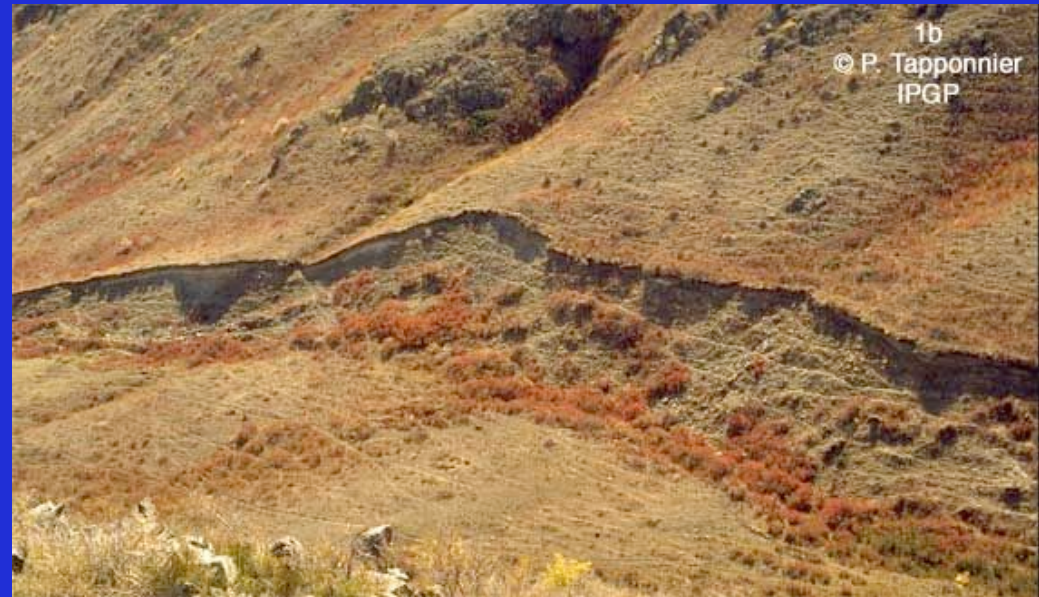
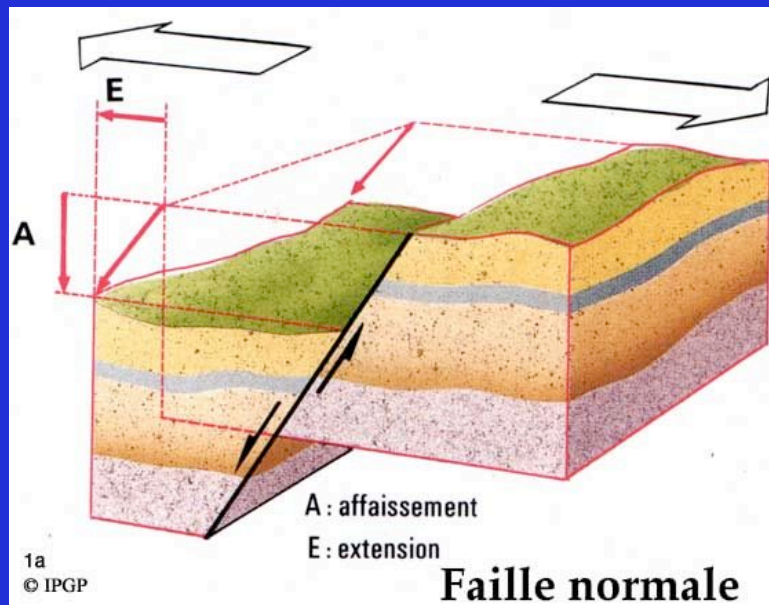

- Sismologie

- La source sismique (failles, mais aussi explosions)

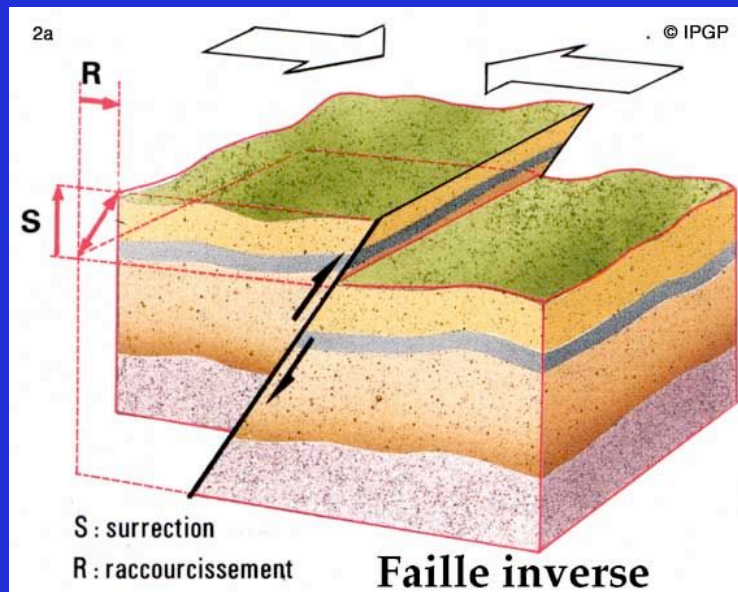
- Quelques notions de propagations

- La sismologie pour voir l'intérieur de la Terre

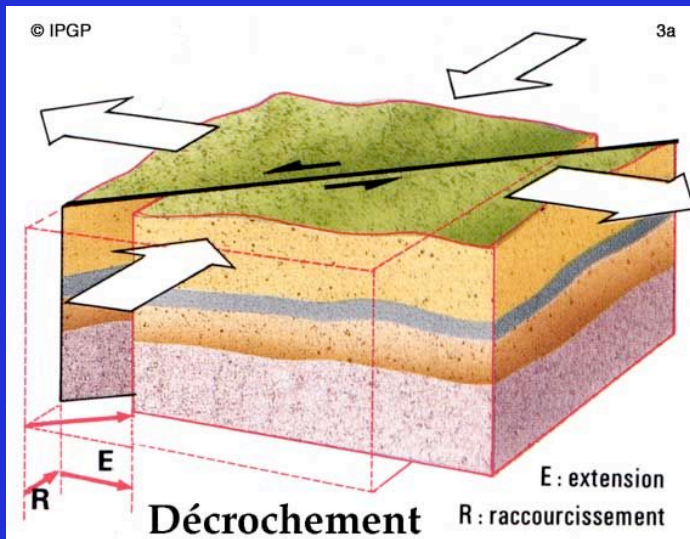
- La sismologie au delà de la Terre



- La composante horizontale du glissement correspond à un écartement (figure 1a) qui s'accompagne de l'affaissement d'un des blocs par rapport à l'autre.
- Ces failles se rencontrent dans les régions étirées et amincies comme les dorsales médio-océaniques et les rifts continentaux.

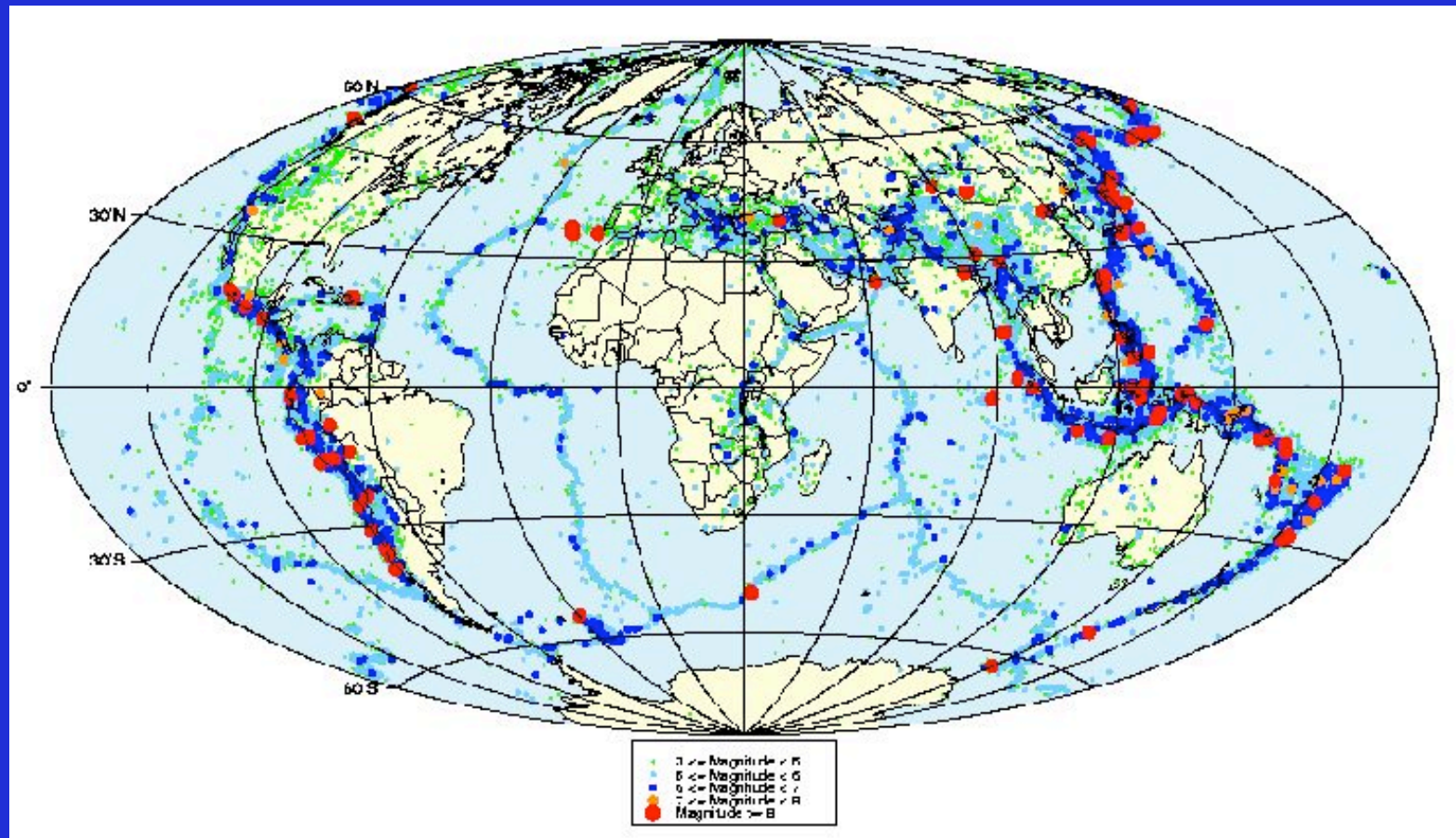


- La composante horizontale du glissement correspond cette fois à un rapprochement (R, figure 2a) qui s'accompagne du chevauchement d'un des blocs sur l'autre.
- Ces failles se rencontrent dans les régions raccourcies et épaissies comme au front des chaînes de montagne.



- Le troisième type de faille correspond à un plan vertical sur lequel se produit un glissement horizontal. Ces failles que l'on appelle décrochements ne créent généralement pas de reliefs car les déplacements se font parallèlement à la surface de la terre. Pour un observateur arbitrairement placé sur l'un des blocs, on parle de décrochement dextre lorsque le bloc auquel il fait face, se déplace vers sa droite et de décrochement sénestre lorsqu'il se déplace vers sa gauche.

Sismicité de la Terre (entre 1928 et 2000)



Ms	8	7	6	5	4	3
Nombre par an	1-2	20	100	1500	7500	>100000

-
- Magnitude des ondes de surface MS :
 - elle est utilisée pour les séismes lointains, dits télé-séismes, dont la profondeur est inférieure à 80 km. Elle se calcule à partir de l'amplitude des ondes de surface.
 - Magnitude des ondes de volume MB :

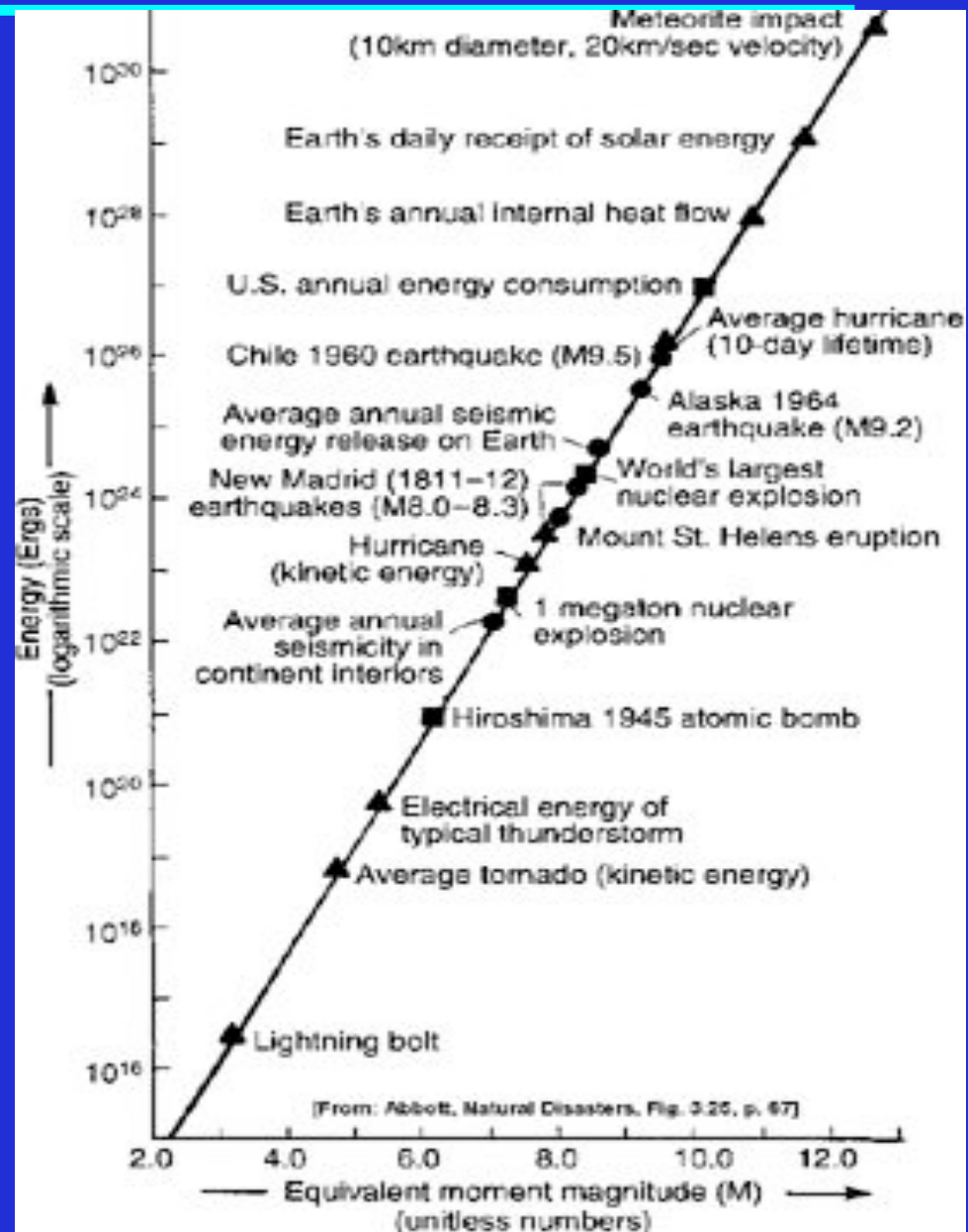
cette magnitude est définie pour tous les télé-séismes et en particulier pour les séismes profonds, car ceux-ci génèrent difficilement des ondes de surface. Elle est calculée à partir de l'amplitude de l'onde P qui arrive au début du sismogramme.
 - Magnitude d'énergie ou de Kanamori MW :

elle est définie pour les très gros séismes. Elle est calculée à partir d'un modèle physique de source sismique et est reliée au moment sismique m_0 :

$$m_0 = \mu SD$$

Avec μ : rigidité du milieu, S: Déplacement moyen sur la faille, D: Surface de la faille

- Energie (1 erg = 10⁻⁷ J)
- $4.65 + 3/2 M_w = \log E$



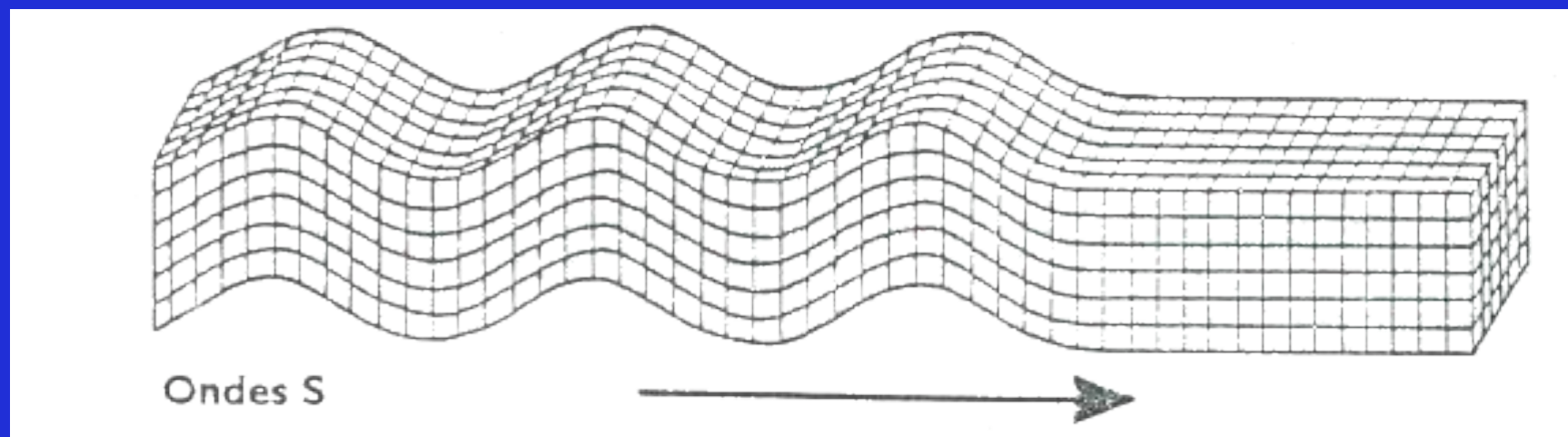
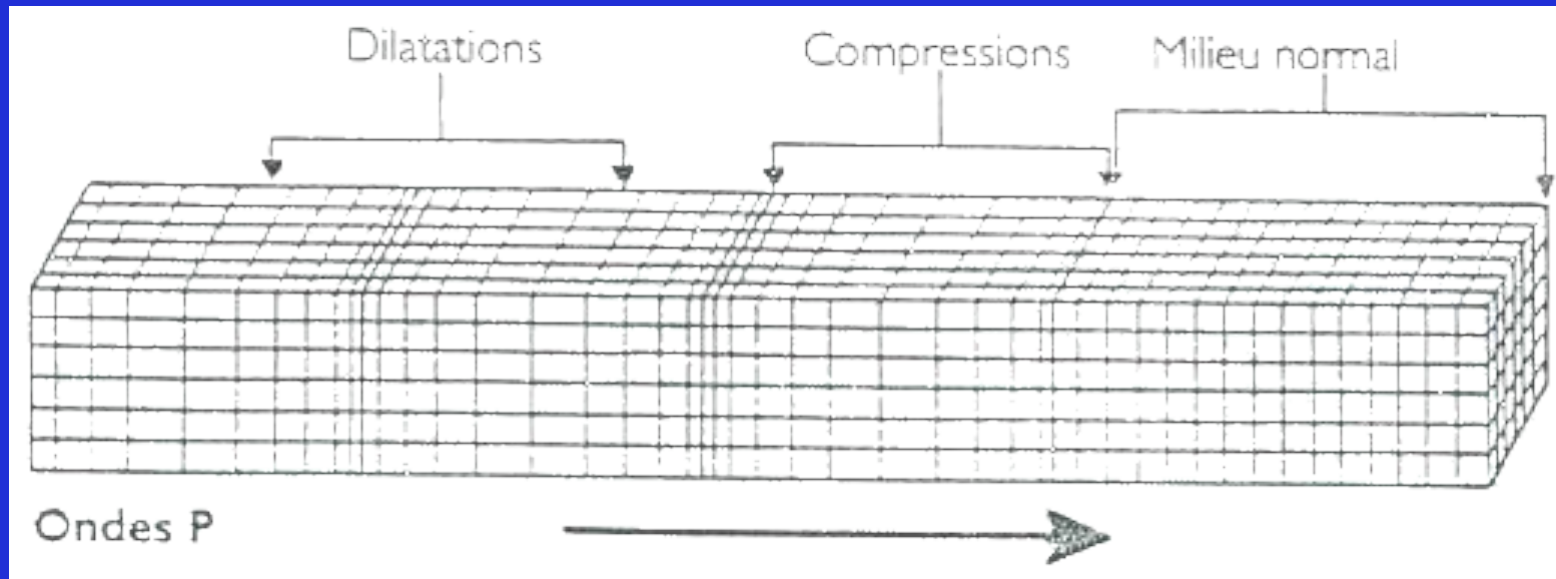
Quelques ordres de grandeur

Magnitude Mw	Surface de la faille (km ²)	Dimension typiques de la rupture (km)
4	1	1x1
5	10	3x3
6	100	10x10
7	1000	30x30
8	10 000	50x200

- Le déplacement de la rupture est typiquement 1/20000 de la longueur de faille
- La vitesse de rupture est typiquement de 3 km/s

Les différentes ondes

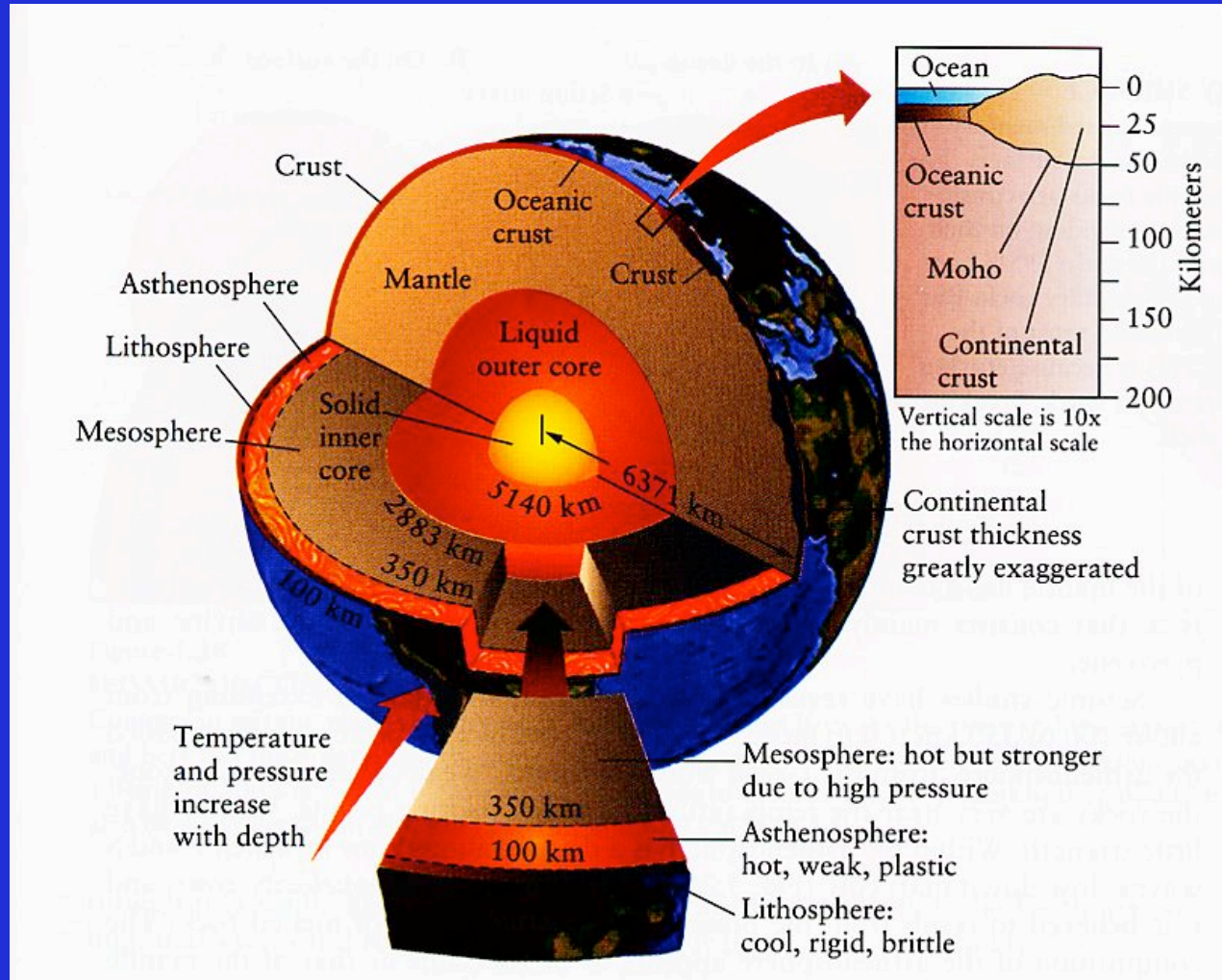
Ondes de volume

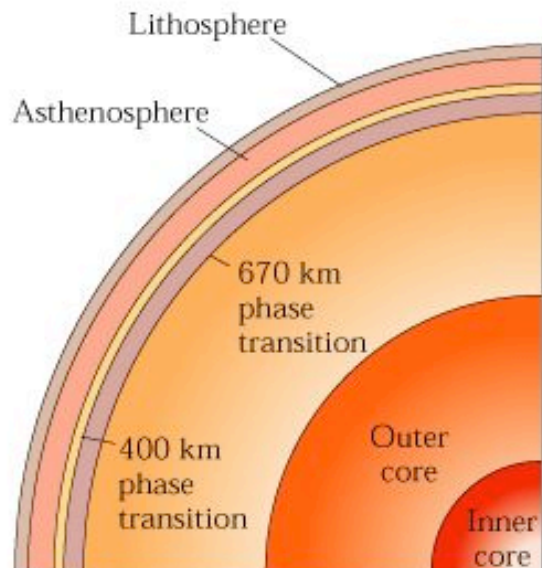


Quelques notions de sismologie

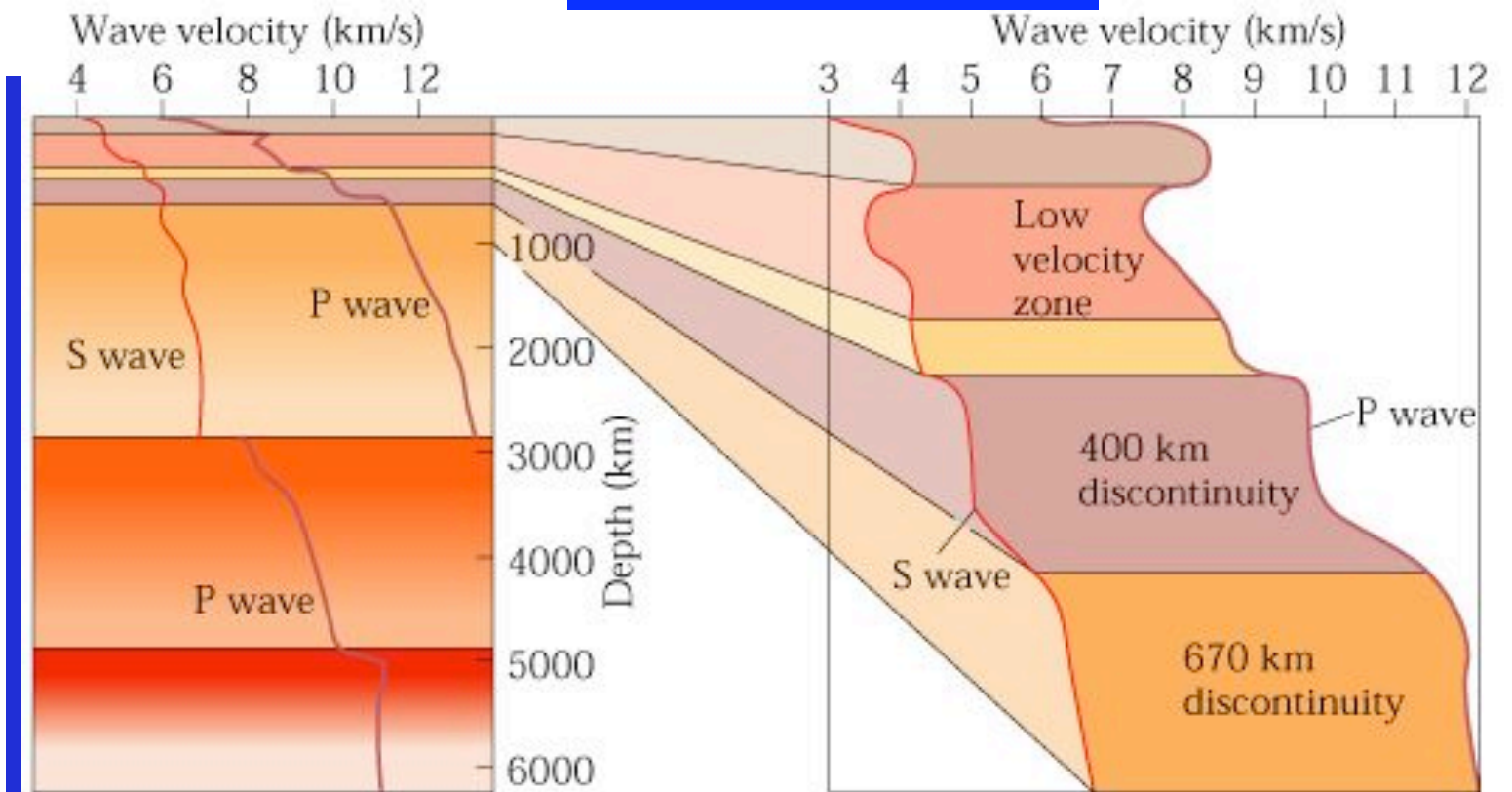
- Equation de propagation
- Relations de Descarte
- Conversion des ondes
- Zone d'ombre

Rappels: intérieur de la Terre

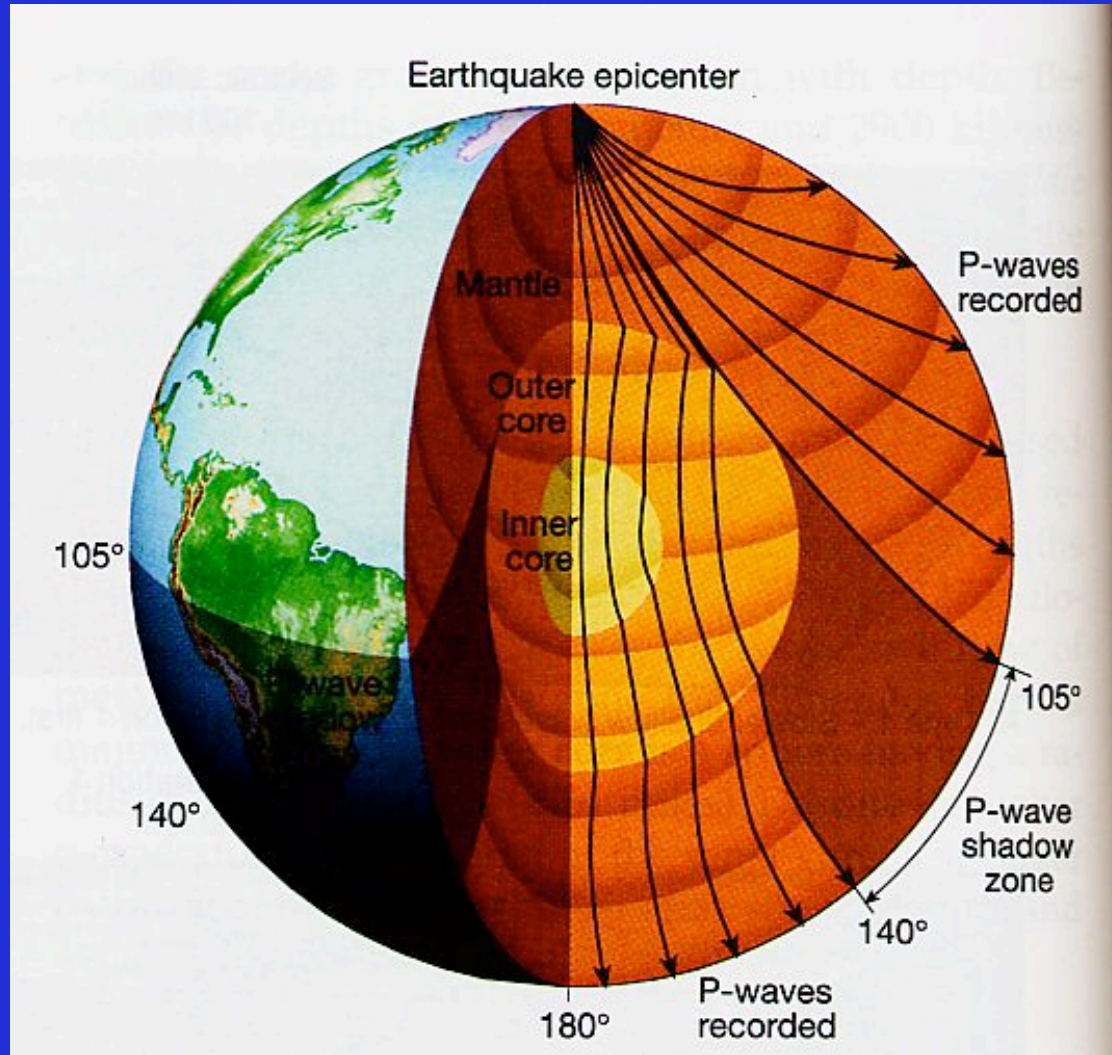




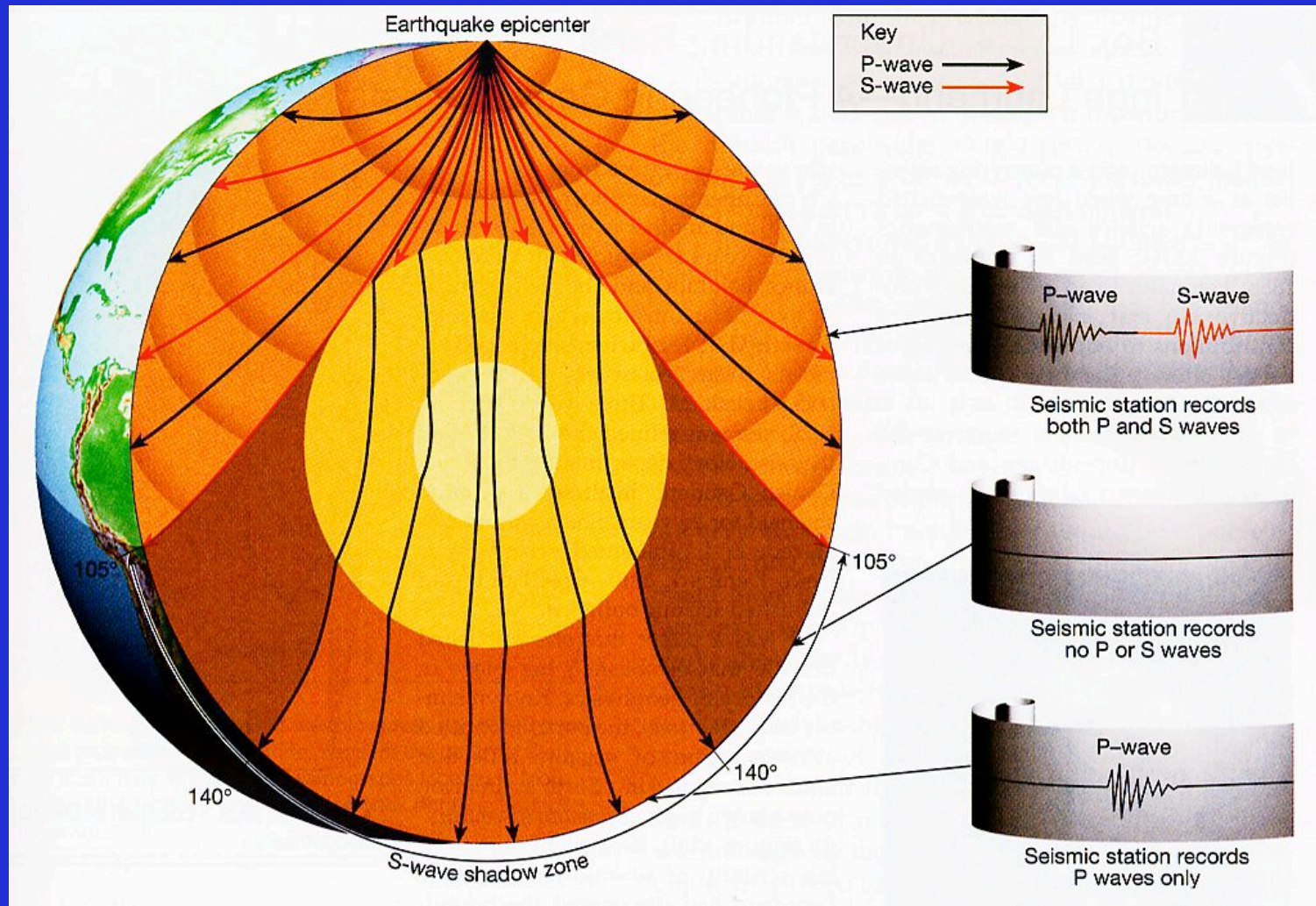
Variations avec la profondeur (en général, accroissement, sauf dans la zone à faible vitesse et entre le manteau et le noyau)
 Discontinuités associées à des sauts de vitesse



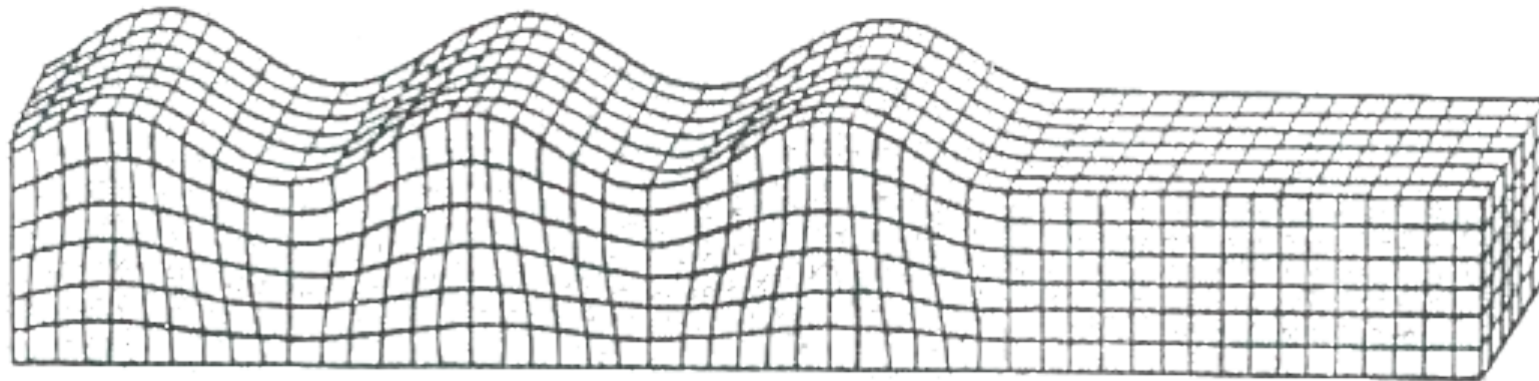
Zone d'ombre – Ondes P



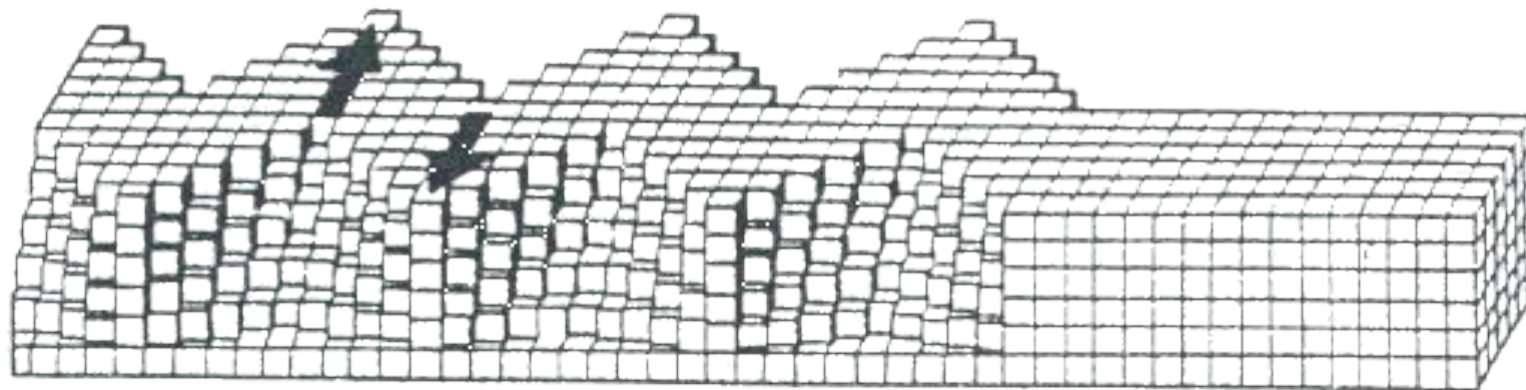
Zone d'ombre ondes S



Ondes de surfaces



Ondes de Rayleigh



Ondes de Love

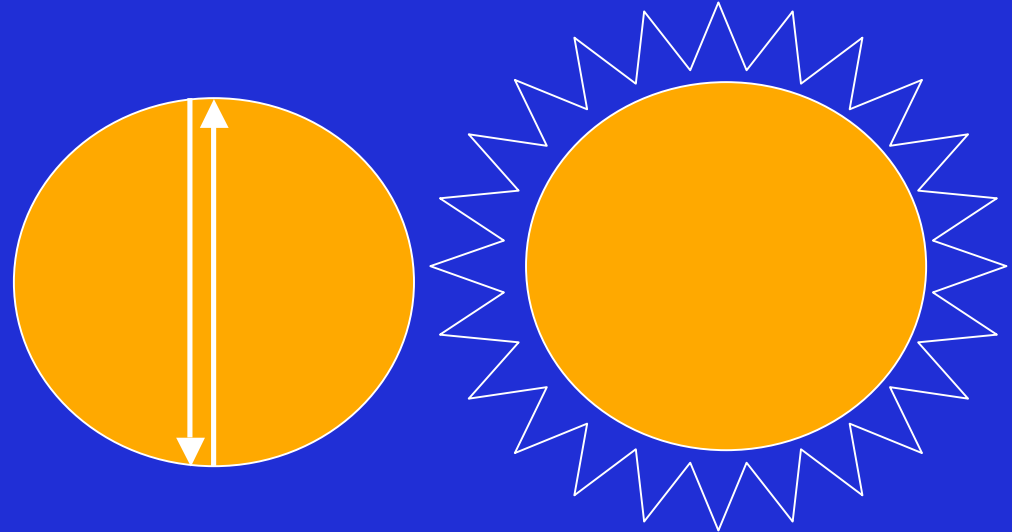


Exemple a 1 dimension

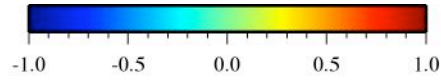
- Les modes propres sont pour la plupart associés à des ondes de surface ou des ondes de volumes
- Pour être créés, une interférence constructive doit se faire après un tour de Terre

$$2\pi r = ncT$$

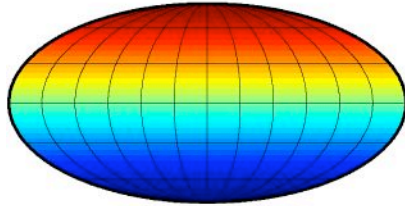
$$f = \frac{1}{T} = n \frac{c}{2\pi r}$$



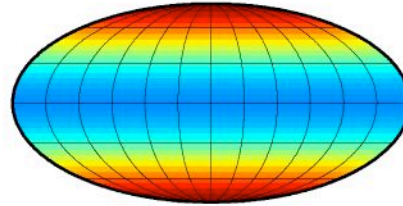
- Pour $c = 4\text{km/s}$, on trouve $f = n * 0.1 \text{ mHz}$



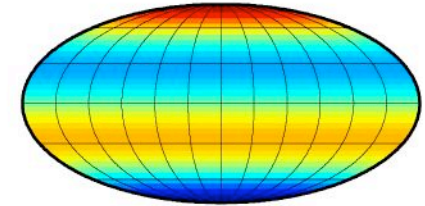
$l=1, m=0$



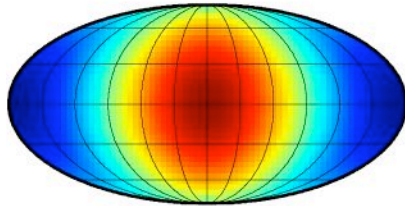
$l=2, m=0$



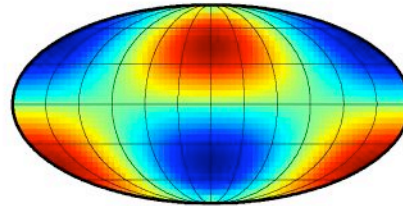
$l=3, m=0$



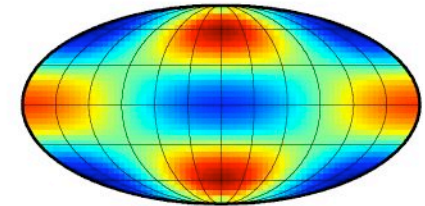
$l=1, m=1$



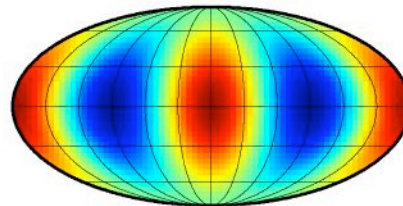
$l=2, m=1$



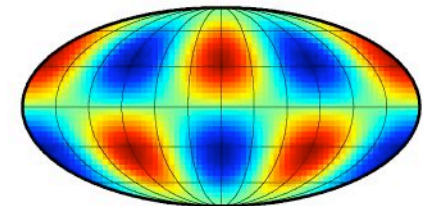
$l=3, m=1$



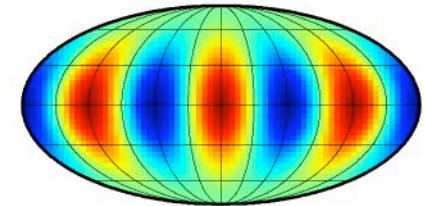
$l=2, m=2$



$l=3, m=2$

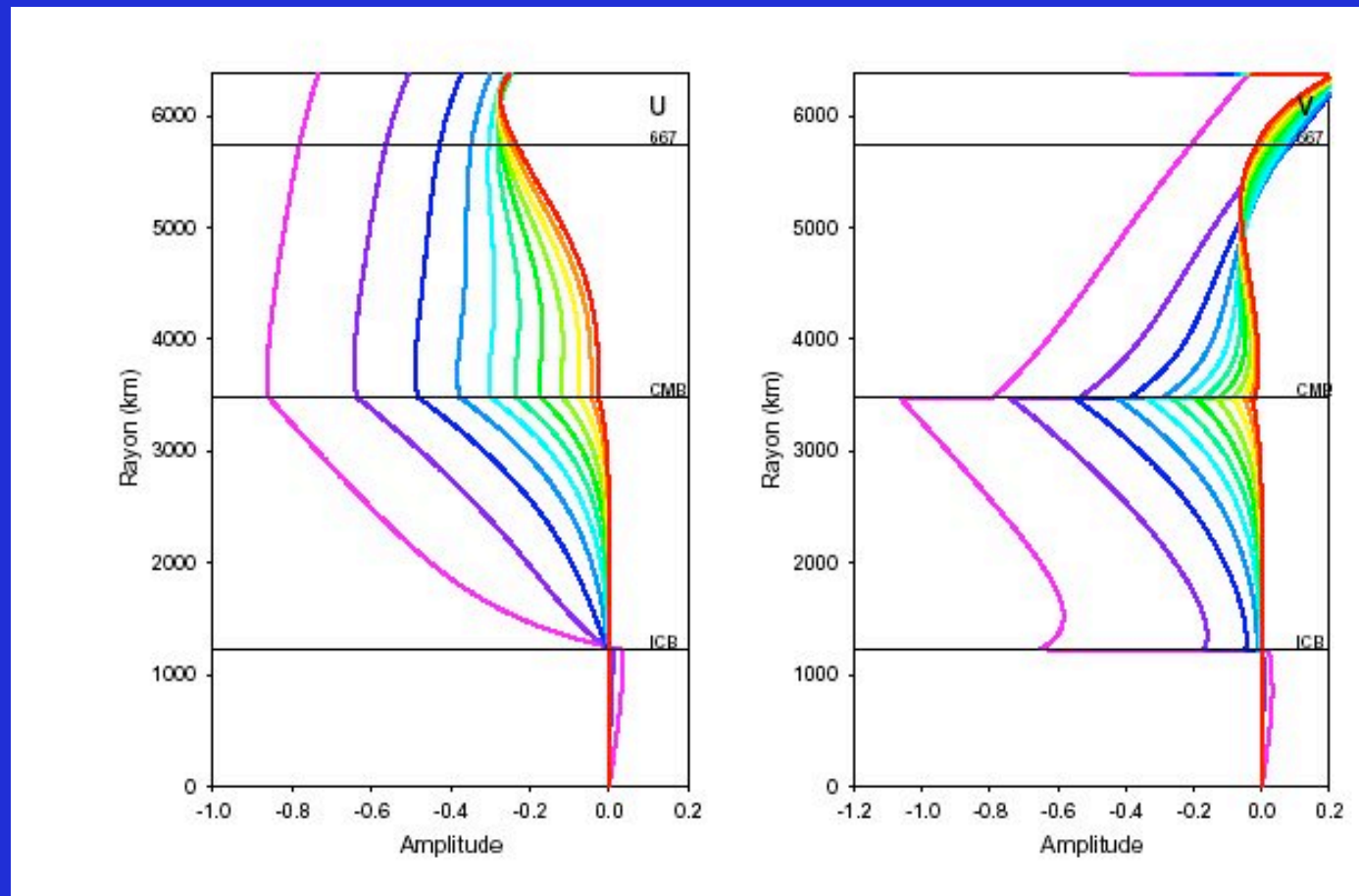


$l=3, m=3$



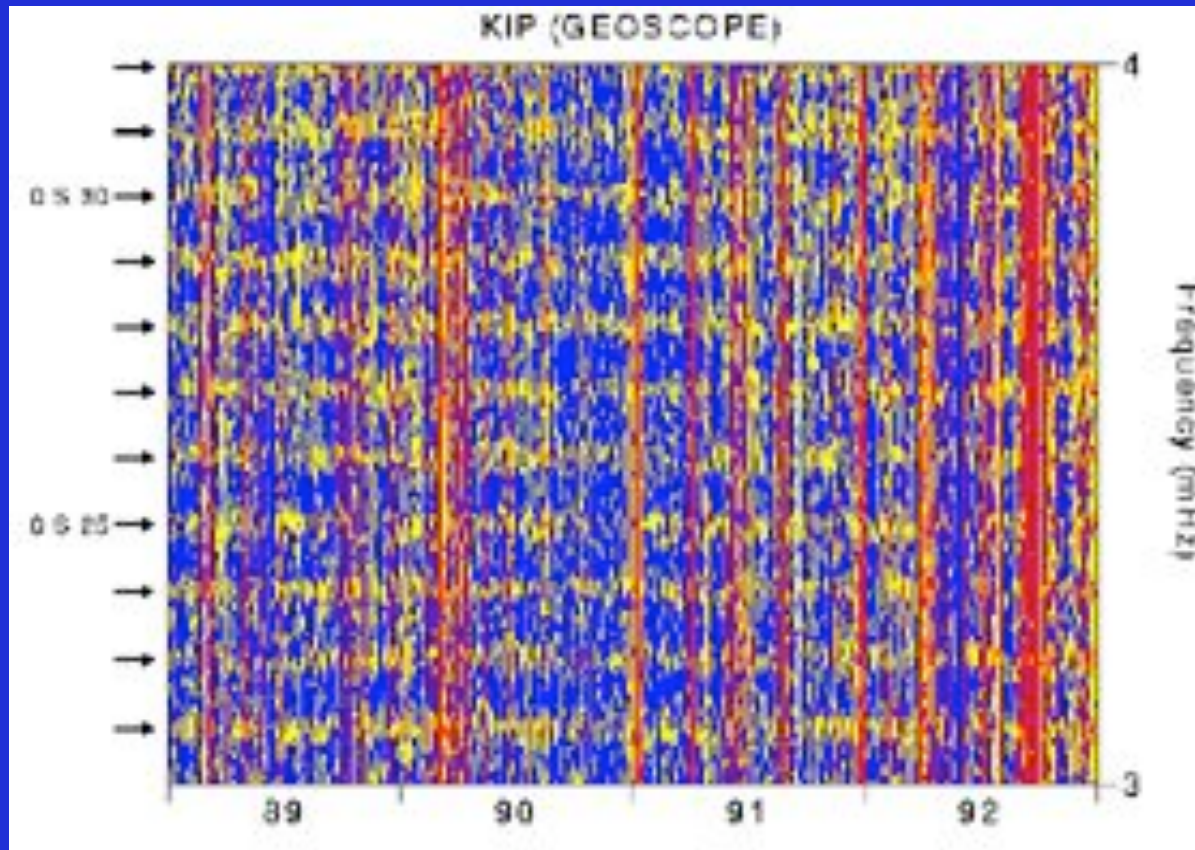
A deux dimensions, les oscillations se font sur toute la sphère

- En général, plus les modes propres associés aux ondes de surface ont des fréquences élevées, plus leur énergie est localisée au près de la surface



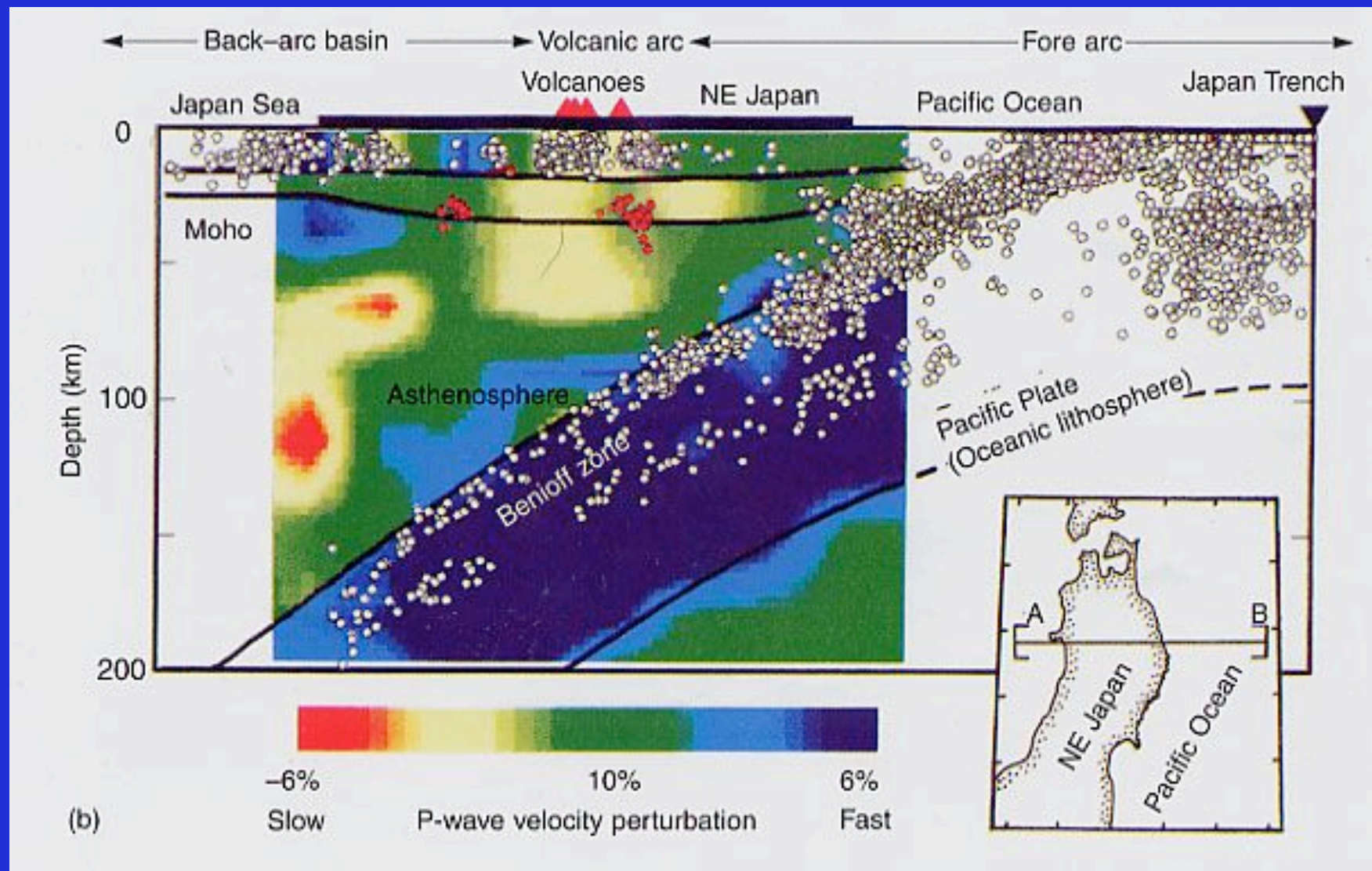
L'excitation continue des modes propres

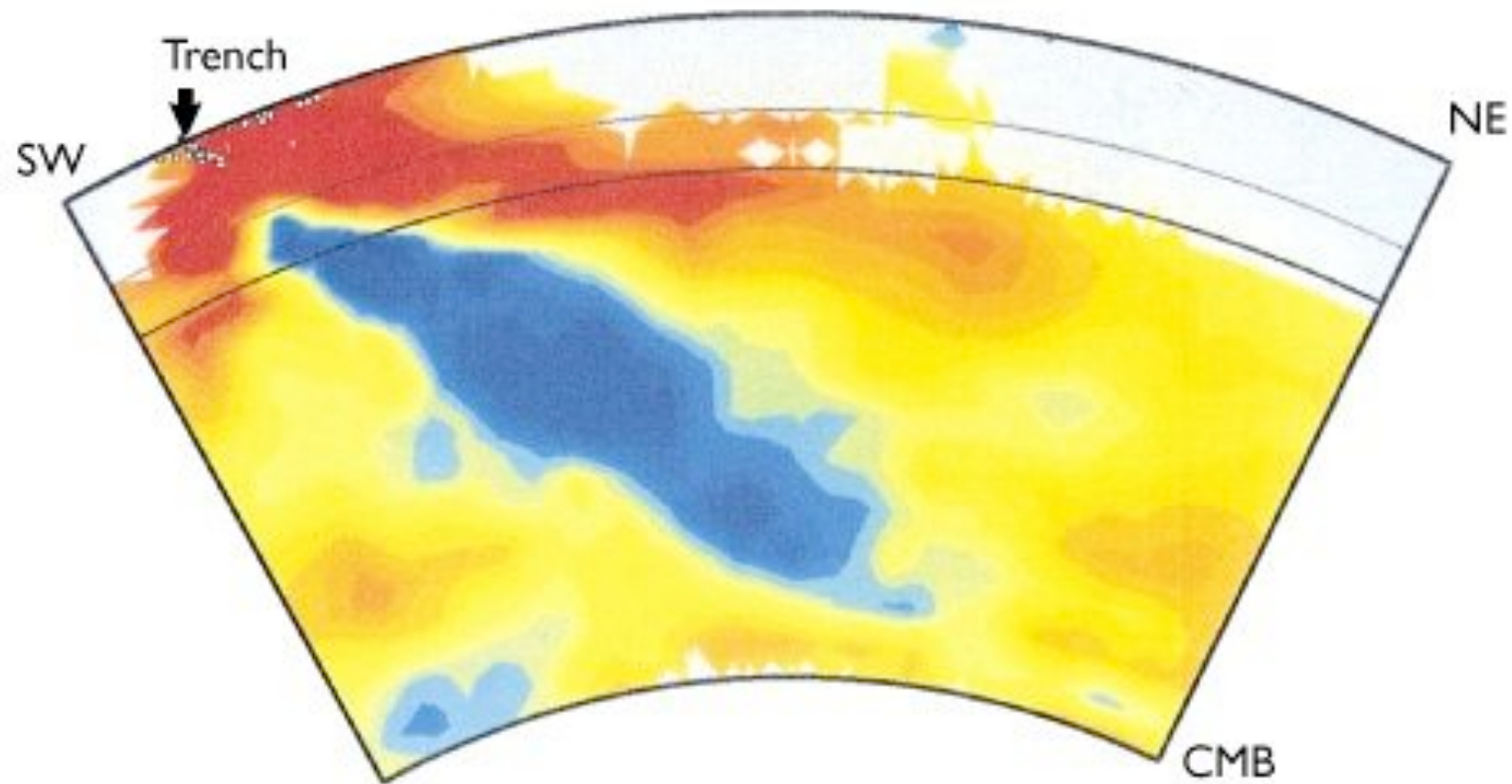
Les modes propres sont aussi excités en permanence par les turbulences de l'atmosphère et les vagues des océans. L'amplitude de ces signaux est très faible ($< 10^{-11} \text{ ms}^{-2}$).






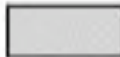
Exemple d'excitation continue à la station Géoscope KIP Geoscope station (Tanimoto 1998)

Tomographic image of the Japan Subduction Zone

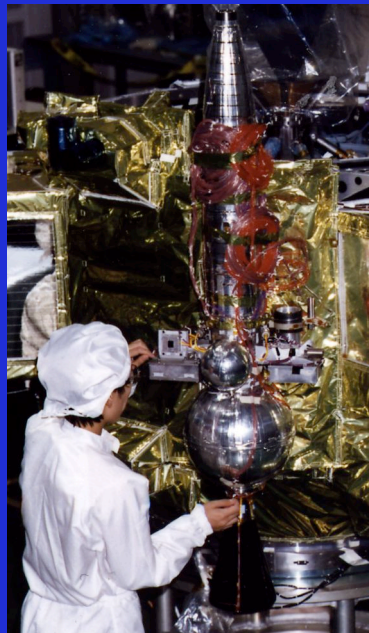
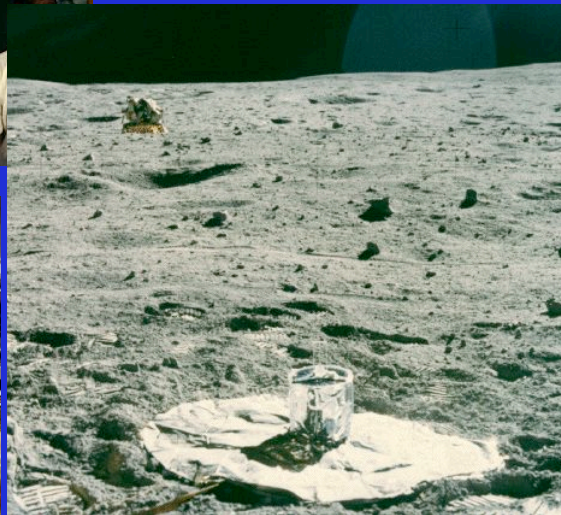
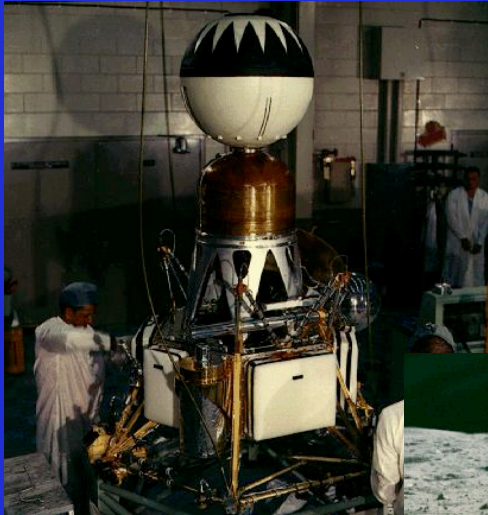




Seismic tomography records variations in P-wave velocity, which correlate with the temperatures of matter in Earth's interior.

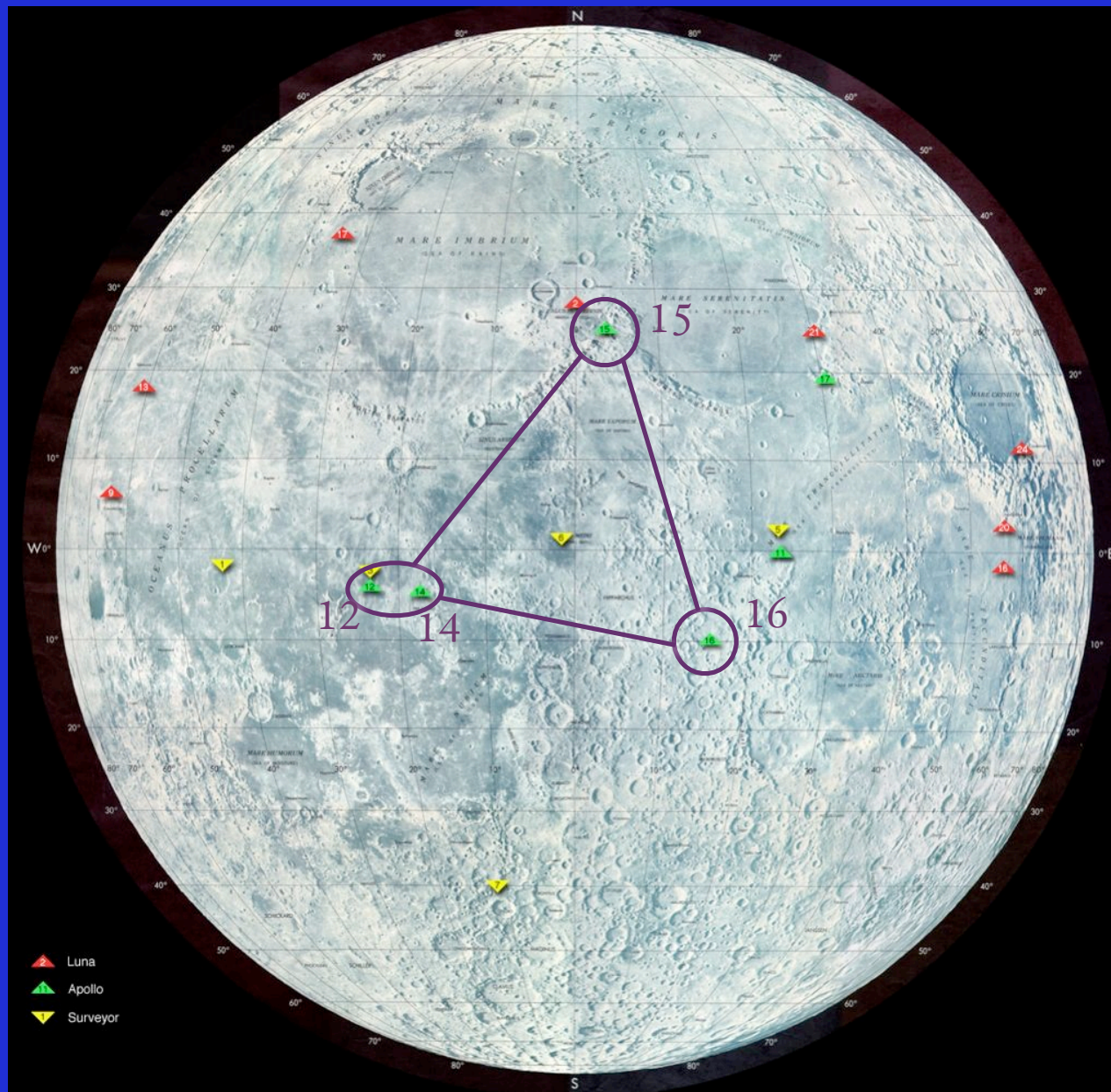
-  Slower P waves, indicating warmer-than-average matter
-  Average-speed P waves, indicating average-temperature matter
-  Faster P waves, indicating cooler-than-average matter
-  No data

Seismologie de la Lune: histoire



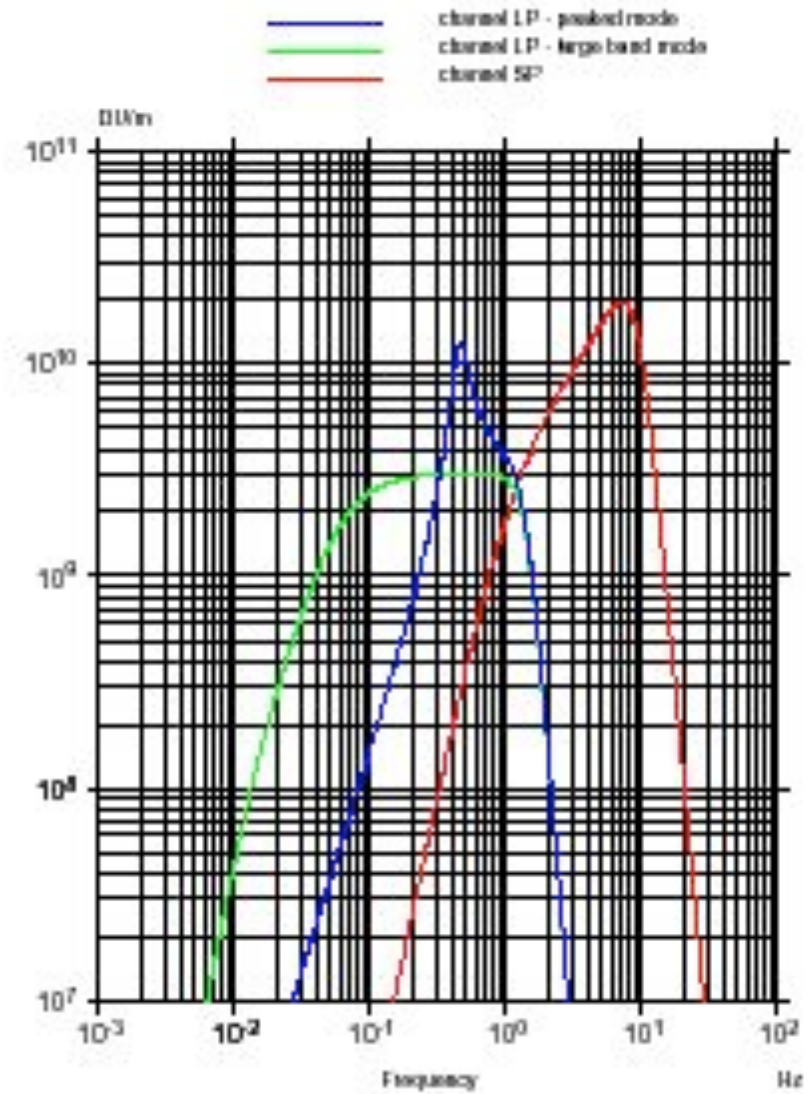
- 1961-1962: Perte de Rangers 3-5 tous équipés des sismomètres
- 1969-1973: Succès et installation d'un réseau de 4 stations fonctionnant jusqu'en 1977
- 2005-6?: Lancement de deux pénétrateurs?

Réseau sismique Apollo



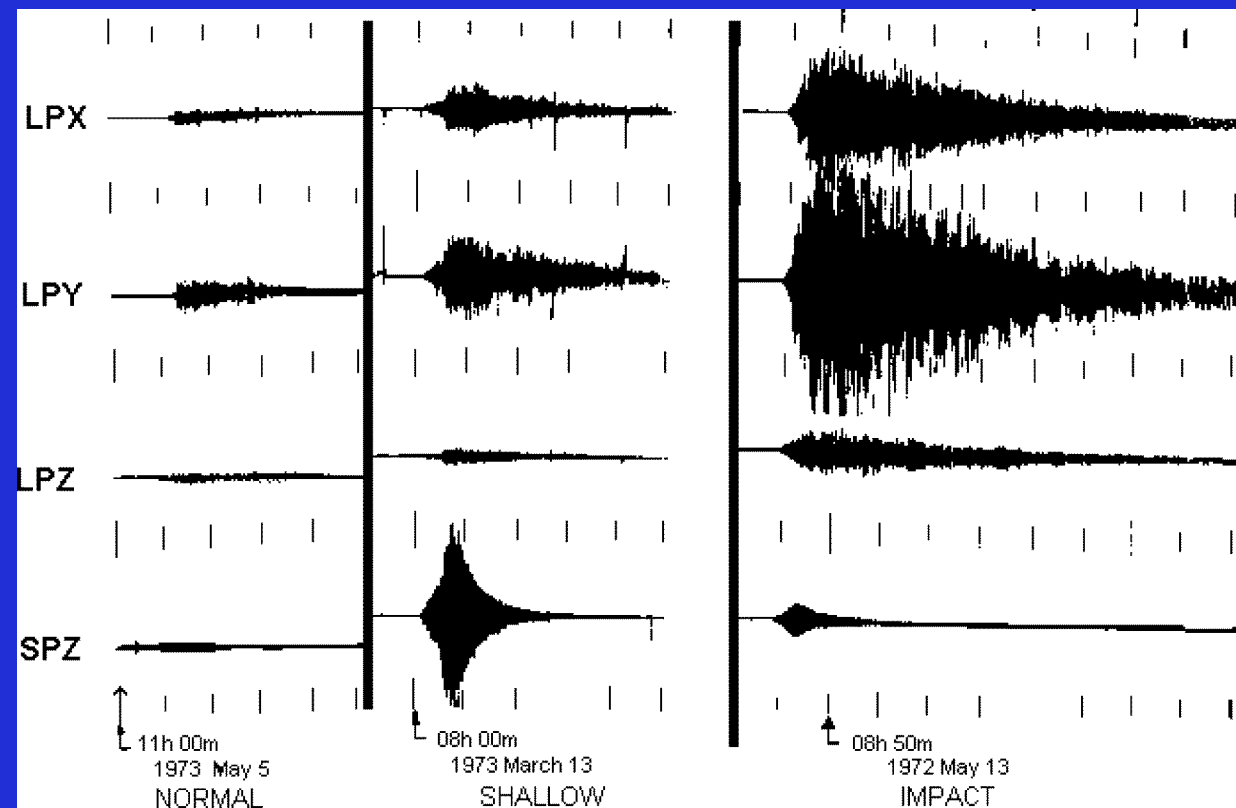
- 4 stations: Apollo 12, 14, 15 et 16
- Installées entre 1969 et 1972
- Arrêtées en 1977

sensitivity

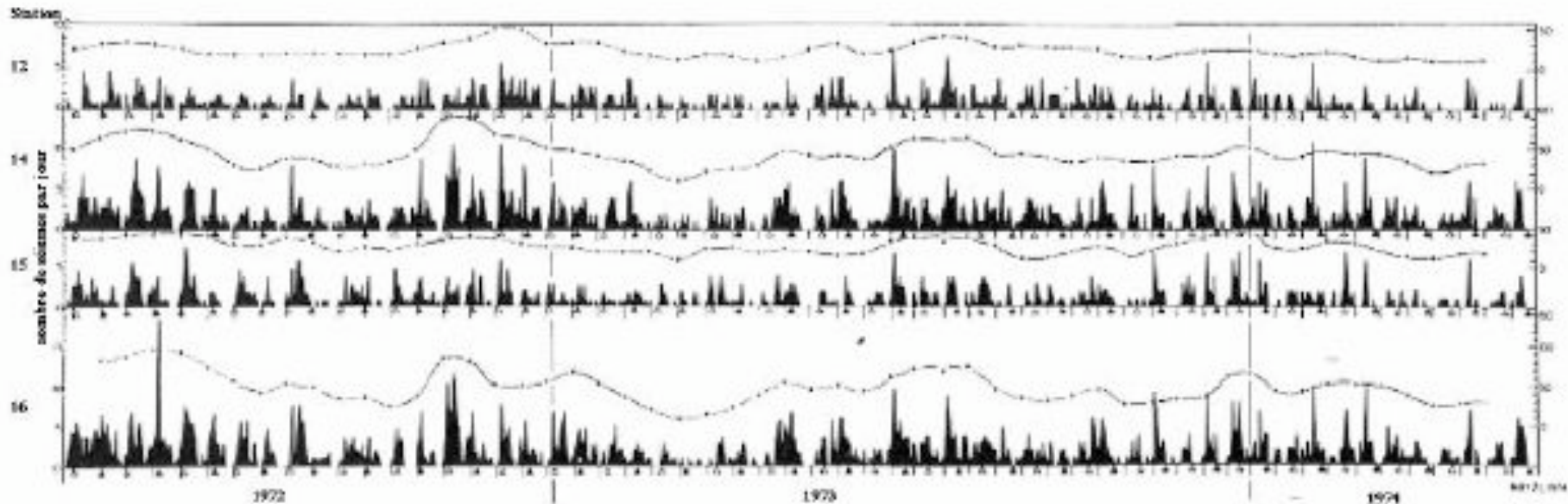


Moonquakes

- deep moonquakes
 - 700-1000 km depth, near just at the bottom of the elastic lithosphere of the Moon
 - Very small magnitudes quakes
 - Origin: accumulation of stress related to the thermoelastic cooling of the planet triggered by the Earth tide
 - Several faults identified where quakes occur repeatedly
- superficial moonquakes
- meteoroid & artificial impacts

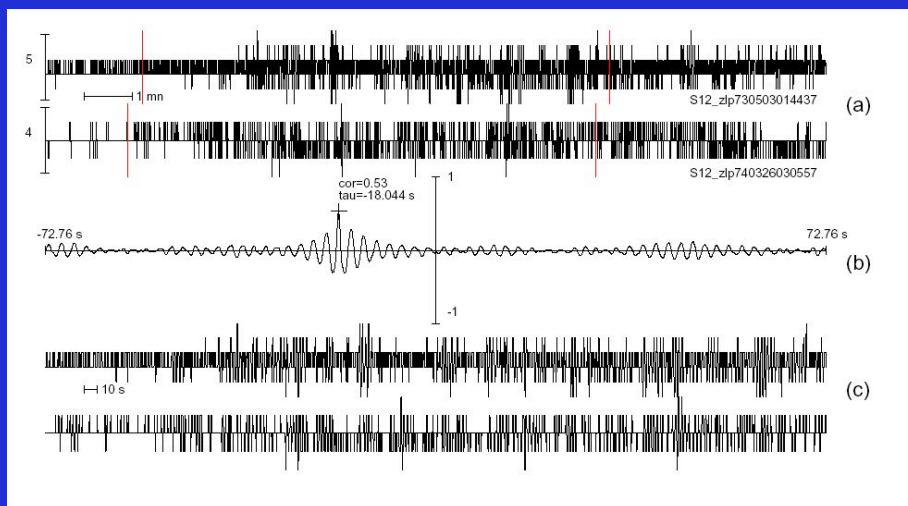


Deep moonquakes

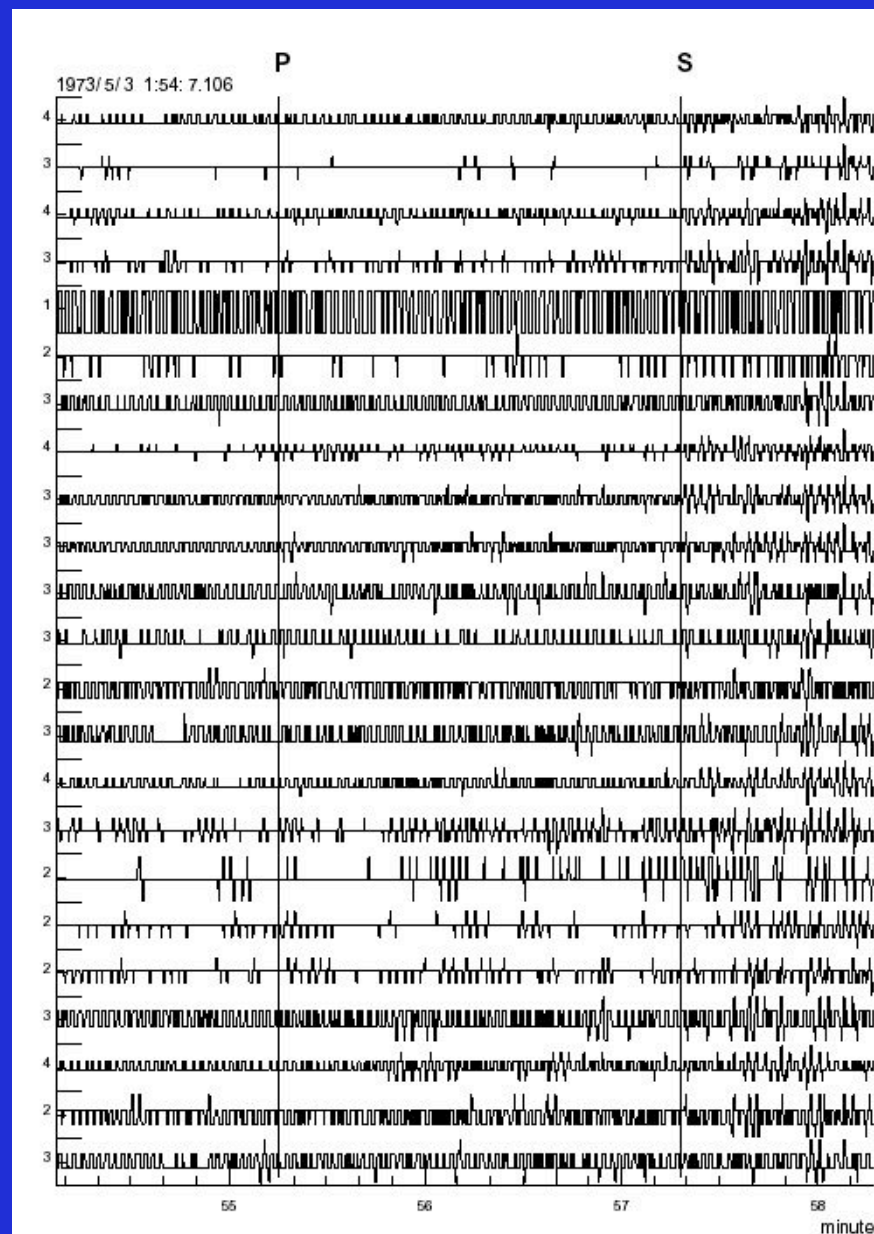


- Number and amplitude of quakes is related to the amplitude of tide
- About 50 active faults detected
- Quakes occur at the same fault regularly but with very low amplitudes, with ground displacement of a few Angströms at 2 sec ($0.5 \cdot 10^{-9} \text{ ms}^{-2}$ of ground acceleration)

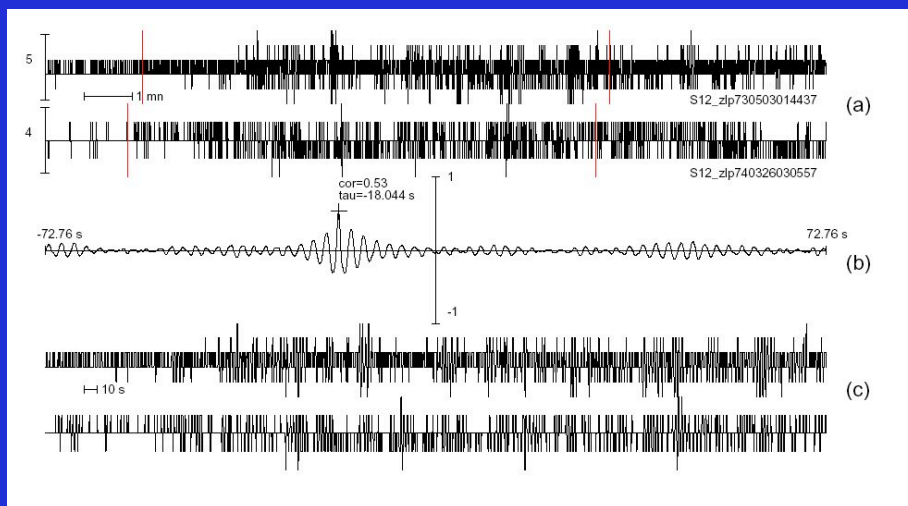
Deep Moonquake



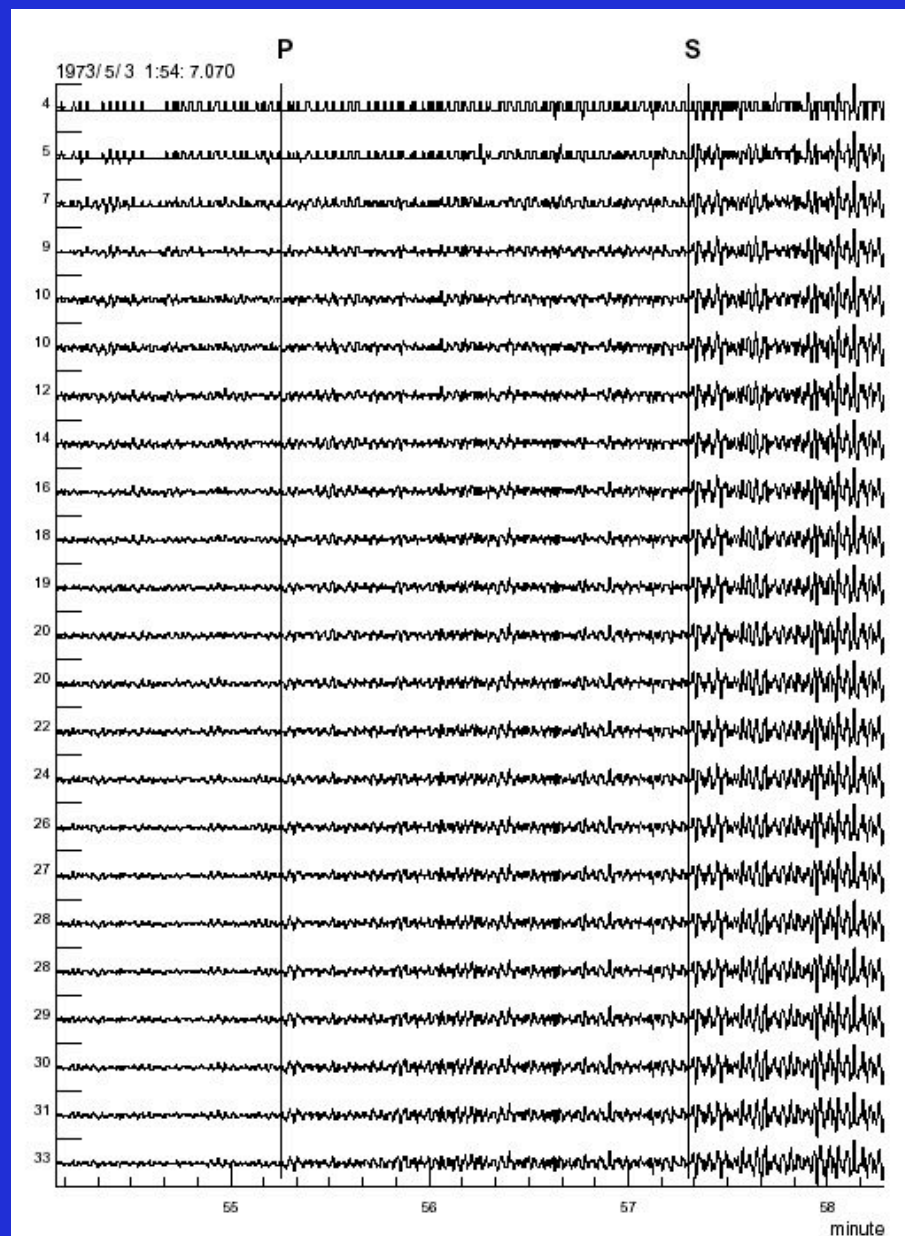
- example of two quakes from the same deep focus and their cross-correlation
- cross-correlation provides the time shift necessary to align the arrival times
- stacking can then be done



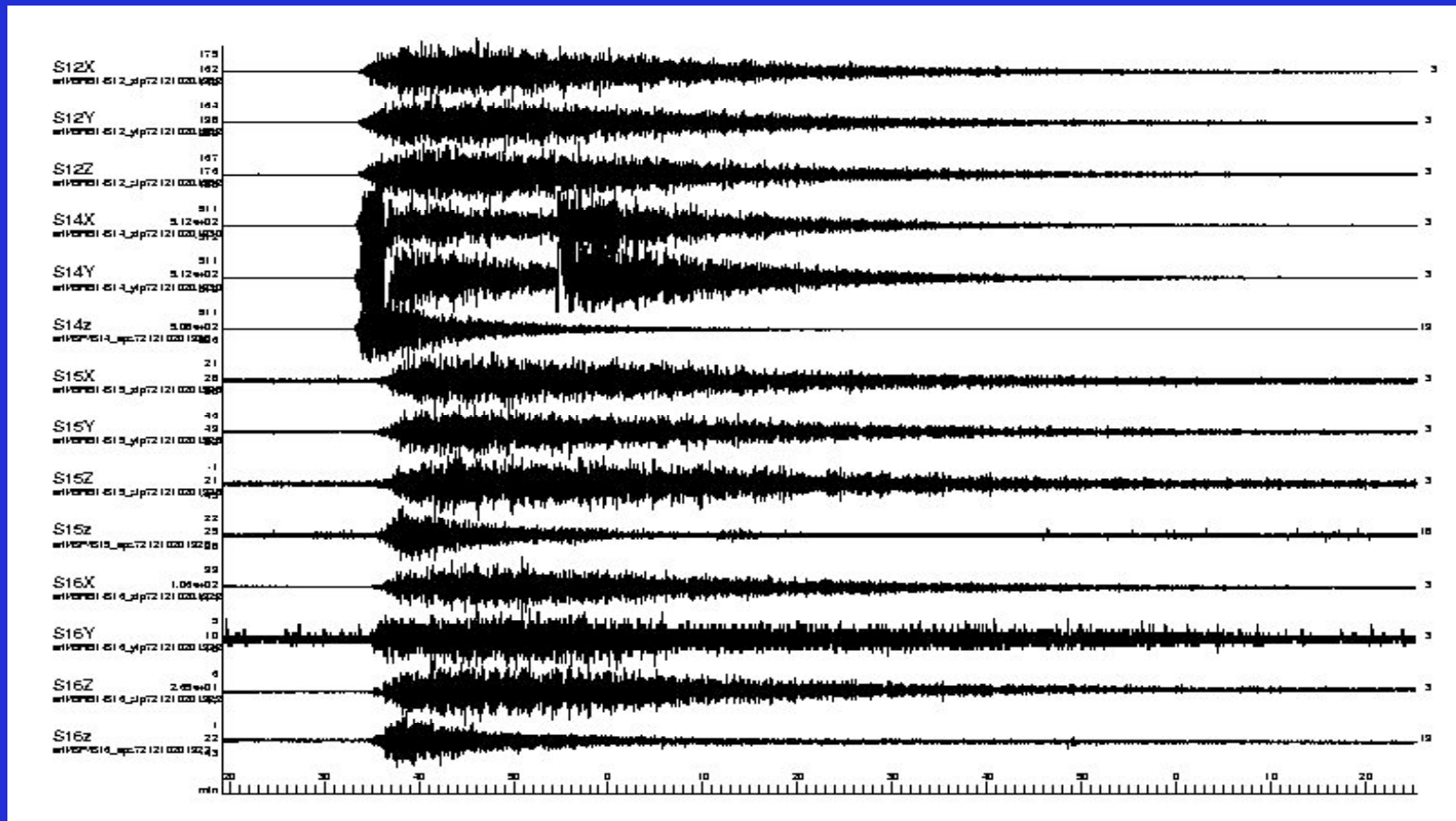
Deep Moonquake



- example of two quakes from the same deep focus and their cross-correlation
- cross-correlation provides the time shift necessary to align the arrival times
- stacking can then be done

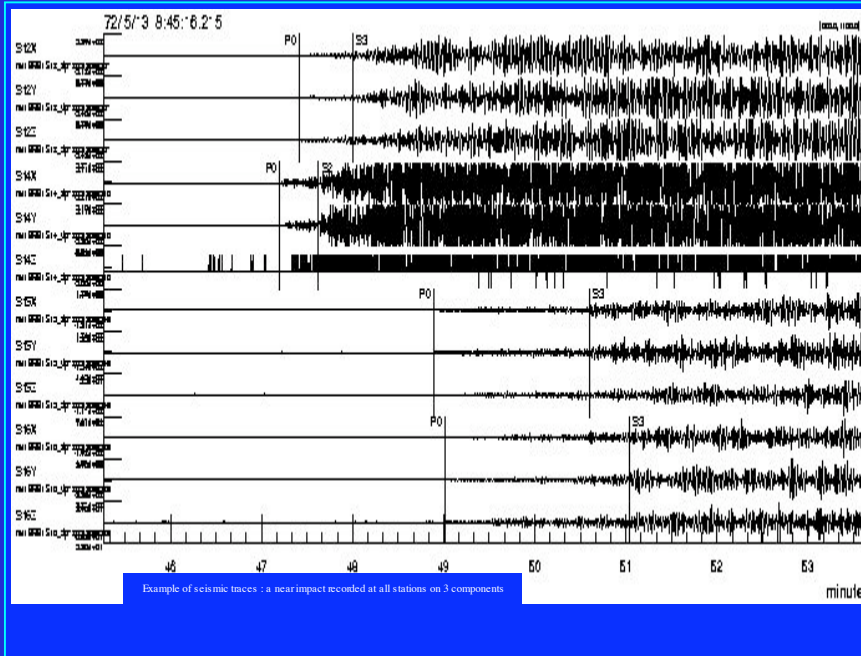


Active source: impacts

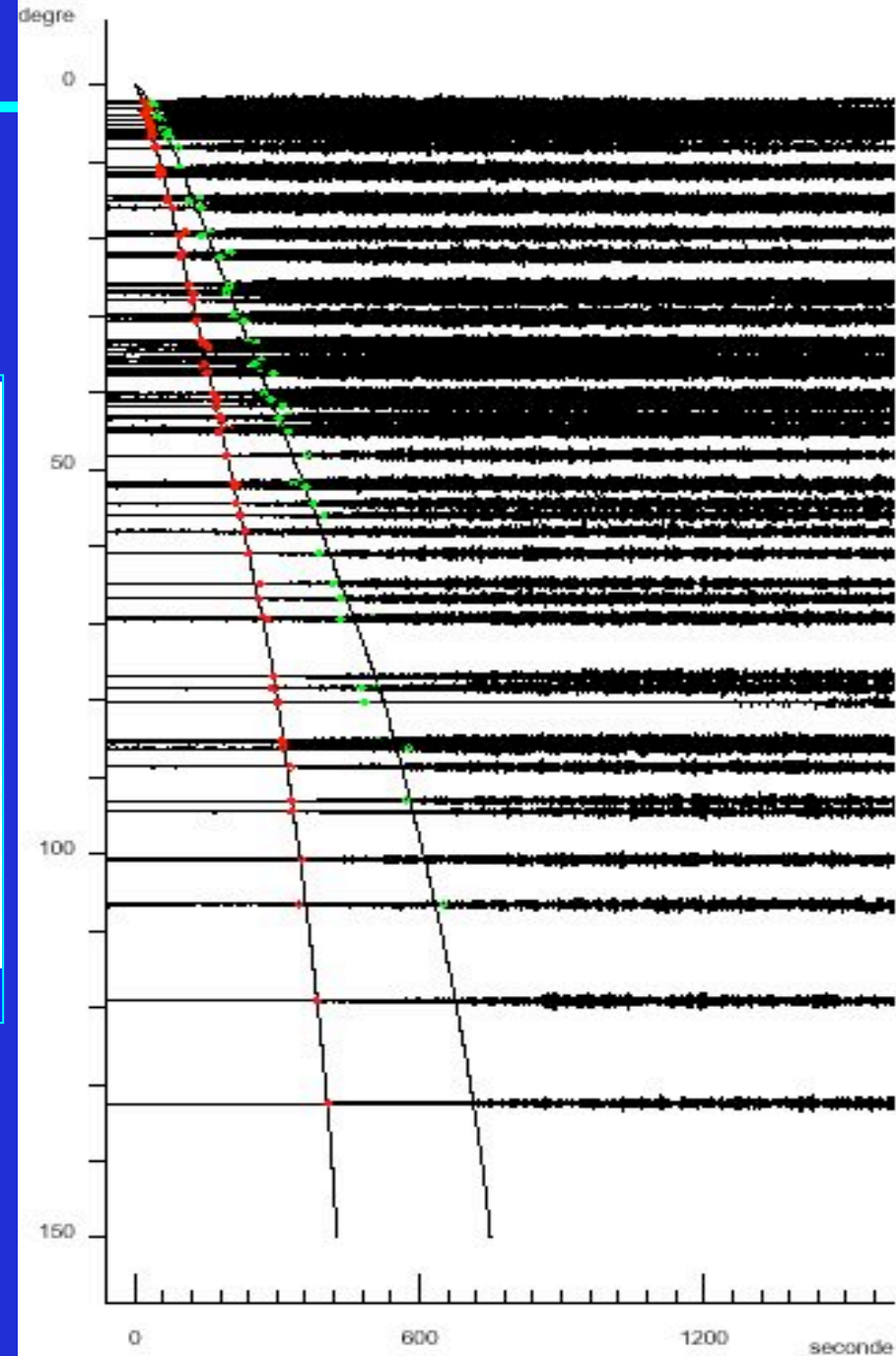


- Impact of the Apollo 17 Saturn V upper stage (Saturn IVB) on the Moon on 10 December 1972 at distances of 338, 157, 1032 and 850 km from the Apollo 12, 14, 15 and 16 stations, respectively. Amplitudes at Apollo 14 station, 157 km from impact, reach about 10^{-5} m s^{-2}
- Known time and location: all arrival times give information on the structure

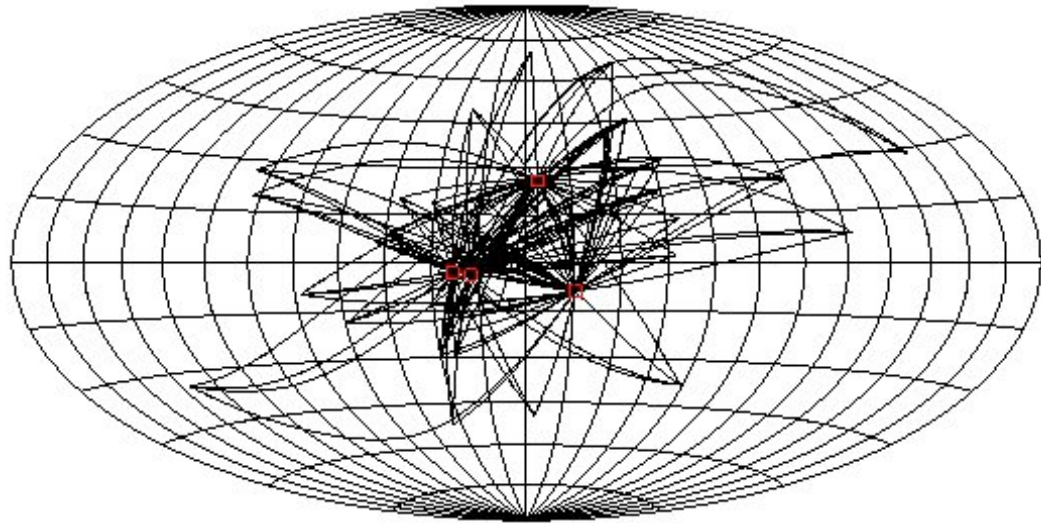
Example of arrival time determination



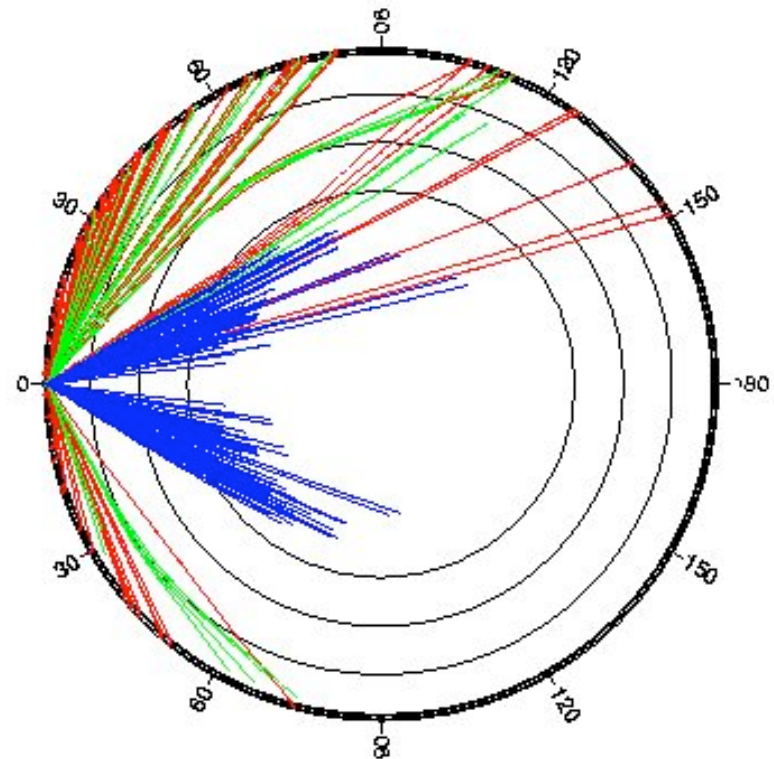
- In many case, diffraction is making the determination of arrival times difficult, with error up to 10sec (mean error is about 2s)



Observation de l'intérieur de la Lune

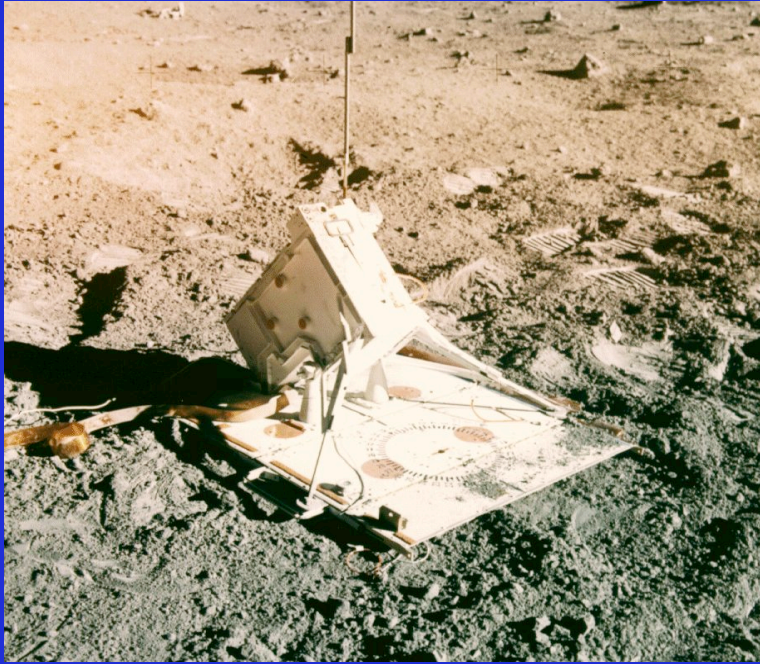


Ray path of 59 events used for global inversion.



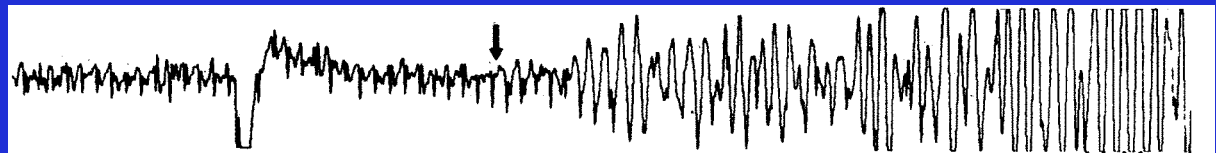
All ray paths available in the Moon. Blue is for deep events, red for impacts, green for superficial moonquakes.

Past experiences in Active seismology



- Active seismic experiment was performed on the Moon on Apollo 14,16,17
- Recording at 3 km for 2.7 kg, with geophone (narrow band) and saturation: broad band SP are much better
- Buried sources (e.g. penetrator) will have much higher efficiency
- Penetration depth of 1.4 km achieved
- Safety protocol on human flight achieved

Mortar with seismic sources, Apollo 16

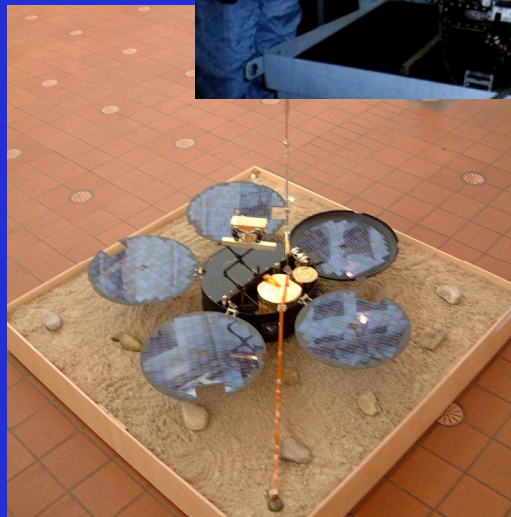
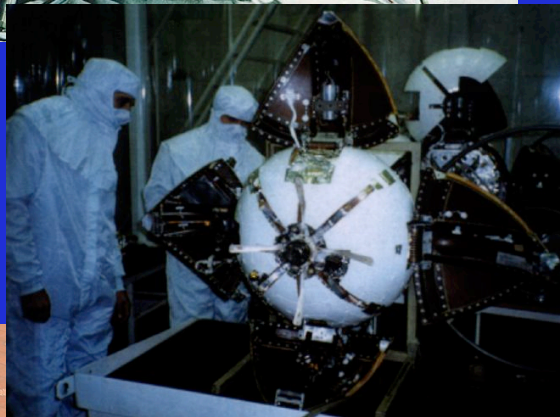
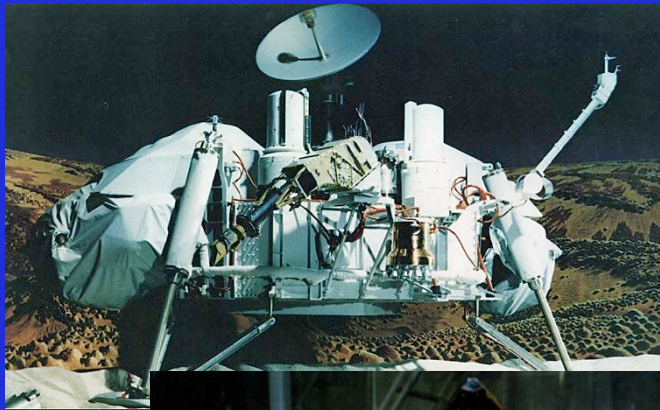


Apollo 17, 454 g of explosives, 1.2 km from the geophone

Transmitter noise

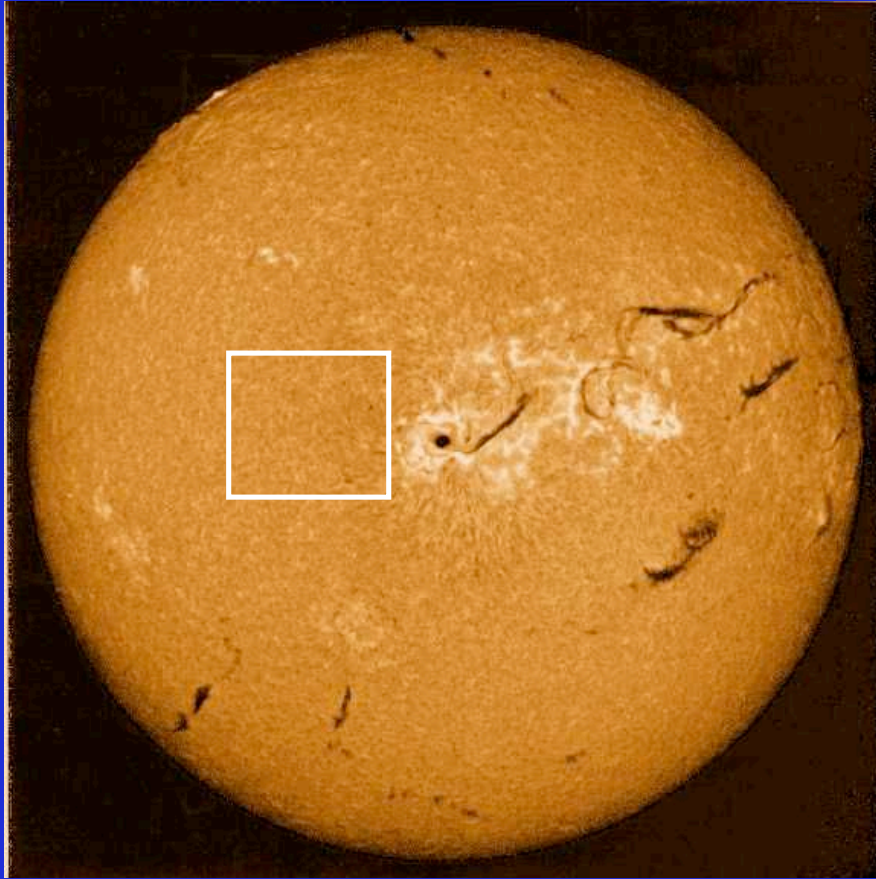
La sismologie au delà de la Terre

Mars seismology: history



- 1975: 2 Viking landers equipped with seismometers. Possible detection of one quake on one lander
- 1996: Failure of the launch of Mars96, with 2 surface stations equipped with BRB Z axis seismometers and 2 penetrators with SP geophones
- 2003: The NetLander mission is stopped by CNES and NASA before phase B completion.
- Other data for deep interior:
 - Density
 - Inertia factor
 - Love number (real and imaginary part)
 - surface content in Th soon

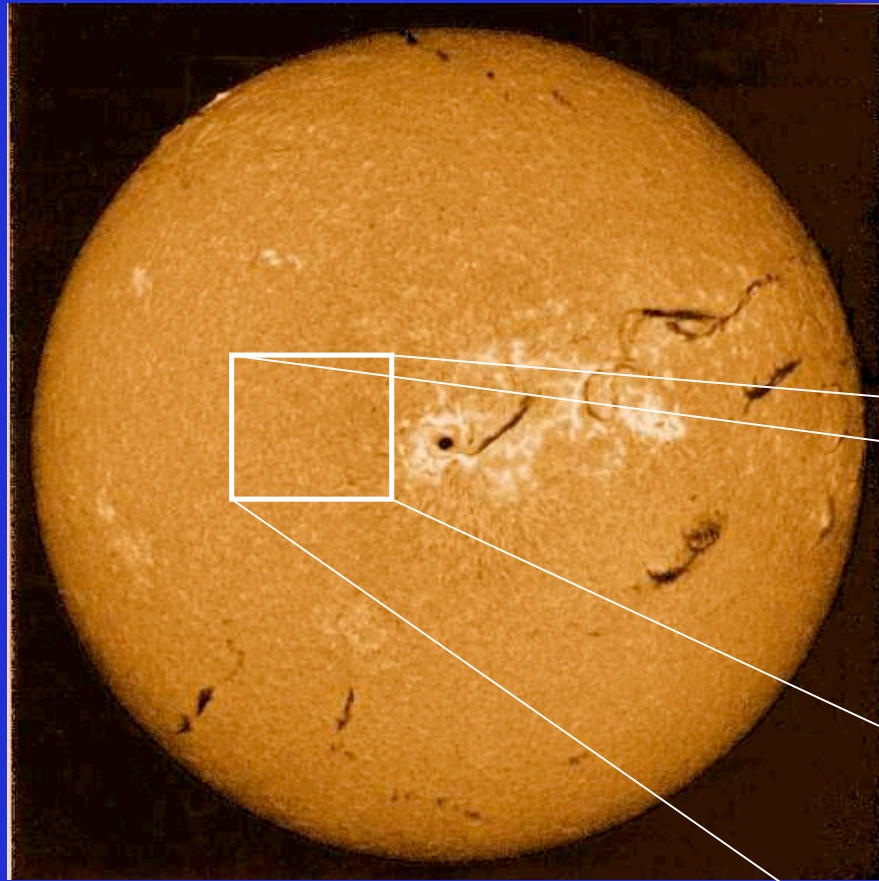
La sismologie du soleil



← 1,400,000 km →

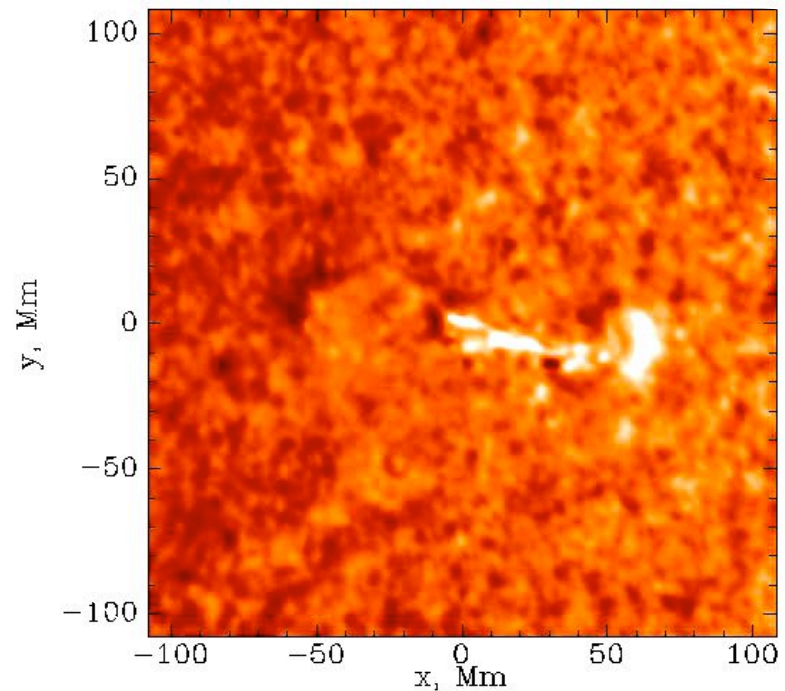
- Mission ESA/NASA Soho, avec à bord un instrument mesurant la vitesse verticale du soleil
- Mesure en utilisant l'émission des atomes de Ni dans la photosphère
- 1024x1024 pixels pour la vitesse verticale avec 20 m/s d'erreurs

La sismologie du soleil



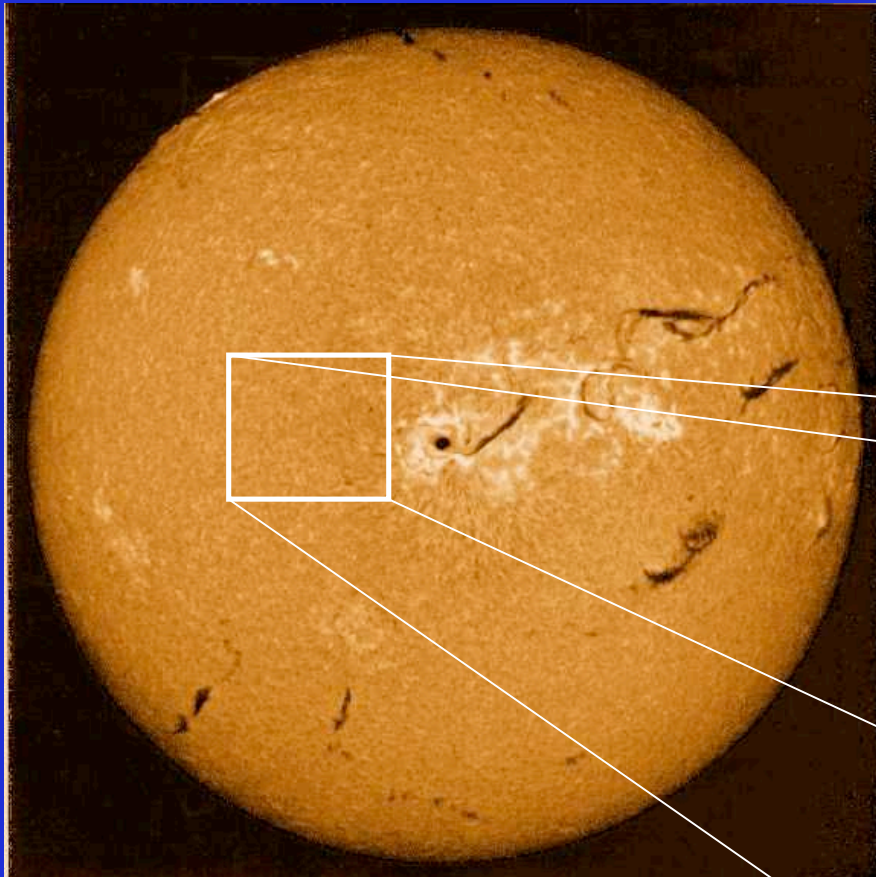
1,400,000 km

- 9 Juillet, 1996 Eruption solaire
- Equivalent d'un séisme de magnitude $M=11$
- Déplacements verticaux de 3 km



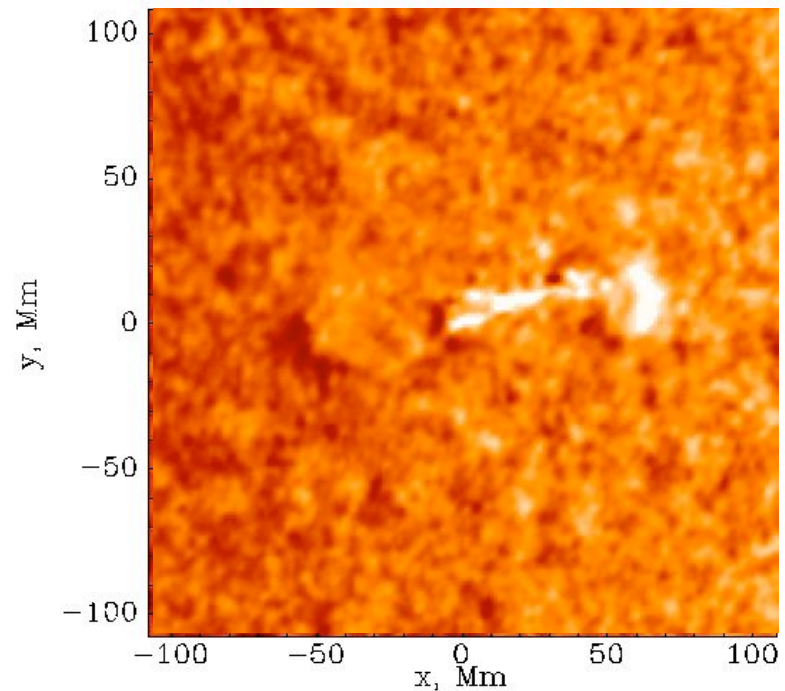
La sismologie du soleil

- 9 Juillet, 1996 Eruption solaire
- Equivalent d'un séisme de magnitude $M=11$
- Déplacements verticaux de 3 km

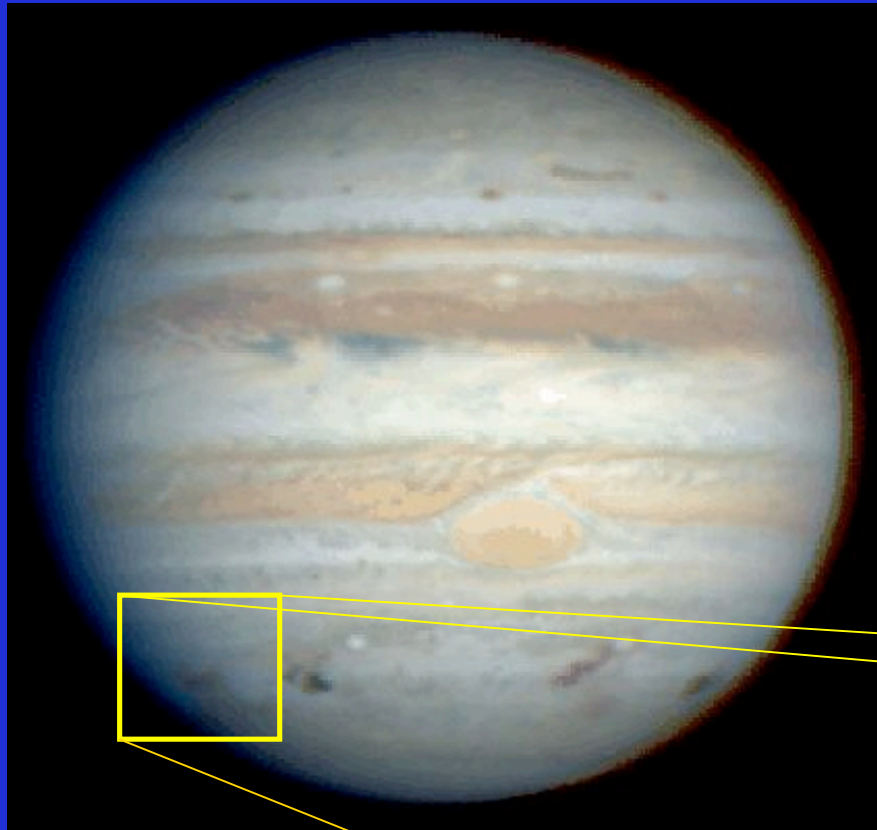


1,400,000 km

A. G. Kosovichev, V. V. Zharkova, Stanford Un.



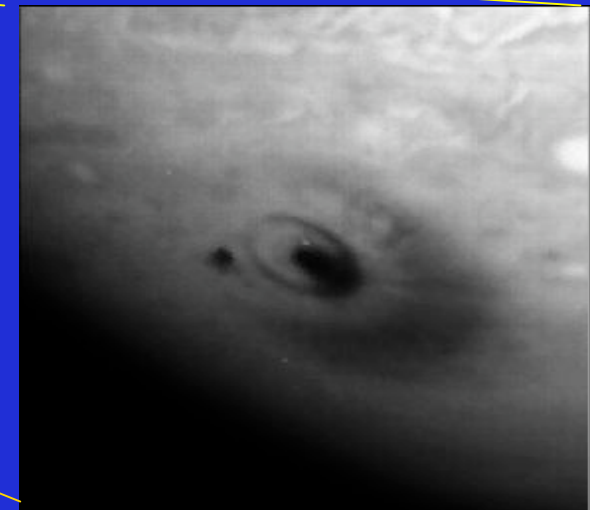
Sismologie de Jupiter



- NASA HST, WFC dans le visible
- 22 Juillet, 1994 impact de Shoemaker-Levy 9
- magnitude equivalente $M=9$
- Déplacement vertical de 100m avec modification de l'albédo des nuages
- Pas d'observations faite depuis le sol
- Observation d'ondes comparables aux tsunamis



130,000 km

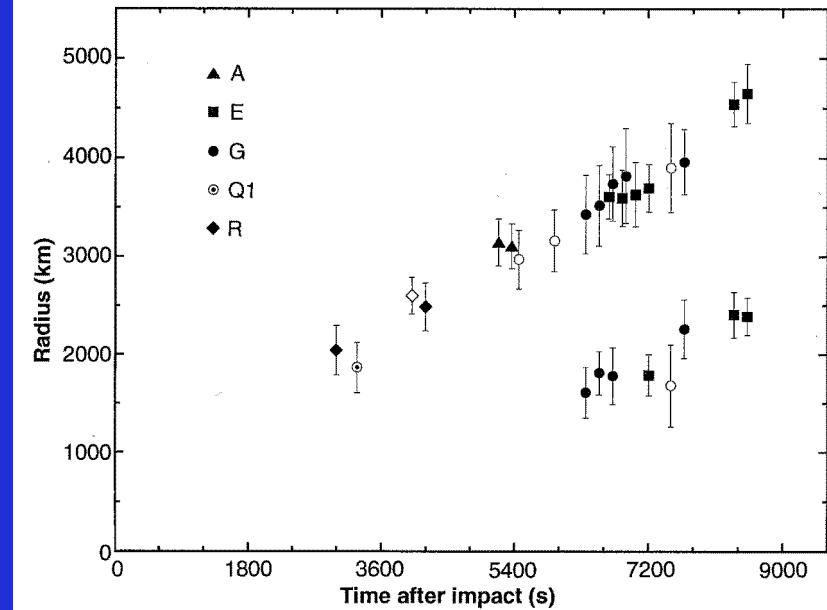
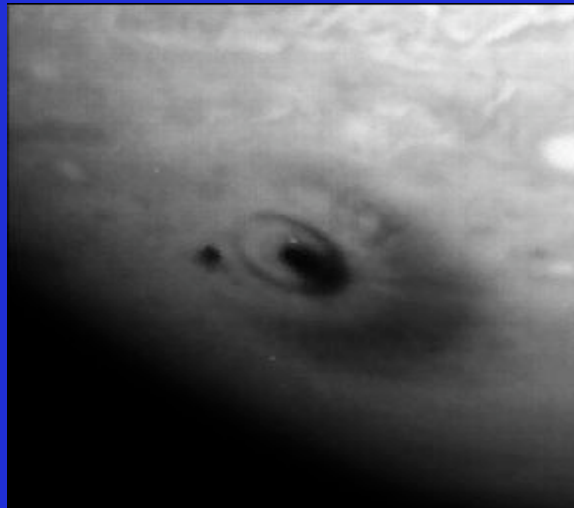
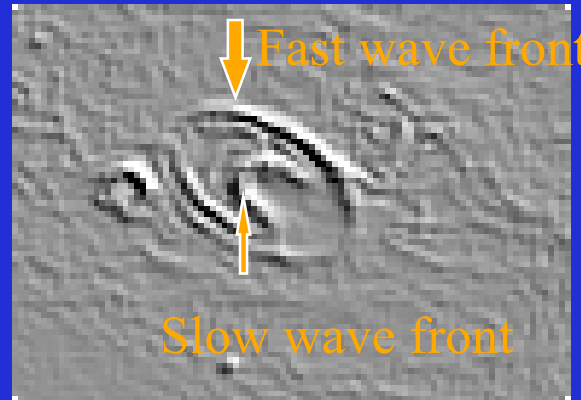


H. Hammel et al, MIT

Sismologie de Jupiter

◆ Impact of the Shoemaker Levy-9: Gravity waves detected by HST

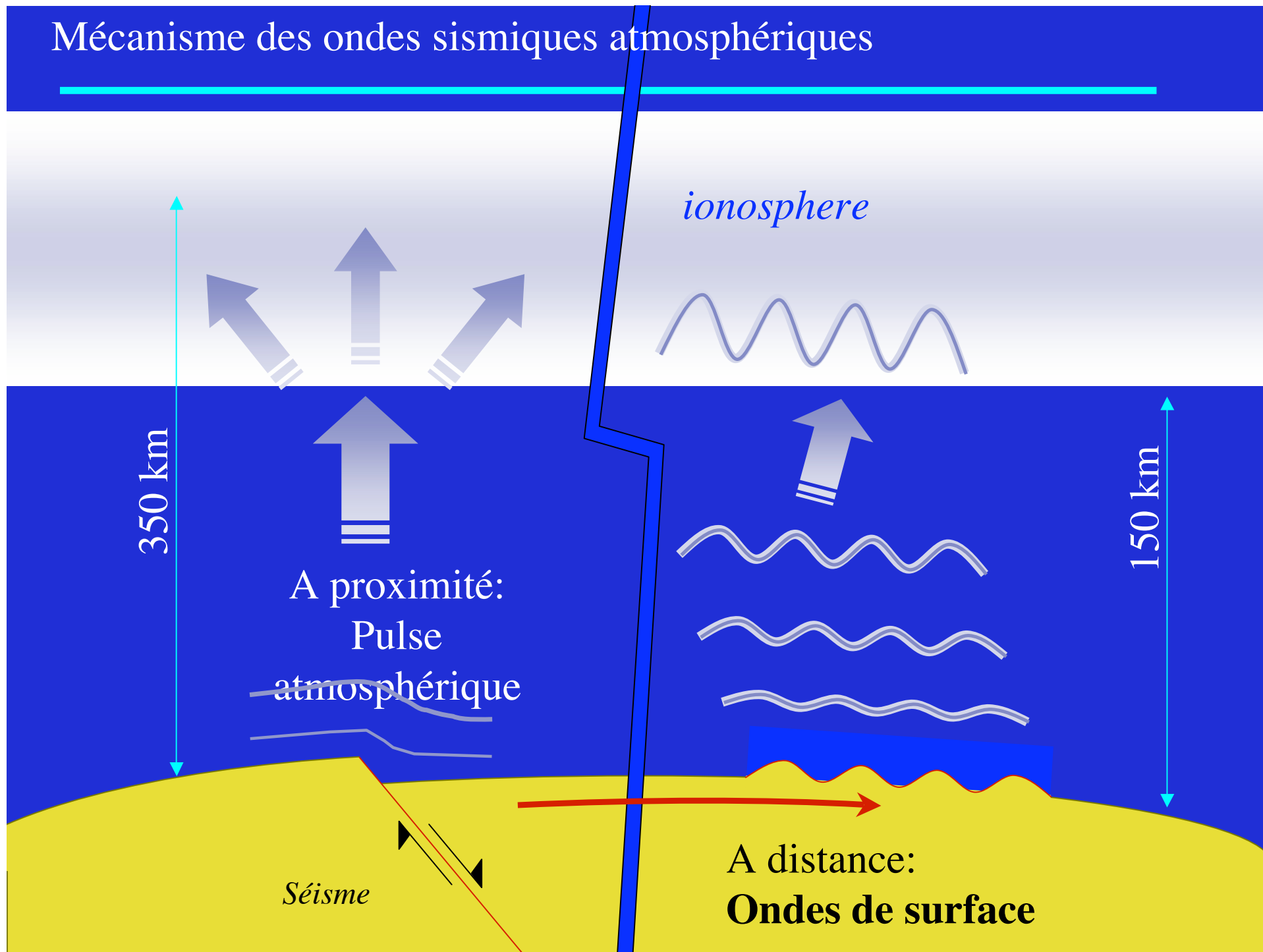
Gravity waves



Hodochrones

Hammel et al., 1995

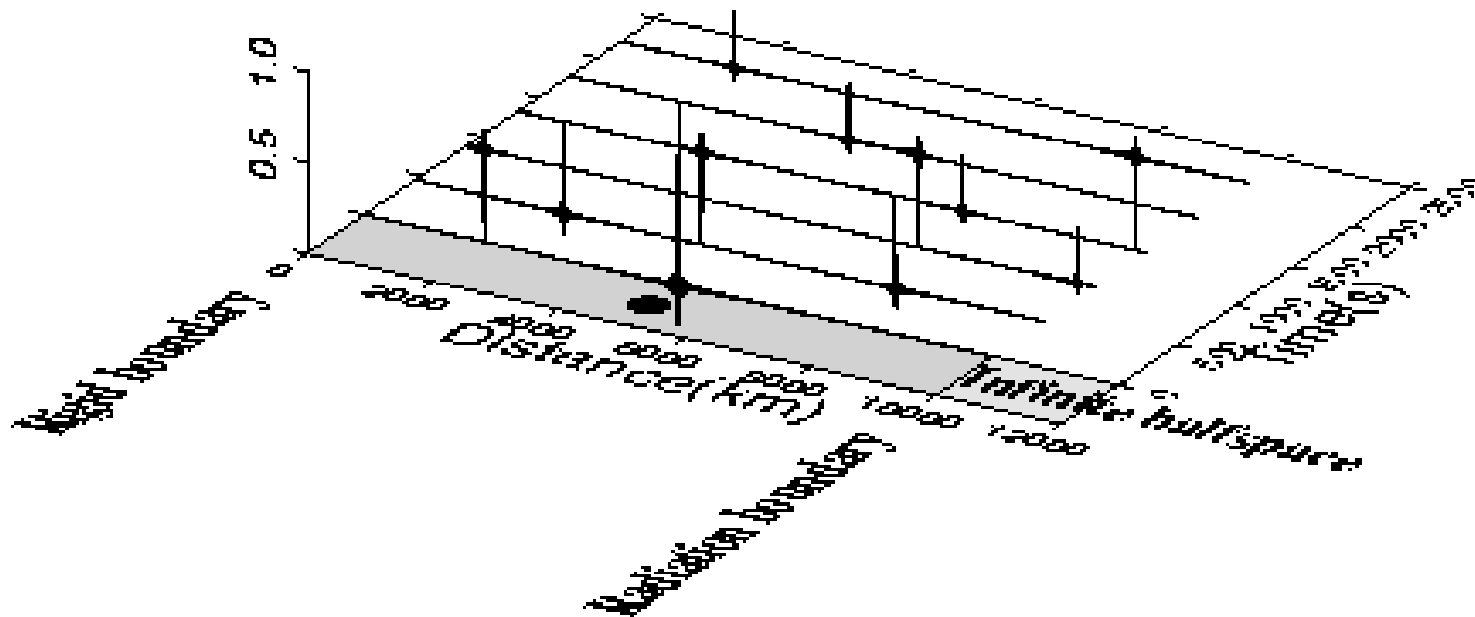
Mécanisme des ondes sismiques atmosphériques



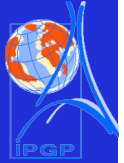
- exemple d'un milieu semi-infini

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0,$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + c \frac{\partial u}{\partial x} = 0, x = L$$



Ondes de pression



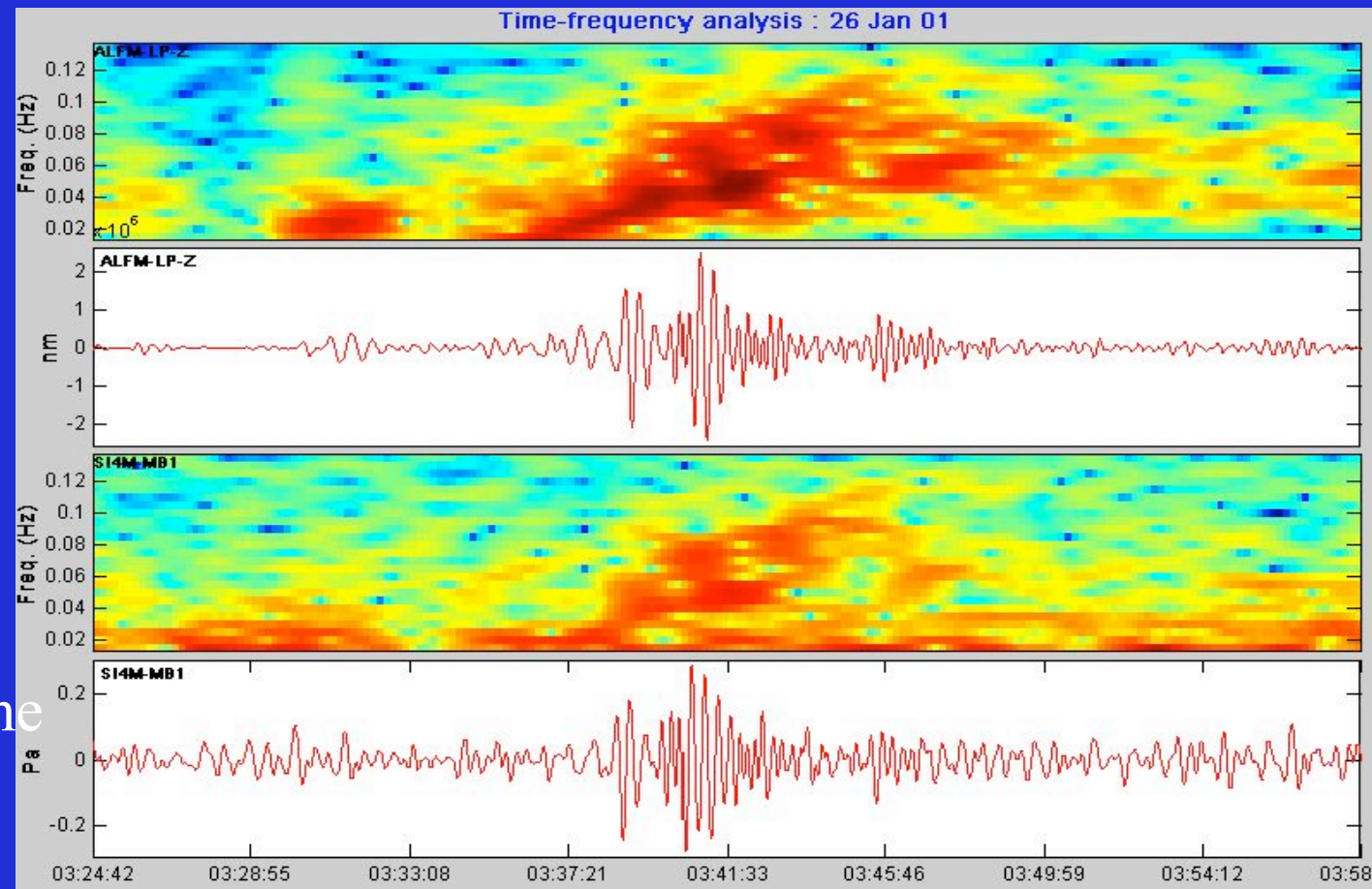
- Station de l'OTICE (microbarographes et sismographes)
- Séisme du 26 janvier 2001 en Inde M=8 (*Farges et al., 2001*)

Station du CTBT installée en Mongolie (Javhlant)

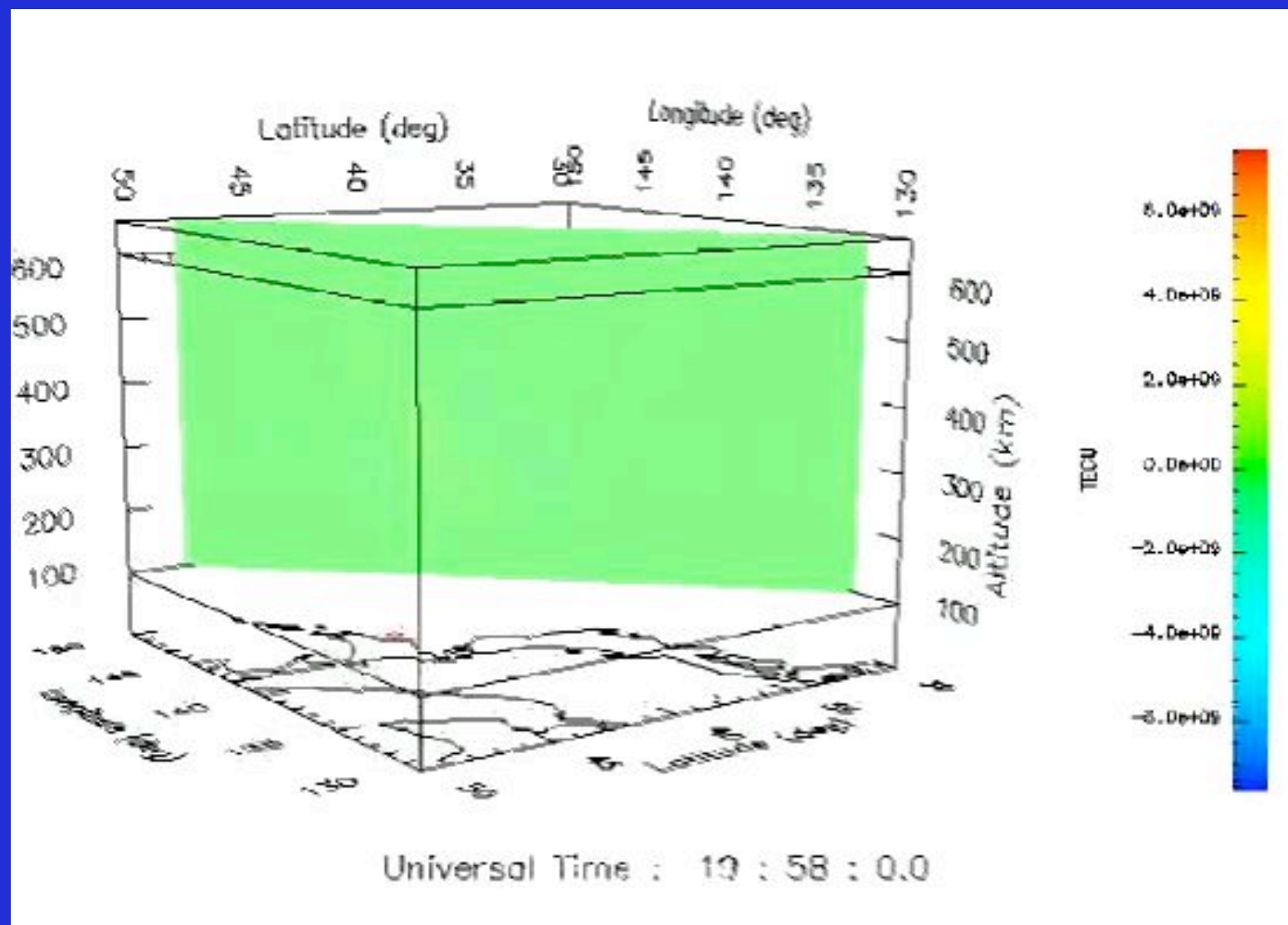
sismogramme

Couplage
 $p=247$ a/T

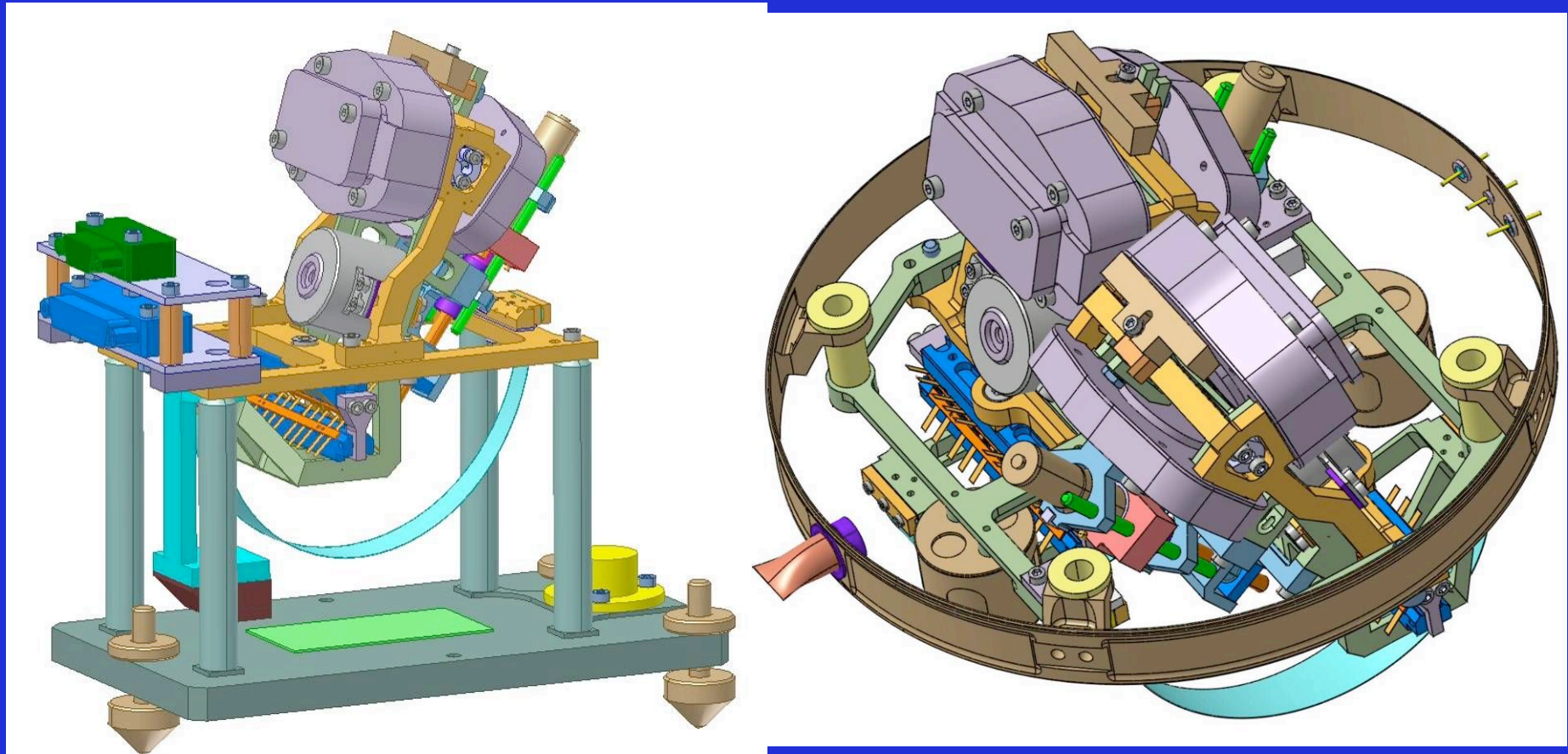
microbarogramme



Ondes dans l'atmosphère



Dernier point... les instruments



- équation d'un pendule + détection du déplacement