille inverse



La photo montre une rupture avec faille inverse lors d'un séisme destructeur à Chi Chi, Taiwan en 1999. Gros plan sur la petite photo.

Les failles de décrochement arrivent en liaison avec un tremblement de terre où les roches des deux côtés du plan de fracture sont déplacées horizontalement dans deux directions opposées.

Dans les frontières de plaques "transcourantes", les plaques glissent l'une par rapport à l'autre. Ceci produit des failles de décrochement. Exemple de frontières de plaques transcourantes se trouvent en Californie et en Turquie.



Faille de décrochement

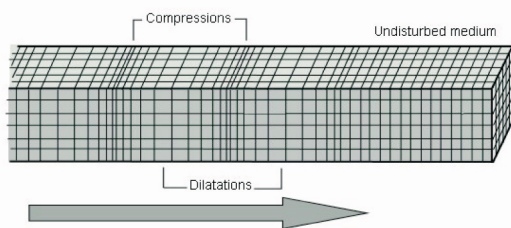


La photo montre une faille de décrochement qui a déplacé la voie ferrée. Photo prise lors du séisme d'Izmit, Turquie, le 17 août 1999.

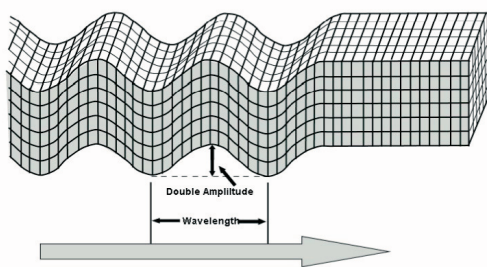
## Les ondes sismiques

Il y a quatre sortes principales d'ondes sismiques. Les ondes P (ondes primaires) ont un mouvement de particules dans la même direction que celle propagée par les ondes. Les ondes S (ondes secondaires) ont un mouvement de particules formant un angle droit avec la direction de propagation. Les ondes P et S sont appelées "body wave" ("ondes de corps") parce qu'elles se propagent à l'intérieur de la terre. Les ondes de surface (ondes de Love et de Rayleigh), par contre, se propagent seulement à la surface de la terre. Les ondes Love (nommées d'après A.E.H. Love (1863-1940)) ont un mouvement de particules formant un angle droit avec la direction de propagation. Les ondes Rayleigh (nommées d'après Lord Rayleigh (1842-1919)) ont un mouvement rétrograde de particules, ce qui veut dire que le mouvement des particules est circulaire à l'opposé de la direction de propagation.

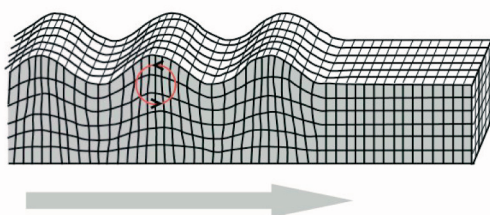
**P Wave**



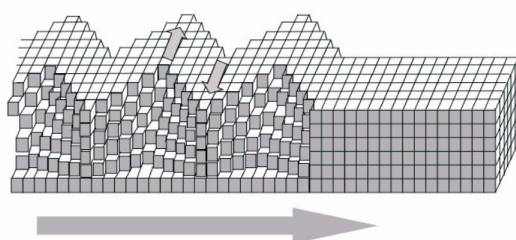
**S Wave**



**Rayleigh Wave**



**Love Wave**

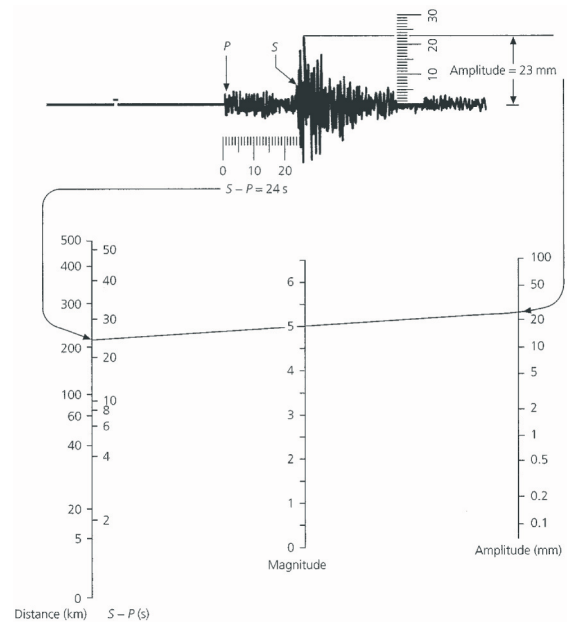


Les différentes ondes sismiques

## La magnitude des tremblements de terre

La façon traditionnelle de mesurer la magnitude des tremblements de terre est d'utiliser l'échelle de Richter. La magnitude de Richter est basée sur l'amplitude du mouvement du sol comme elle est enregistrée par les sismographes et la distance au tremblement

de terre. Charles Richter introduisit son échelle en Californie en 1935, où il assigna une magnitude de 3 à un tremblement de terre à 100 km de distance qui avait causé 1 mm d'amplitude de mouvement terrestre enregistré sur son équipement spécial (un sismomètre Wood-Anderson).



La magnitude est déterminée par l'amplitude maximum inscrite sur le sismogramme. Pour calculer la magnitude l'amplitude est corrigée par la distance, comme montré sur la figure.

Les échelles des magnitudes comme celle de Richter sont logarithmiques, ce qui veut dire qu'une augmentation d'un chiffre correspond à une multiplication par 10 du mouvement du sol et à peu près par 32 de l'énergie libérée par le tremblement de terre. L'échelle de Richter est encore utilisée par les sismologues à cause de sa popularité. Cependant, les sismologues d'aujourd'hui préfèrent utiliser une autre échelle de magnitude basée sur le moment sismique. Le moment sismique est calculé en prenant en compte la taille de la faille, l'importance du glissement et la différence de rugosité entre les deux plans de faille.

A quoi correspondent les différentes magnitudes?

- 2 Rarement senti par les humains
- 2.5 Energie comparable à un coup de foudre moyen
- 3.5 Energie comparable à un fort coup de foudre
- 4 Senti par les humains, possibilités de dommages
- 5 Energie comparable à une tornade de moyenne intensité
- 6 Energie comparable à la bombe atomique d'Hiroshima
- 7 Seisme destructeur, causant souvent des pertes de vie. Peut générer un tsunami
- 8 Energie comparable à la plus grande explosion atomique du monde
- 9 Séisme catastrophique causant de grands dommages

Avec quelle fréquence avons nous des tremblements de terre?

Description	Magnitude	En moyenne, par an
Catstrophique	8 ou plus	1
Très fort	7-7.9	18
Fort	6-6.9	120
Moyen	5-5.9	800
Petit	4-4.9	6200
Très petit	3-3.9	49000
	Magnitude 2-3 approx. 365000	Magnitude 2-3 approx. 365000 Magnitude 1-2 approx. 3000000

La table montre combien de fois les séismes de différentes forces se produisent dans le monde (en moyenne).

Les 5 plus grands tremblements de terre au monde depuis 1900

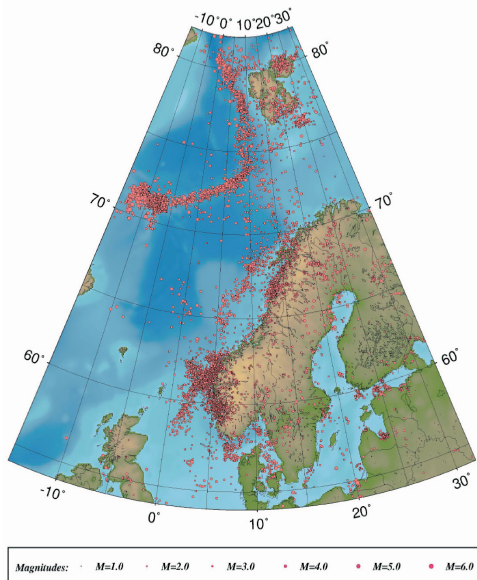
1. 1960, 22 mai, Chili du sud, M=9.5
2. 1964, 28 mars, Prince William Sound, Alaska, M=9.2
3. 1957, 9 mars, Iles Andreanoff, Alaska, M=9.1
4. 1952, 4 novembre, Kamchatka, M=9.0
5. 2004, 26 décembre, Sumatra, Indonésie, M=9.0

Les 5 tremblements de terre les plus meurtriers au monde

1. 1556, 23 janvier, Senshi, Chine, 830 000 morts (M~8.0)
2. 2004, 26 décembre, Sumatra, Indonésie, 280 000 (M=9.0)
3. 1976, 27 juillet, Tangshan, Chine, 255 000 morts (M=7.5)
4. 1780, 28 février, Iran, 200 000 morts (M=?)
5. 1920, 16 décembre, Gansu, Chine, 200 000 morts (M=8.6)

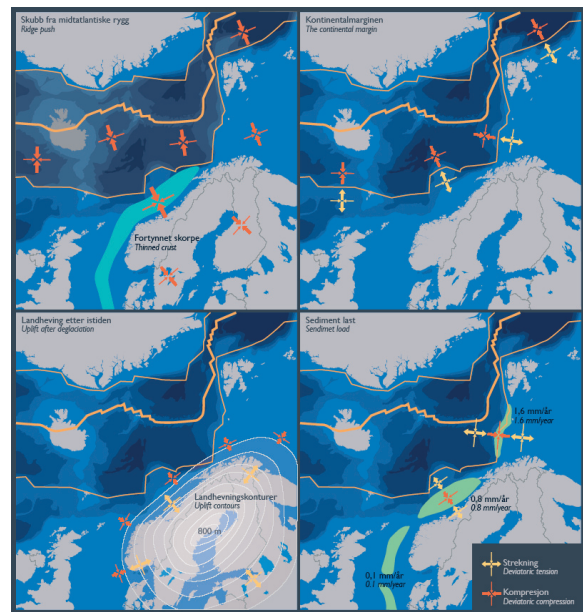
### Les tremblements de terre en Norvège

L'activité sismique en Norvège et dans la mer environnante est liée aux structures géologiques. La frontière de plaque de la dorsale mi-atlantique est un des éléments les plus importants. De plus, des tremblements de terre se produisent le long de la structure de fosses (systèmes de faille normale) dans la Mer du nord et le long de la marge continentale. A terre, la plus grande activité se trouve dans les régions de Sunnhordland et de Nordland.

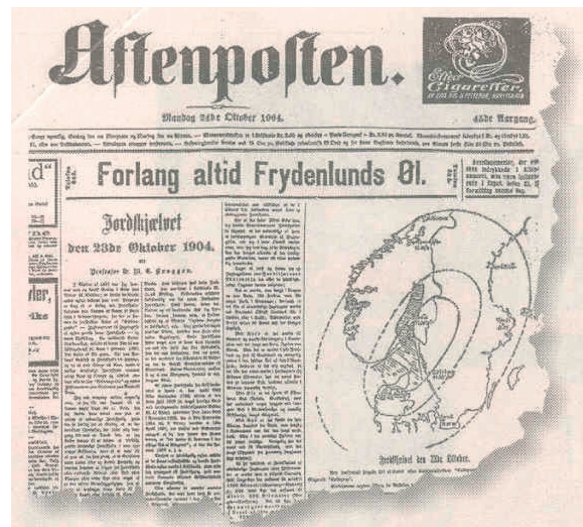


Epicentres de séismes 1980-2004

A part les régions arctiques autour de la dorsale mi-atlantique, la Norvège est située loin des frontières de plaques, et on peut se demander pourquoi il y a des tremblements de terre. La réponse est que les contraintes s'accumulent dans la croûte terrestre en raison d'autres mécanismes. Il y a quatre mécanismes principaux qui causent l'accumulation de contraintes dans la région autour de la Norvège. "Ridge-push" (la poussée de la dorsale) est associé avec les frontières divergentes des plaques dans l'Atlantique du nord et est considérée une source importante de contraintes régionales le long des côtes norvégiennes et à l'intérieur des terres. La marge continentale joue aussi un rôle important dans le procédé d'accumulation de contraintes. La fonte des glaces et le soulèvement consécutif après la dernière période glaciaire causent des contraintes verticales surtout le long de la côte. De plus, des forces verticales dues à l'accumulation de sédiments au fond de la mer contribuent à augmenter les contraintes dans la région.



Le mécanisme d'accumulation des contraintes autour de la Mer de Norvège

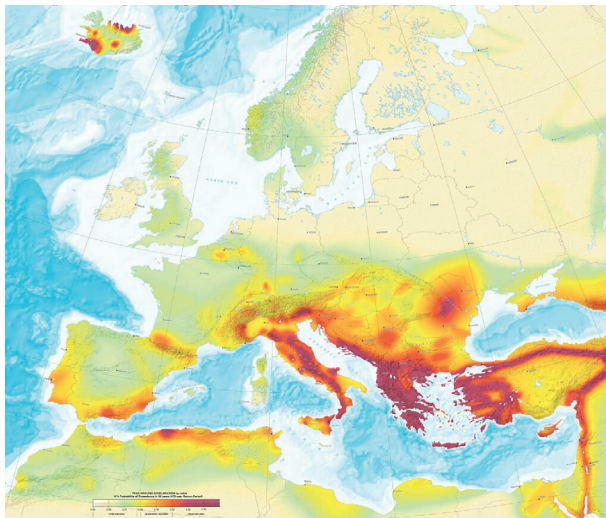


Le 23 octobre 1904, un tremblement de terre à Oslo fait la une du journal Aftenposten. Le séisme a touché Oslo juste à l'heure de la grand-messe et avait une magnitude de 5.4 sur l'échelle de Richter. Le tremblement de terre causa de la panique en plusieurs

endroits et occasionna des dommages assez importants aux bâtiments. La photo montre un extrait de journal du 24 octobre 1904.

### Le risque sismique en Europe

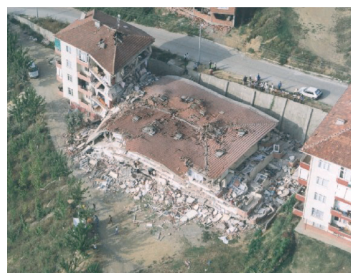
Cette carte, préparée par la Commission Européenne de Sismologie, montre les risques sismiques en Europe.



La couleur rouge soutenue indique un grade important de risques de forts mouvements causés par des tremblements de terre futurs. En Norvège et dans les régions environnantes, le risque de forts mouvements est relativement faible. Le plus grand risque de forts séismes en Europe se trouve dans les régions méditerranéennes, dans des pays comme la Grèce, la Turquie, l'Italie et l'Espagne. Ces pays sont situés près de frontières de plaques et ont des systèmes importants de failles capables de produire de forts séismes.

Un risque sismique élevé provient d'une combinaison de grande activité sismique et de haute vulnérabilité. En d'autres termes, le risque sismique est plus grand quand l'épicentre d'un grand tremblement de terre est situé dans un endroit peuplé. Un tel exemple est la Turquie où de grands séismes destructeurs se produisent souvent. Le 17 août 1999, un fort tremblement de terre ( $M=7.4$ ) secoua Izmir dans ce pays. Le séisme occasionna d'importants dommages le long de la faille de 150 km et causa la mort de 19000 personnes. Après ce tremblement de terre, le risque d'un nouveau séisme dans la Mer de Marmara est encore accru et un grand tremblement de terre pourrait avoir des conséquences catastrophiques à Istanbul, ville de 12 millions d'habitants. Afin d'être le mieux préparés possible à une telle éventualité, les chercheurs travaillent à calculer les mouvements du sol qui resulteraient d'un tel séisme. Les calculs sont basés sur une hypothèse de magnitude ( $M=7.5$ ) ainsi que sur les propriétés de la croûte et de la faille.

La photo montre un bâtiment qui s'est écroulé lors du tremblement de terre catastrophique d'Izmir, Turquie, en 1999. La plupart des dégâts sont le résultat de mauvaises pratiques de construction.



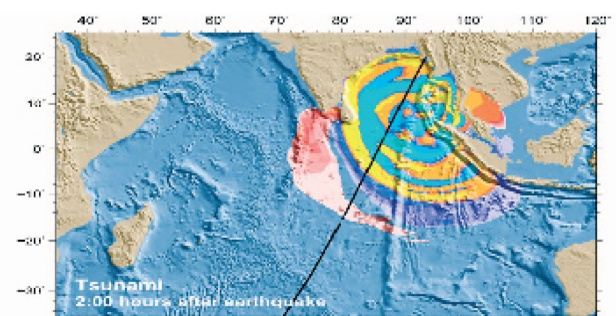
### Tsunami

Tsunami est une expression japonaise qui veut dire "vague de port". C'est un ras de marée produit par un changement subi du sol marin en raison, par exemple, d'un tremblement de terre ou d'un glissement de terrain. Ce changement met en mouvement des masses énormes d'eau. Au large, ces vagues peuvent atteindre une vitesse de 800 km/h mais les navires ne les sentent pas car elles ont une très longue longueur d'onde et une hauteur limitée. L'eau se retire souvent avant que les très hautes vagues n'atteignent la côte. La vitesse diminue et la hauteur des vagues augmente énormément, mais les vagues sont encore relativement longues quand elles arrivent à la côte et elles peuvent donc pénétrer très loin dans les terres. Quand les vagues se retirent elles entraînent tout avec elles vers la mer. Normalement, deux ou trois vagues atteignent la côte de cette façon, espacées de plusieurs minutes.



Comment se forme un tsunami

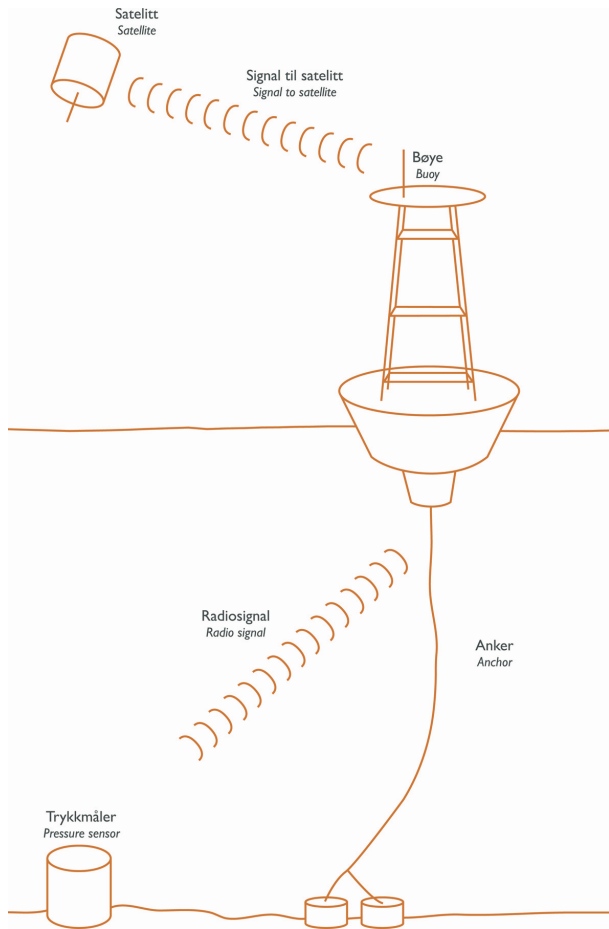
Le 26 décembre 2004, un tremblement de terre catastrophique ( $M=9$ ) eut lieu au nord-ouest de Sumatra en Indonésie. L'épicentre était sous la mer et un grand tsunami se forma, causant d'énormes dégâts dans une très grande région autour de l'Océan Indien.



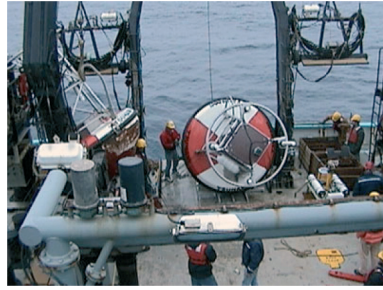
La photo, prise du satellite Jason 1 (NOAA), montre le tsunami deux heures après le tremblement de terre. Les couleurs montrent les changements au niveau de la surface de la mer et donc rendent la propagation des vagues visible.

Un système d'avertissement de tsunami peut être utile pour éviter les catastrophes. Une sonde qui mesure la pression de l'eau est placée au fond de la mer et de là envoie un signal à une bouée qui le transmet à terre par un satellite. Un changement de la pression indique le passage d'une vague d'un tsunami. Une des conditions pour qu'un tsunami se produise, est qu'un séisme ait bien lieu sur le fond de la mer. Ceci est enregistré à une station sismique à terre, déterminant la localisation et

la magnitude. Un système d'avertissement de tsunami confirme alors si une vague de tsunami est en route vers la terre. Un tel système existe dans le Pacifique.



La figure montre les différents composants d'un système d'avertissement de tsunami basé sur une sonde au fond de la mer et communication par satellite. Un tel système est installé dans le Pacifique.



La photo montre la bouée qui transmet l'information par satellite.

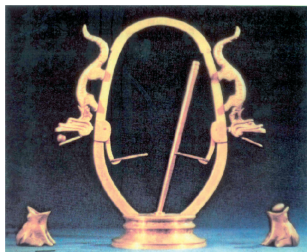


# Histoire de la sismologie

## Histoire de la sismologie globale

Depuis la plus grande antiquité les humains ont essayé d'expliquer pourquoi il y avait des tremblements de terre. Les Chinois ont été les premiers à construire un instrument pour enregistrer les tremblements de terre. Ces faits et leur suite sont décrits plus bas.

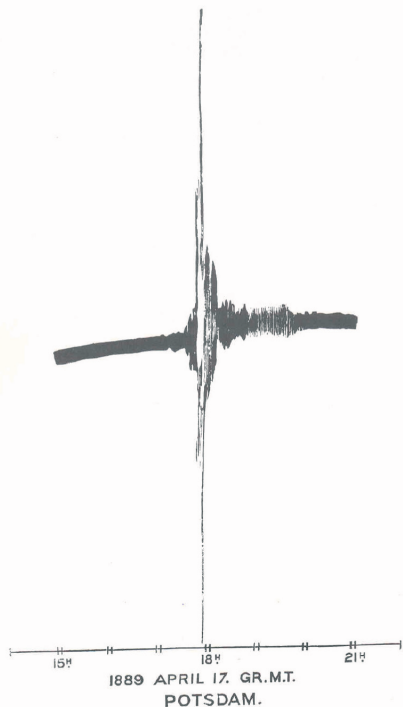
Environ 132 av J-C: Le premier sismoscope qui montre d'où viennent les ondes sismiques est utilisé en Chine



1875: Filippo Cecchi invente le premier sismomètre en Italie.



1889: Pour la première fois, un tremblement de terre est enregistré à distance par un instrument. Ceci se passe à Potsdam, Allemagne et il s'agit d'un tremblement de terre japonais.

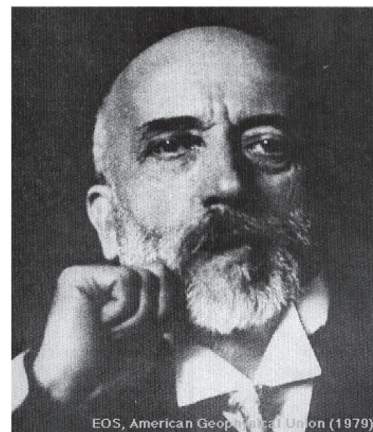


1892: John Milne conçoit un sismomètre qui est installé dans une quarantaine d'observatoires dans le monde. C'est le commencement de l'observation globale des tremblements de terre.

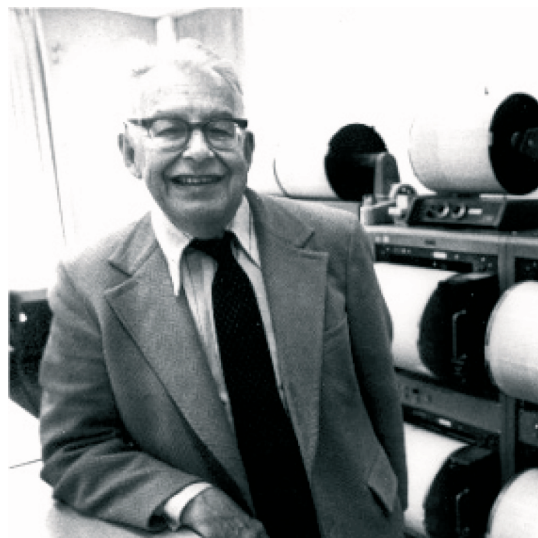


1906: Richard Oldham découvre le noyau de la terre en étudiant les ondes sismiques.

1909: Andrija Mohorovicic découvre la discontinuité de moho, la limite entre la croûte et le manteau terrestre



1935: Charles Richter développe l'échelle de magnitude (appelée "échelle de magnitude de Richter") qui est utilisée pour déterminer la grandeur d'un tremblement de terre et employée pour la première fois dans la partie sud de Californie.



1936: Inge Lehmann du Danemark découvre le noyau central de la terre.



1946: Une explosion atomique est enregistrée pour la première fois par un sismographe.

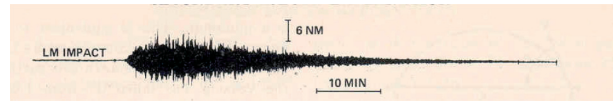
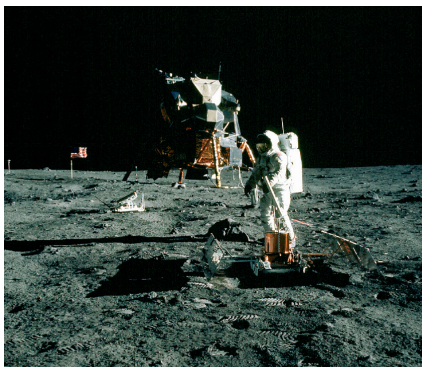
1960: Le plus important tremblement de terre jamais enregistré a lieu au Chili, magnitude M=9.5.

1961: Le réseau standard global sismique est établi (WWSSN) pour observer à la fois les tremblements de terre et les expériences nucléaires. La station norvégienne de KONO à Kongsberg est installée en 1962 comme faisant partie de ce réseau. WWSSN a joué un rôle très important en fournissant des données qui étayaient la théorie de la dérive des continents et des plaques tectoniques. Ceci aide à comprendre le procédé fondamental de la déformation terrestre. WWSSN est ensuite incorporé par IRIS (Incorporated Research Institution for Seismology) et est toujours en activité comme Réseau Globale Sismique (Global Seismic Network, GSN).

1966: Keiiti Aki définit le moment sismique, qui est une mesure physique de la magnitude d'un tremblement de terre.



1969-72: Les astronautes d'Apollo placent un sismomètre sur la lune et les premiers "tremblements de lune" sont enregistrés.

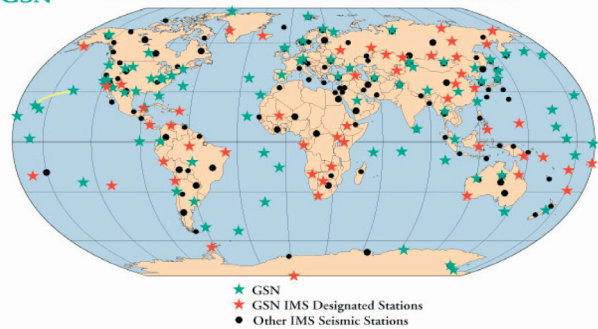


1977: Hiroo Kanamori établit l'échelle de magnitude de moment, qui est une mesure de la magnitude d'un tremblement de terre basée sur le moment sismique. C'est cette échelle de magnitude qui est utilisée par la plupart des sismologistes aujourd'hui.

1996: Le CTBT (traité interdisant les expériences atomiques) est instauré. Actuellement (2005), ce traité est signé par 174 pays. En même temps, le Centre International de Données est établi à Vienne. Ce centre est chargé de coordonner les observations de surveillance relatives à ce traité. La surveillance sismique est assurée par l'IMS (International Monitoring System). La carte montre le réseau global de stations qui font partie du GSN et de l'IMS.



GLOBAL SEISMOGRAPHIC NETWORK  
& INTERNATIONAL MONITORING SYSTEM (IMS)



★ GSN  
★ GSN IMS Designated Stations  
● Other IMS Seismic Stations

### Événements importants de sismologie en Norvège

En Norvège, la sismologie a été une science active depuis 1830 environ quand B.M. Keilhau commença à étudier les tremblements de terre. Les événements les plus importants de la sismologie norvégienne sont décrits ci-dessous.

1819: Le 31 août un grand tremblement de terre est enregistré près de Lurøy, au nord de la Norvège. C'est le plus important tremblement de terre en Europe du nord-ouest en temps historique (magnitude M=5.8).

1836: B.M. Keilhau publie "Etterretninger om jordskjelv i Norge" (une description des tremblements de terre norvégiens jusqu'en 1834).

1887: Hans Reusch, directeur de la Recherche Géologique Norvégienne (NGU), commence une étude systématique des séismes norvégiens.



1888: T.Ch.Thomassen publit „Berichte über die wesentlich seit 1834 in Norwegen eingetroffenen Erdbeben” couvrant les tremblements de terre norvégiens de 1834 à 1887.

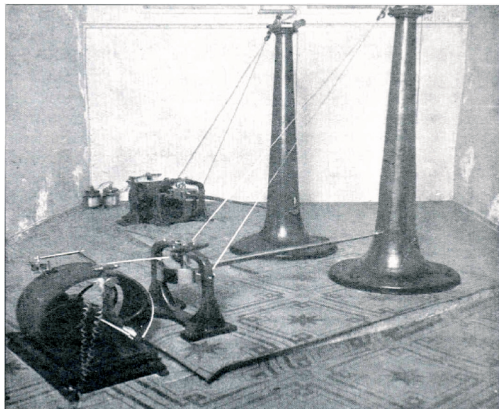
1899: Le Musée de Bergen est chargé des études systématiques des séismes.

1900: C.F.Kolderup fait une application pour obtenir des fonds destinés à l'installation d'un sismographe à Bergen. L'application est rejetée.

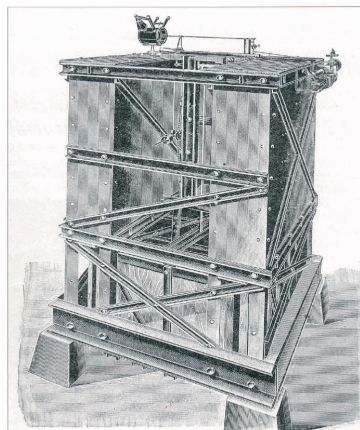


1904: Le 23 octobre un grand tremblement de terre a lieu dans le fjord d'Oslo,  $M=5.4$ . La Norvège se joint à une convention d'états pour l'avancement de la recherche sismique. Les fonds pour l'installation d'un sismographe à Bergen sont accordés.

1905: En mai, la Norvège installe son premier sismographe, un sismographe Bosch-Omori à deux composants, dans le sous-sol du Musée de Bergen. Cet instrument sera utilisé jusqu'en 1959. Environ 70 séismes sont enregistrés pendant les dix premières années. Le premier tremblement de terre (en Mongolie de l'ouest) est enregistré le 9 juillet à Bergen.



1921: Un sismographe de Wiechert à pendules horizontal (à deux composants) est installé au Musée de Bergen.



1923: Un sismomètre vertical est installé dans le Musée de Bergen.

L'Observatoire de Sismologie a son premier bureau, à Joachim Frieles gate 1.

1946: Le 9 avril, le gouvernement norvégien décide d'établir une Université à Bergen.

L'Université se charge des investigations systématiques des tremblements de terre dès sa fondation.

1958: Juillet: La première station en dehors de Bergen est installée à Isfjorden à Svalbard (Spitsbergen). C'est un sismomètre vertical de Willmore.



1959: US Coast and Geodetic Survey fait don à la Norvège d'un sismographe de Benioff à 3 composants avec enregistreur de film. Il sera installé au Musée de Tromsø.

Le premier sismographe construit à Bergen est mis en opération dans cette ville.

1960: L'Observatoire de Sismologie (Jordskjelvstasjonen) devient un institut universitaire indépendant.

1961: La première station sismique est installée à Jan Mayen.

En mars, l'Observatoire de Sismologie s'installe à Villaveien 9.

1962: En participant au projet Skagerrak, l'Observatoire de Sismologie conduit une étude sismique qui, pour la première fois, établit la présence de roches pouvant contenir du gaz et du pétrole sur le socle continental norvégien. C'est le début de l'aventure pétrolière norvégienne.

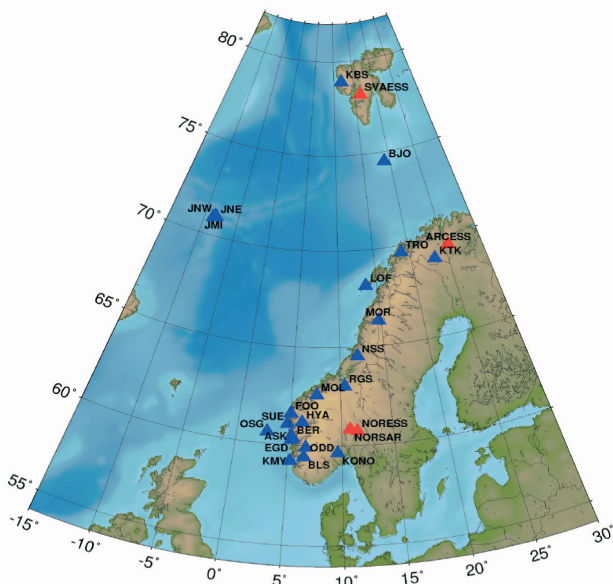
1963: US Coast and Geodetic Survey, en coopération avec avec UiB (Université de Bergen), installe une antenne sismique à Lillehammer pour faire de la recherche sur l'identification des explosions.

1968-70: NORSAR (Antenne Sismique Norvégienne) est établi avec une antenne sismique à Mjøsa et un centre de données et de recherche à Kjeller. NORSAR est créé comme une institution de recherche en coopération avec l'Observatoire de Sismologie et le Ministère des Affaires Etrangères. NORSAR est établi principalement pour surveiller les expériences nucléaires. NORSAR est aujourd'hui une institution indépendante qui, en plus d'opérer des antennes sismiques, conduit des affaires de conseil en sismologie.

1977: L'Observatoire de Sismologie s'installe dans le bâtiment des sciences à l'Université (Realfagbygget)

1990: L'enregistrement des séismes, la recherche sismique et la section de l'enseignement de la sismologie deviennent part du nouveau Département de Physique du Globe. Celui-ci est créé en joignant l'Observatoire de Sismologie et l'Institut de Géophysique (section magnétisme terrestre et paléomagnétisme).

1992: Le NNSN (Norwegian National Seismic Network ou Réseau National Norvégien de Sismologie) est établi, basé sur les réseaux précédents, de l'ouest, du sud et du nord ainsi que quelques stations opérées par l'Université de Bergen. Le réseau est financé par l'Université de Bergen et l'Association de l'Industrie Pétrolière (OLF). La carte montre les stations qui faisaient partie du réseau quand il a été établi, les triangles bleus représentent les stations NNSN et les triangles rouges les antennes sismiques de NORSAR.



2003: La surveillance des séismes, la recherche et l'enseignement de la sismologie deviennent part de l'Institut des Sciences de la Terre qui est établi en joignant l'Institut de la Physique du Globe et l'Institut de Géologie.

La haute compétence en sismologie en Norvège a amené les résultats suivants:

- Programme d'enseignement pour les étudiants norvégiens et étrangers. UiB a aujourd'hui le plus important programme de sismologie des pays nordiques.

- La recherche et l'enseignement dans le domaine du pétrole ont connu un départ rapide avec une importante contribution de la sismologie quand les grandes réserves de pétrole ont été découvertes sur le sol continental norvégien. Ces activités continuent actuellement et la Norvège est un des pays de pointe quant à la recherche dans le domaine du pétrole.
- De nombreux projets internationaux en sismologie sont menés par UiB et NORSAR.
- Développement de logiciels qui sont utilisés dans plus de 50 pays.
- Projets dans les pays en voie de développement où le risque sismique est important.
- Recherche sur les problèmes norvégiens et mondiaux en relation avec la sismologie.

Ci-dessous dans le catalogue une carte montre les pays où les institutions norvégiennes ont coopéré et d'où viennent les étudiants étrangers. Les photos ci-dessous sont prises lors de nos activités internationales.



Station sismique en Iran



Enseignement au Koweït

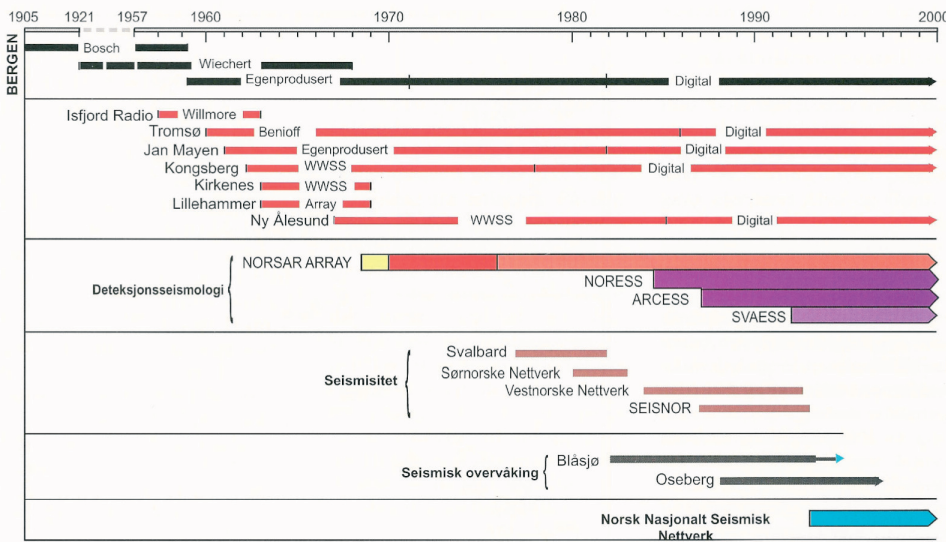


Station sismique en Ouganda



Station sismique au Tibet

# Le Réseau National Sismique Norvégien

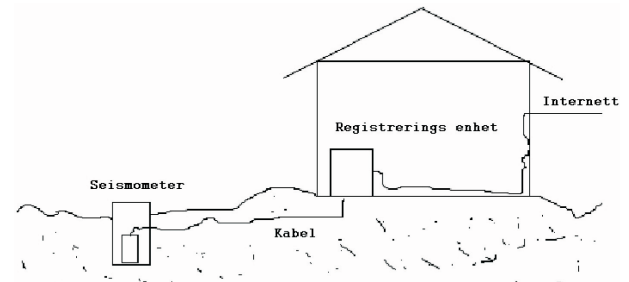


Les stations sismiques en Norvège (chronologie). A partir du haut: les lignes noires indiquent les stations de Bergen, les lignes rouges étroites représentent les autres stations de UiB, les lignes rouges plus larges sont les antennes sismiques de NORSSAR, les lignes marron et les lignes noires sont les réseaux locaux provisoires gérés conjointement par UiB et NORSSAR. Abréviations: WWSSN: World Wide Standardized Seismic Network. NORESS, ARCESS et SVAESS sont des antennes sismiques de NORSSAR.

Le Réseau National Sismique Norvégien (NNSN) a commencé avec l'installation de la station de Bergen en 1905. Depuis plusieurs stations, des petits réseaux locaux et des antennes sismiques (arrays) ont été en activité. A partir de 1992 toutes les stations, à l'exception de NORSSAR (Norwegian Seismic Array), ont été réunies en un réseau national. L'industrie pétrolière norvégienne a contribué au fonctionnement des stations sismiques de l'Université de Bergen depuis 1984. Actuellement NNSN est financée par l'Université de Bergen et l'Association de l'Industrie Pétrolière Norvégienne, et le centre d'activité se trouve au Département des Sciences de la Terre à l'Université de Bergen.

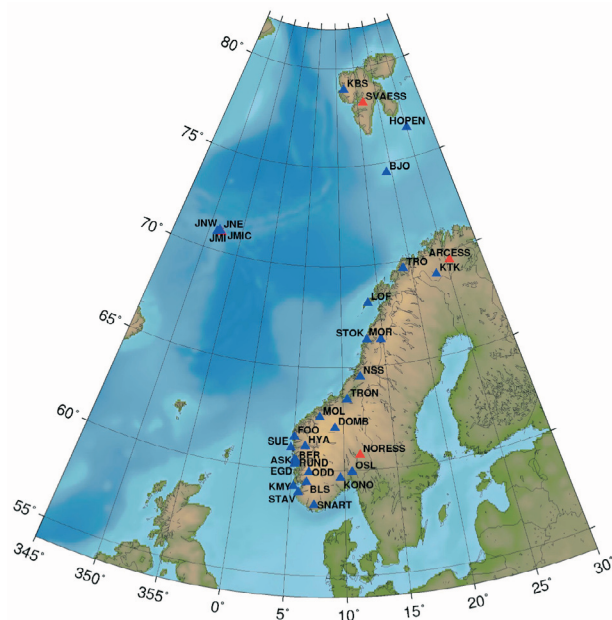
vers l'unité d'enregistrement ("Registrerings enhet"), en principe un convertisseur analogique numérique et un ordinateur. Les données sont ensuite transmises par Internet à l'Université de Bergen.

## Installation typique NNSN à l'intérieur d'une station



L'installation typique d'un capteur sismique

Il est important que le séismomètre soit installé en contact avec des roches fondamentales pour éviter le bruit des couches superficielles du sol. Une station typique NNSN consiste en un tube de plastique cimenté dans la roche ("Bedrock") et fixé avec des barres de fer. L'installation est souterraine pour éviter le bruit du vent. Ce type d'installation est utilisée pour mesurer des signaux de fréquence aussi basse que 0,2 Hz et convient donc tout à fait aux tremblements de terre norvégiens.



Réseau National Sismique Norvégien (NNSN) et autres stations en Norvège. Les symboles bleus représentent les stations de NNSN et les rouges les antennes sismiques de NORSSAR. JMJC est exploité par NORSSAR.

## Une station typique NNSN

Un ou plusieurs sismomètres sont placés à l'extérieur d'une maison (pour éviter le bruit des mouvements dans la maison). Un câble ("Kabel") part du sismomètre

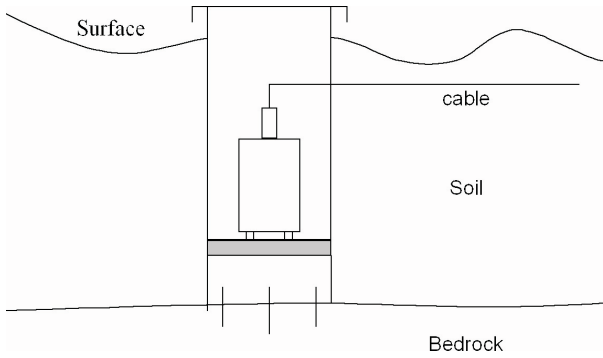


Illustration schématique de l'installation. L'installation est sous la surface ("Surface").



Un capteur sismique de courtes périodes prêt à être installé

### Les stations sismiques de Jan Mayen

Jan Mayen est notre avant-poste dans la Mer de Norvège. C'est là que se trouve le seul volcan en activité de Norvège, Beerenberg, et aussi les plus grands tremblements de terre. Les données de Jan Mayen sont transmises par satellite au continent pour la surveillance continue de Beerenberg.



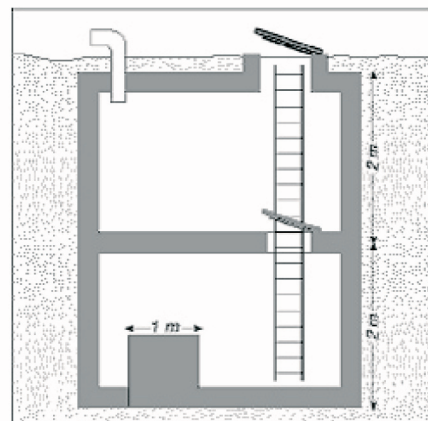
Le volcan de Beerenberg



La station près de Beeremberg reçoit son énergie d'une éolienne et d'un panneau solaire. Le sismomètre est installé dans la boîte jaune à droite. Les données sont envoyées par radio à la base centrale de Jan Mayen.

### Les stations large bande du NNSN

Les stations large bande sont particulièrement bien adaptées à l'enregistrement de tremblements de terre du monde entier. Elles doivent pouvoir enregistrer des fréquences très basses, jusqu'à 0.001 Hz, ce qui correspond à des oscillations avec une période de 1000 secondes. Ceci suppose une température très constante et des conditions spéciales pour les installations. NNSN a 5 stations à large bande.

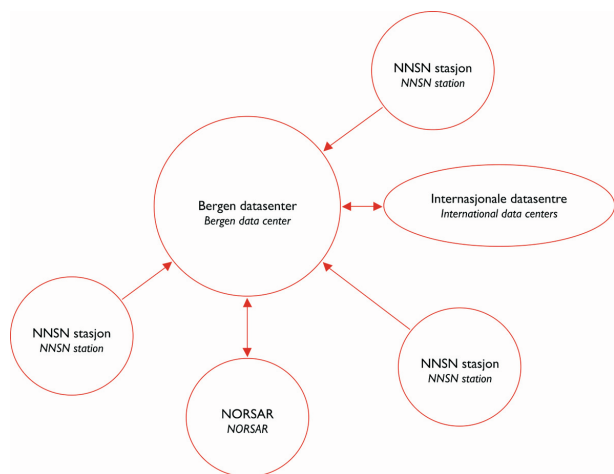


La station de Ny Ålesund, Svalbard (Spietsberg). A droite on peut voir l'entrée de la station et à gauche un dessin schématique. Le sismomètre est placé au fond pour minimiser les variations de pression et de température.



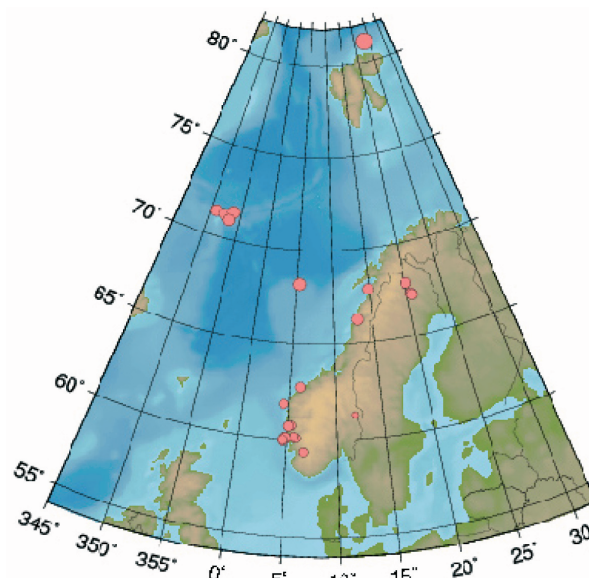
La station de Kongsberg dans une ancienne mine d'argent. Cette station est une des meilleures du monde en raison de sa location au plus profond d'une mine.

### Afflux de données au NNSN

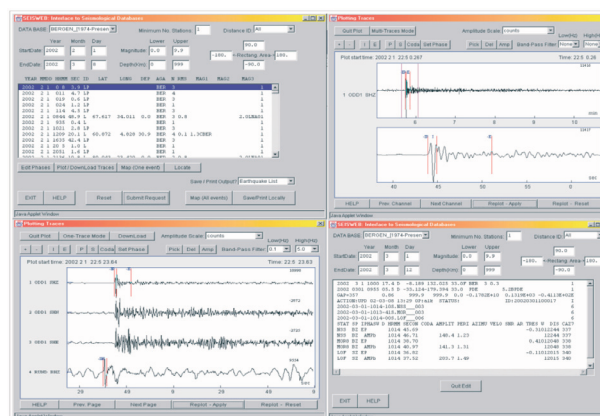


- Les données arrivent des stations NNSN 24 heures sur 24.
- Les données analysées sont reçues de NORSAR et d'autres centres internationaux chaque jour.
- Toutes les données norvégiennes et certaines données internationales sélectionnées sont analysées (calcul de la localisation et de la magnitude) et enregistrées dans une base de données à l'Université de Bergen.
- Toutes les données sont du domaine public et sont envoyées à des centres de données internationales.

### NNSN et le public



NNSN met à jour continuellement les informations sur les derniers tremblements de terre en Norvège (sur son site). La carte montre ce qui s'est passé pendant les 10 derniers jours.



Sur la toile, la page NNSN est ouverte à tous ceux qui veulent voir ou chercher des données.



#### Makrosesimisk spørreskjema

I forbindelse med jordskjelvet  
01.11.2004 kl 22:26 GMT/UTC  
(01.11.2004 kl 23:26 lokal tid)

Institutt for geovitenskap ved Universitetet i Bergen ønsker å kartlegge omfanget av rystelsene av dette skjelvet. Det er viktig at selv de som knapt merket jordskjelvet besvarer dette skjemaet.

Ble skjelvet merket?  Ja  Nei

Hvor var du?  Ute  Inne

Var du våken eller sov?  Våken  Sov

Bygningstype:  Tre  Mur/lettbetong  Betong

Antall etasjer i bygningen:

Jordbunntype:  Fjell  Sand  Leire  Løsmasser

Si un tremblement de terre est senti, NNSN rassemble les informations venant du public, manuellement ou par son site sur la toile.

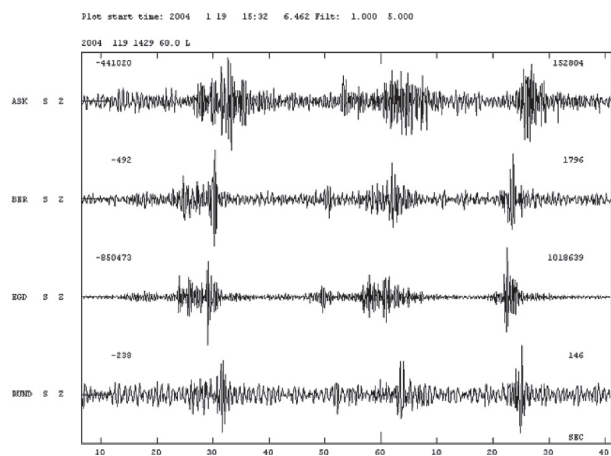
NNSN a un service de téléphone fonctionnant 24 heures sur 24 pour répondre aux questions du public concernant les tremblements de terre. Pendant les heures ouvrables: 55 58 34 10, 55 58 36 00. Reste du temps: 55 14 00 98, 55 12 27 23 ou 55 93 70 73.

www.geo.uib.no

## Utilisation des données

- Informations générales au public concernant les tremblements de terre ou autres évènements.
- Exemples d'autres évènements: explosions, navires qui touchent le fond (Rocknes), accidents (échouage de la plateforme Sleipner) ou tremblements de terre provoqué (Ekofisk).
- Préventions de risques: les données de NNSN ont été très importants pour calculer les risques sismiques pour les installations offshore.
- Recherche.

## L'accident du Rocknes



En relation avec l'accident du Rocknes le 19 janvier 2004, les stations du RNSN autour de Bergen enregistrèrent un signal peu commun. Les sismogrammes montrent l'enregistrement de la plus grande secousse aux stations ASK, Askøy; BER, Université de Bergen; EGD, Espesrend et RUND, Rundemannen. Le premier enregistrement est à 15 h 32 mn 10 sec GMT (16h 32mn 10 sec heure locale). L'échelle du temps est en secondes.



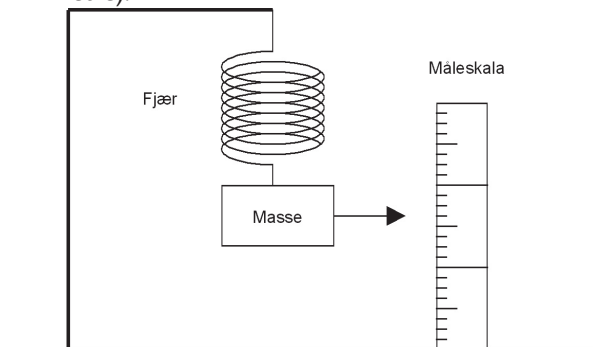
## Les instruments sismiques

Les instruments sismiques utilisés pour enregistrer les mouvements du sol causés par les tremblements de terre sont essentiels pour étudier la sismologie. Sans les instruments, nous aurions une connaissance très limitée des tremblements de terre et de l'intérieur de la terre. La partie suivante va décrire quelques instruments sismiques, certains exposés ici et aussi quelques autres.

### Comment fonctionne un sismomètre?

L'ensemble composé d'un sismomètre et d'une unité enregistrant le signal s'appelle un sismographe.

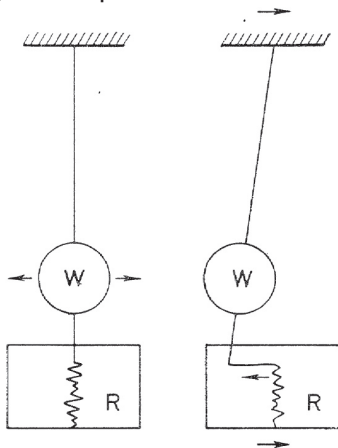
Le sismomètre sent les vibrations de la terre et les transforme en un signal qui peut être enregistré. Les sismographes modernes peuvent mesurer des mouvements de moins de un nm (un millionième de millimètre).



Comment cela fonctionne: Quand le sol bouge rapidement, la masse va rester immobile du à l'inertie et nous allons avoir une mesure sur l'échelle de droite. Ceci est le principe d'un sismographe mécanique. Le sismographe sur cette figure mesure les mouvements verticaux de la terre. Dans les sismographes plus récents, il y a une bobine électrique autour de la masse (qui est magnétique), de telle sorte qu'un signal électrique est produit quand la masse bouge.

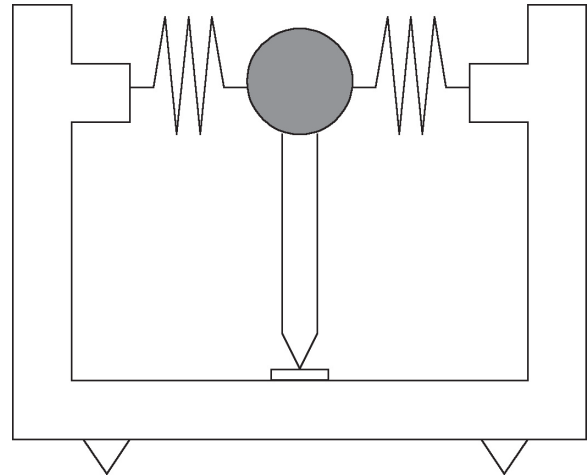
### Mouvement horizontal

Les tremblements de terre produisent à la fois des mouvements verticaux et horizontaux. Pour mesurer un mouvement horizontal, on doit avoir une masse qui puisse bouger sur le plan horizontal.

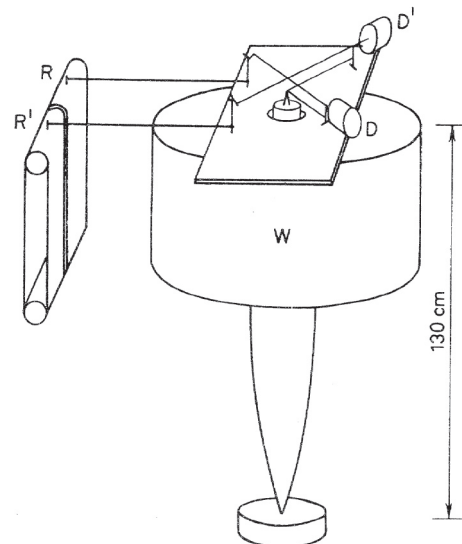


Un simple pendule horizontal. Quand le sol bouge vers la droite, le pendule va osciller vers la gauche et le mouvement du sol va être enregistré sur le papier qui se déroule. Le pendule peut osciller dans toutes les directions et doit être suspendu à un très long fil pour

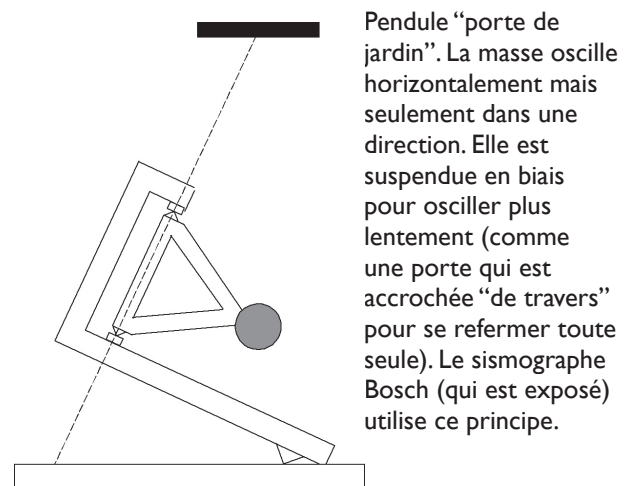
pouvoir osciller même avec des basses fréquences. Pour cette raison, on utilise un pendule "inversé" (voir les figures suivantes).



Pendule inversé. La masse peut osciller dans toutes les directions sur le plan horizontal. C'est le principe du sismographe de Wiechert utilisé à Bergen entre 1921 et 1968, voir la figure suivante.

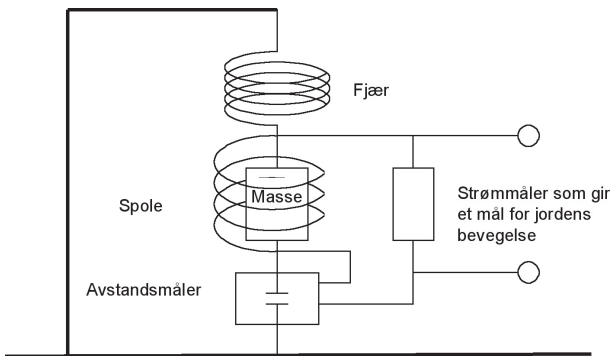


Le sismographe de Wiechert. Le mouvement horizontal de la masse est saisi par deux bras qui, à l'aide d'un système de leviers, peut amplifier le mouvement et l'enregistrer sur deux tambours rotatifs (R). Le sismographe peut enregistrer des mouvements horizontaux nord-sud et est-ouest en même temps.

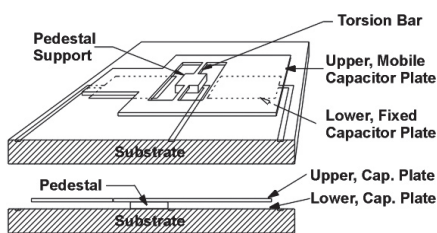


Pendule "porte de jardin". La masse oscille horizontalement mais seulement dans une direction. Elle est suspendue en biais pour osciller plus lentement (comme une porte qui est accrochée "de travers" pour se refermer toute seule). Le sismographe Bosch (qui est exposé) utilise ce principe.

## Les capteurs sismiques modernes



Dans les nouveaux capteurs sismique, la masse ne bouge pratiquement pas. La masse est accrochée à un ressort. Le mouvement à partir du point d'équilibre est mesuré à l'aide d'un appareil de mesure à distance. Dès que la masse entame un mouvement, l'appareil de mesure à distance envoie un courant électrique par la bobine. Ce courant va s'opposer au mouvement de telle sorte que la masse va rester immobile. Plus le mouvement est important plus le courant est fort, et la quantité de courant peut donc indiquer la mesure du mouvement du sol (ou plus exactement l'accélération du sol). De tels instruments peuvent être compacts et très sensibles; ils s'appellent des accéléromètres. On les utilise dans de nombreux domaines, par exemple pour déclencher les coussins d'air dans les voitures.



Accéléromètre sur un chip électronique. L'appareil à mesurer la distance est un condensateur, le ressort est une barre de torsion et la masse est la plaque supérieure du condensateur. La dimension du chip est de 2 mm sur 2 mm.

## Les fréquences mesurées

Les sismomètres mesurent des signaux d'une fréquence comprise entre 0.001 Hz et 100 Hz.

Il est relativement simple de fabriquer des sismomètres qui mesurent les hautes fréquences > 0.1 Hz (sismomètres à courte période)

Les sismomètres qui mesurent les basses fréquences (<0.1 Hz) sont plus difficiles à fabriquer (sismomètres à longue période)

Les sismomètres modernes (et coûteux) mesurent à la fois les basses et les hautes fréquences (sismomètres à large bande). Leur technique est basée sur le principe des accéléromètres.

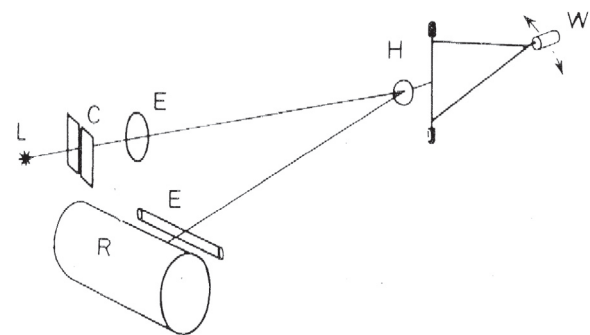
## Les enregistrements de signaux sismiques

Le capteur sismique produit un signal. Sur les sismographes plus anciens, ceci était enregistré mécaniquement. Tous les capteurs modernes envoient un signal électrique qui peut être enregistré de différentes manières. Un enregistrement sur papier, habituellement d'une durée de 24 heures, est appelé un sismogramme.

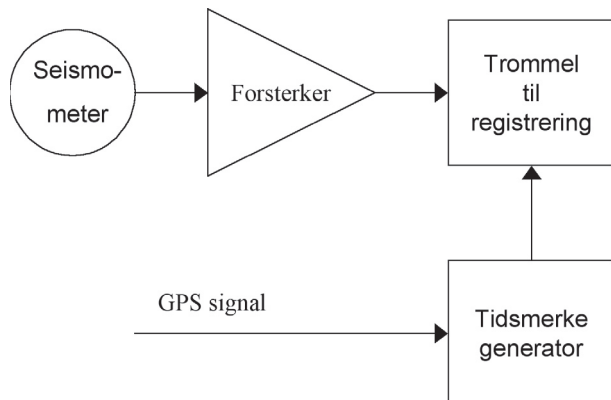
**Optique.** le signal électrique est envoyé à un galvanomètre avec un miroir. Un faisceau lumineux est réfléchi par le miroir et enregistré sur un tambour rotatif équipé d'un papier sensible à la lumière. Ce système a été employé à partir du début du vingtième siècle et abandonné assez récemment.

**Enregistrement par stylo.** Au lieu d'un faisceau lumineux, on utilise un stylo électrique qui enregistre également sur du papier sur un tambour rotatif. Le stylo peut enregistrer avec de l'encre, rayer sur un papier noirci à la fumée ou dégager de la chaleur et marquer un papier sensible à la chaleur.

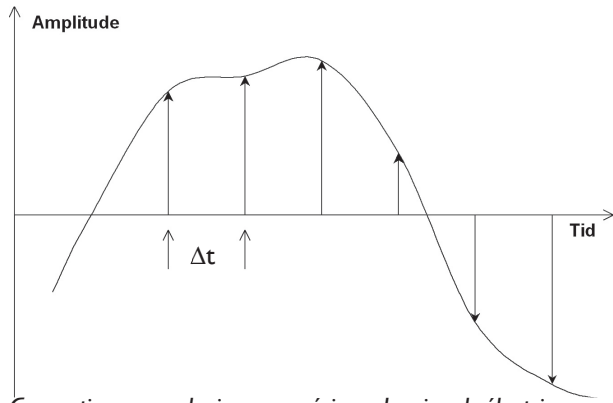
**Enregistrement numérique.** Presque tous les sismographes emploient aujourd'hui l'enregistrement numérique. Le signal électrique est transformé en un signal numérique et enregistré par un ordinateur.



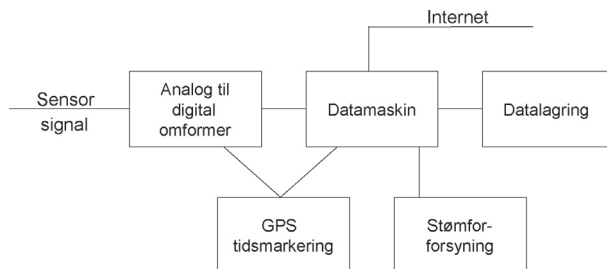
Enregistrement optique. Le signal électrique est envoyé à un galvanomètre avec un miroir (h). Un faisceau lumineux (l) est réfléchi par le miroir (h) et enregistré sur un tambour équipé d'un papier optique (r). Devant le tambour, il y a un objectif optique qui focalise le faisceau.



Enregistrement par stylo des signaux sismiques. Le signal du sismomètre est amplifié et envoyé à un tambour enregistreur. Le signal horaire d'un récepteur GPS (système de positionnement global) est employé pour produire des pulsions de minute et d'heure enregistrées en même temps que le signal. Avant que les signaux horaires soient disponibles par radio, les pulsions de temps étaient produites par une horloge mécanique.

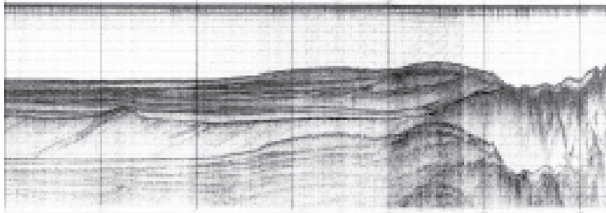


Convertisseur analogique numérique. Le signal électrique reçu est continu, en d'autres termes nous connaissons la dimension (amplitude) du signal à tout moment. Le convertisseur analogique numérique (AD) mesure l'amplitude à intervalles réguliers ( $\Delta t$ ) et donne des valeurs numériques pour l'amplitude sous forme d'une séquence de nombres. Ceux-ci sont alors interprétés par l'ordinateur. Pour les signaux sismiques, les amplitudes sont habituellement interprétées 100 fois par seconde. Pour la musique numérique sur un CD, il y a environ 44 000 impressions par seconde.



Station sismique numérique. Le signal est envoyé au convertisseur analogique numérique ("Analog til digital omformer") qui convertit le signal en signal numérique. Ce signal numérique est transmis à un ordinateur (Datamaskin), où il est enregistré et emmagasiné ("Datalagring"). De là le signal est envoyé, par internet, à un centre de calcul central. "GPS tidsmarkering" veut dire avoir le temps exact par GPS et "Strømforsyning" la source d'énergie.





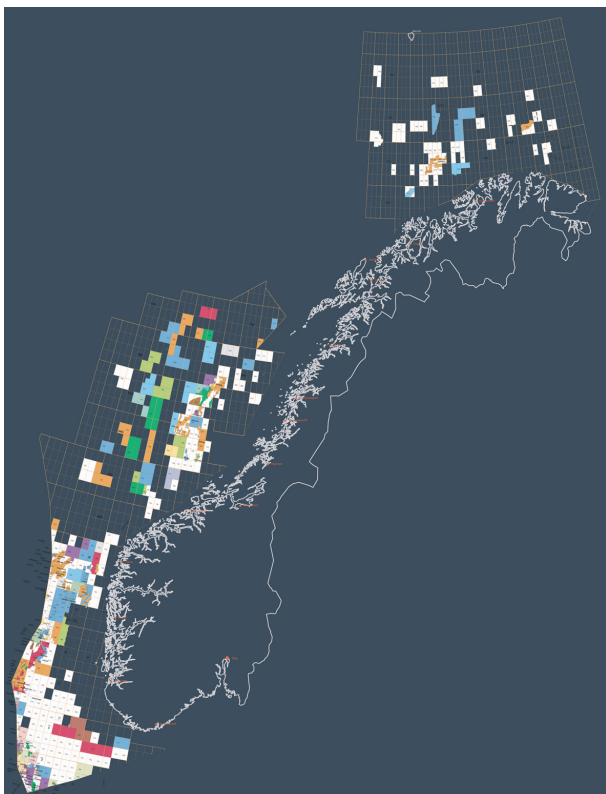
Un exemple d'une section sismique prise à partir d'une région à l'ouest de Bergen et jusqu'à Norskerennen. Les lignes sur cette section sismique indiquent les couches sous le fond marin.

On savait depuis longtemps que la partie sud de la Mer du Nord étaient couvertes par des roches sédimentaires. Mais de nombreux géologues croyaient qu'elles étaient seulement au sud, limitées par une ligne allant des Shetland au sud de la Norvège où de vieilles roches granitiques étaient exposées. Lorsque l'Observatoire de Sismologie démontra, à l'aide de recherches sismiques, que de massives couches sédimentaires (d'une épaisseur de plusieurs kilomètres) se trouvaient tout le long du socle continental y compris dans la Mer de Barents et autour de Svalbard (Spietsberg), la surprise fut grande parmi les spécialistes. Une des conséquences fut que les candidats formés par l'Observatoire de Sismologie devinrent convoités et occupèrent un rôle central dans l'établissement de l'industrie pétrolière au début des années 70.

pour compenser. En raison d'un défaut dans un puit, de l'eau a été pompée dans la couche de sol au dessus du reservoir. Le résultat fut un tremblement de terre "fait par l'homme" de magnitude 5 en mai 2000. Les enregistrements de NNSN ont été essentiels pour expliquer ce qui s'était passé.



*Le champ Ekofisk*



*Cette carte montre les champs pétroliers sur le socle continental norvégien. Les endroits colorés indiquent les champs exploités.*

La première découverte de pétrole sur le socle continental norvégien eut lieu à Ekofisk dans la Mer du Nord. C'était en 1969 et la production commença en 1971. Le champ pétrolifère d'Ekofisk s'enfonce depuis plusieurs années à cause de l'exploitation du pétrole, et de l'eau est pompée dans le réservoir





