

Sismologie

F. Chambat

Sources des illustrations :

<http://eost.u-strasbg.fr/pedago/Accueil.html>

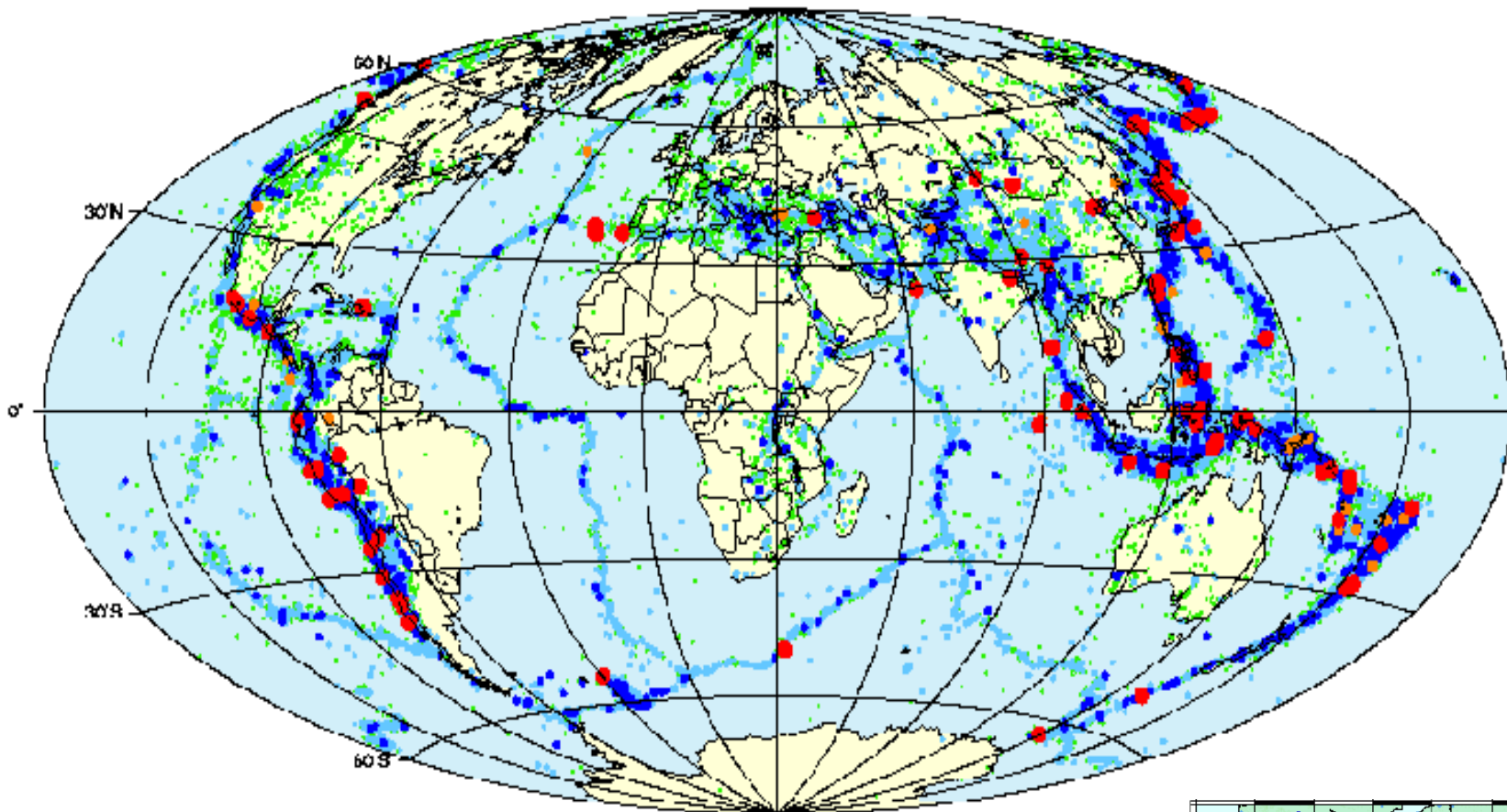
<http://www.seismo.unr.edu/ftp/pub/louie/class/plate/seismology.html>

et d'autres...

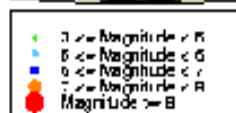
I Séismes et sismomètres

- Creuser ? Kola

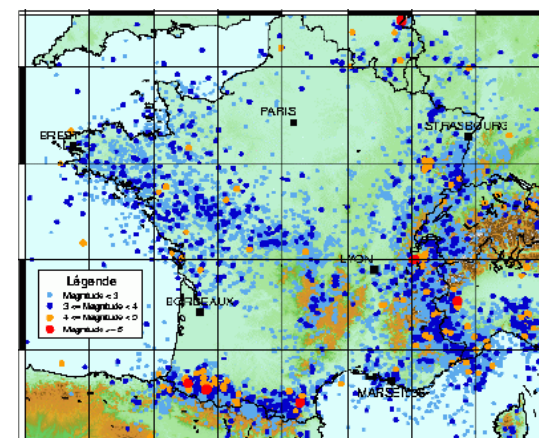




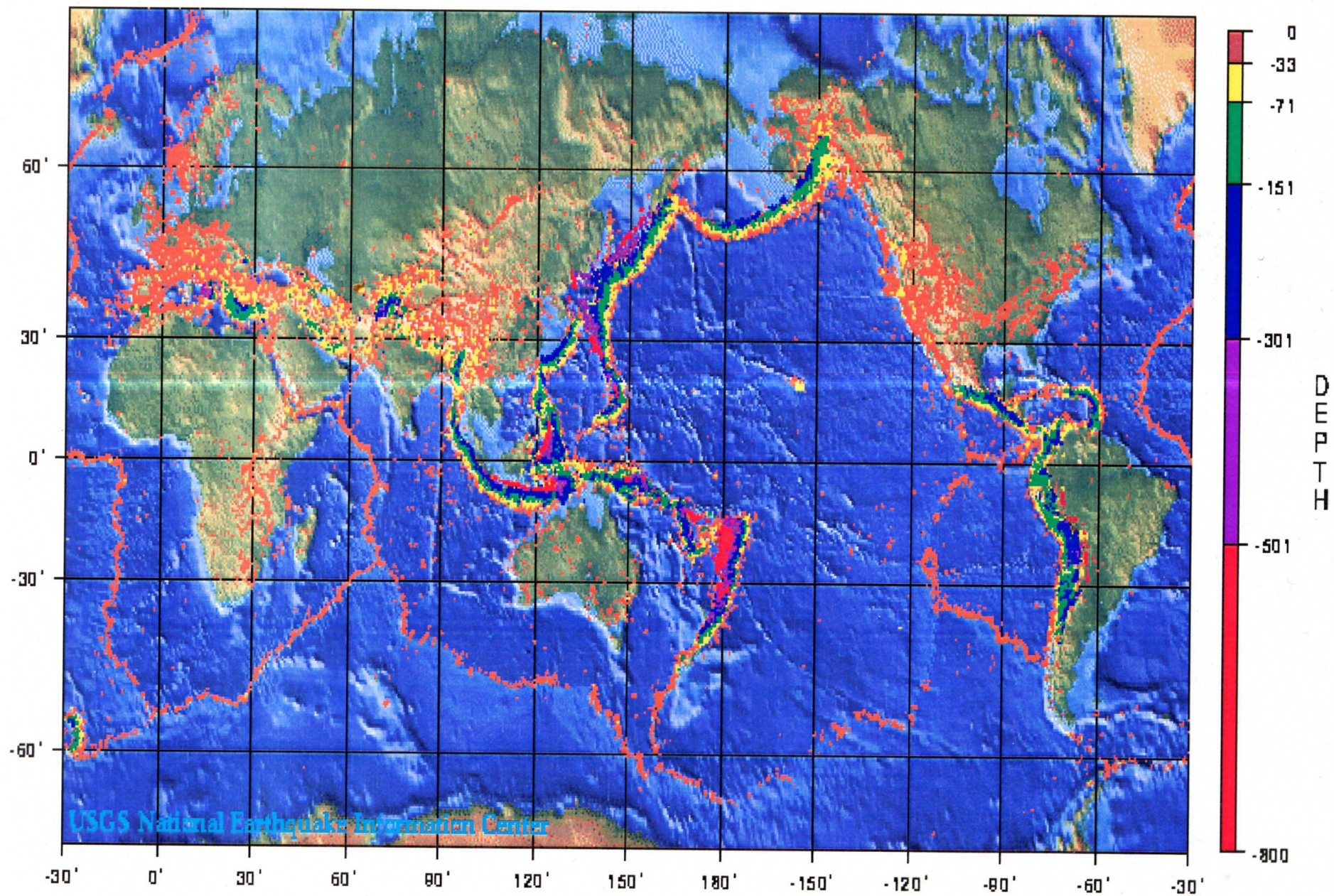
Sismicité du monde
par magnitude
de 1928 à 2000

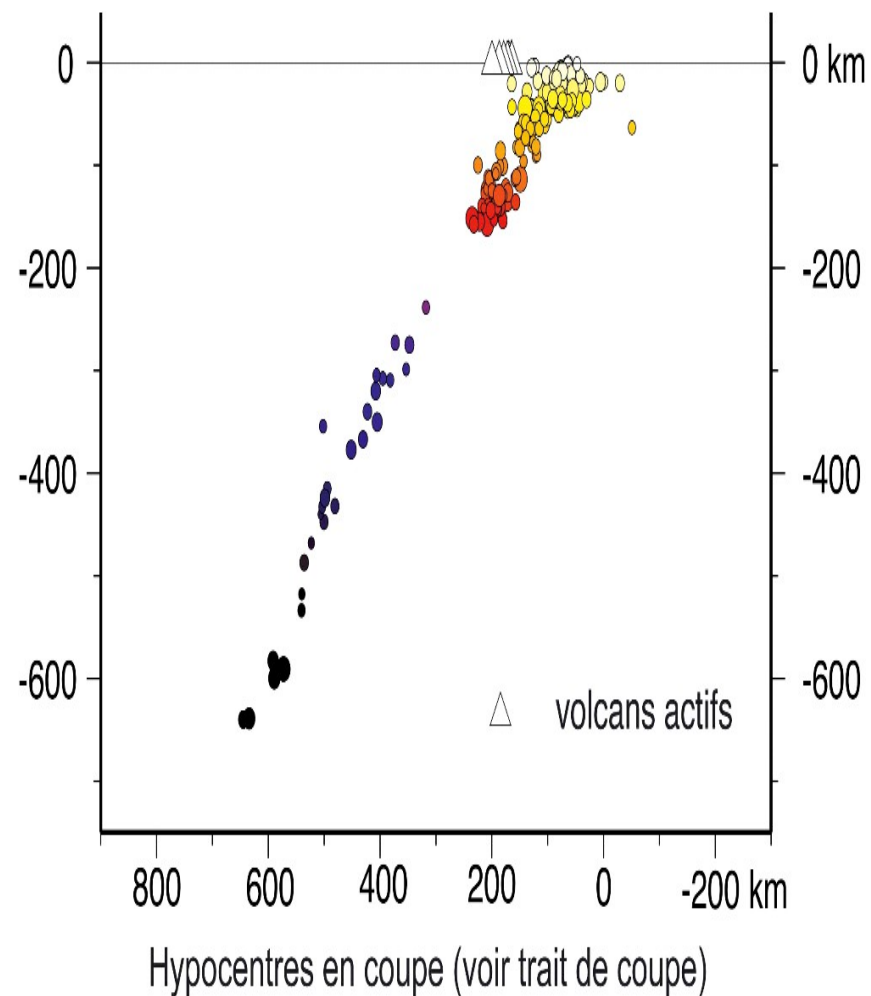
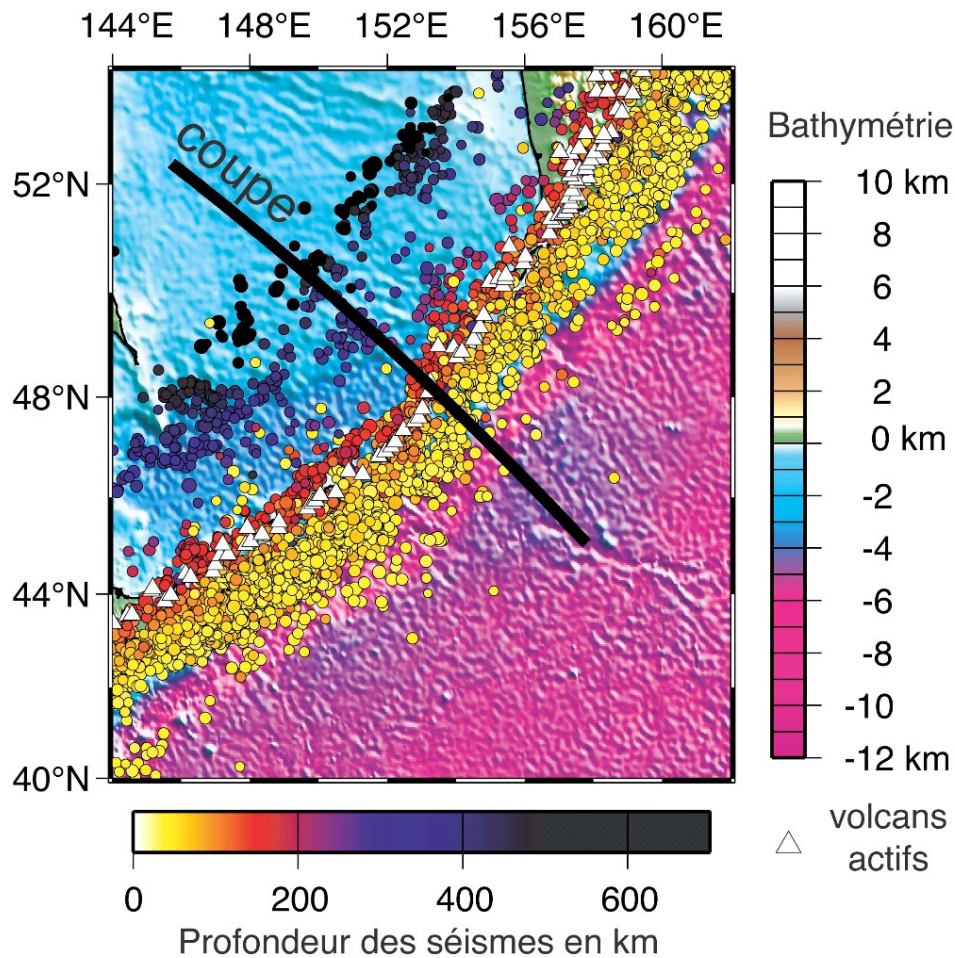


Sismicité française
par magnitude
de 1980 à 2000



World Seismicity: 1975 - 1995

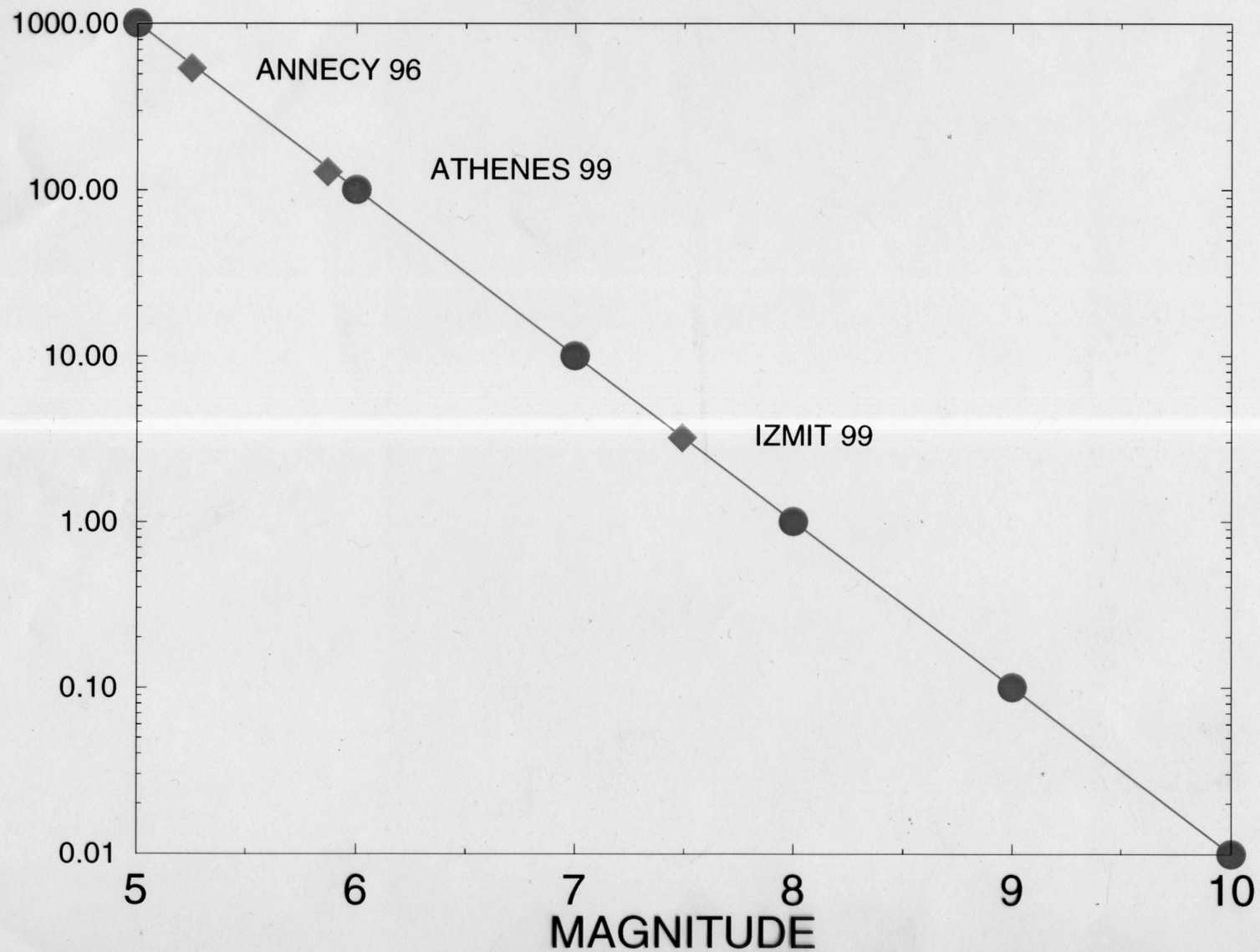




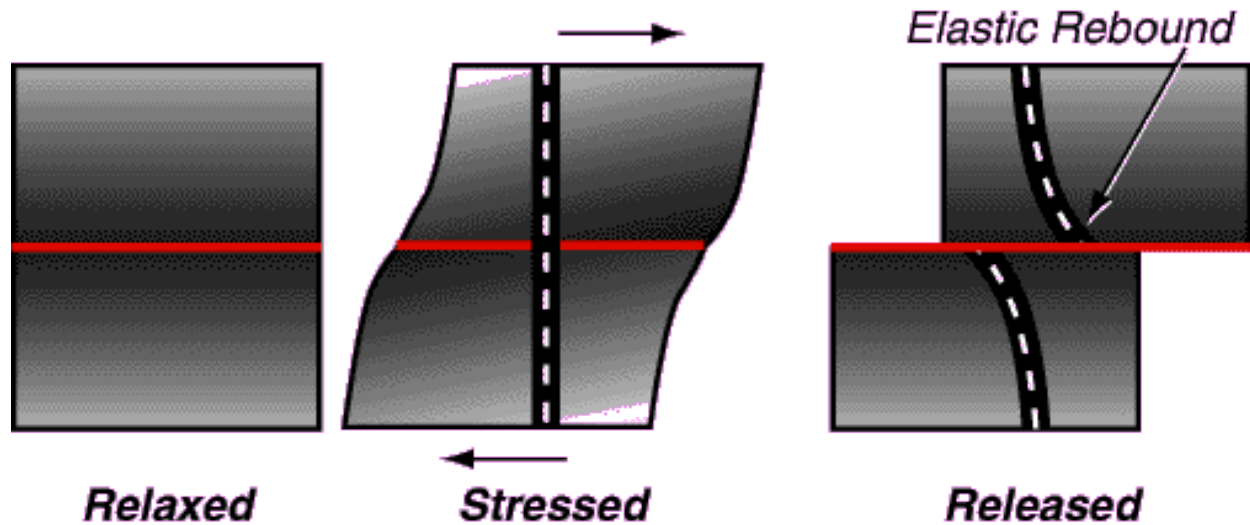
Zone de subduction des Kouriles en plan et en coupe. Séisme sur la période ?-?. La profondeur des foyers des séismes est indiquée par la charte de couleurs (jaunes pour les plus superficiels et noirs pour les plus profonds). D'après Lallemand et al., 2005 (Convergences lithosphériques - Continents et tectonique des plaques).

Dans la zone épacentrale, la plaque Pacifique plonge vers le nord-ouest sous la plaque Okhotsk à une vitesse d'environ 90 mm/an. Elle reste sismiquement active jusqu'à environ 700 km de profondeur (Figure 3). Le choc principal du 15 novembre 2006 s'est produit à faible profondeur et à moins de 80 km de la fosse des Kouriles. Enfin, de très nombreuses répliques se sont produites, dont 2 de magnitude supérieure à 6.0, dans l'heure qui a suivi le choc principal : près de 100 événements ont pu être identifiés par les analystes du DASE 21 heures après le choc principal

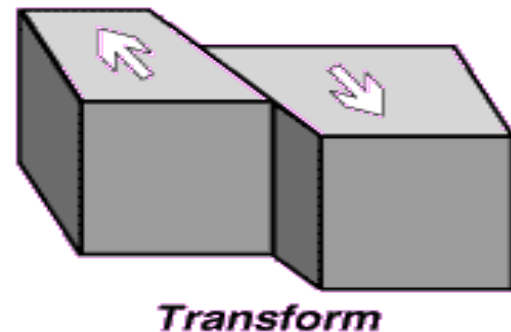
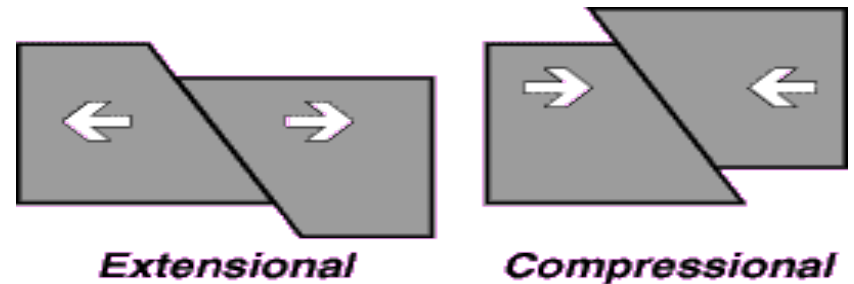
NOMBRE DE SEISMES PAR AN



Cycle sismique



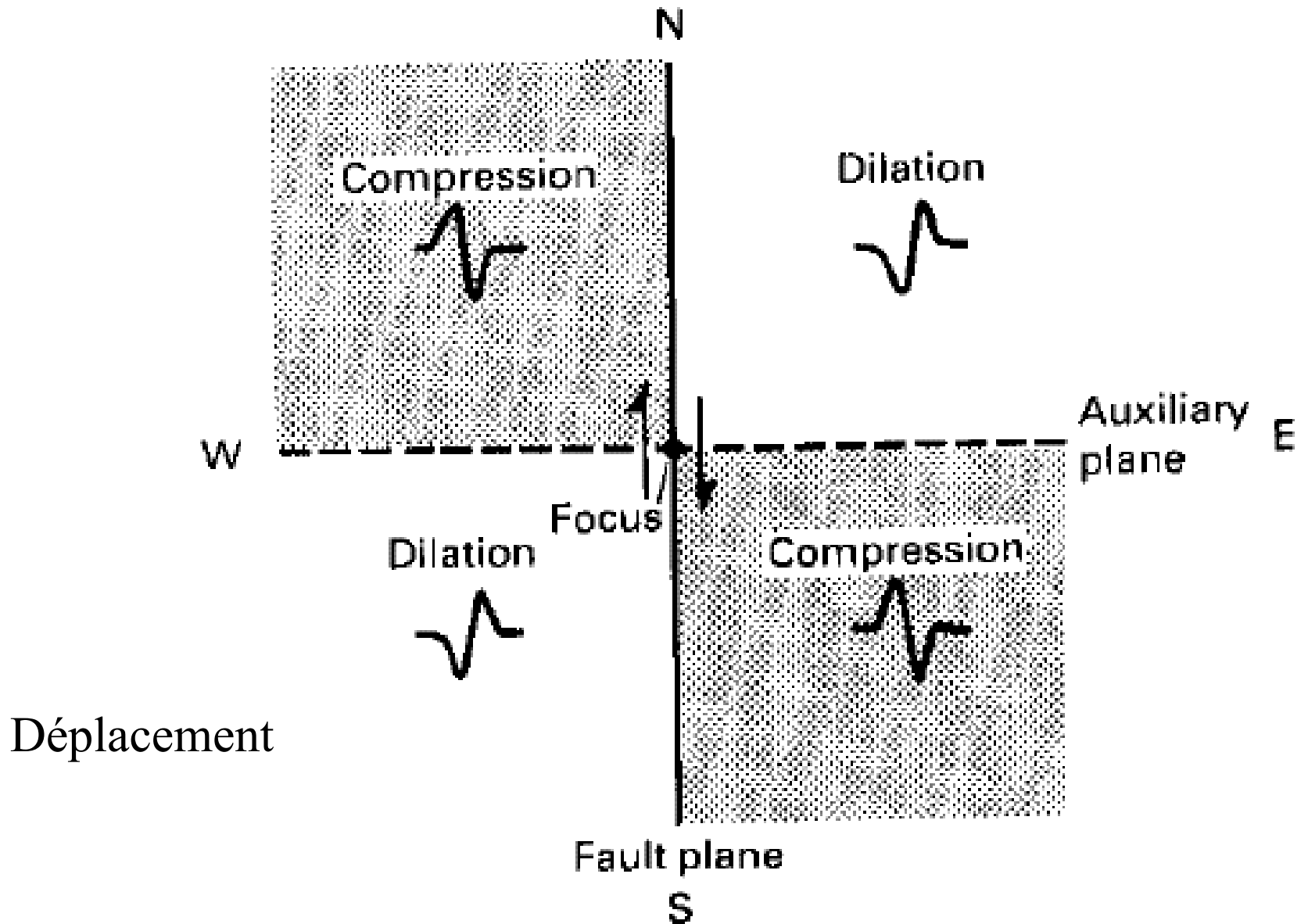
Mécanisme au foyer :
extension (faille normale)
compression (inverse)
cisaillement (décrochement)



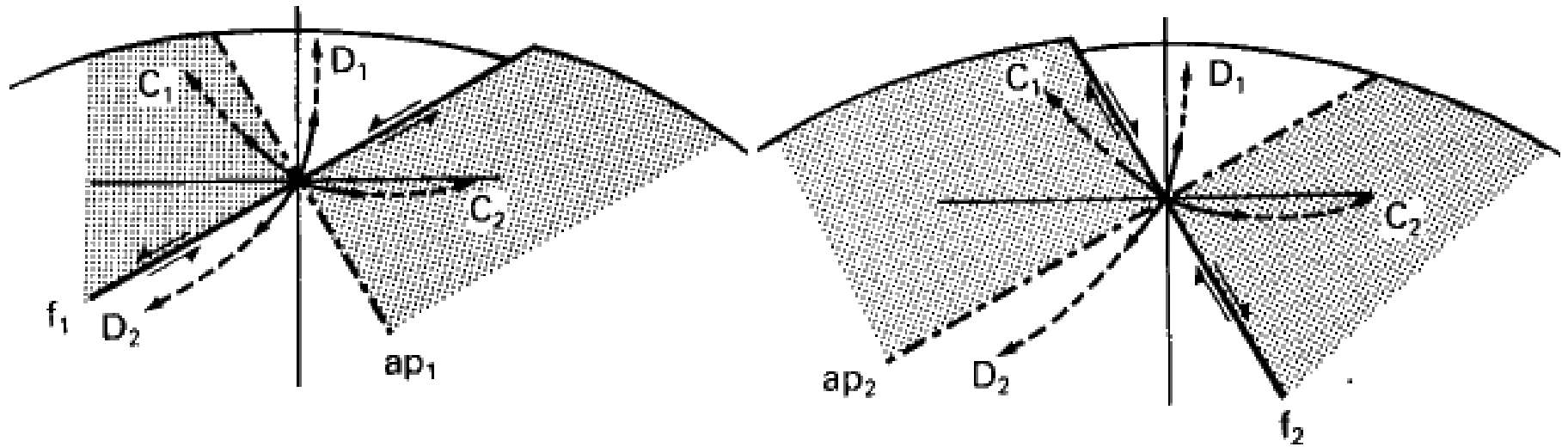


Glissement le long de la faille Impériale, El Centro, California, 15/10/1979.

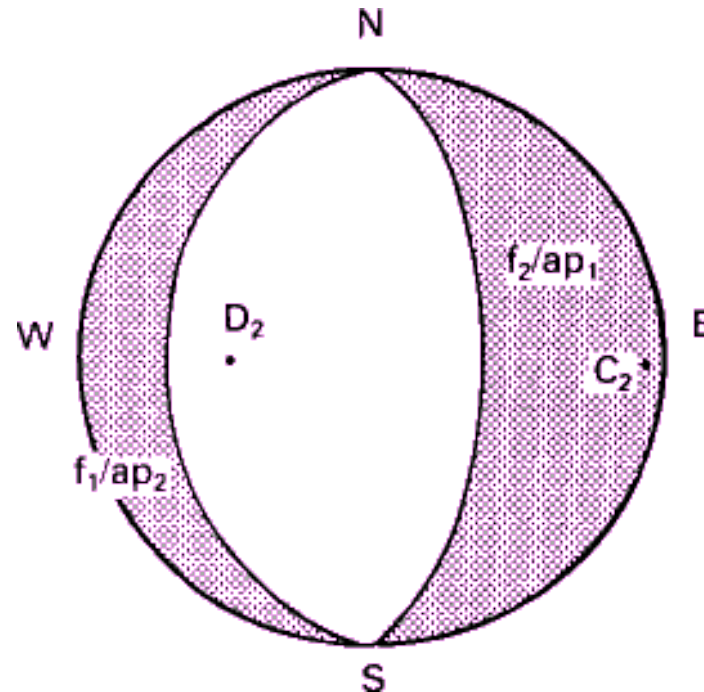
Comme un ressort le milieu se comprime ou se détend,
mécanisme = double couple



En 3D, pour une faille normale



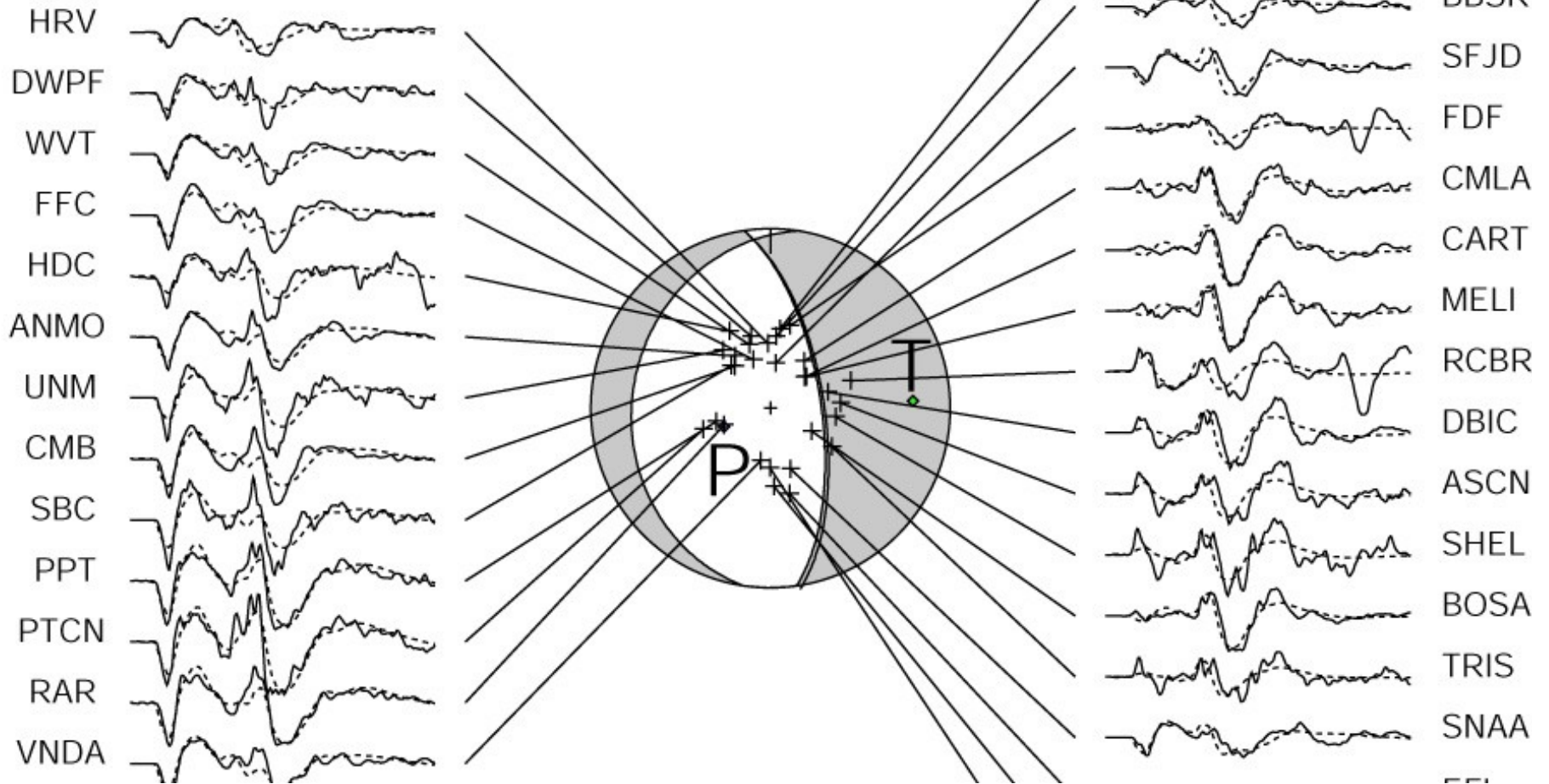
Sphère focale,
polarités sur la
 $\frac{1}{2}$ sphère inférieure,
vue d'en dessous
(on peut aussi regarder
l'autre $\frac{1}{2}$ sphère de dessus)



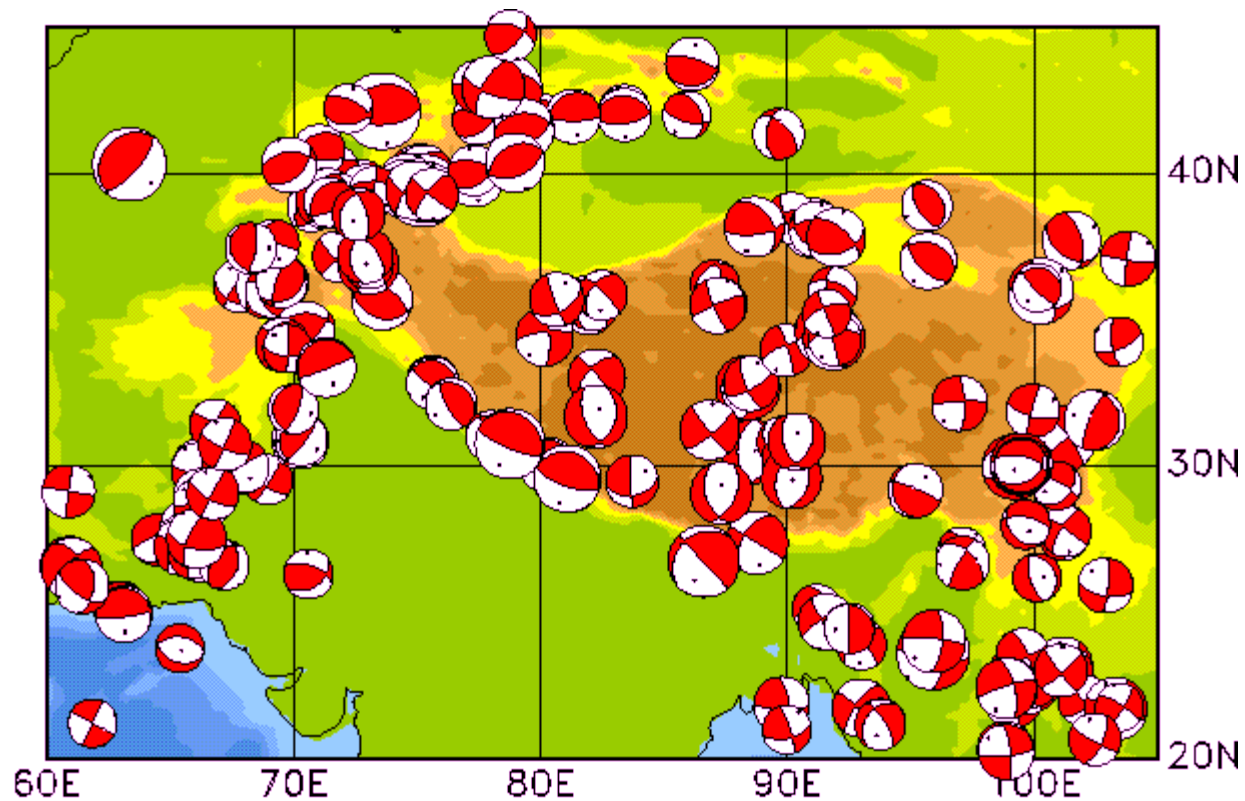
Séisme de Tarapaca, Chili

23 juin 2005, m=7.8

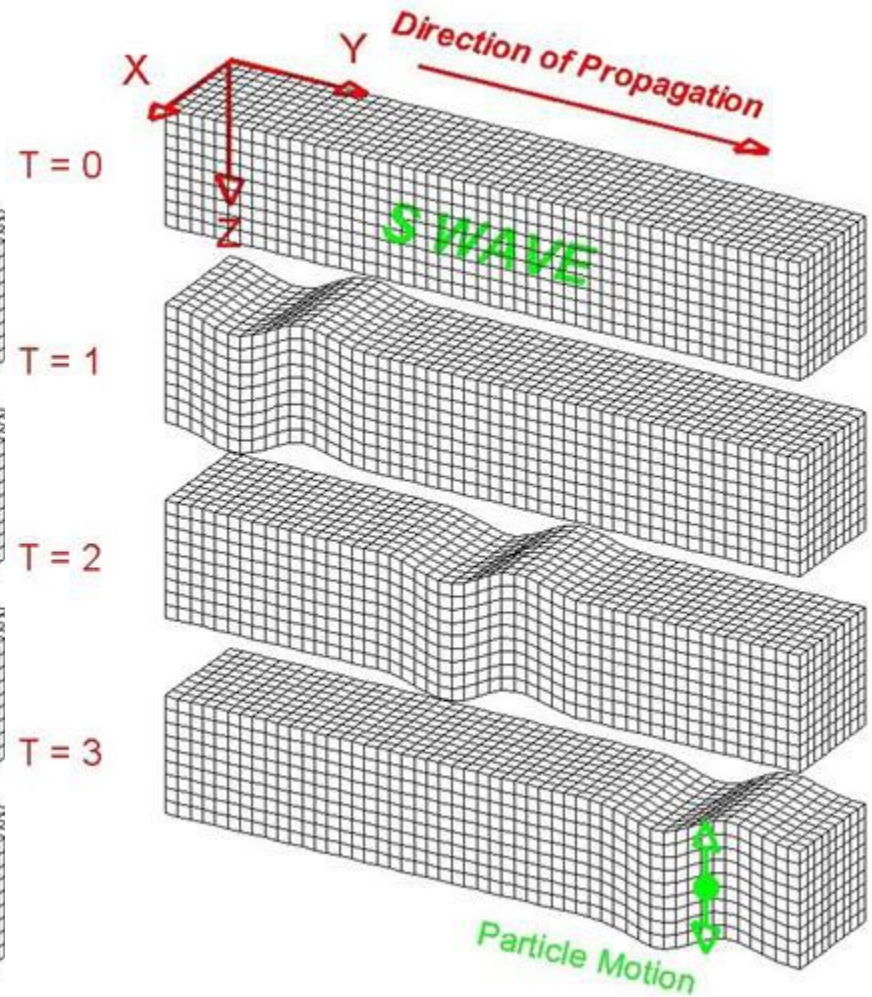
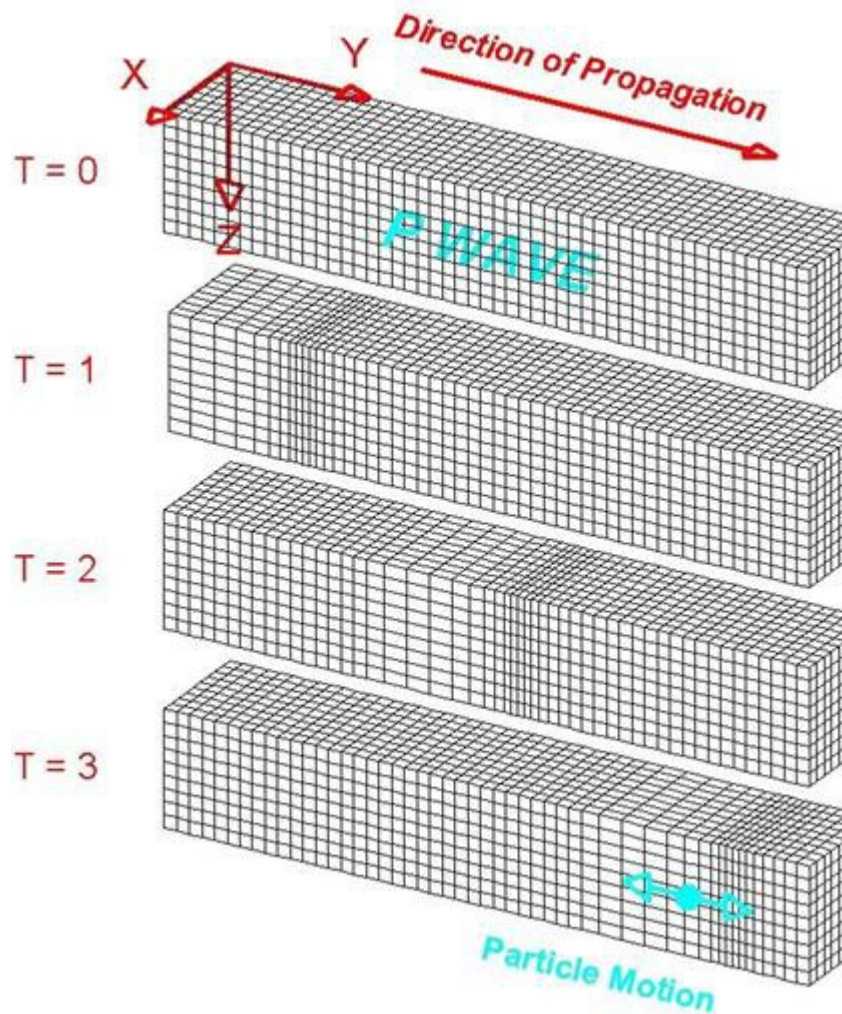
a) P waves



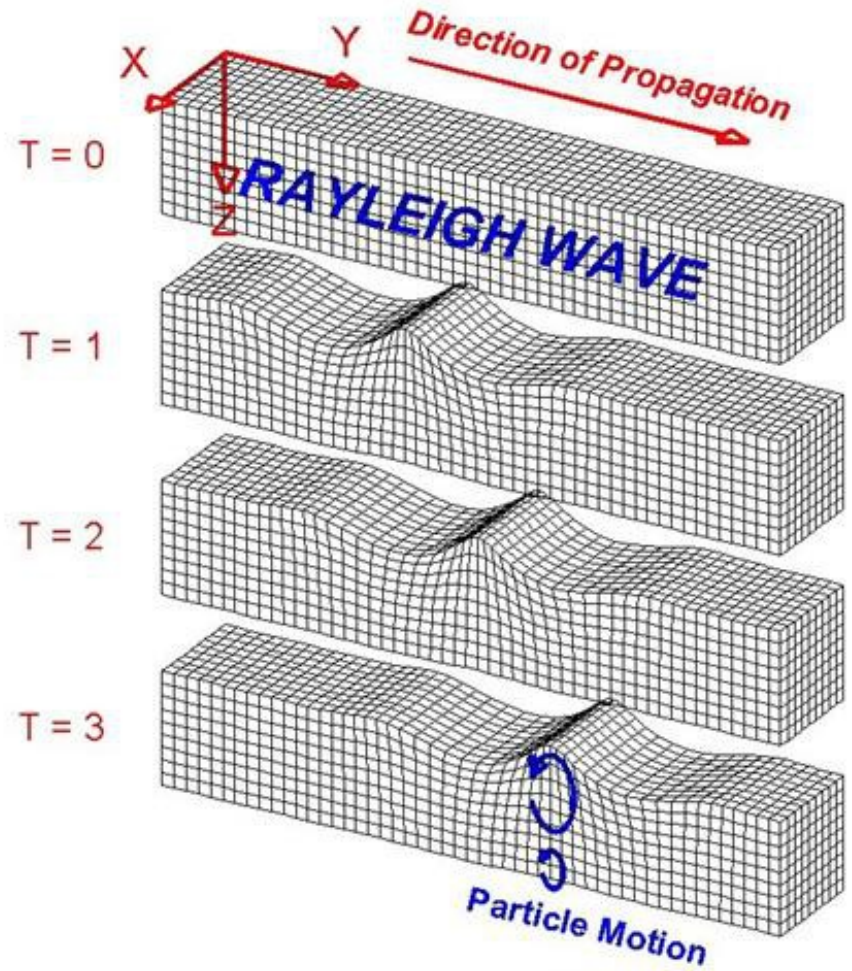
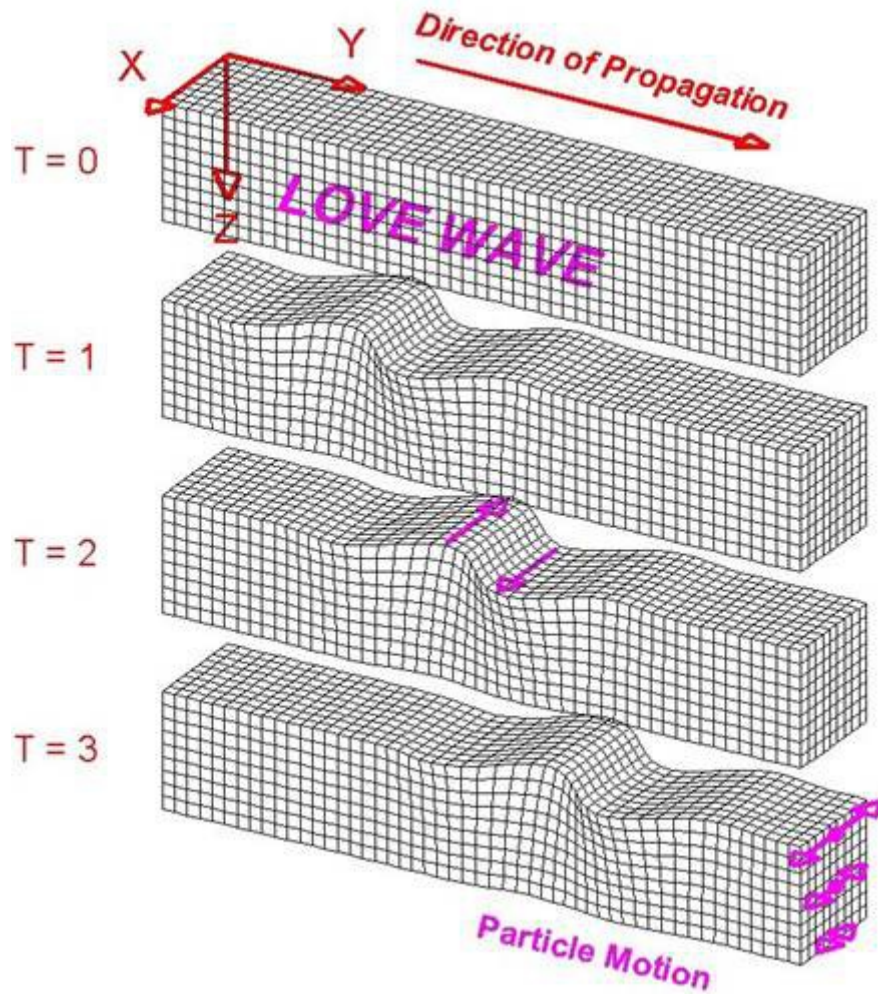
Mécanismes aux foyers sur la région du Tibet (Harvard group)



Ondes de volume



Ondes de surface



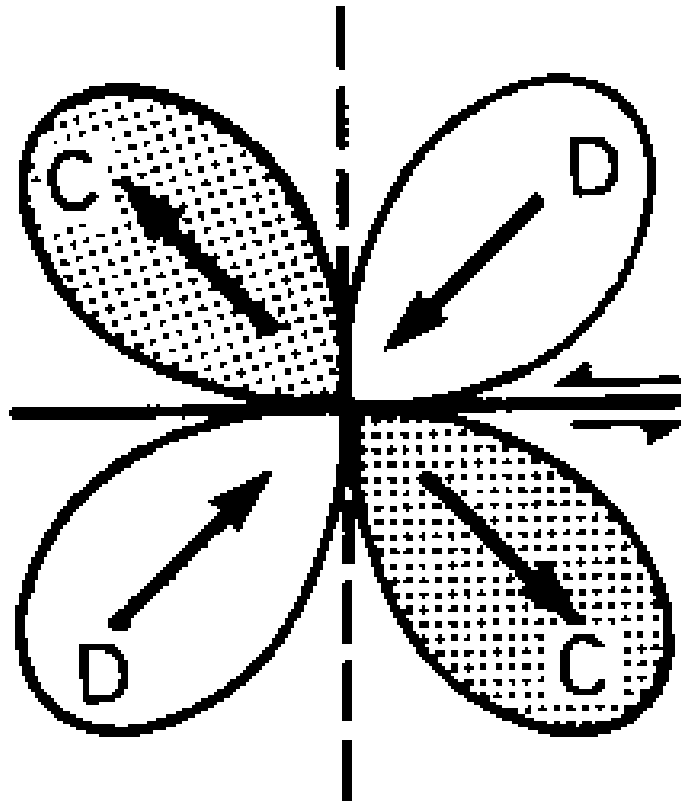


Diagramme de radiation
des ondes P en plan

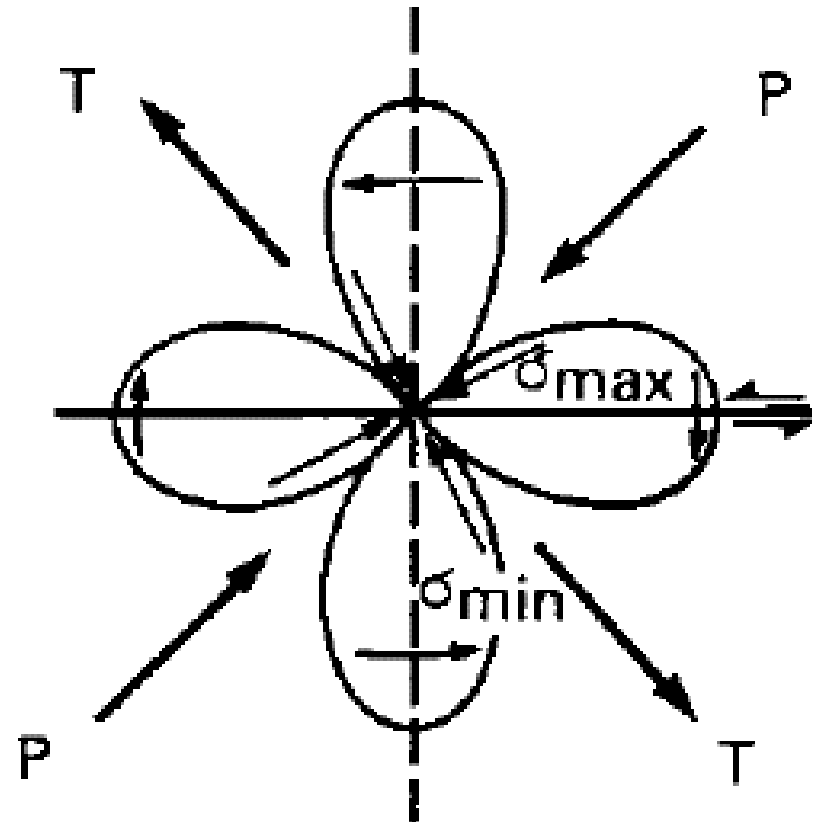


Diagramme de radiation
des ondes S en plan

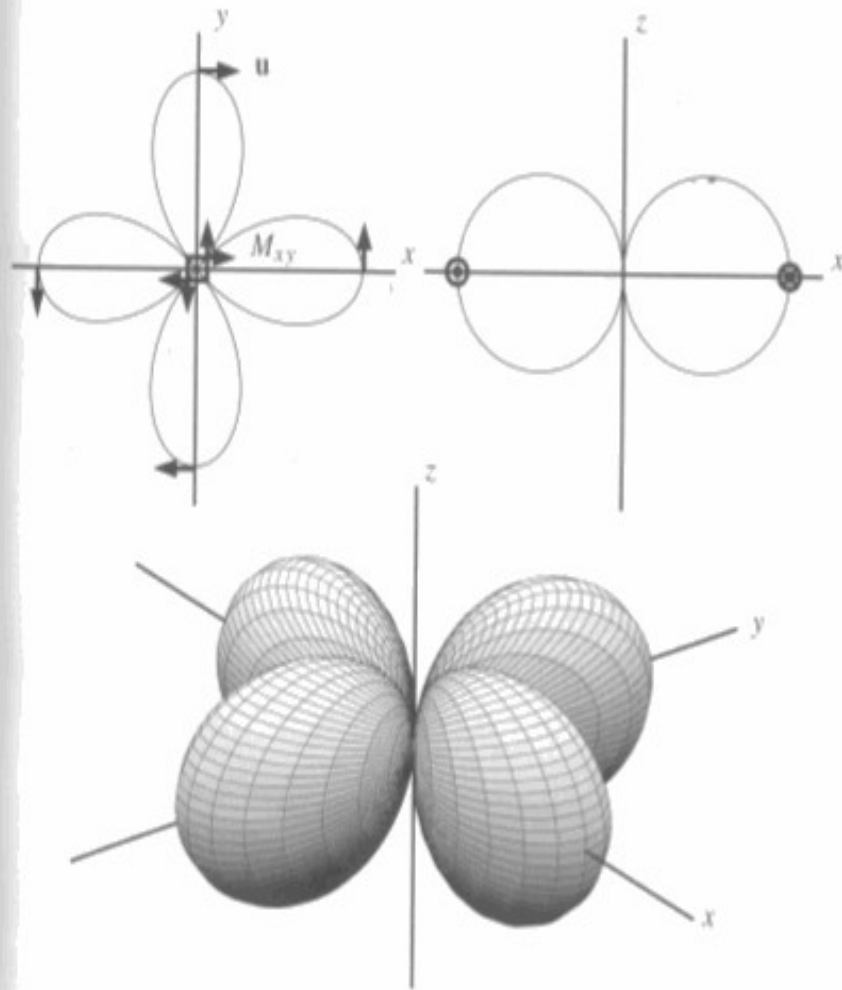


Fig. 4.23. The radiation patterns for SH waves due to a double couple, M_{xy} . As Figure 4.22.

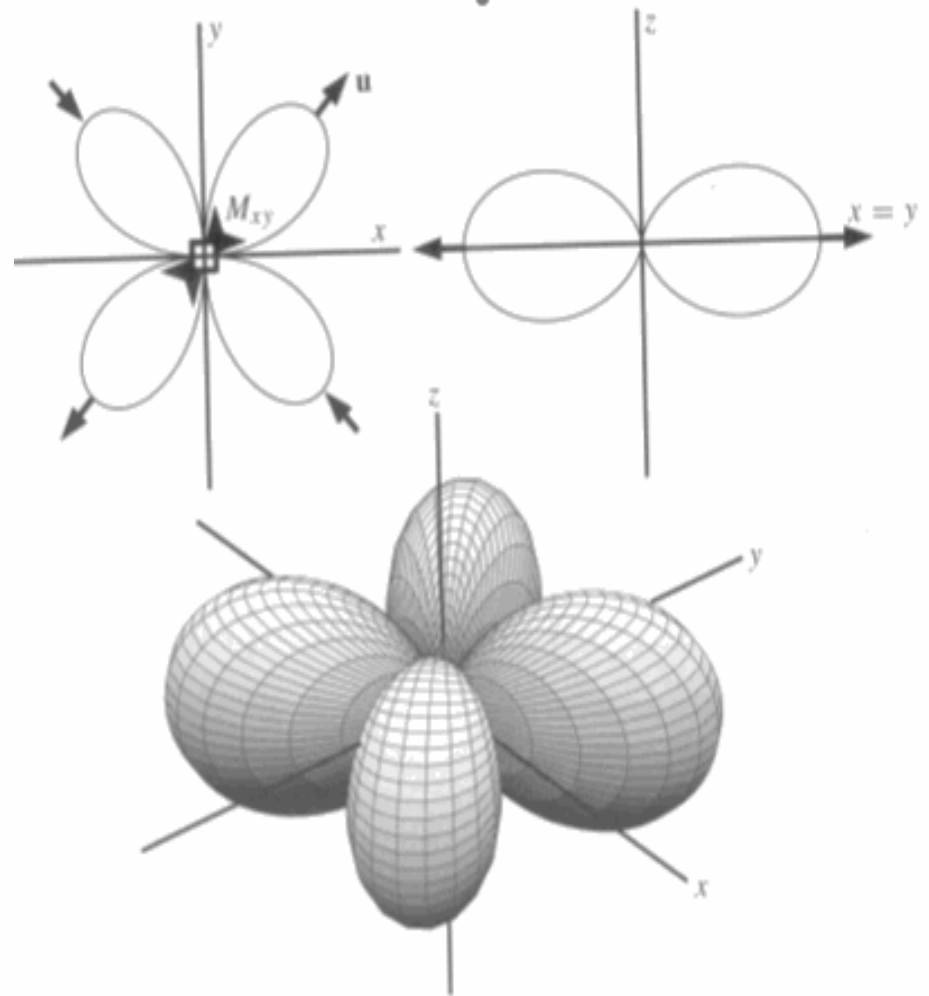


Fig. 4.22. The radiation patterns for P waves due to a double couple, M_{xy} . The plots show the relative amplitudes in different directions: the upper-left plot is in the cross-section in the x - y plane; the upper-right plot is in the plane $x = y$; and the lower plot is a view of the three-dimensional radiation pattern. Otherwise as Figure 4.14.

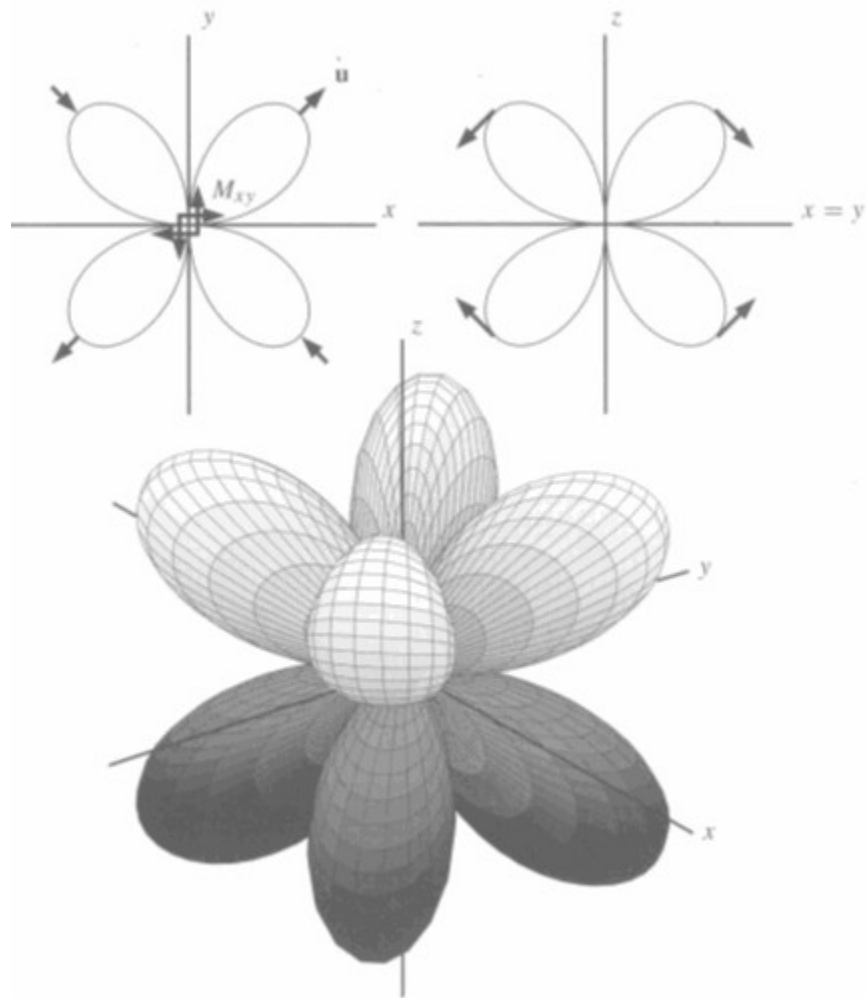


Fig. 4.24. The radiation patterns for SV waves due to a double couple, M_{xy} . As Figure 4.22.

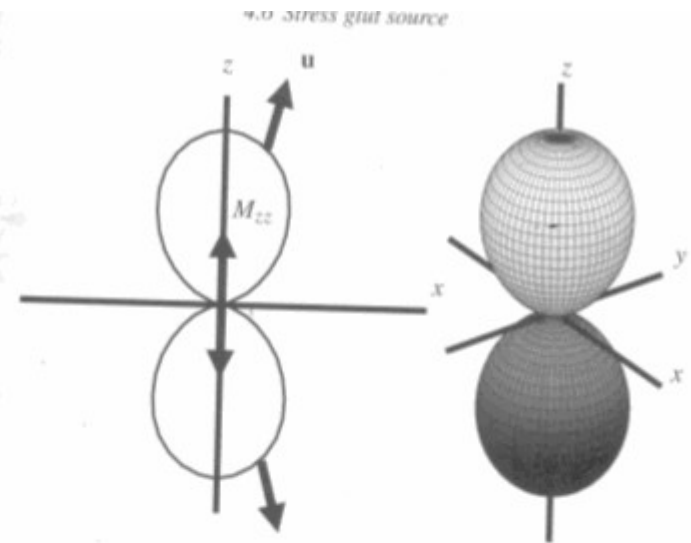


Fig. 4.20. The radiation patterns for P waves due to a dipole, M_{zz} . As Figure 4.14.

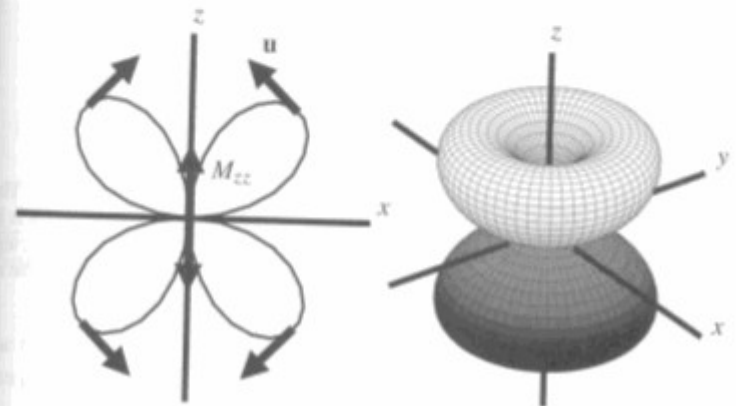
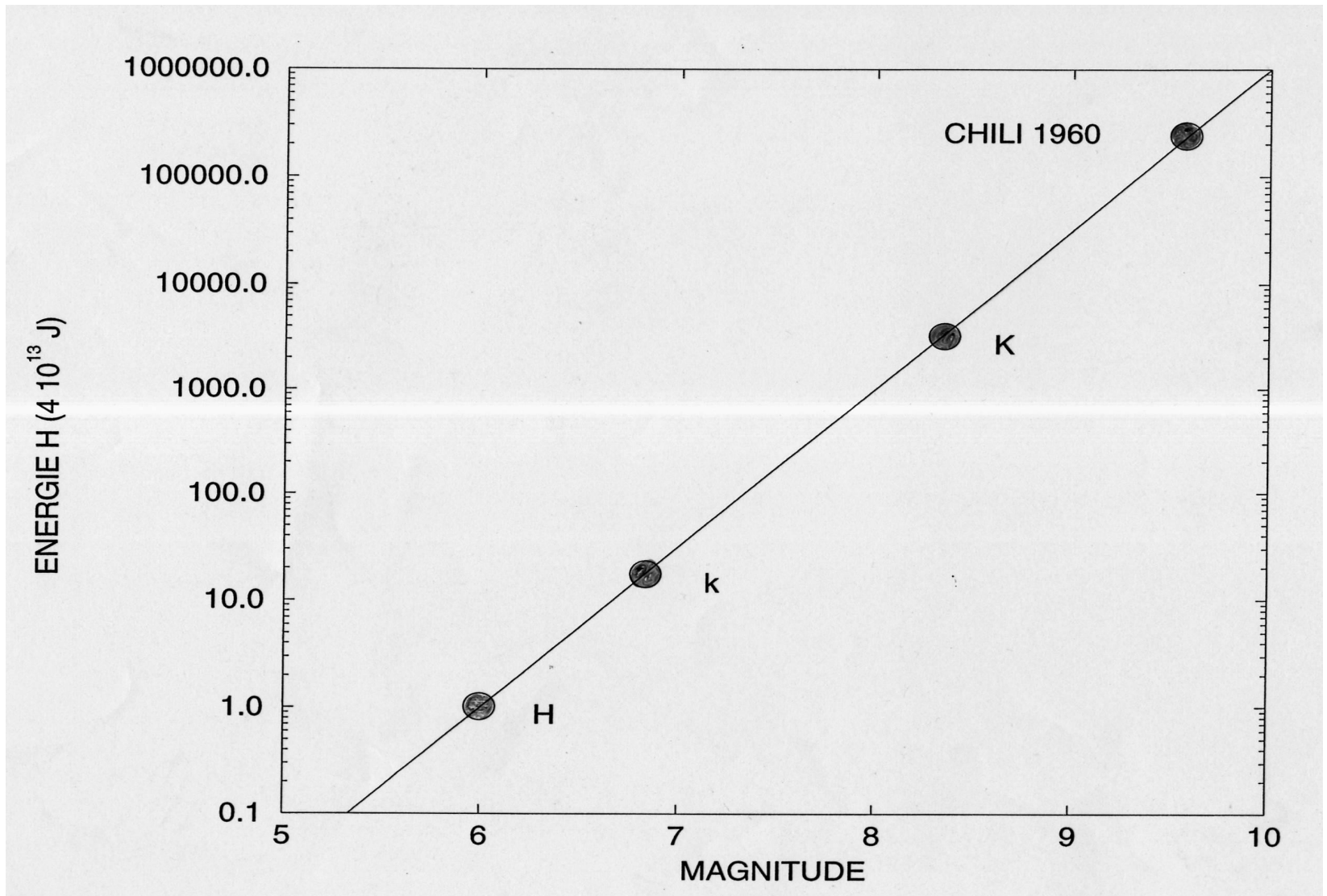


Fig. 4.21. The radiation patterns for SV waves due to a dipole, M_{zz} . As Figure 4.14.



Magnitude + 1 $\Rightarrow$ Energie x 32

Plusieurs types de magnitude.

Magnitude des ondes de surface

$$MS = \log(A_{20}) + b + c \log(\Delta)$$

A_{20} est l'amplitude mesurée maximale des ondes de surface (en général Rayleigh sur la composante verticale du sismomètre) à une période de 20 s,
 Δ est la distance épacentrale exprimée en degré,
 b et c sont des constantes de calibrations.

Moment sismique

$$M_0 = \mu S \Delta u$$

μ est la rigidité du milieu,
 S est la surface rompue durant le séisme,
 Δu est le déplacement moyen ayant eu lieu sur la faille.

Magnitude de moment

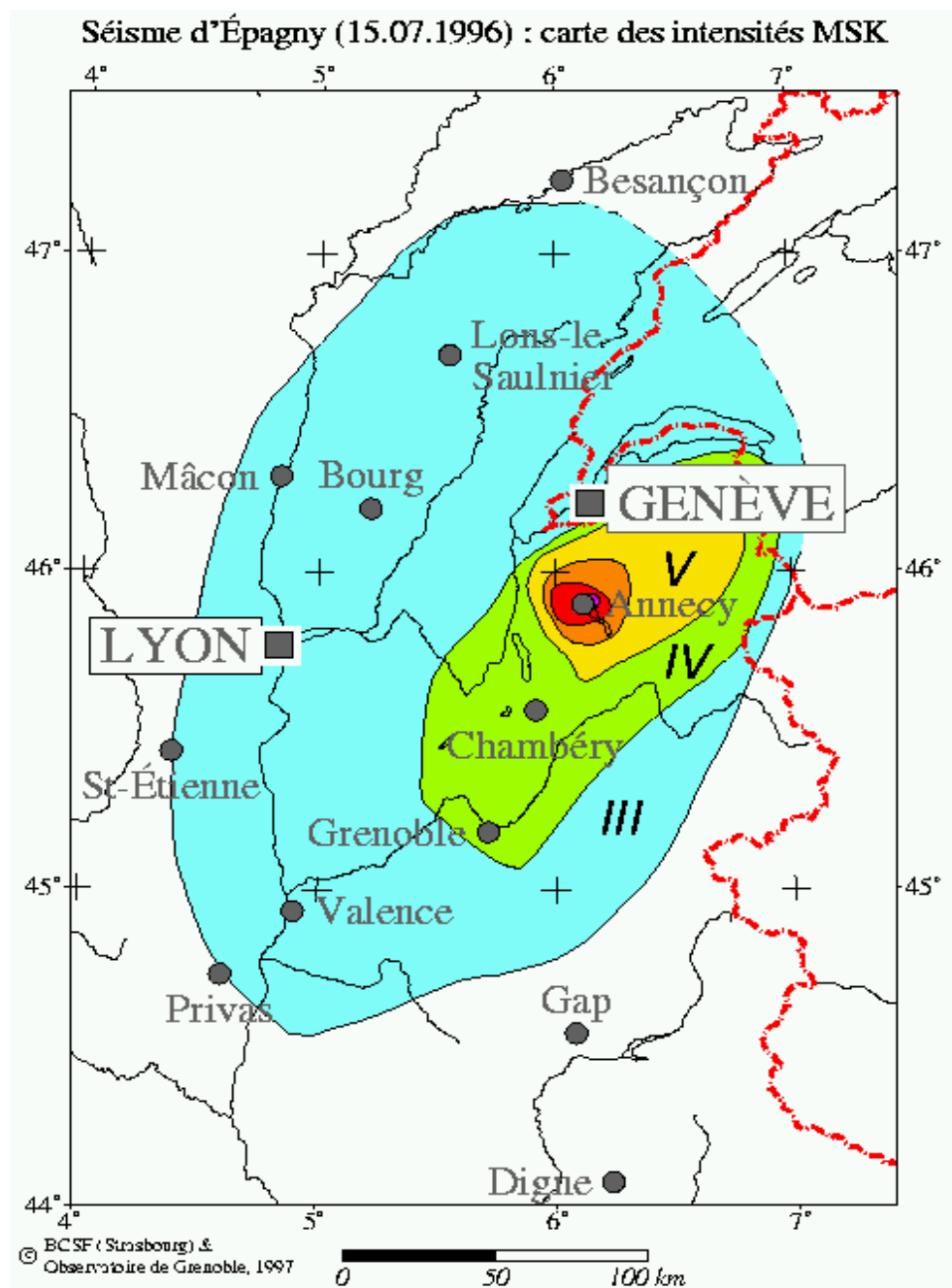
Définie par une relation empirique avec le moment sismique (exprimé en N.m):

$$\text{Log}_{10}(M_0) = 1.5M_w + 9.1$$

mesure de l'énergie... mais aussi les
dégâts



Carte d'intensité
interprétée:
exemple du
séisme d'Annecy
du 15 juillet 1996



L'échelle EMS 92 est la préfiguration de l'échelle EMS 98 utilisé par le Bureau Central Sismologique Français (BCSF) depuis janvier 2000. Ce sont des échelles européennes. Elles remplacent l'ancienne échelle MSK.

Degré	secousse	observations
-------	----------	--------------

I	imperceptible	La secousse n'est pas perçues par les personnes, même dans l'environnement le plus favorable.
----------	----------------------	---

II	à peine ressentie	Les vibrations ne sont ressenties que par quelques individus au repos dans leur habitation, plus particulièrement dans les étages supérieurs des bâtiments.
-----------	--------------------------	---

III	faible	L'intensité de la secousse est faible et n'est ressentie que par quelques personnes à l'intérieur des constructions. Des observateurs attentifs notent un léger balancement des objets suspendus ou des lustres.
------------	---------------	--

IV	ressentie par beaucoup	Le séisme est ressenti à l'intérieur des constructions par quelques personnes, mais très peu le perçoivent à l'extérieur. Certains dormeurs sont réveillés. La population n'est pas effrayée par l'amplitude de la vibration. Les fenêtres, les portes et les assiettes tremblent. Les objets suspendus se balancent.
-----------	-------------------------------	---

V	forte	Le séisme est ressenti à l'intérieur des constructions par de nombreuses personnes et par quelques personnes à l'extérieur. De nombreux dormeurs s'éveillent, quelques-uns sortent en courant. Les constructions sont agitées d'un tremblement général. Les objets suspendus sont animés d'un large balancement. Les assiettes et les verres se choquent. La secousse est forte. Le mobilier lourd tombe. Les portes et fenêtres battent avec violence ou claquent.
----------	--------------	---

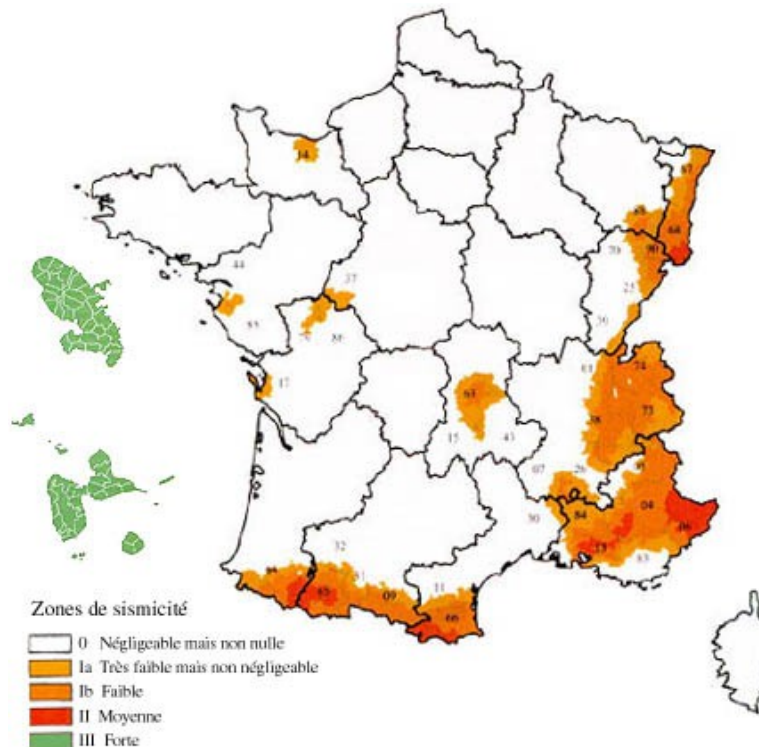
- VI légers dommages** Le séisme est ressenti par la plupart des personnes, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur. De nombreuses personnes sont effrayées et se précipitent vers l'extérieur. Les objets de petite taille tombent. De légers dommages sur la plupart des constructions ordinaires apparaissent: fissurations des plâtres; chutes de petits débris de plâtre.
- VII dommages significatifs** La plupart des personnes sont effrayées et se précipitent dehors. Le mobilier est renversé et les objets suspendus tombent en grand nombre. Beaucoup de bâtiments ordinaires sont modérément endommagés: fissurations des murs; chutes de parties de cheminées.
- VIII dommages importants** Dans certains cas, le mobilier se renverse. Les constructions subissent des dommages: chutes de cheminées; lézardes larges et profondes dans les murs; effondrements partiels éventuels.
- IX destructive** Les monuments et les statues se déplacent ou tournent sur eux-mêmes. Beaucoup de bâtiments s'effondrent en partie, quelques-uns entièrement.
- X très destructive** Beaucoup de constructions s'effondrent.
- XI dévastatrice** La plupart des constructions s'effondrent.
- XII catastrophique** Pratiquement toutes les structures au-dessus et au-dessous du sol sont gravement endommagées ou détruites.

Aléa et risque sismique

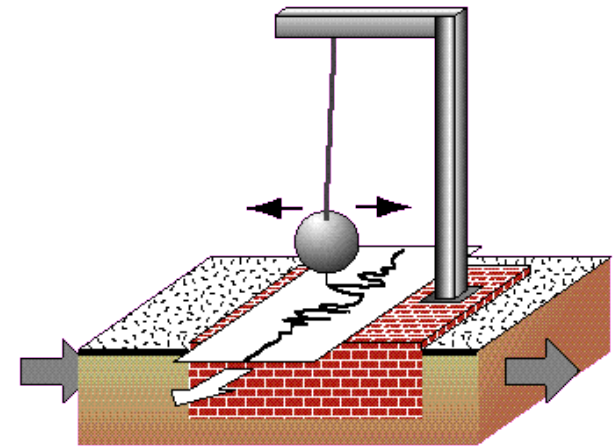
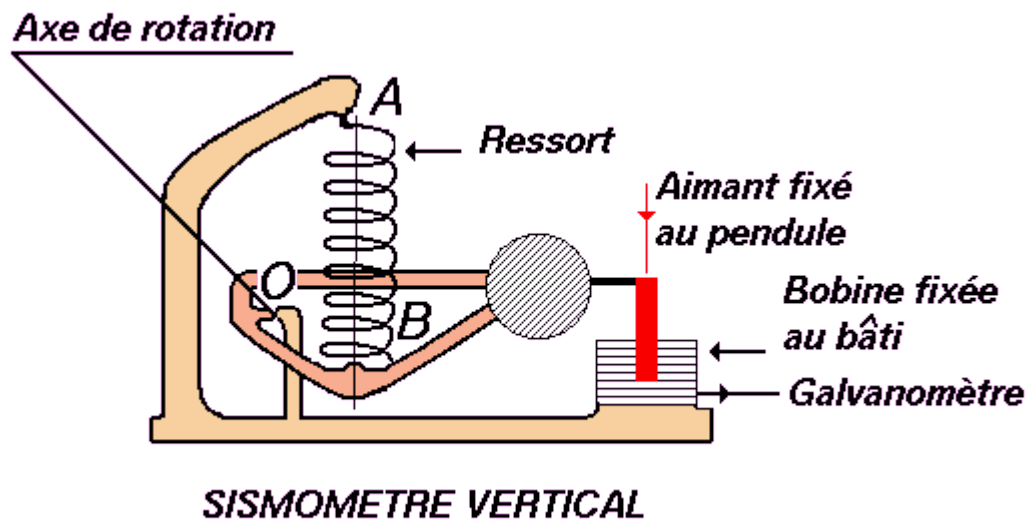
Aléa = susceptibilité d'un événement à se produire

Vulnérabilité = effet de l'évènement sur les biens et les personnes

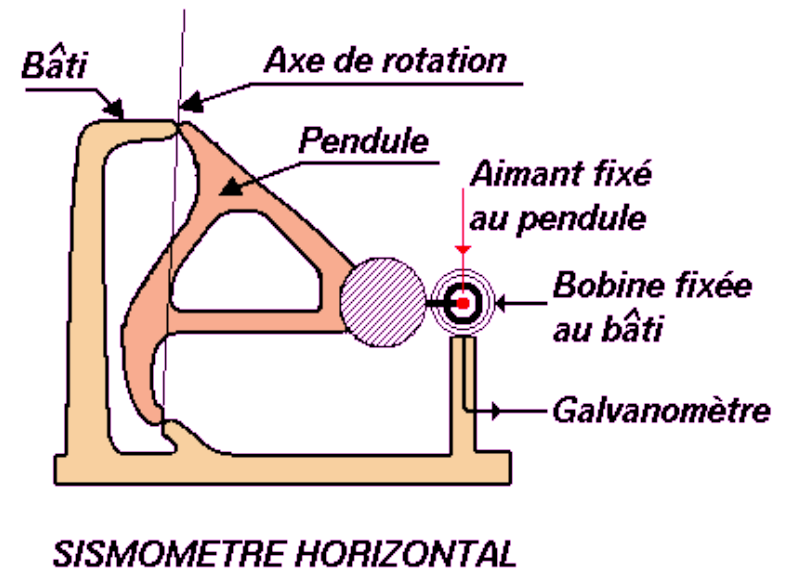
Risque = Aléa * Vulnérabilité



Aléa sismique
en France



Trois sismomètres Wielandt-Streckeisen STS-1 en position de fonctionnement sur une station sismologique. Chaque sismomètre mesure environ 40 cm de diamètre.





Un sismomètre Press-Ewing vertical construit en 1953. Sa période est réglable jusqu'à 30 s.

La boule de verre sur la composante verticale sert à éliminer les variations de pression.

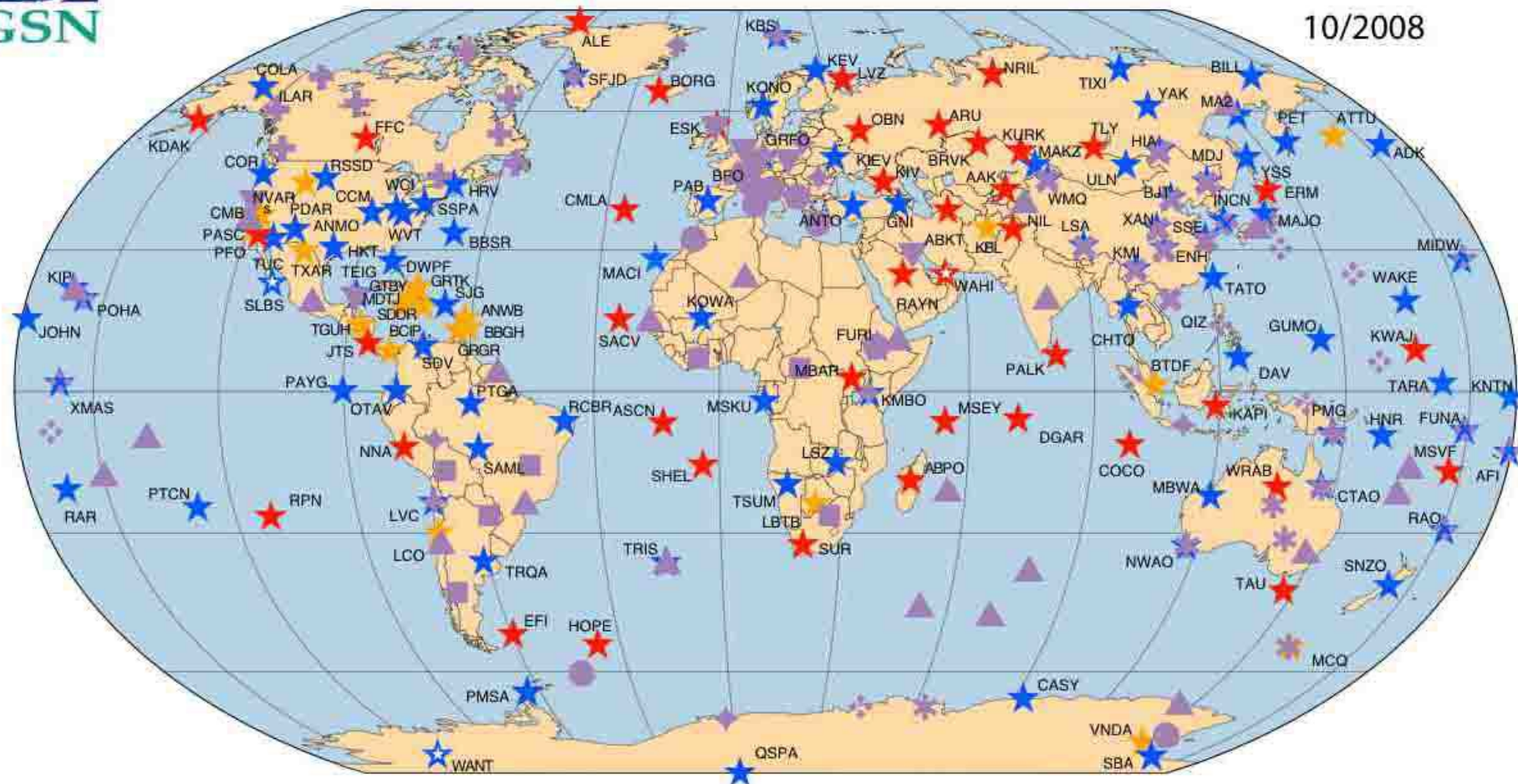
Des appareils de ce type ont équipé le réseau américain WWSSN.



GLOBAL SEISMOGRAPHIC NETWORK

FEDERATION OF BROADBAND DIGITAL SEISMIC NETWORKS (FDSN)

10/2008



- ★ IRIS / IDA Stations ★ IRIS / USGS Stations ★ Affiliate Stations
- ★ GSN Stations (planned)

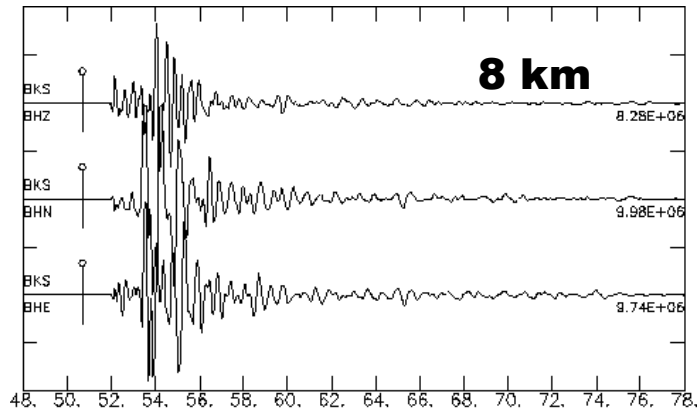
Australia Canada France Germany Italy Japan U.S. China Other



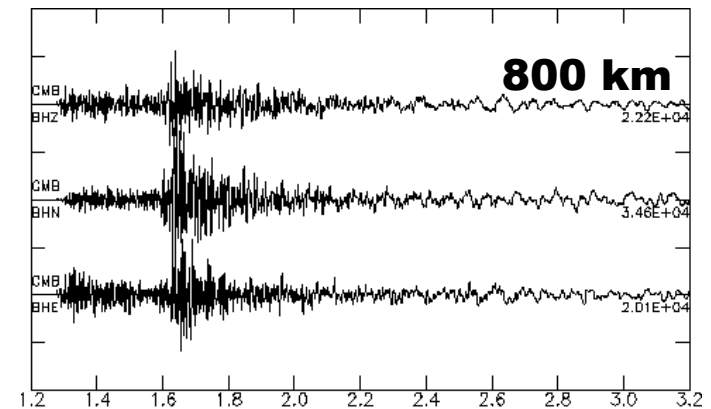
(France = réseau GéoScope)

Le sismogramme

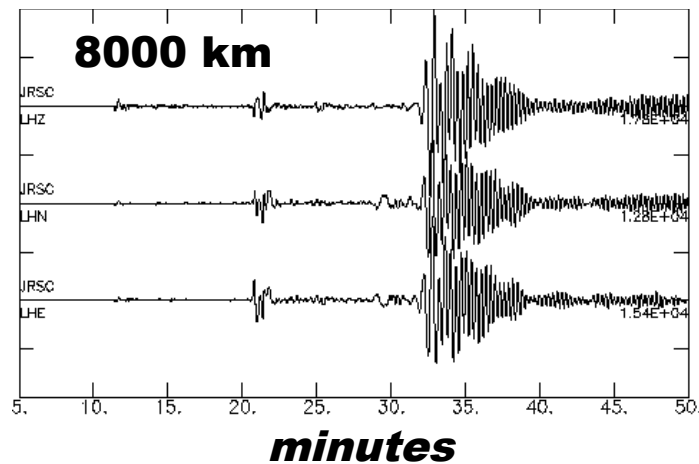
Plus un séisme est enregistré loin, plus l'enregistrement dure longtemps ...



secondes

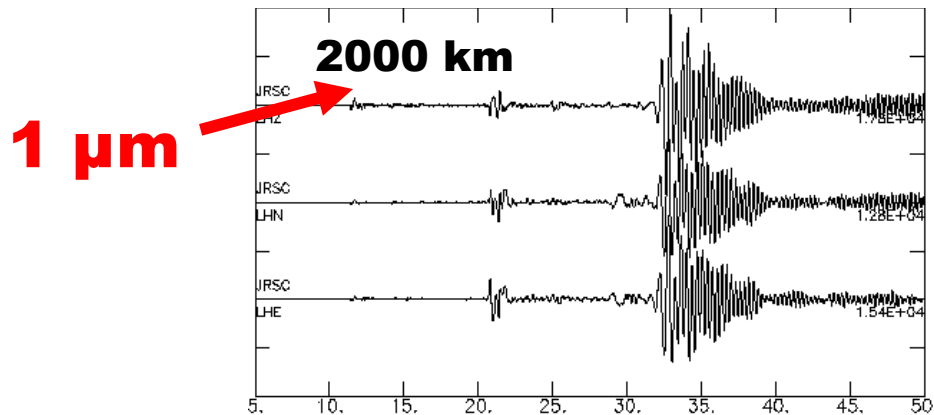
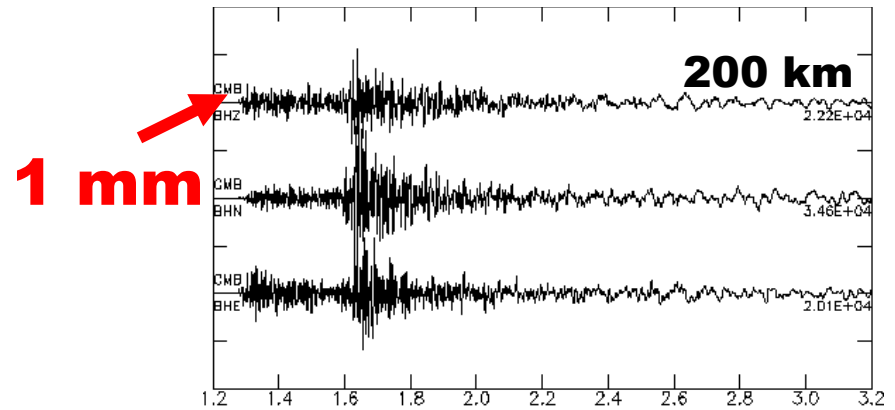
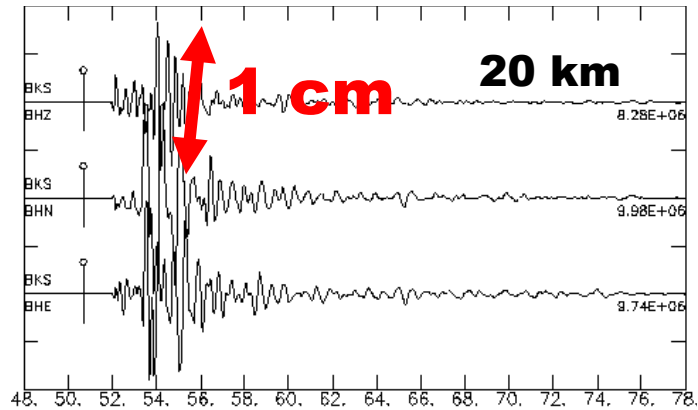


minutes



Le sismogramme

... mais plus l'amplitude du mouvement est faible



Les failles *décrochantes*, *inverses*, *normales* :



Séismes, failles et décalages



Rivière décalée par la faille de San Andreas



Décalages dans un champ
(séisme d'Impérial 1979)



Décalage d'une rangée d'arbres
(séisme de Motagua 1976)



Rails courbés
(séisme d'Izmit, Turquie 1999)



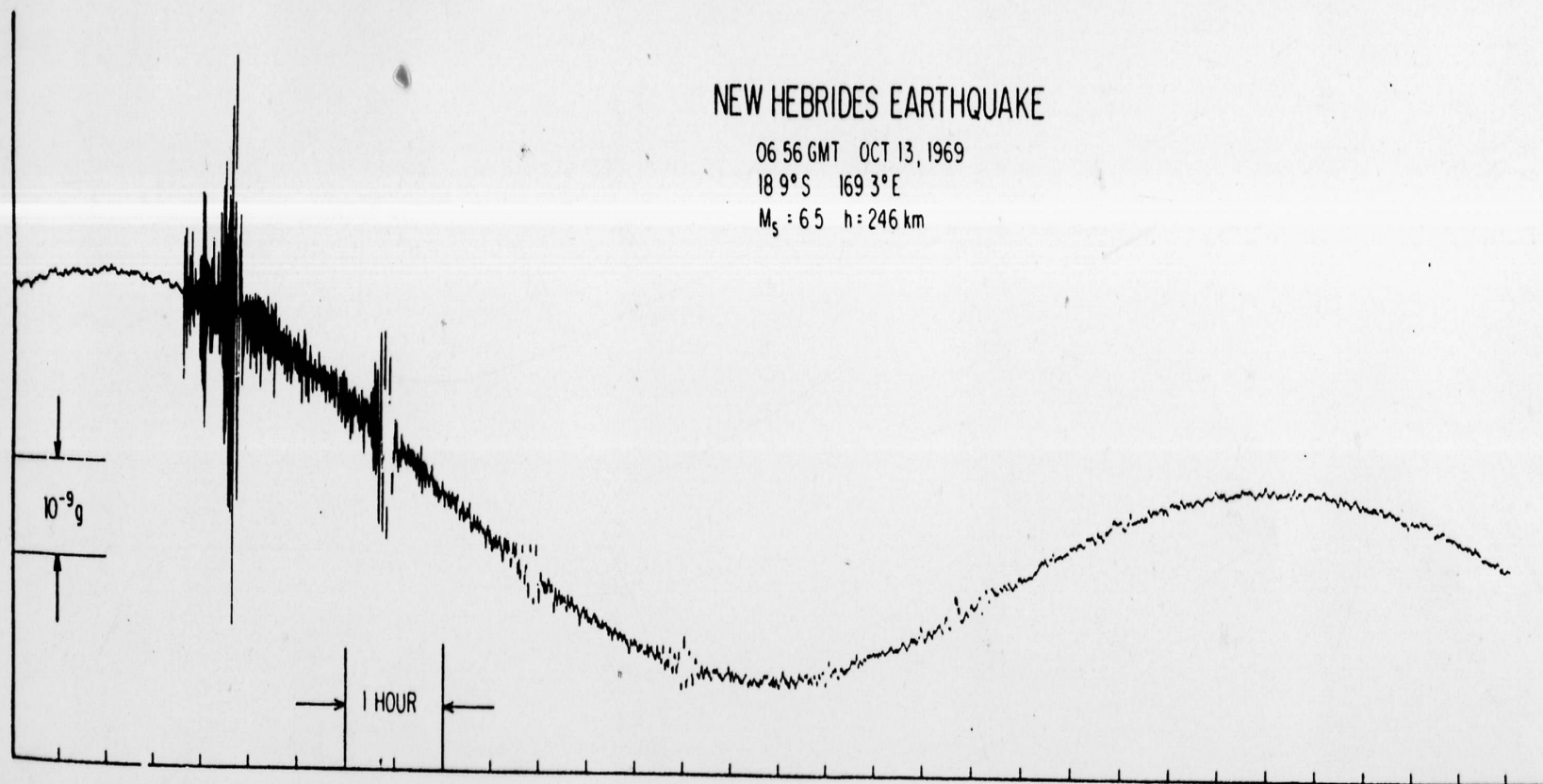
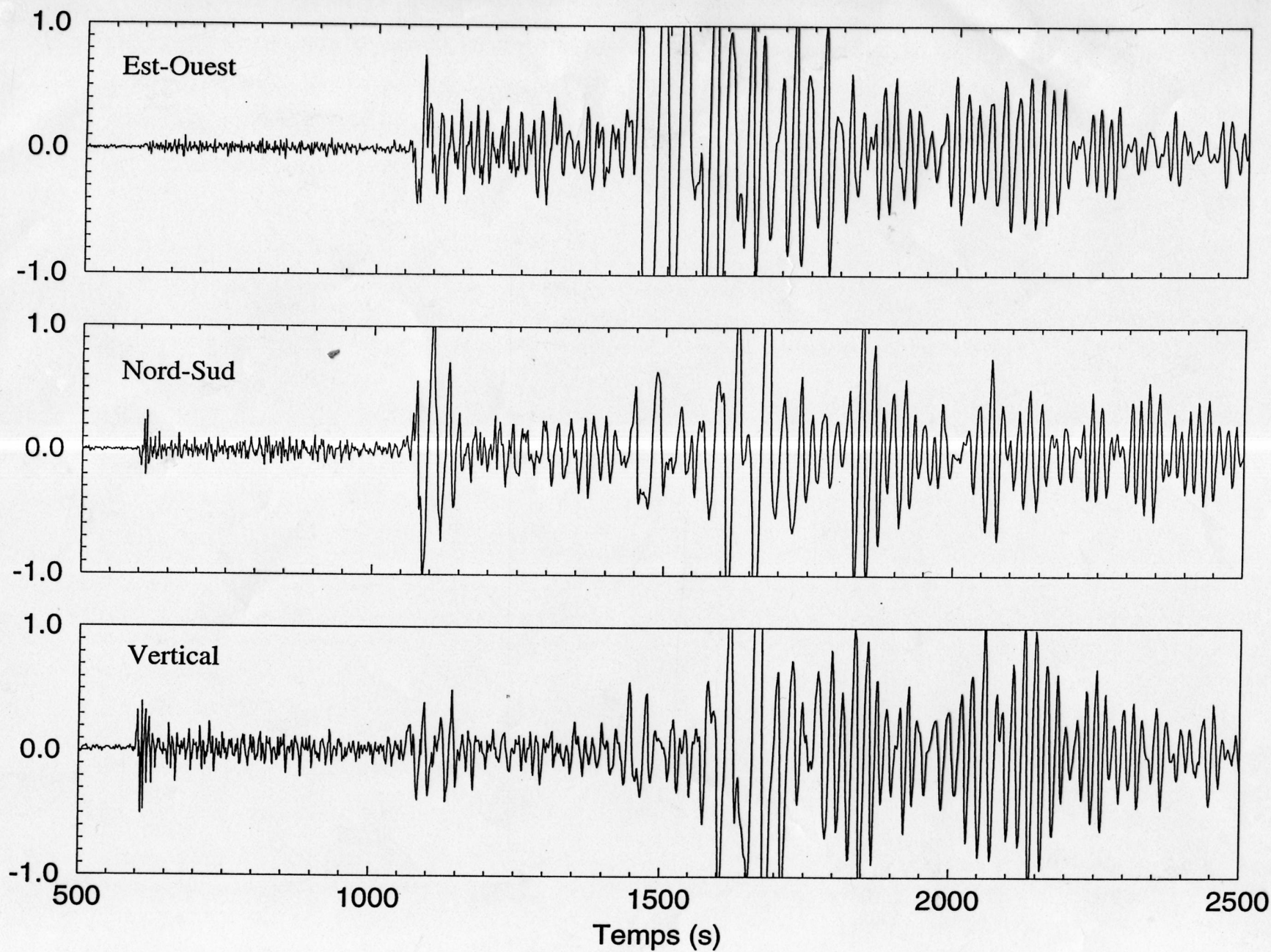


Fig. 1. Accelerogram for New Hebrides earthquake. The frequency band 1 to 30 c/hr is amplified 40 db with respect to the bodily tidal frequencies. The vertical scale, 10^{-9} gm, is to be used for the band 1 to 30 c/hr.

Charter Towers, Australie



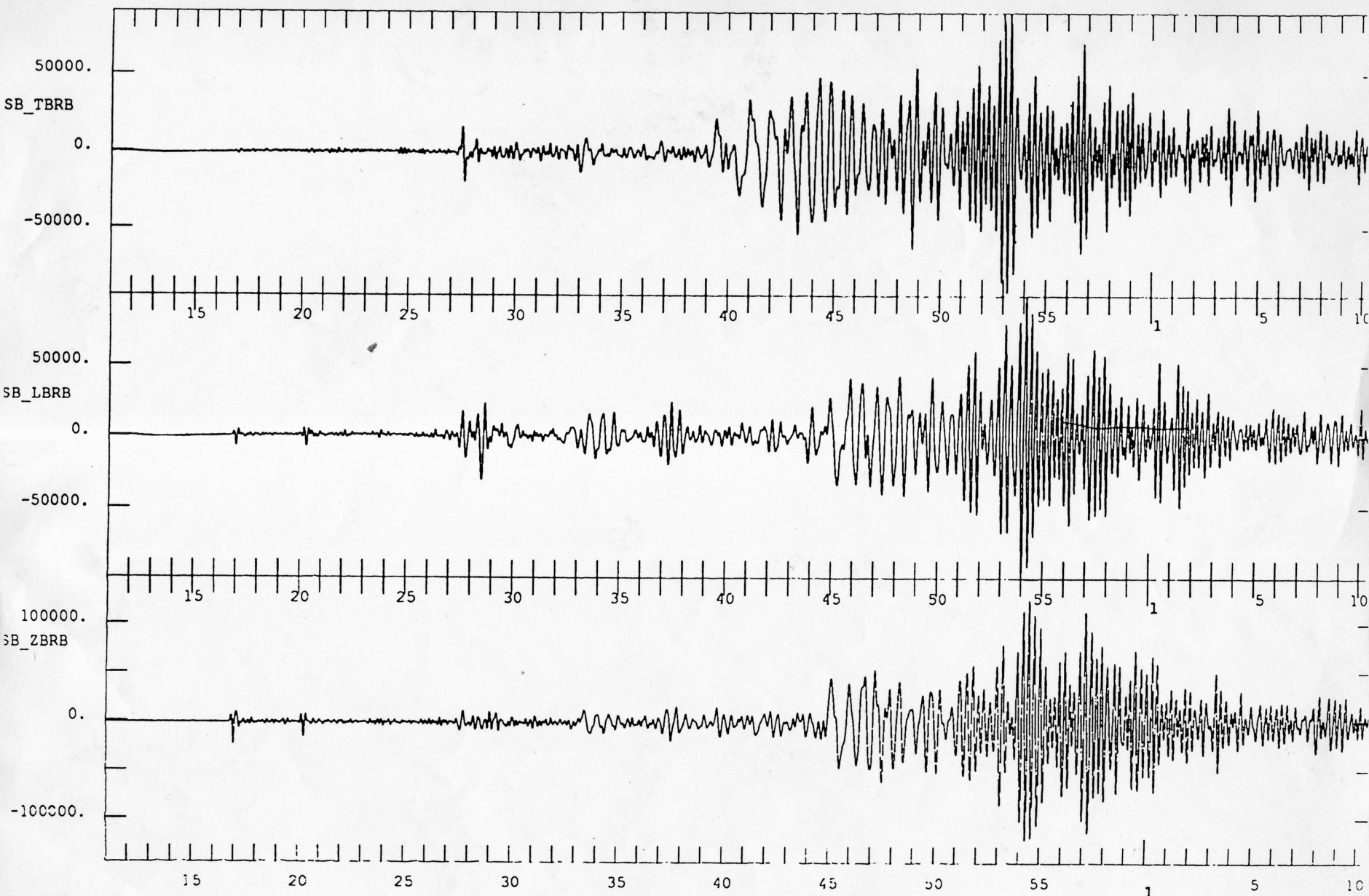
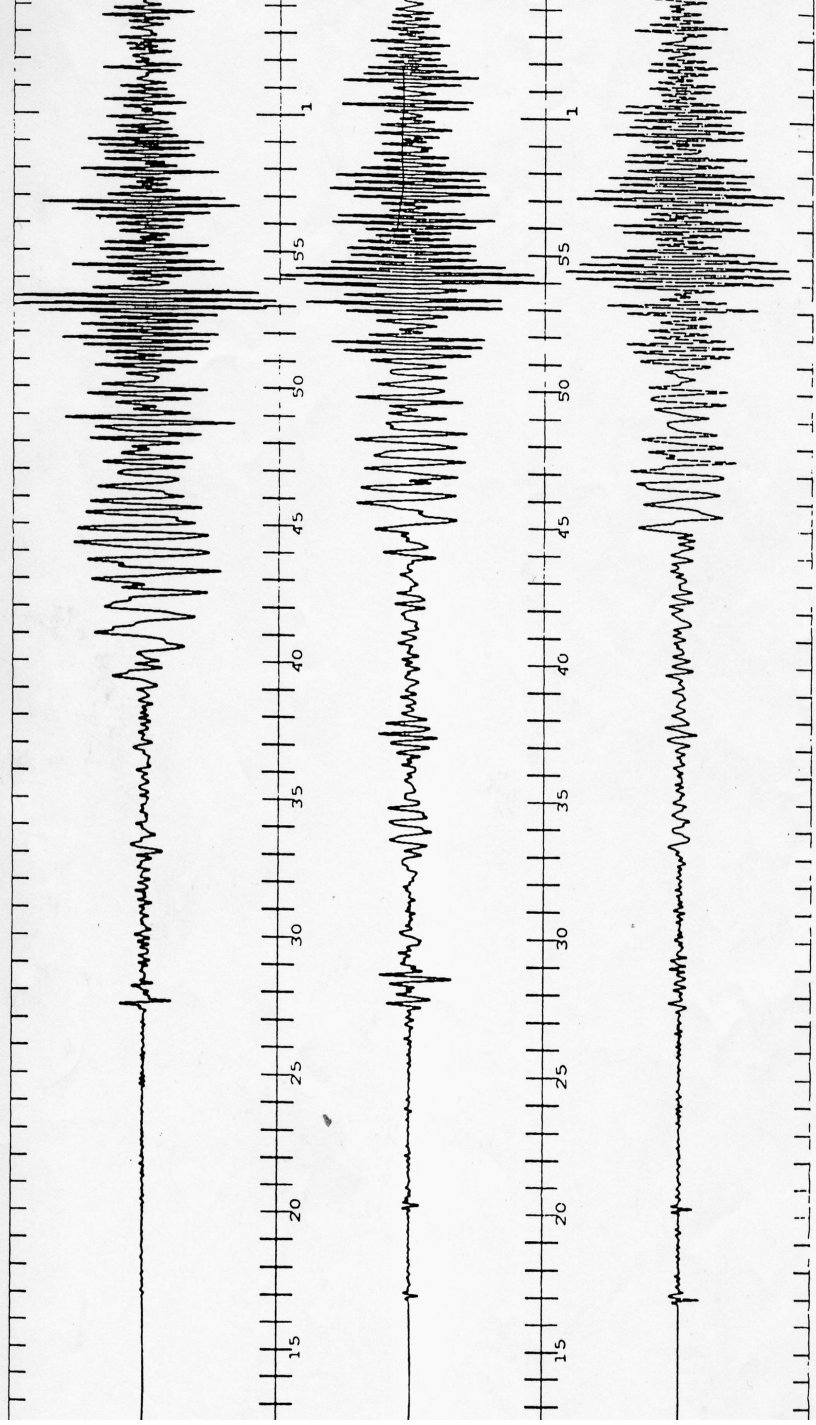
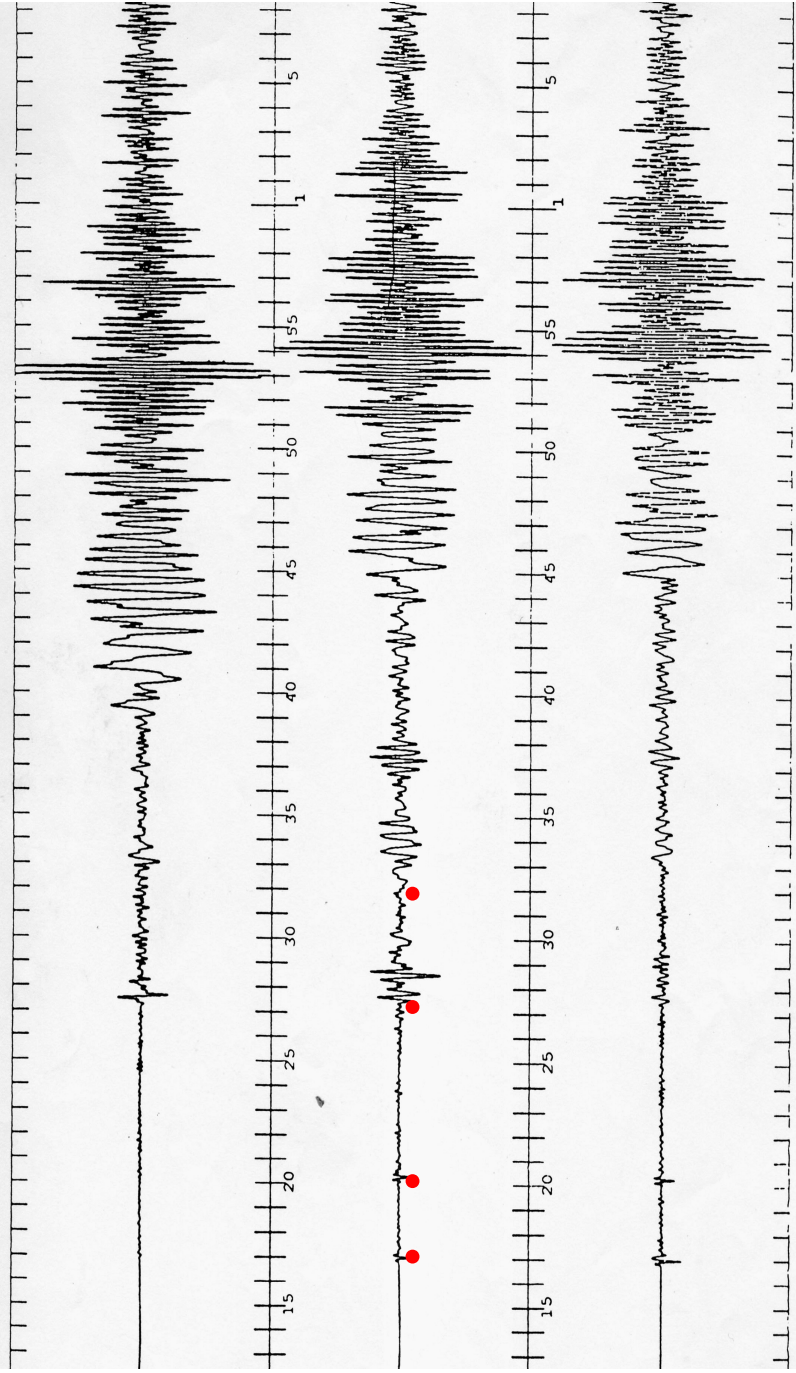


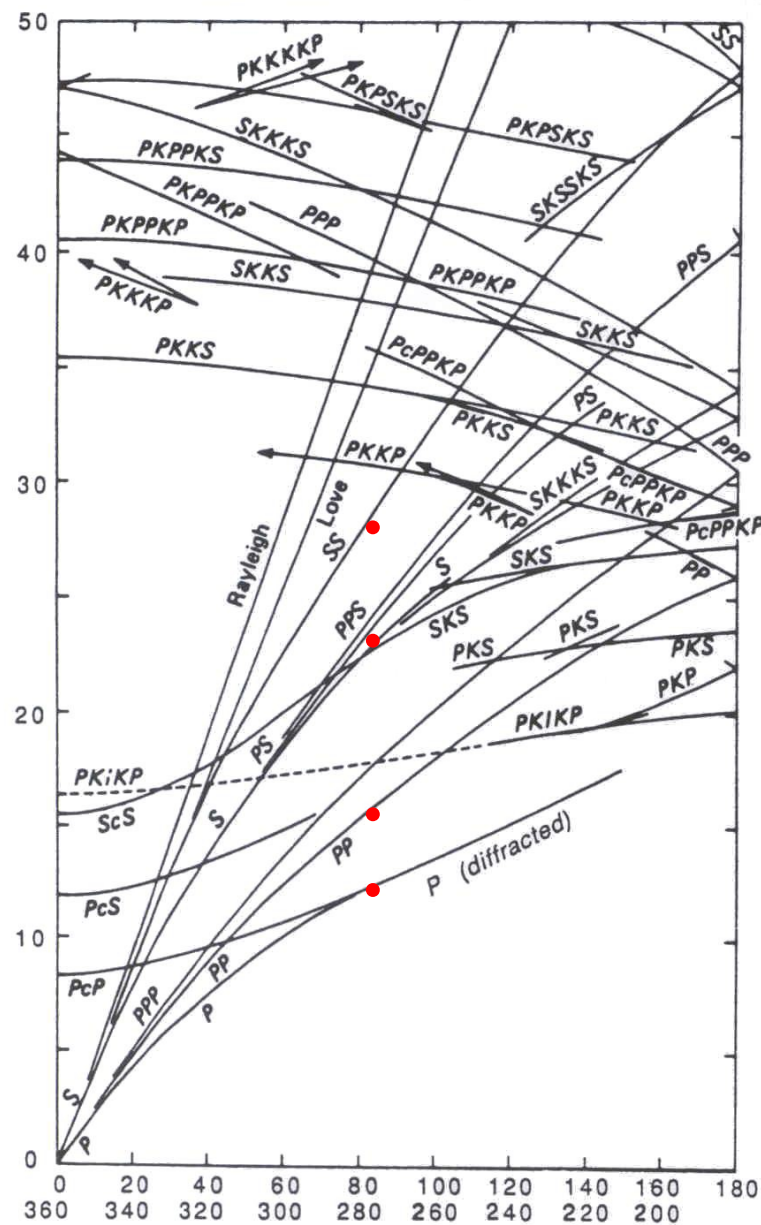
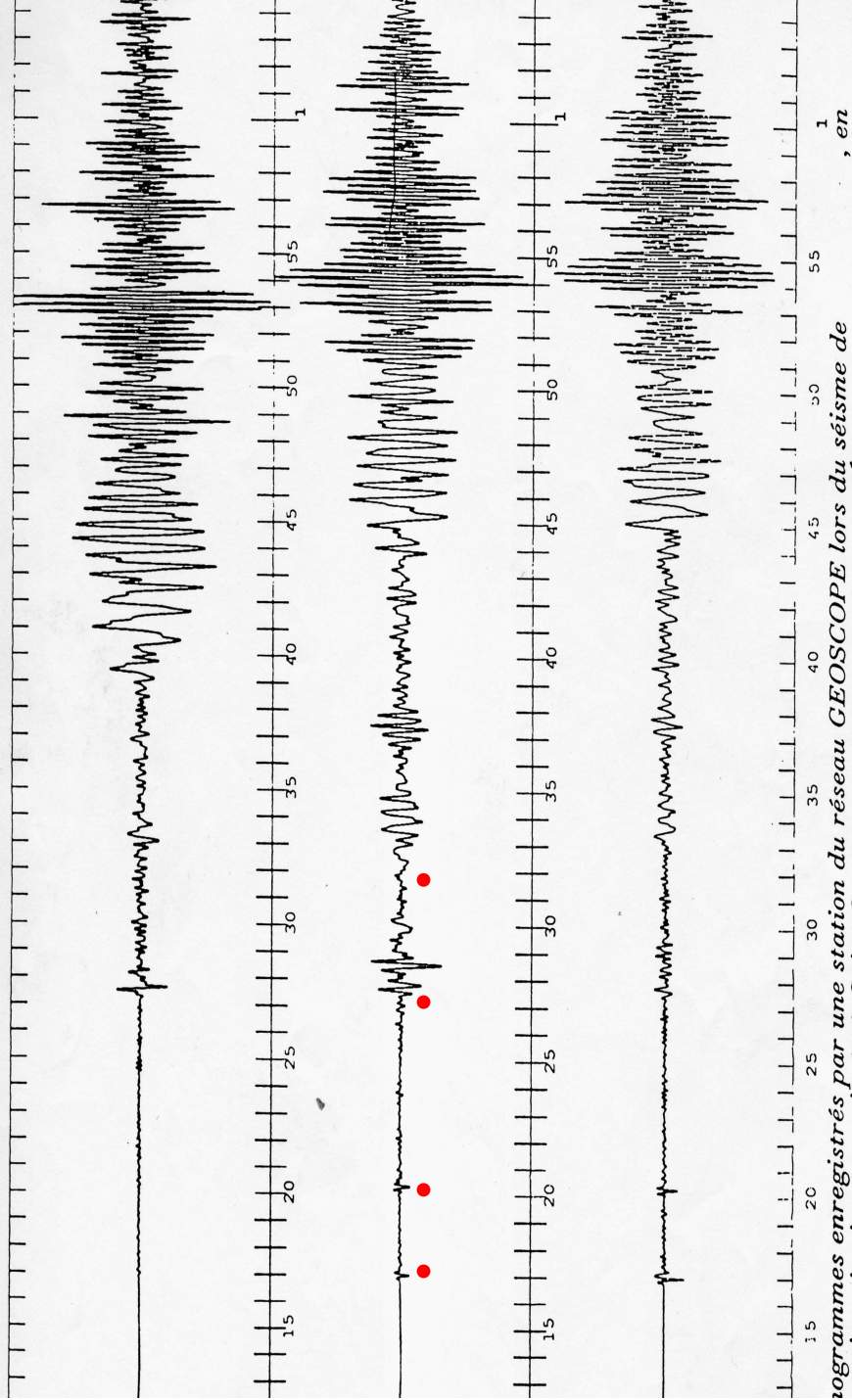
Fig. 18 – Sismogrammes enregistrés par une station du réseau GEOSCOPE lors du séisme de , en , le 17 octobre 1989. La station sismique est située à Saint-Sauveur-en-Rue, près de Saint-Étienne, en France. Chaque trace représente :

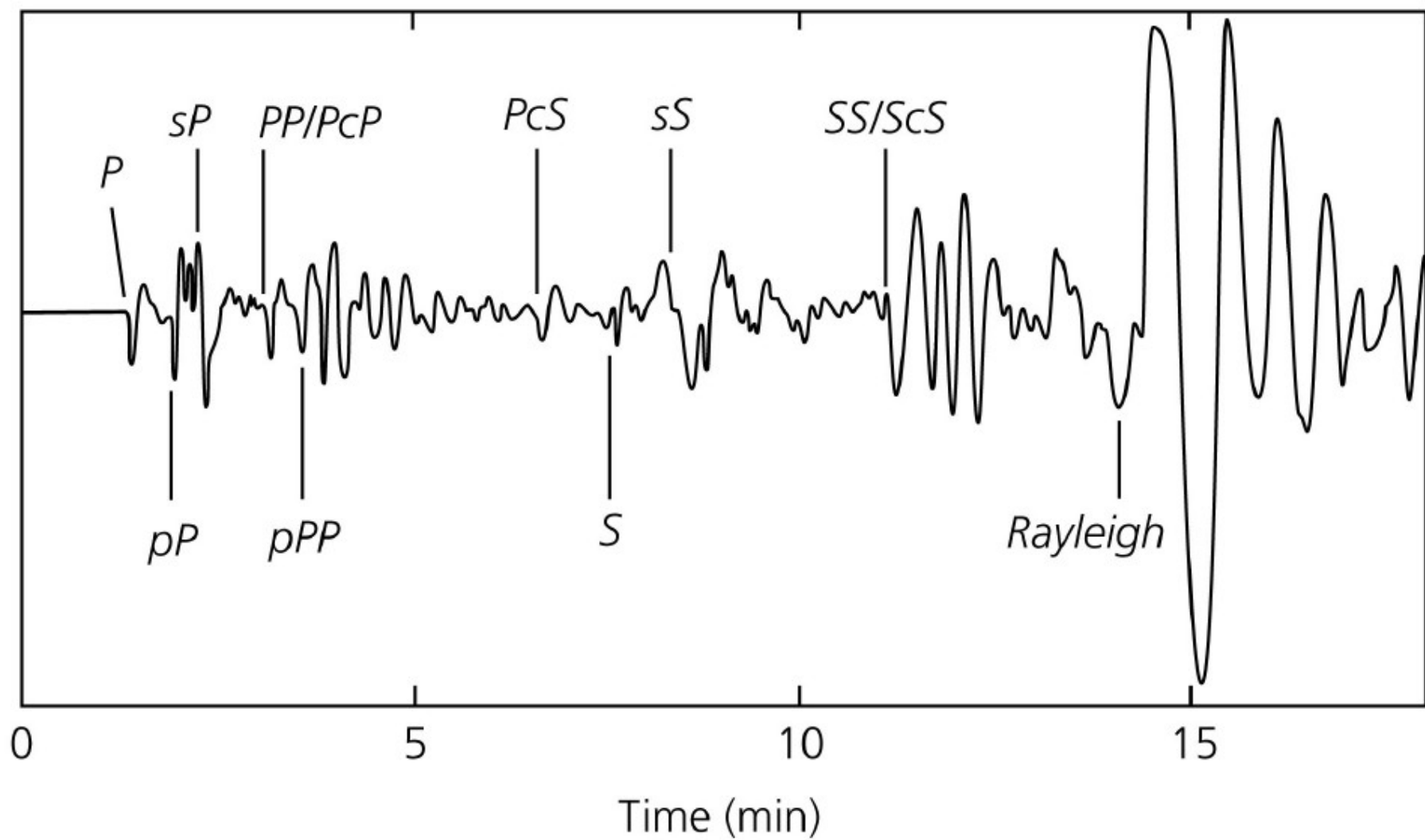


rogrammes enregistrés par une station du réseau GEOSCOPE lors du séisme de , en station sismique est située à Saint-Sauveur-en-Rue, près de Saint-Etienne. en France Chaque trace



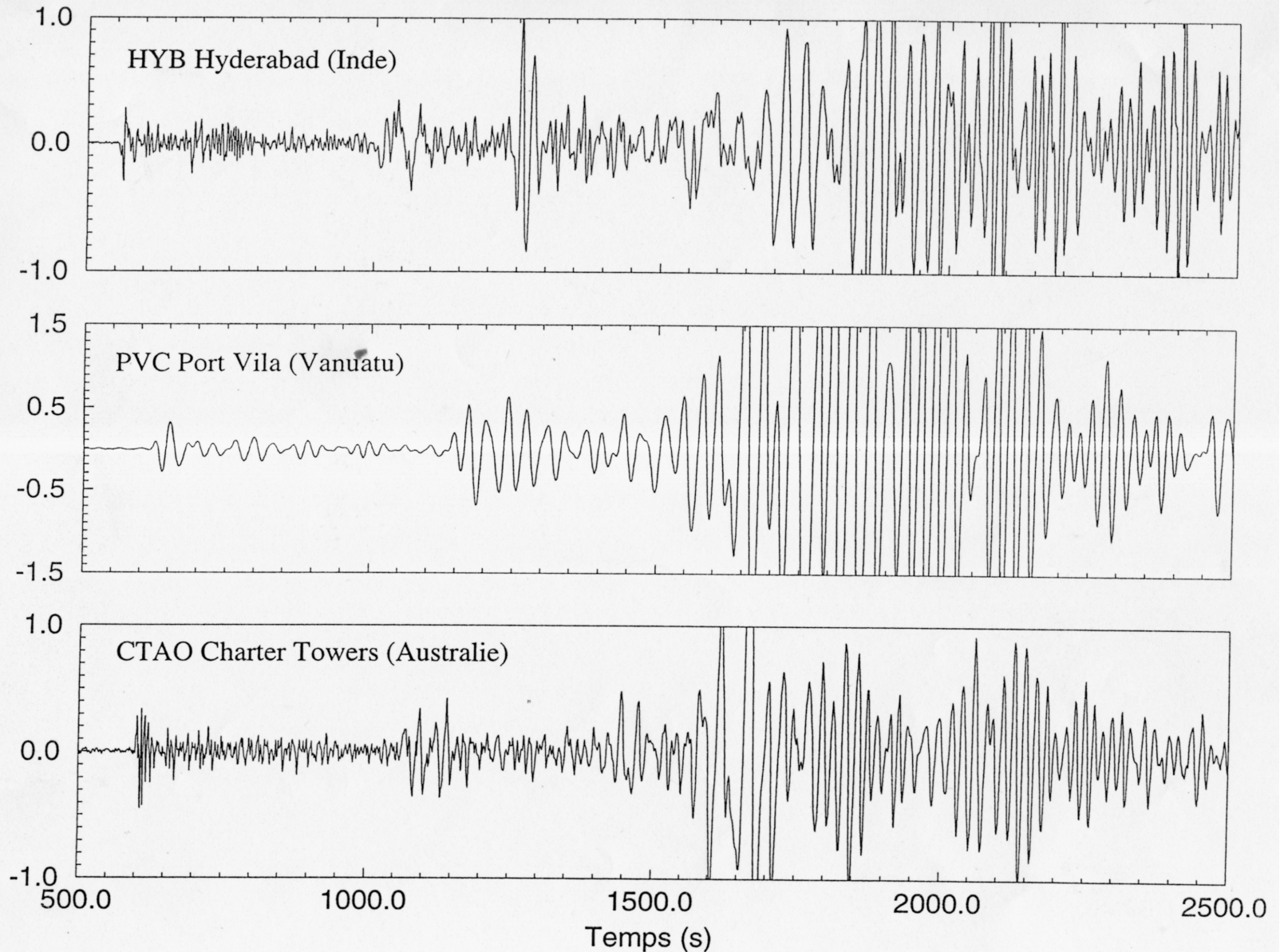
rogrammes enregistrés par une station du réseau GEOSCOPE lors du séisme de , en , le 1 station sismique est située à Saint-Sauveur-en-Rue, près de Saint-Étienne. en France Chaque trace correspond





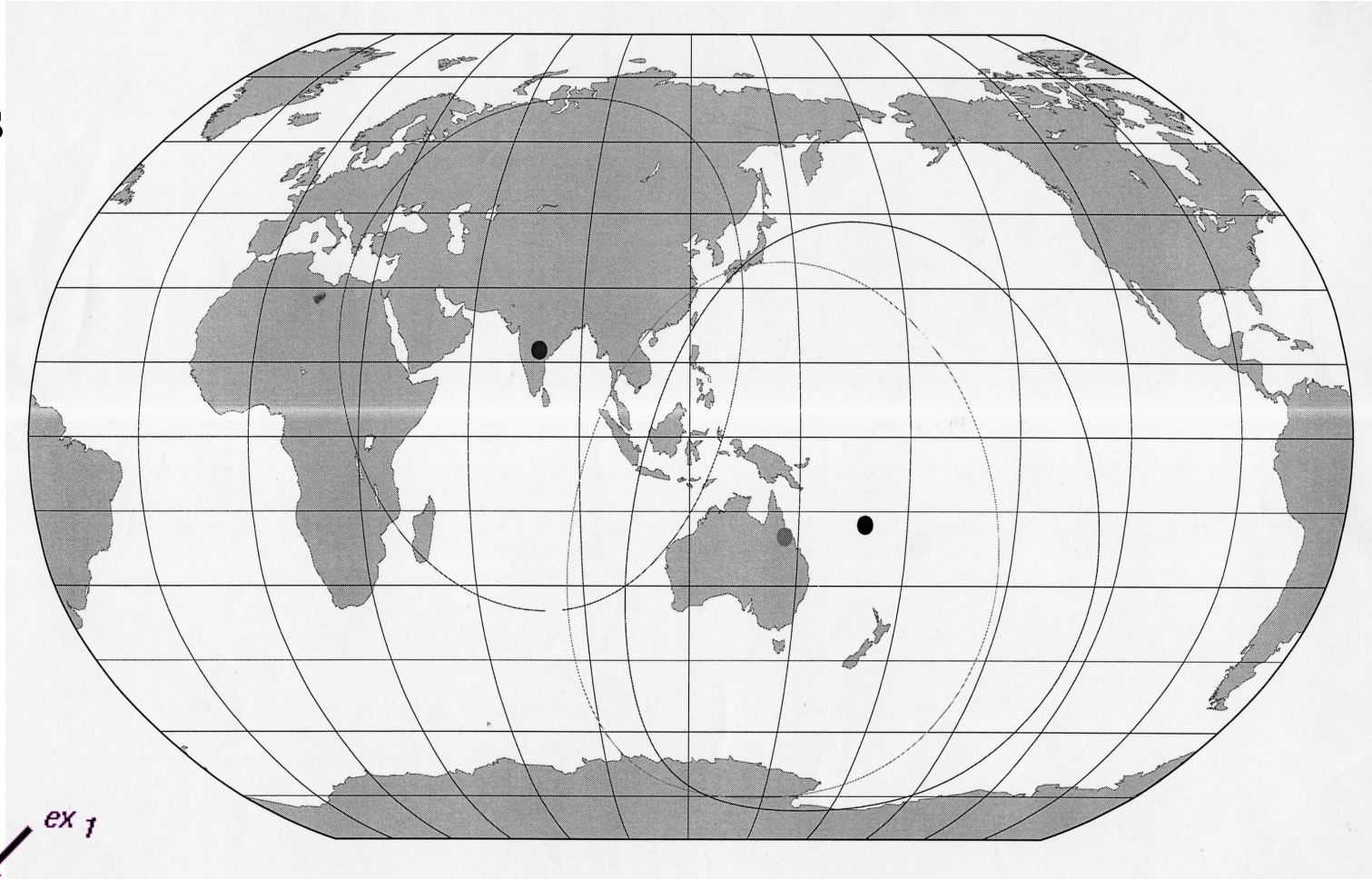
Localisation de séismes

Composante verticale

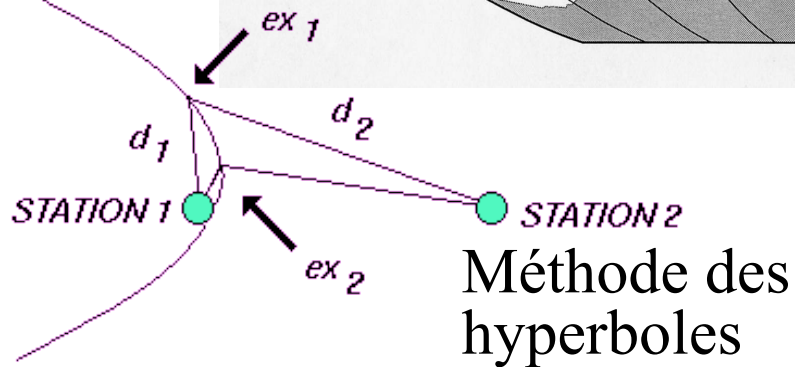


Localisation de séismes

Méthode des
cercles



HYPERBOLE

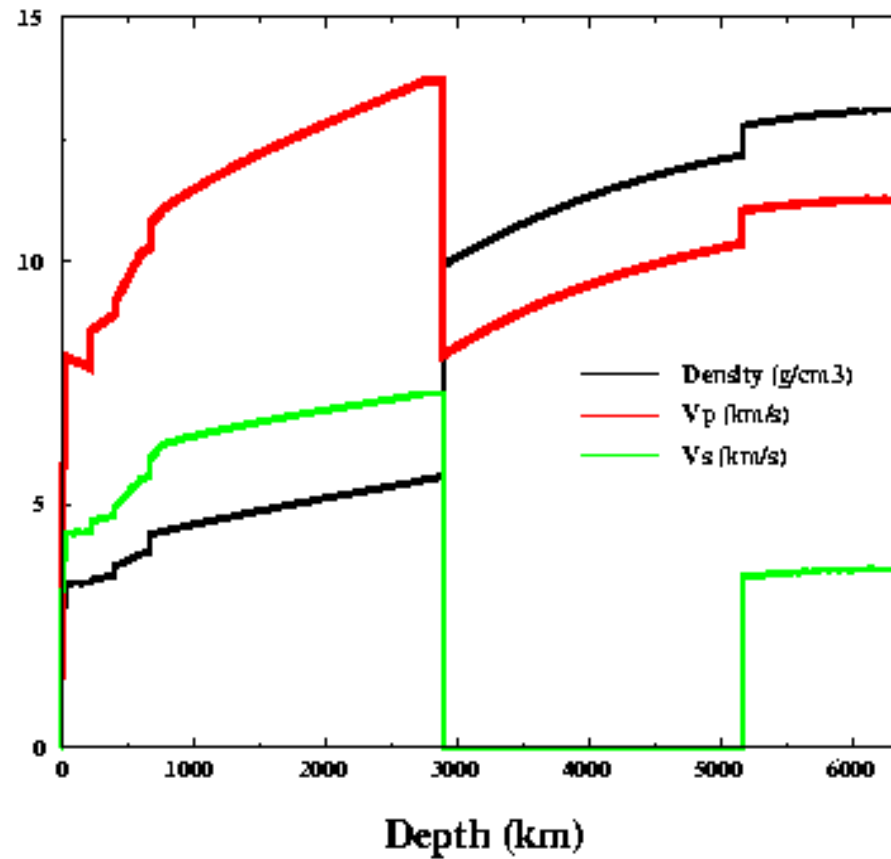


Méthode des
hyperboles

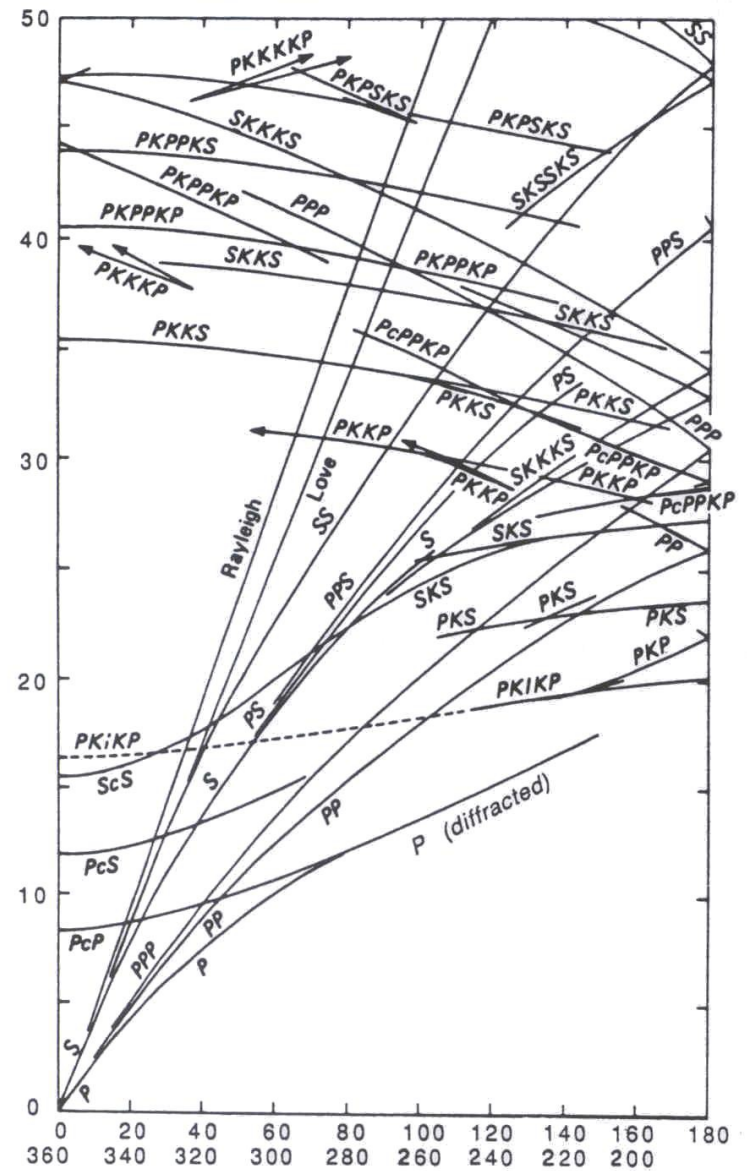
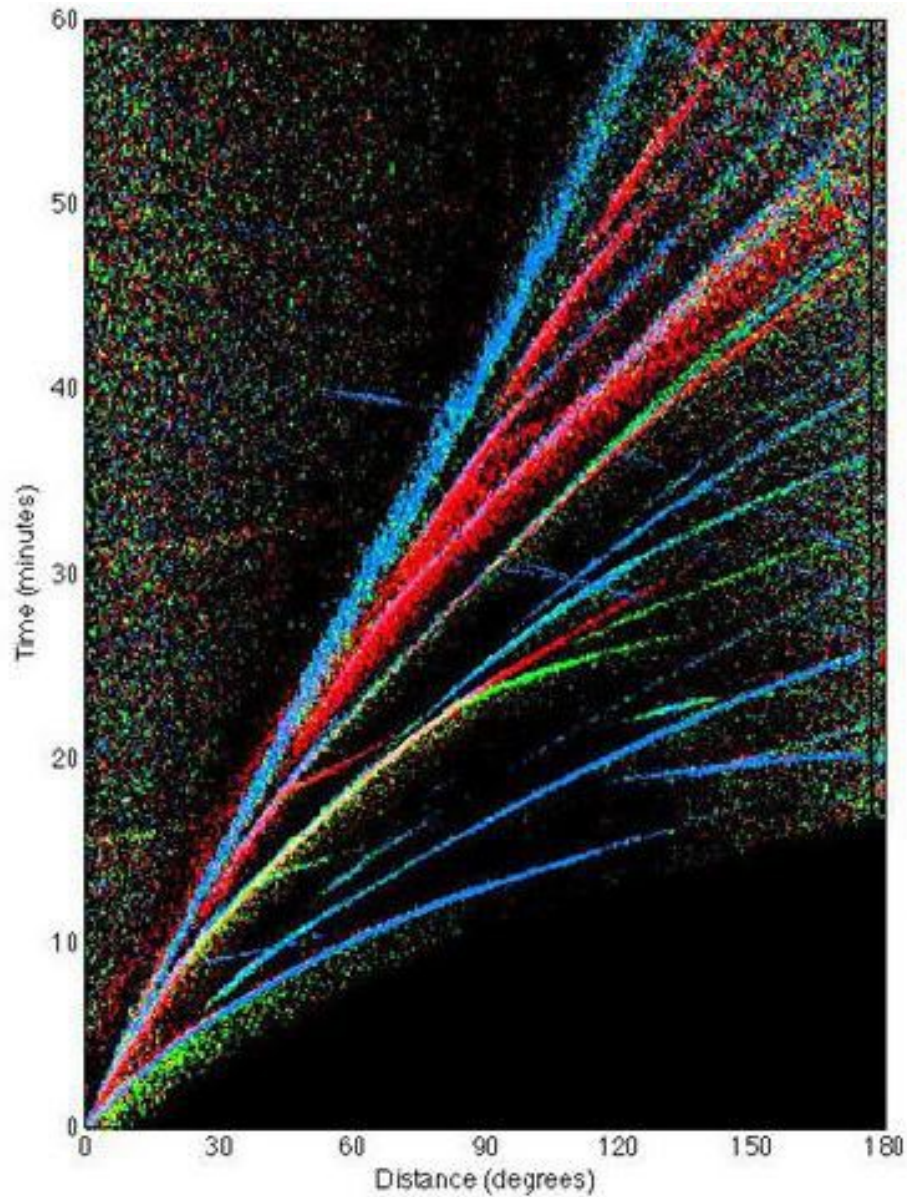
Et utilisation de
la polarité
des ondes

Construire des modèles sphériques de Terre

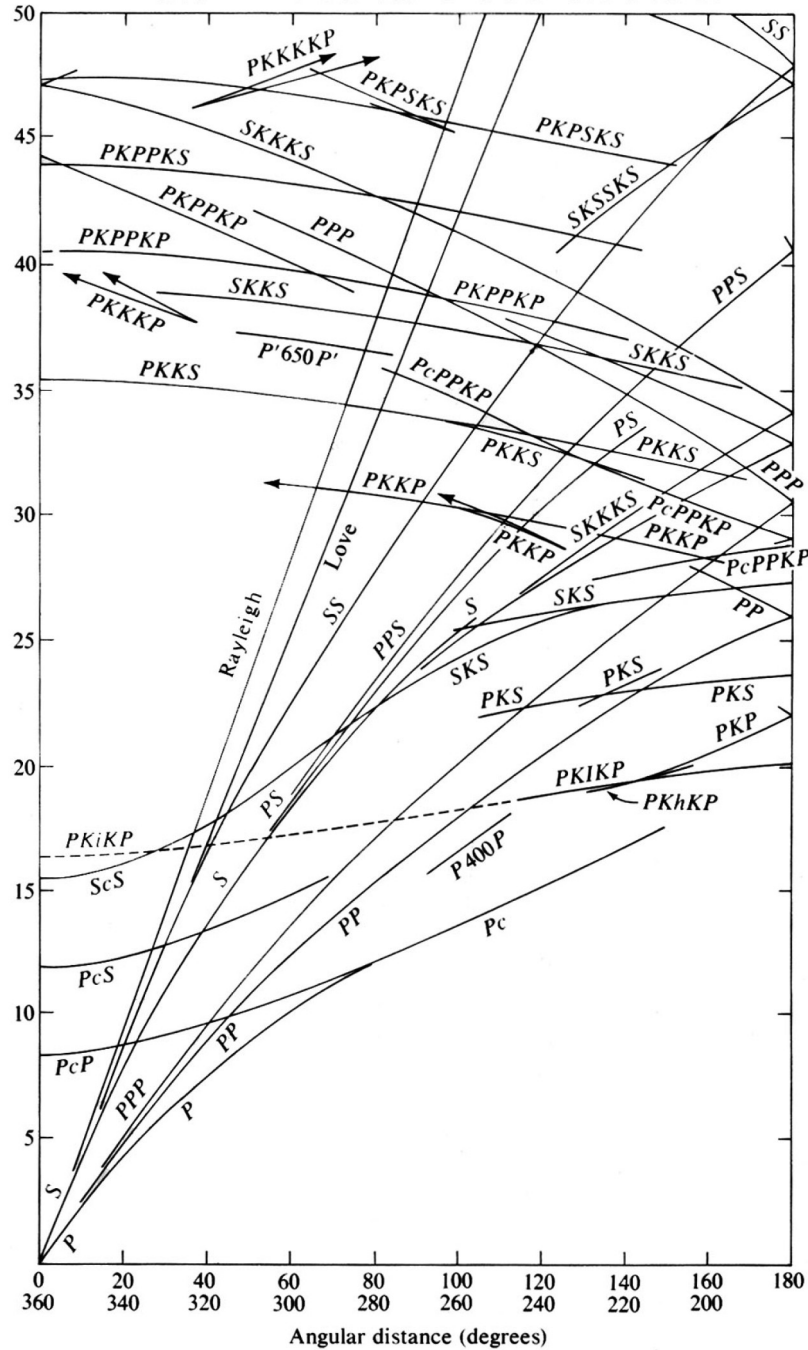
MANTLE DENSITY: SEISMOLOGY



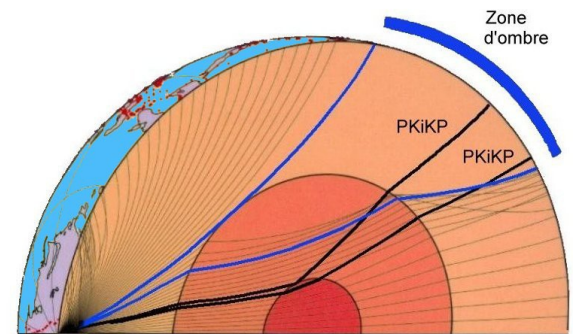
Ondes P et S

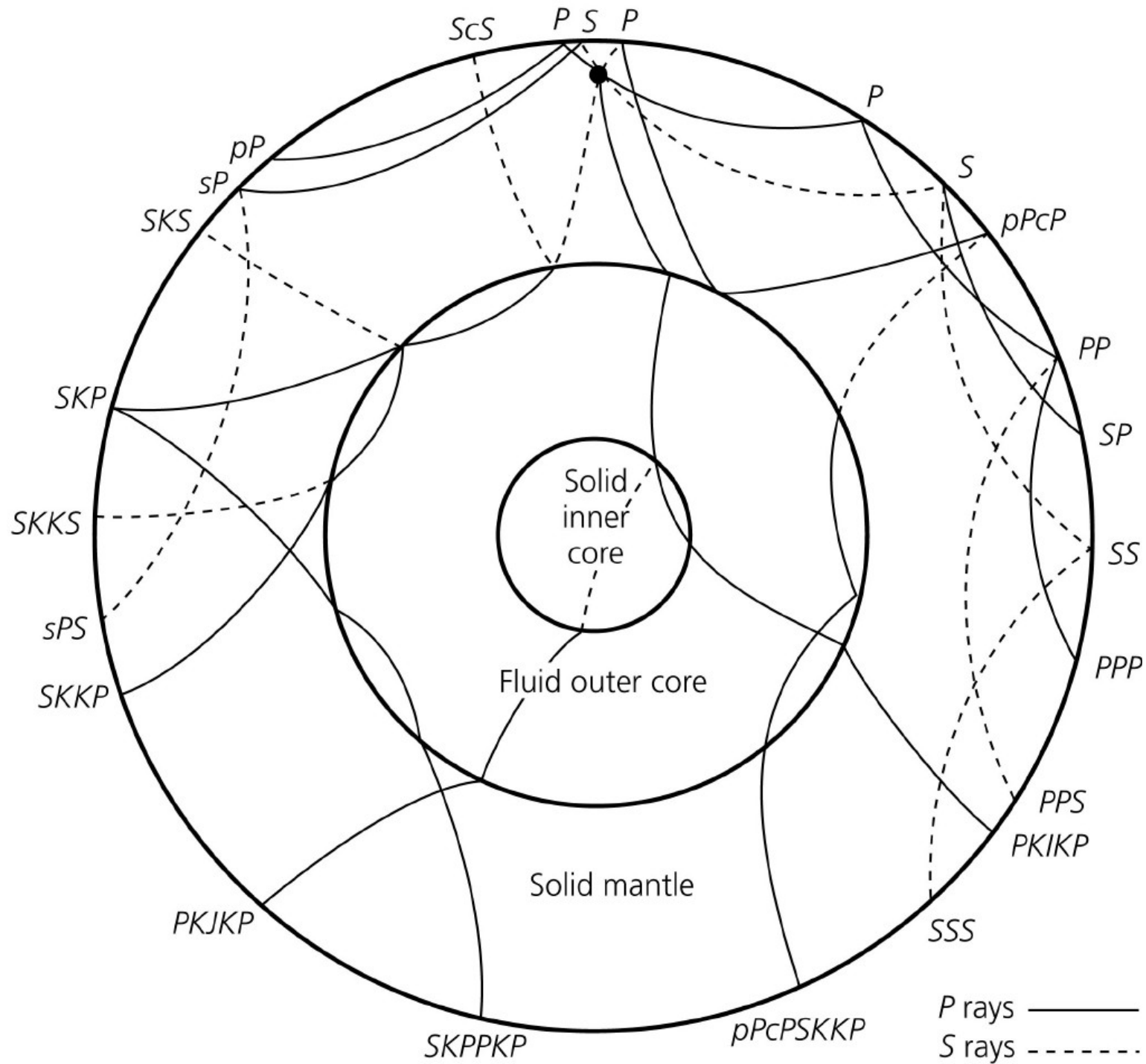


Travel-Time Curves for a Surface Source



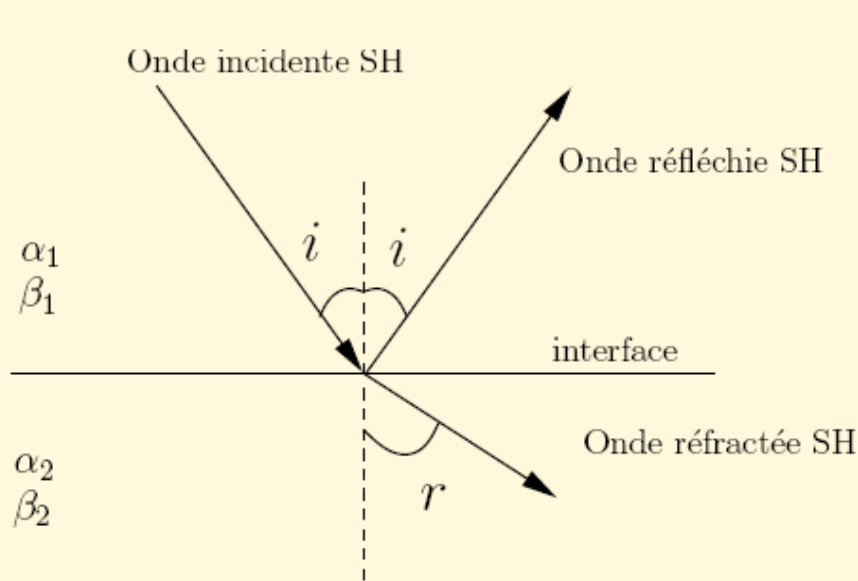
From Bolt, B., *Inside the Earth*, San Francisco: W.H. Freeman, 1982.



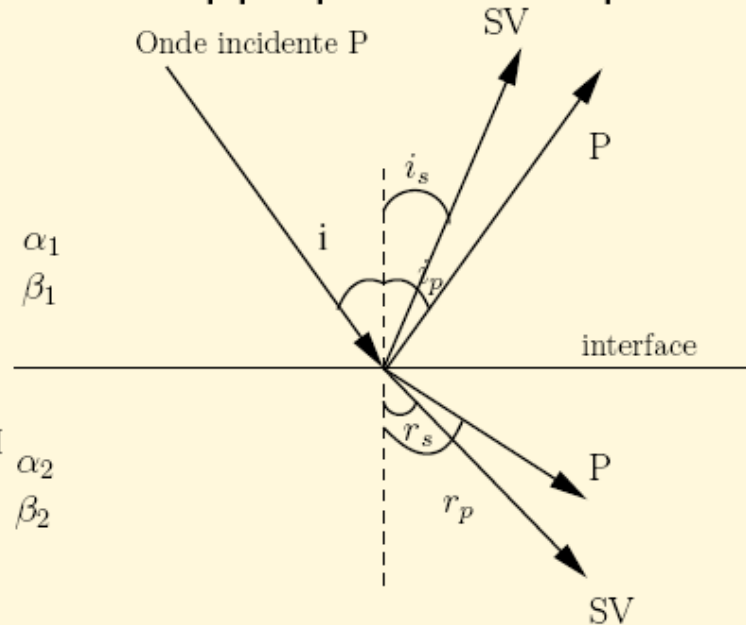


En sismologie

Il peut y avoir conversion $P \rightarrow P + SV$, $SV \rightarrow P + SV$. Une onde SH reste SH. Les lois de Snell–Descartes s'appliquent. Cas plan :

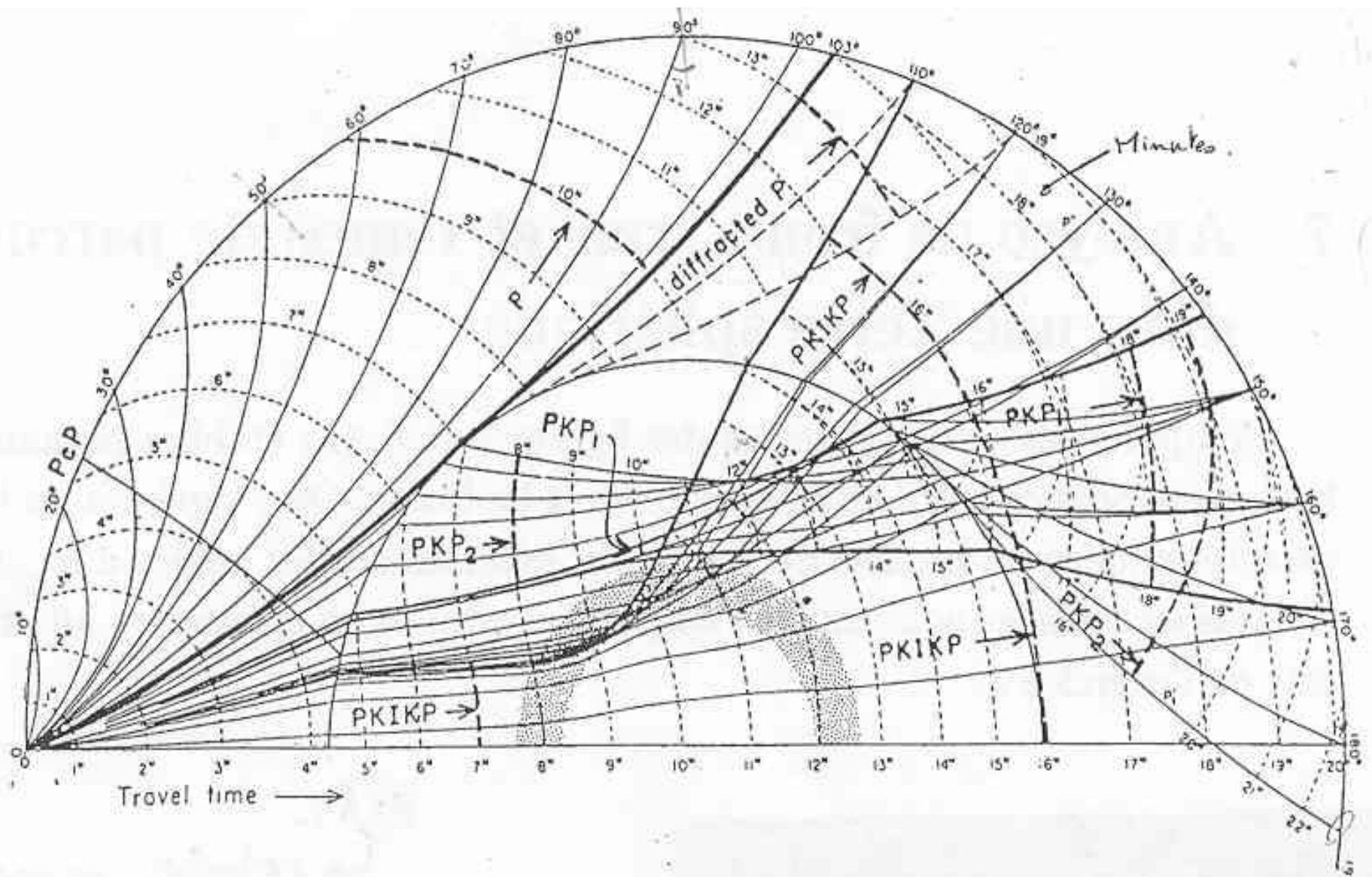


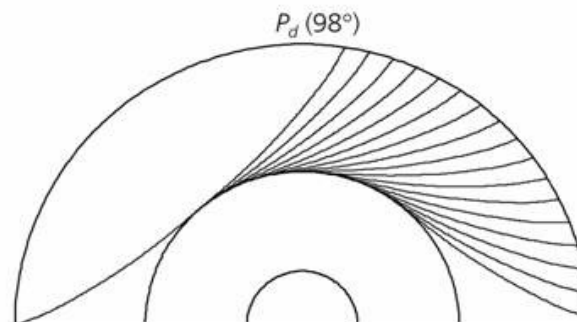
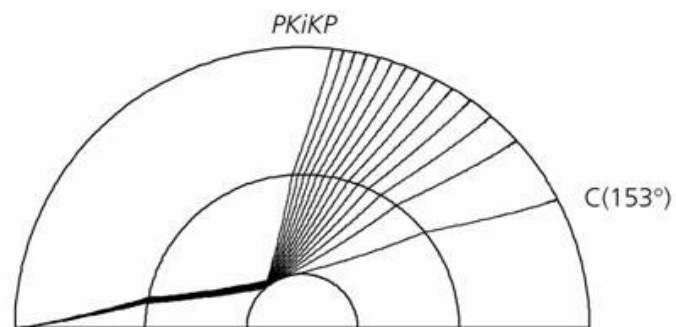
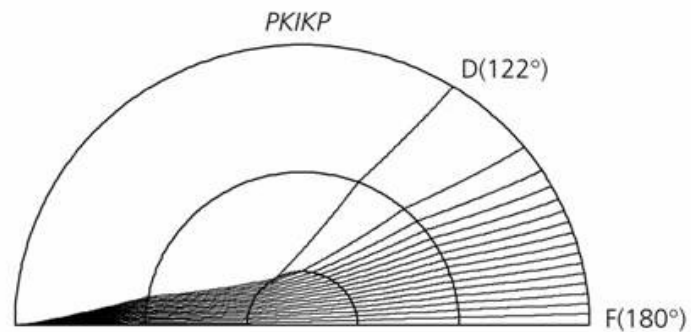
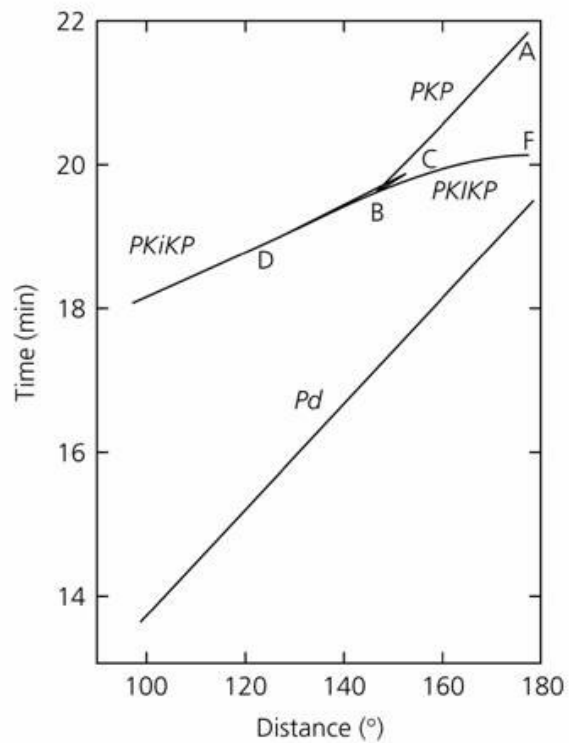
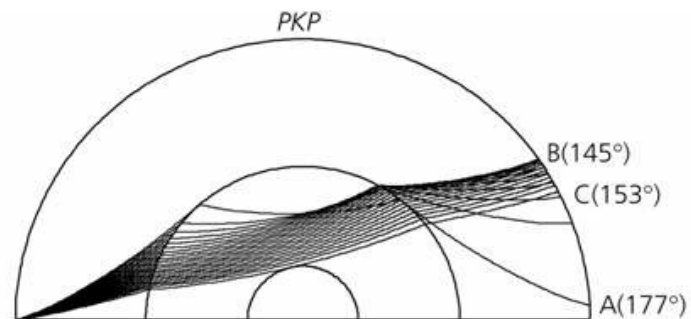
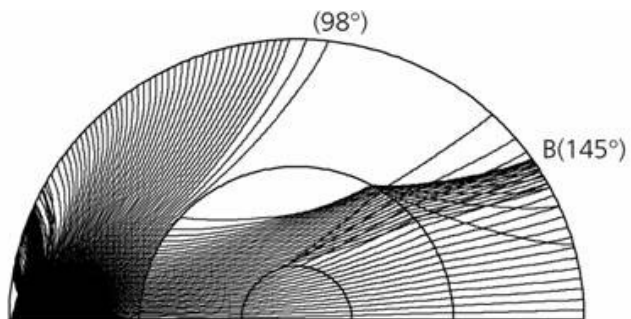
$$\frac{\sin i}{\beta_1} = \frac{\sin r}{\beta_2} = p$$



$$\frac{\sin i_p}{\alpha_1} = \frac{\sin i_s}{\beta_1} = \frac{\sin r_p}{\alpha_2} = \frac{\sin r_s}{\beta_2} = p$$

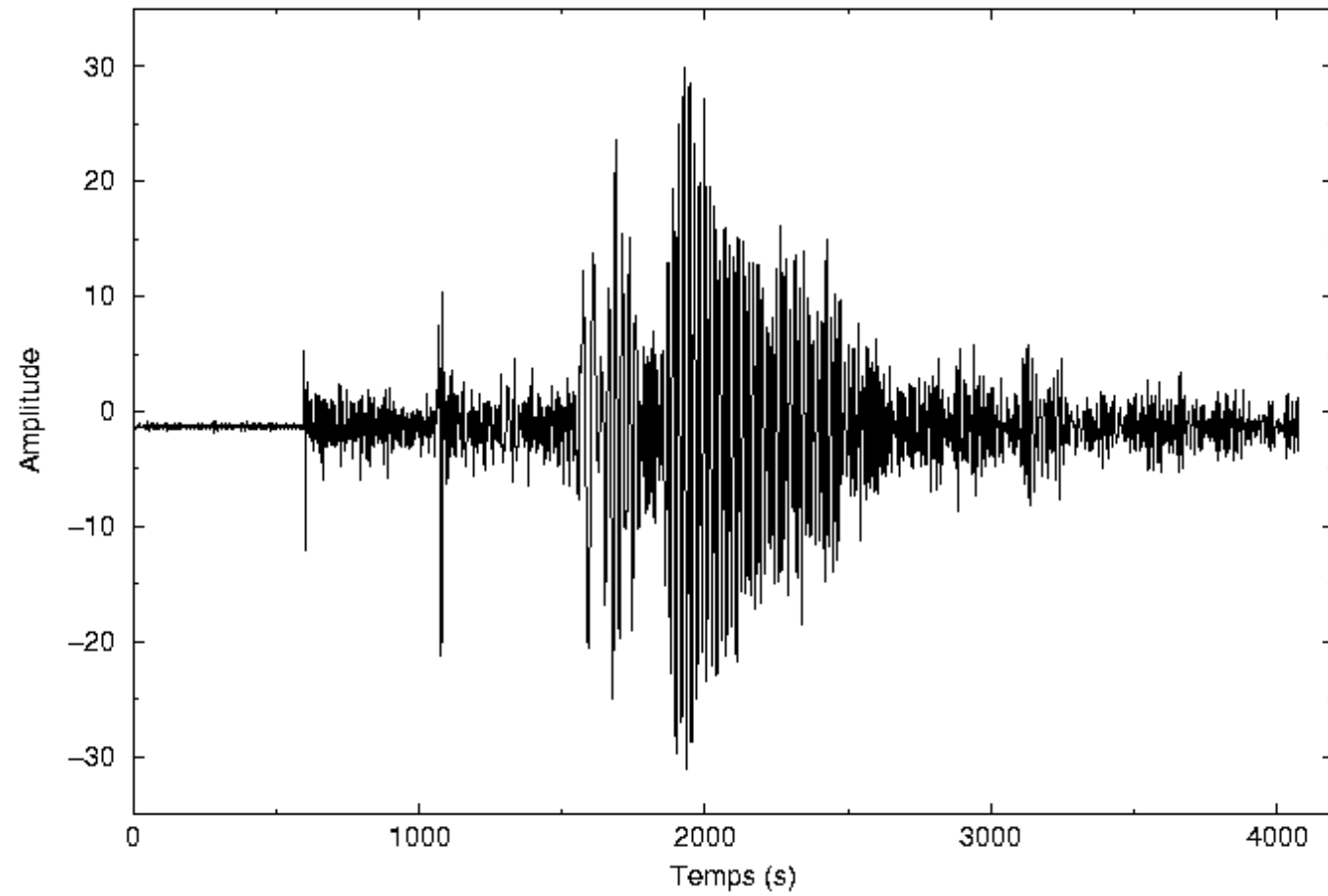
p est le **paramètre du rai** . Ce paramètre contrôle la géométrie du rai sismique quand celui-ci traverse des milieux de vitesse différente.





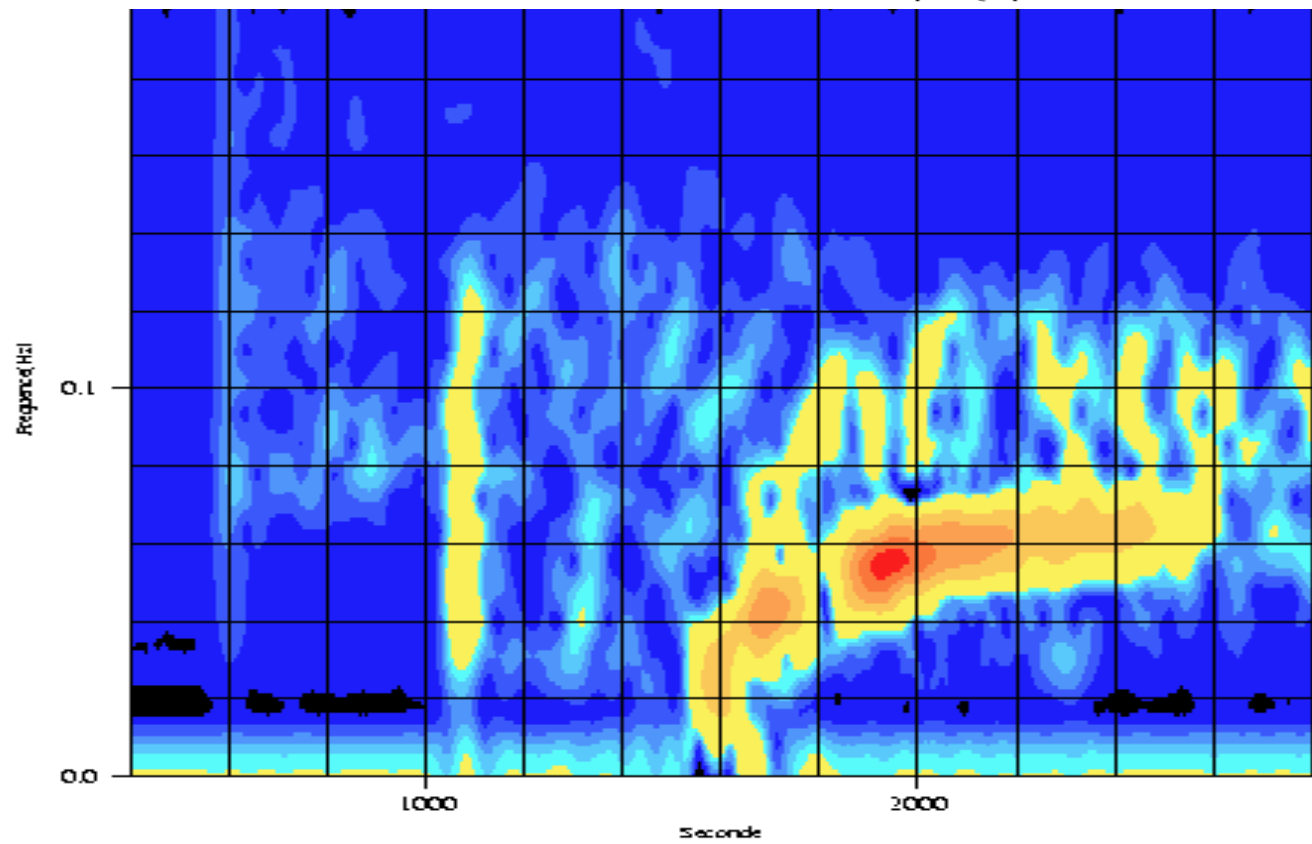
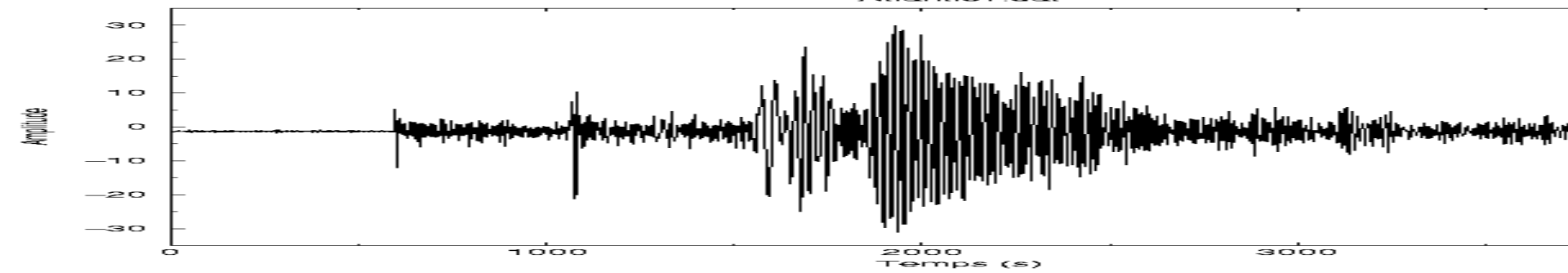
Seisme oceanique

Atlantic1.dat

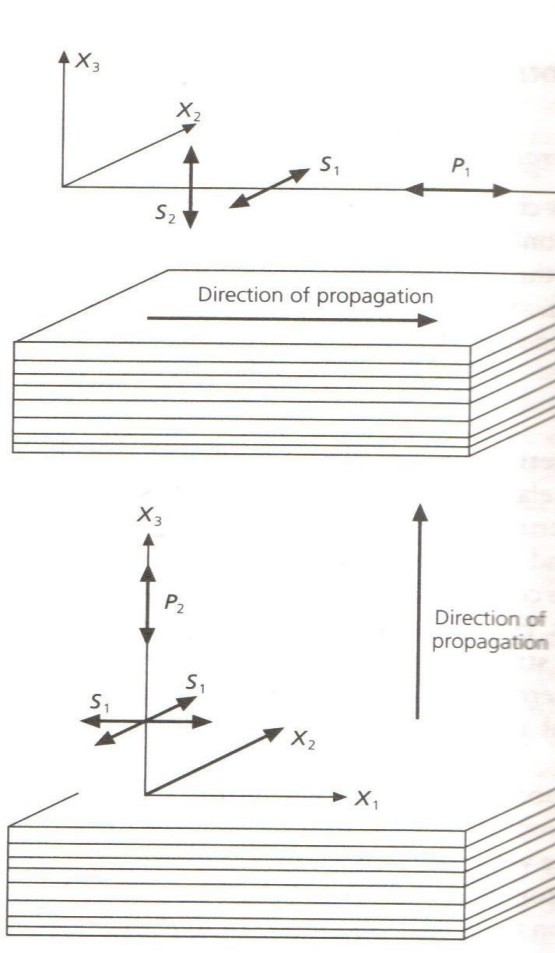


Seisme oceanique

Atlantic1.dat



Anisotropie



Anisotropie transverse

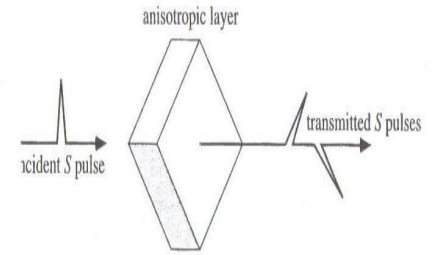
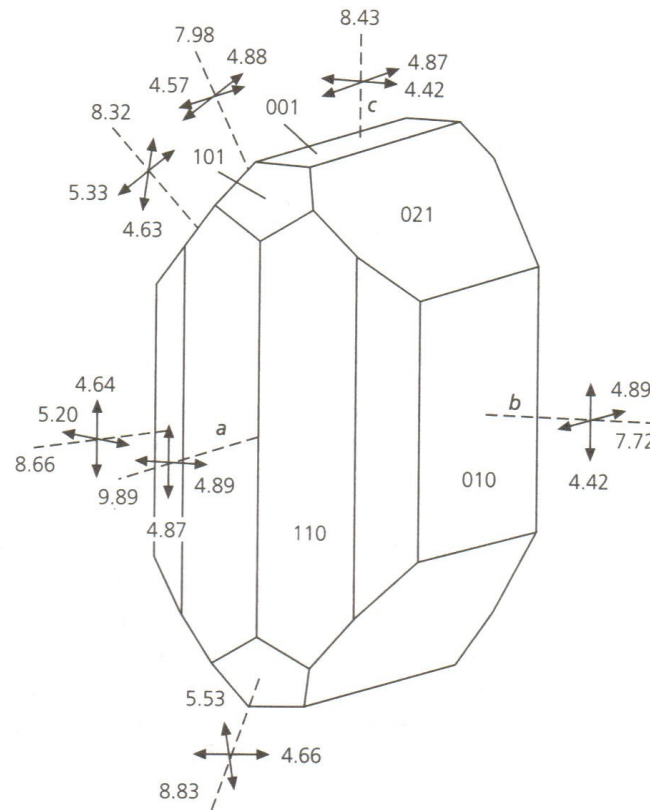
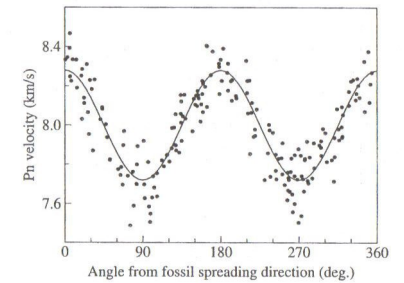


fig. 11.14. An S-wave that travels through an anisotropic layer

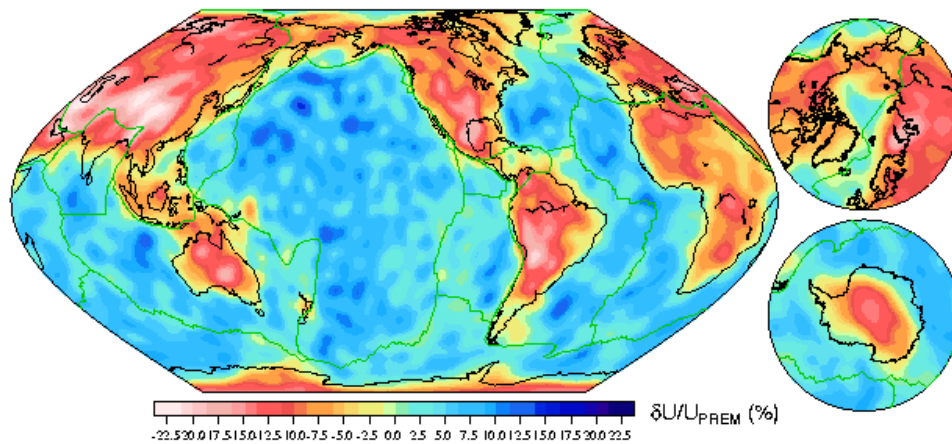


Anisotropie de l'olivine

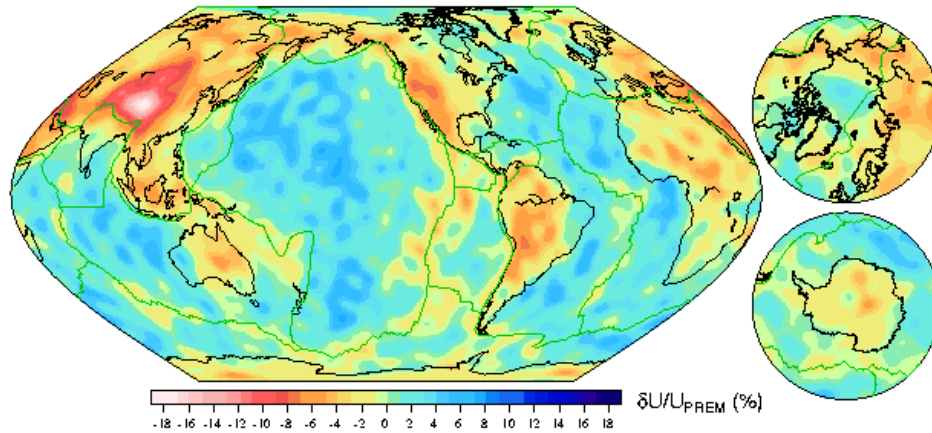


Dépendance azimutale

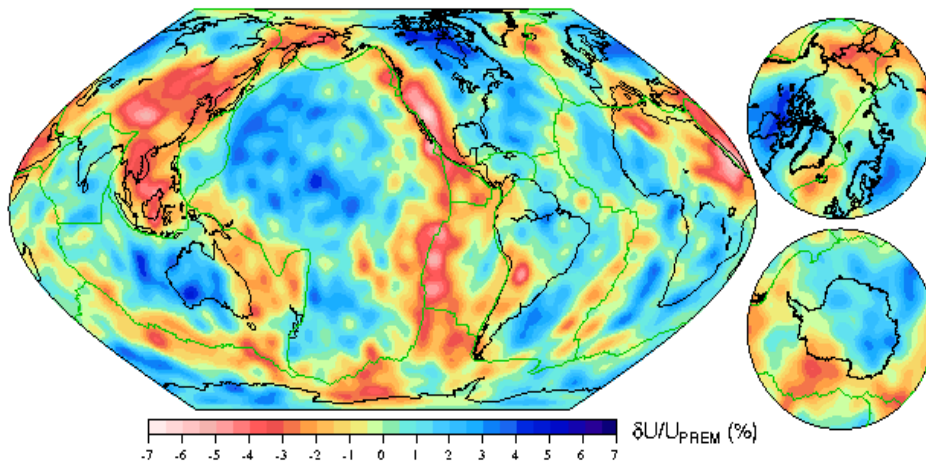
Vitesse des ondes de Love



$T = 40$ s



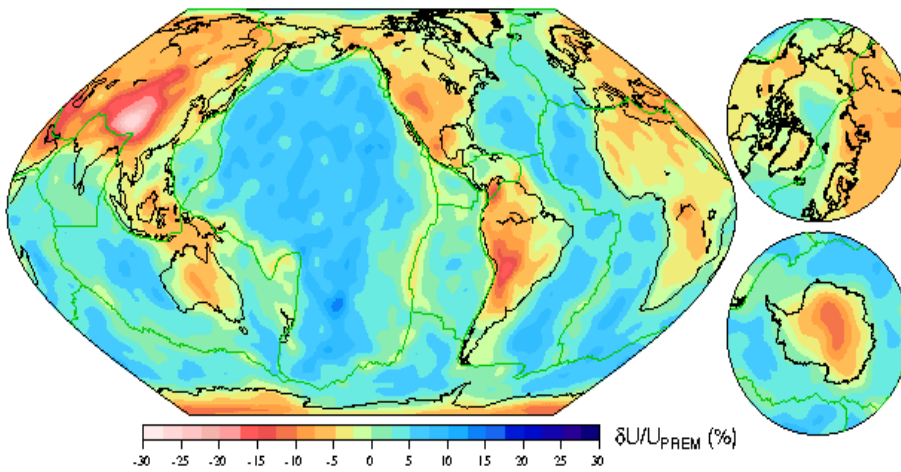
$T = 70$ s



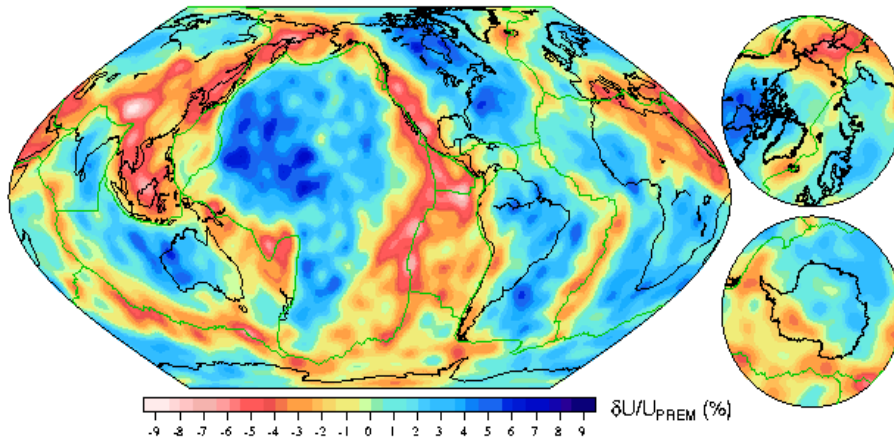
$T = 150$ s

Vitesse des ondes de Rayleigh

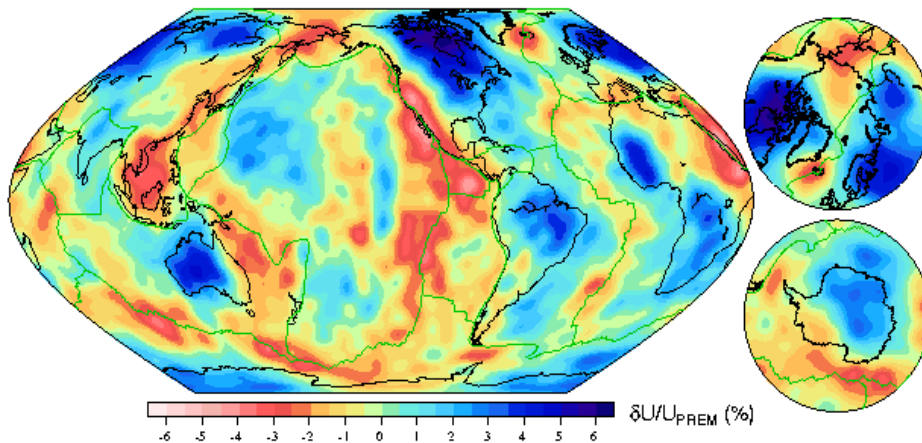
$T = 40 \text{ s}$



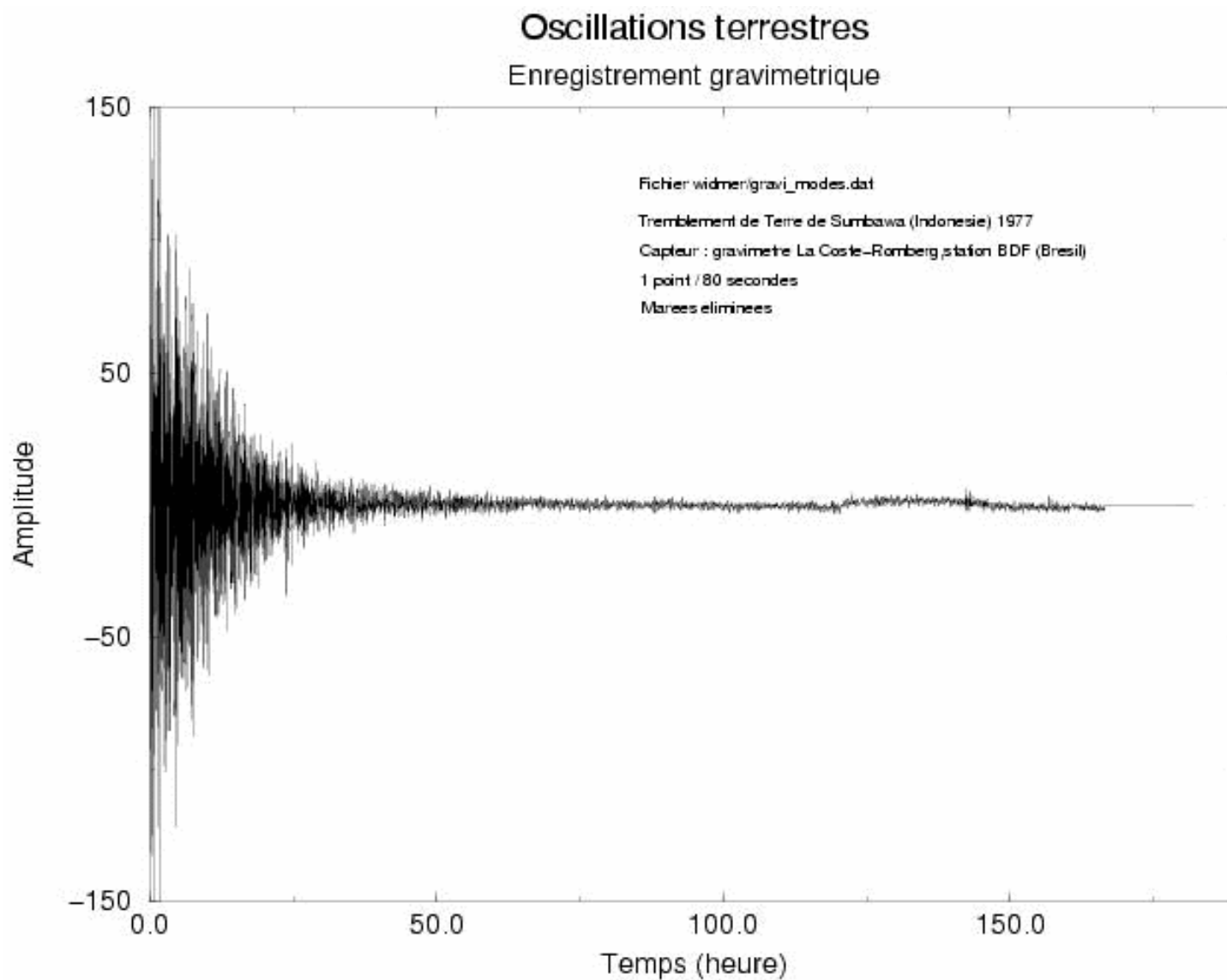
$T = 70 \text{ s}$



$T = 150 \text{ s}$

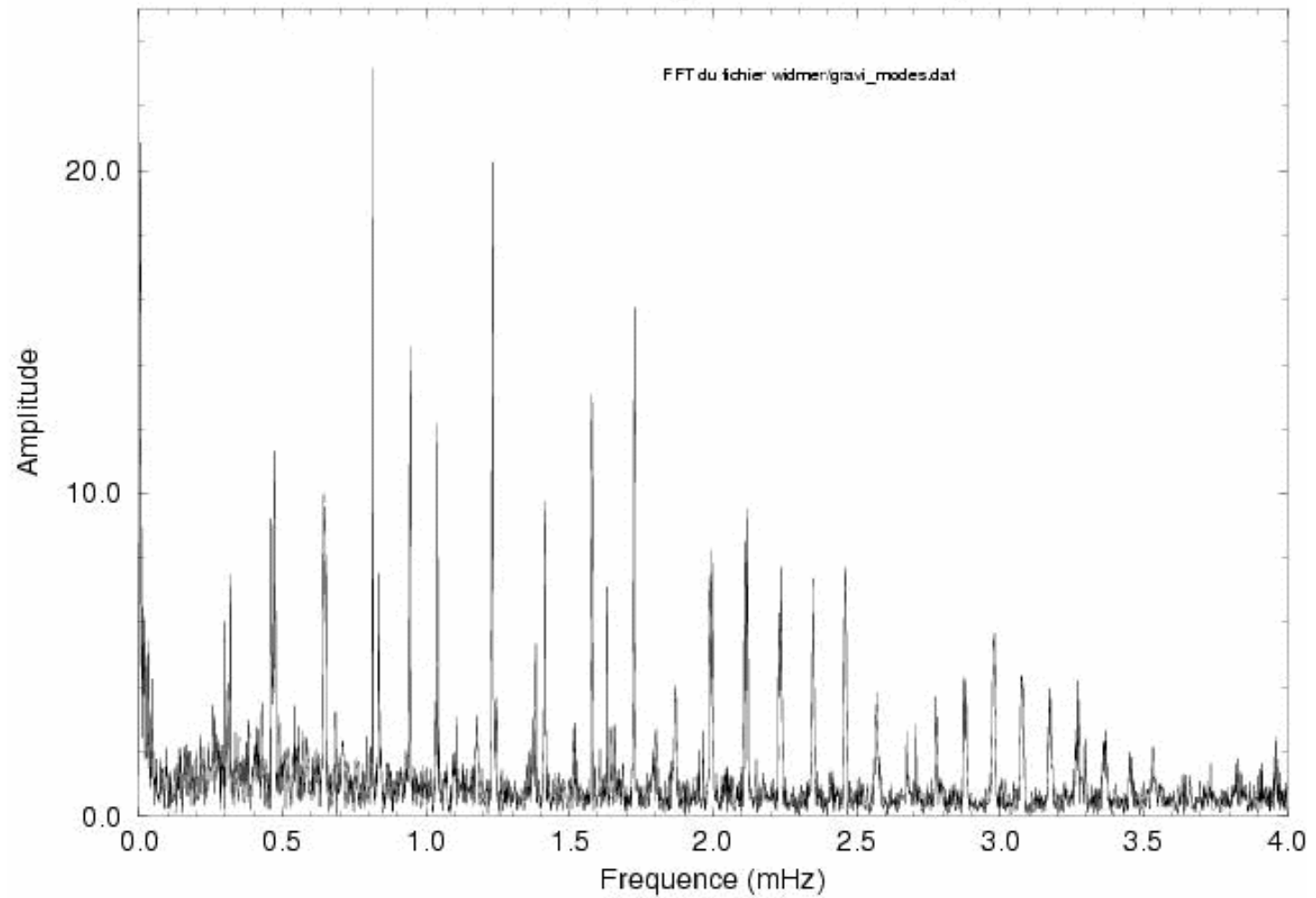


Modes propres (ou *Oscillations libres*)

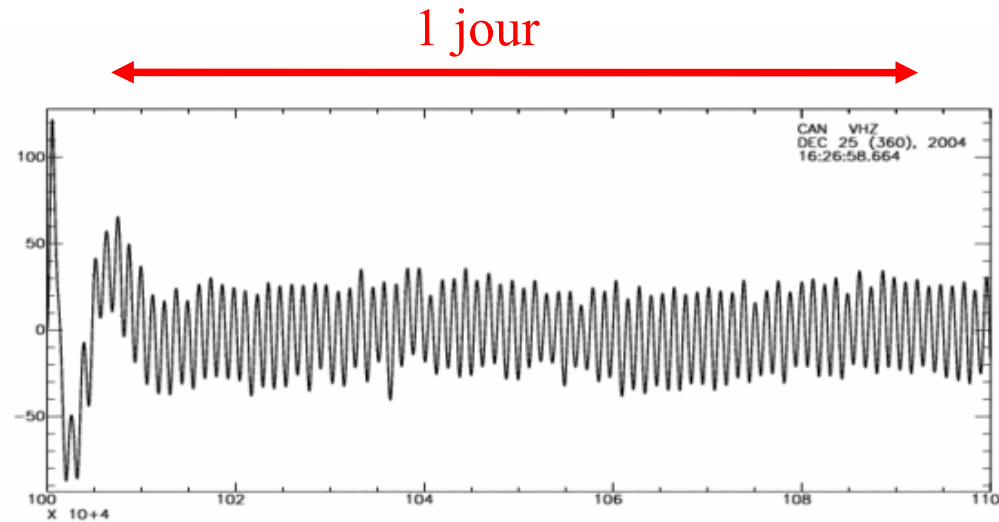


Spectre des vibrations terrestres

FFT avec padding et fenetre de Hanning

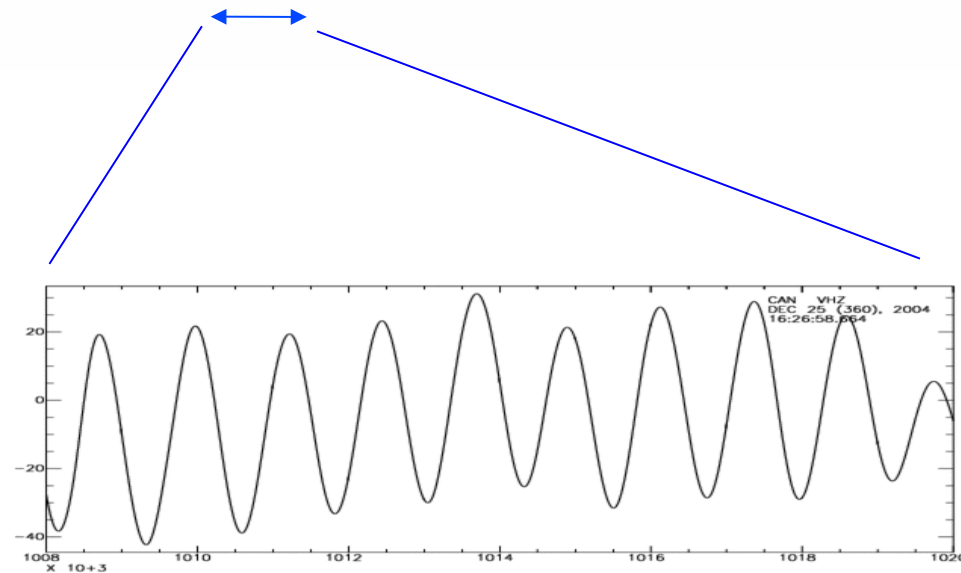


Oscillations libres 11 jours après le séisme de Sumatra



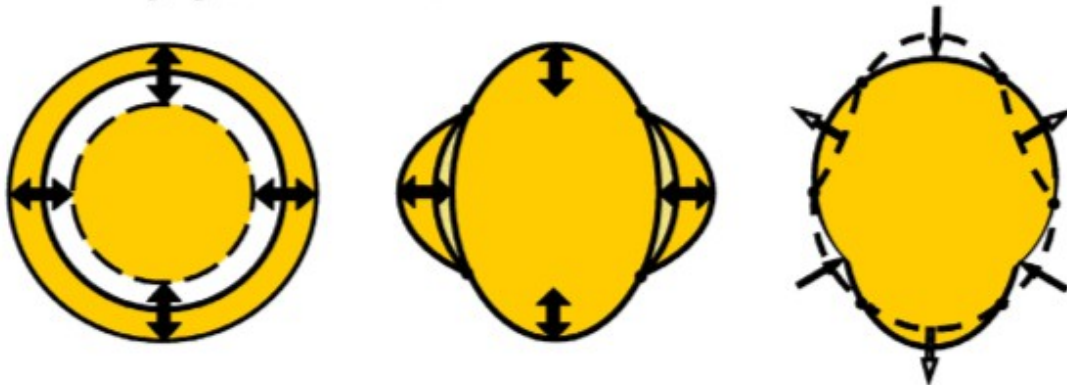
Mode 0S0

Période 1200s

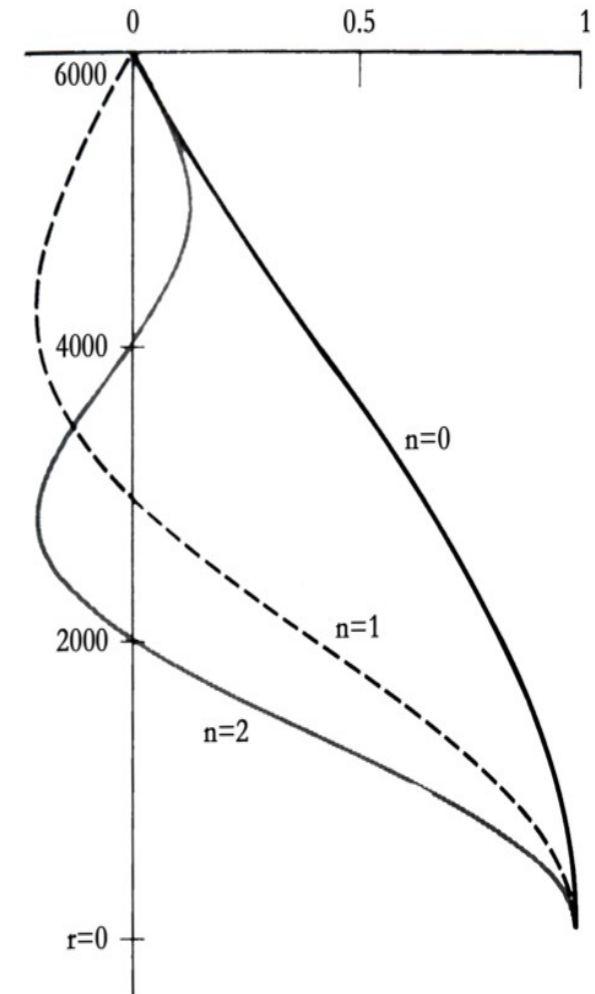




Toroidal modes ${}_0T_2$ (44.2 min), ${}_1T_2$ (12.6 min)
and ${}_0T_3$ (28.4 min)



Spheroidal modes ${}_0S_0$ (20.5 min), ${}_0S_2$ (53.9 min)
and ${}_0S_3$ (25.7 min)



Fonctions propres de qq radiaux

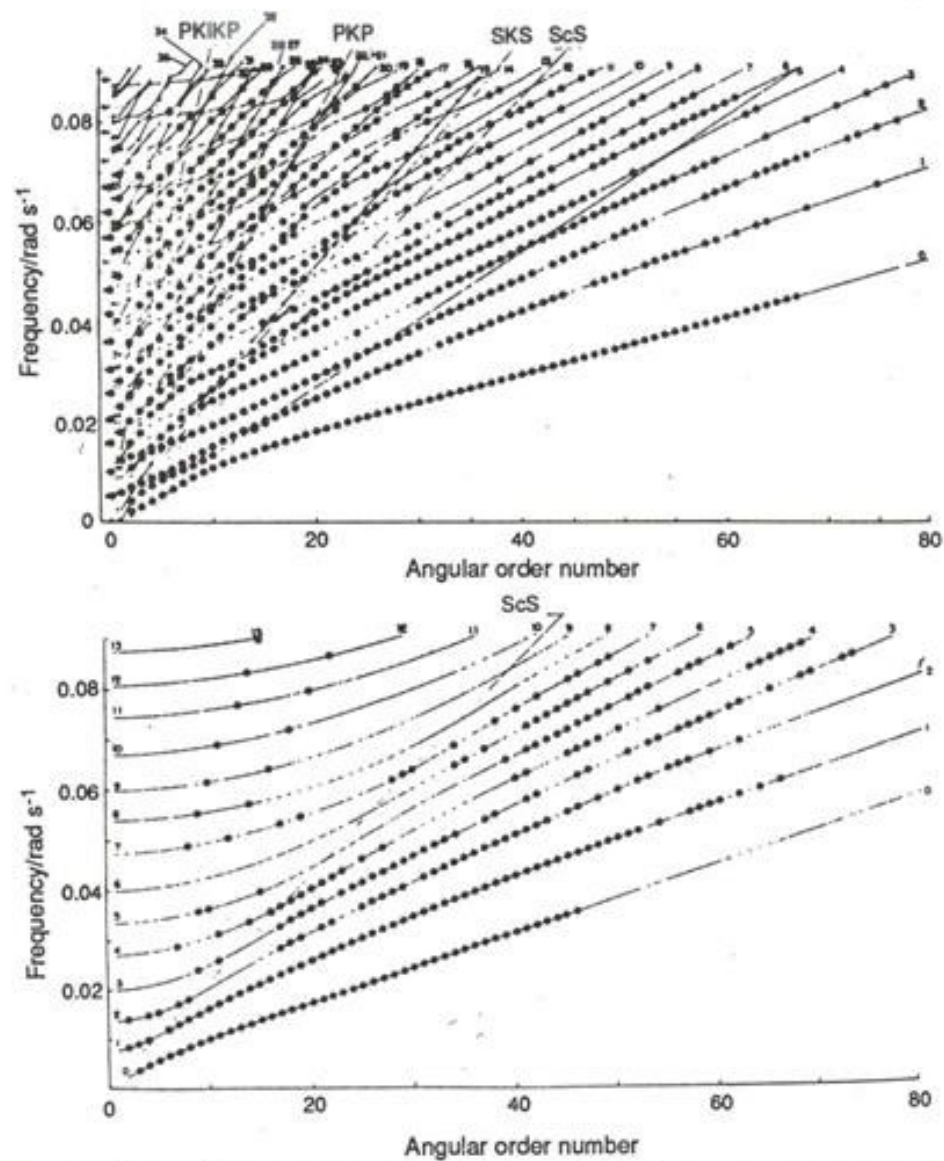
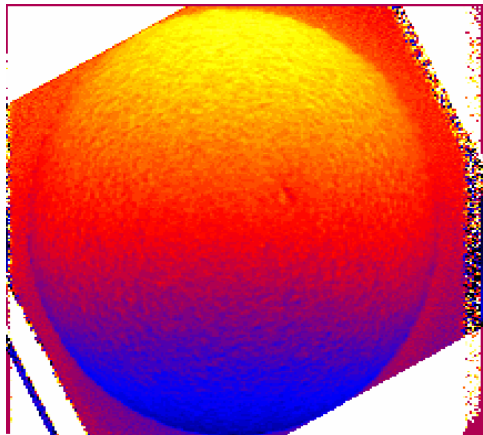
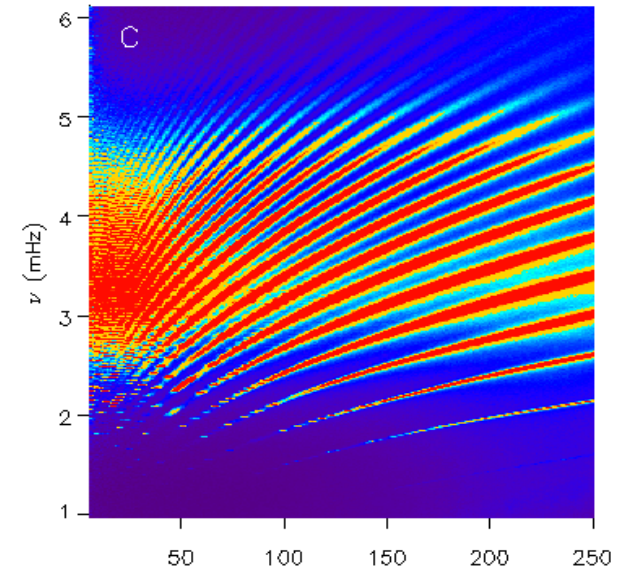
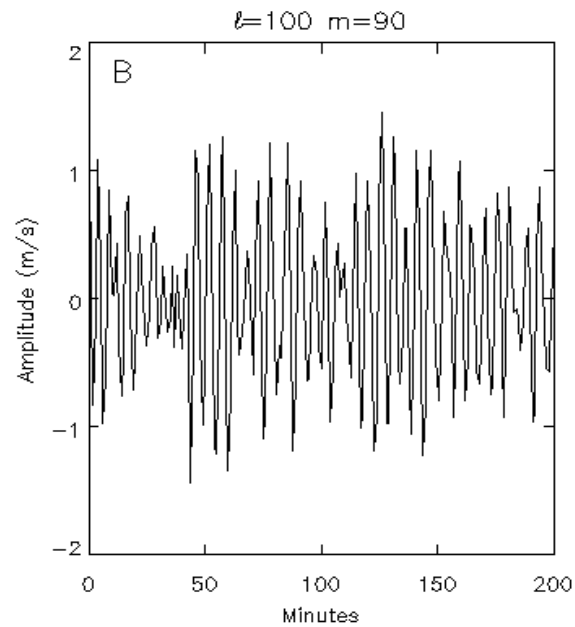
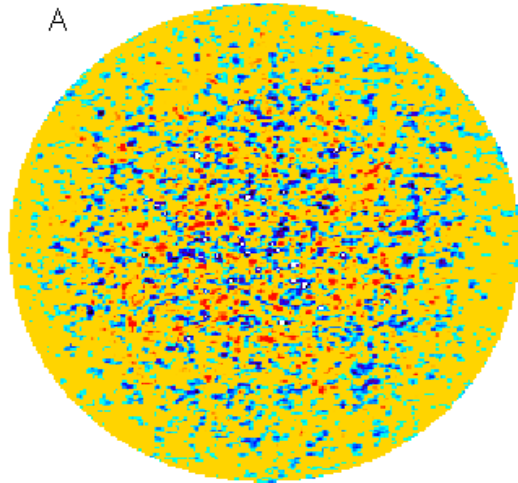


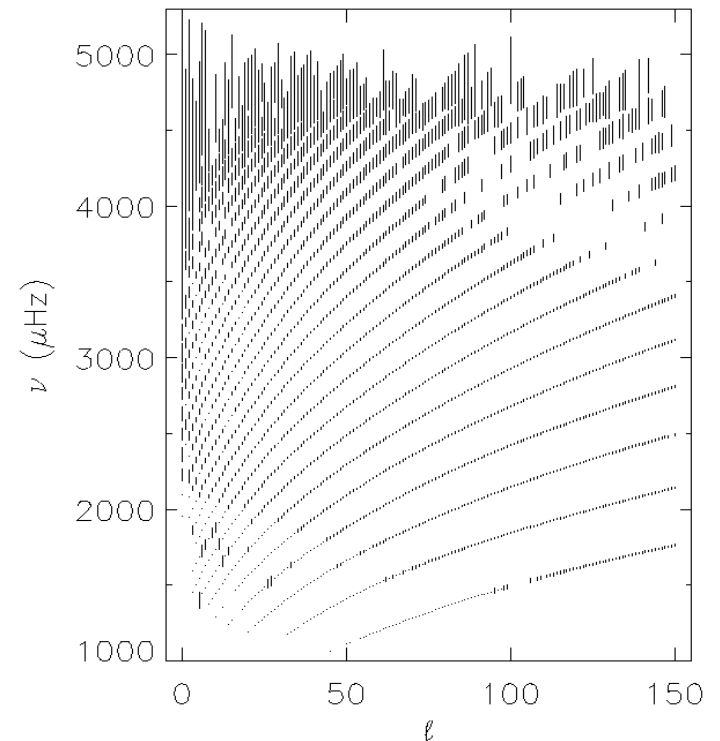
FIGURE 4.26 Spheroidal (top) and toroidal (bottom) mode eigenfrequencies as a function of angular order number, l . Note that modes align on fundamental ($n=0$) and overtone ($n>0$) branches. Body-wave equivalent modes, which cross branches, are indicated for a few main body-wave phases. (From Gilbert and Dziewonski, 1975.)



Modes du Soleil

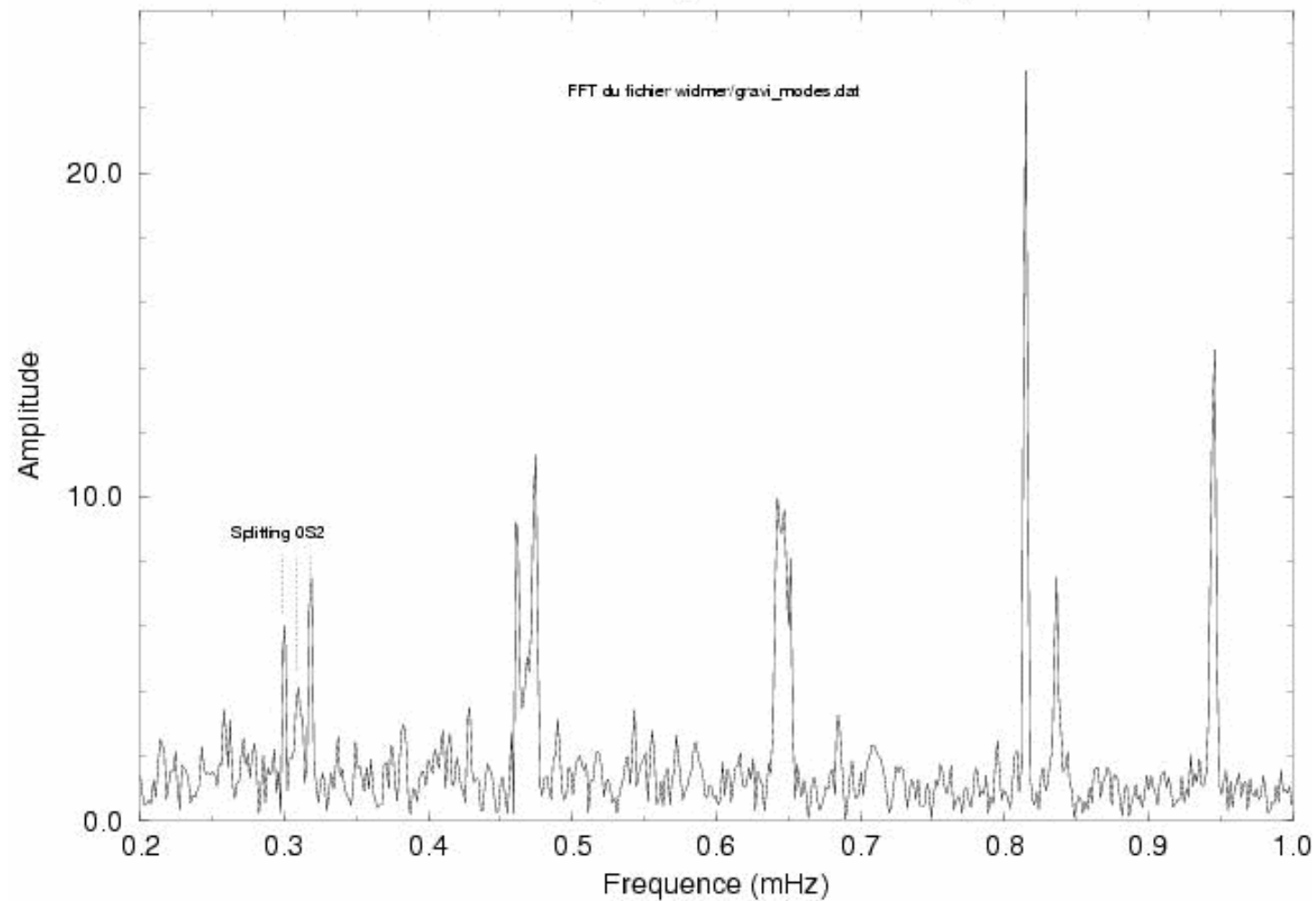
- Doppler avec et sans rotation du Soleil
- Une harmonique sphérique $Y_{lm}(t)$ au cours du temps
- Spectres des $Y_{lm}(t)$:

<http://www.stat.berkeley.edu/~stark/Seminars/Aaas/helio.htm>



Spectre des vibrations terrestres (zoom)

FFT avec padding et fenetre de Hanning



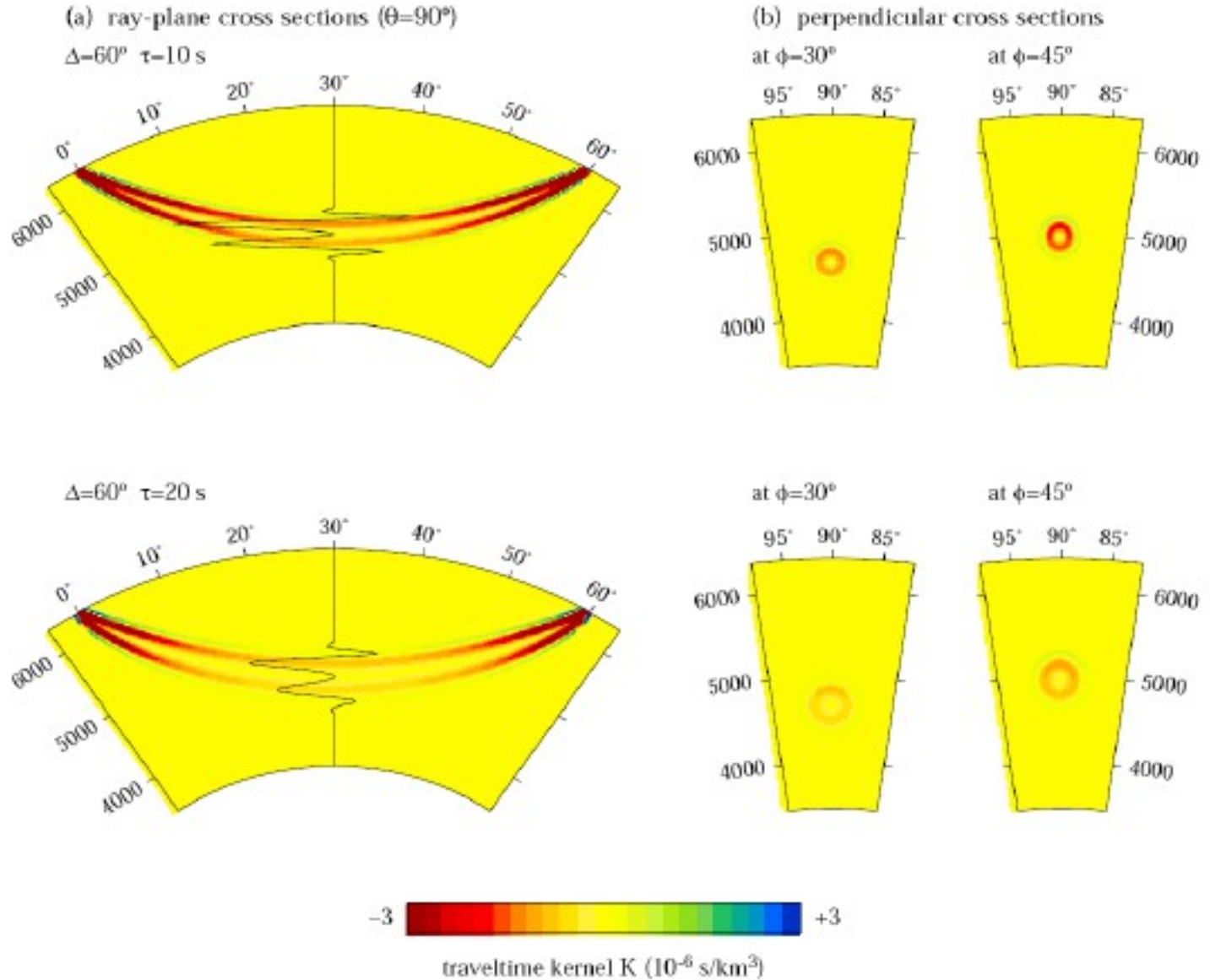
Determined at 1000°C

	$-\frac{\partial \log V_p}{\partial T}$ (10^{-5} K^{-1})	$-\frac{\partial \log V_s}{\partial T}$ (10^{-5} K^{-1})	$R_{s/p}$
MgO	7.2	9.4	1.30
CaO	6.8	8.4	1.23
grossular	4.6	6.0	1.30
pyrope	4.6	4.5	0.98
olivine (Fe/(Fe+Mg)=0)	6.2	7.6	1.22
olivine (Fe/(Fe+Mg)=0.1)	7.4	7.7	1.04
Al ₂ O ₃	4.7	6.9	1.47

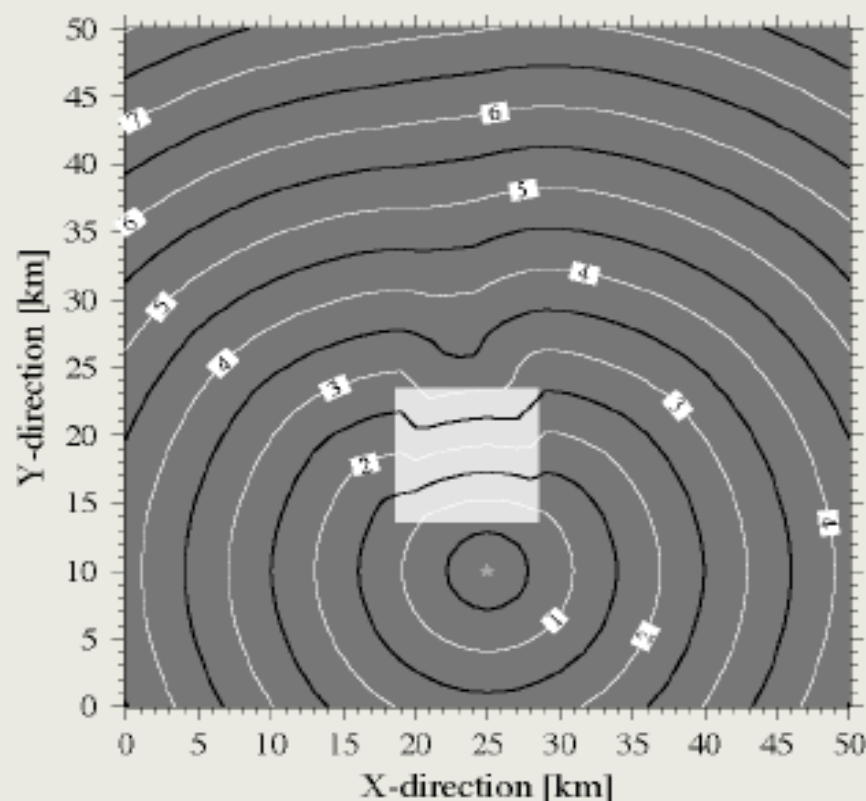
Nouvelles tendances...

Théorie en fréquence finie : noyaux de sensibilité
(ou zone de Fresnel) en « banana-doughnut »
(Hung, Dahlen, Nolet, 2000)

S.-H. Hung, F. A. Dahlen and G. Nolet



Wave front healing (Nolet & Dahlen, 2000)



L : half width of anomaly

x : distance to receiver

λ : wave length

6 km/s

4 km/s

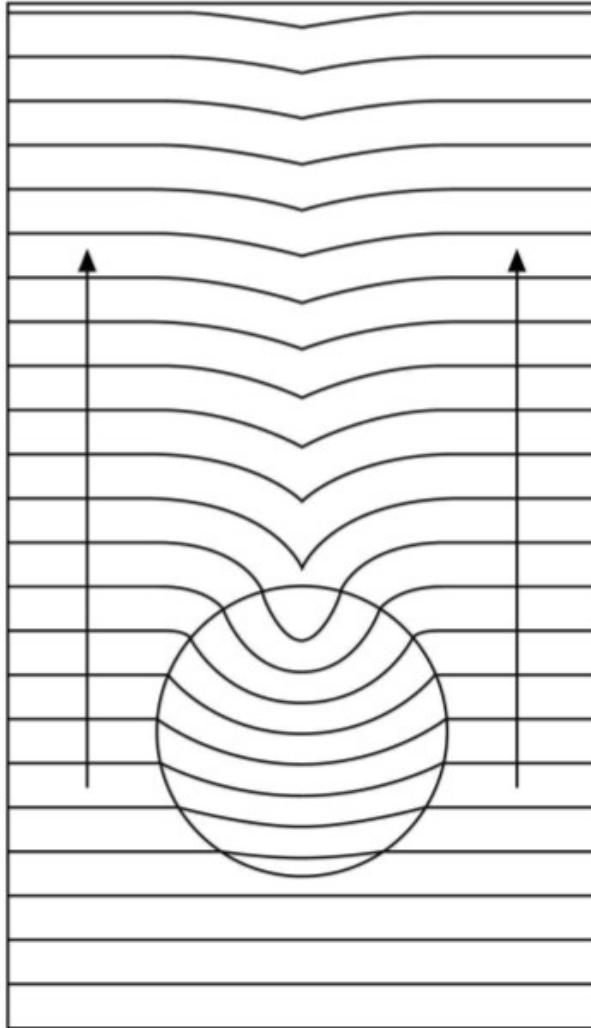
Regime 1: $x/L \ll \pi L/\lambda$ (Local earthquake tomography)

Regime 2: $x/L \gg \pi L/\lambda$ (Teleseismic tomography)

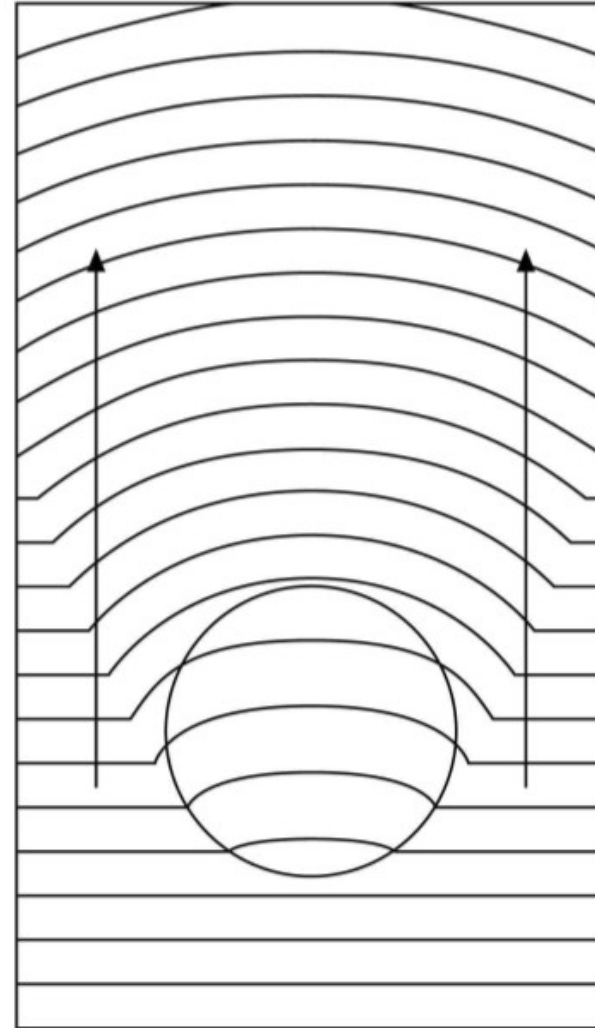
Les anomalies lentes sont moins faciles à détecter

Ex : effet d'une anomalie sphérique :

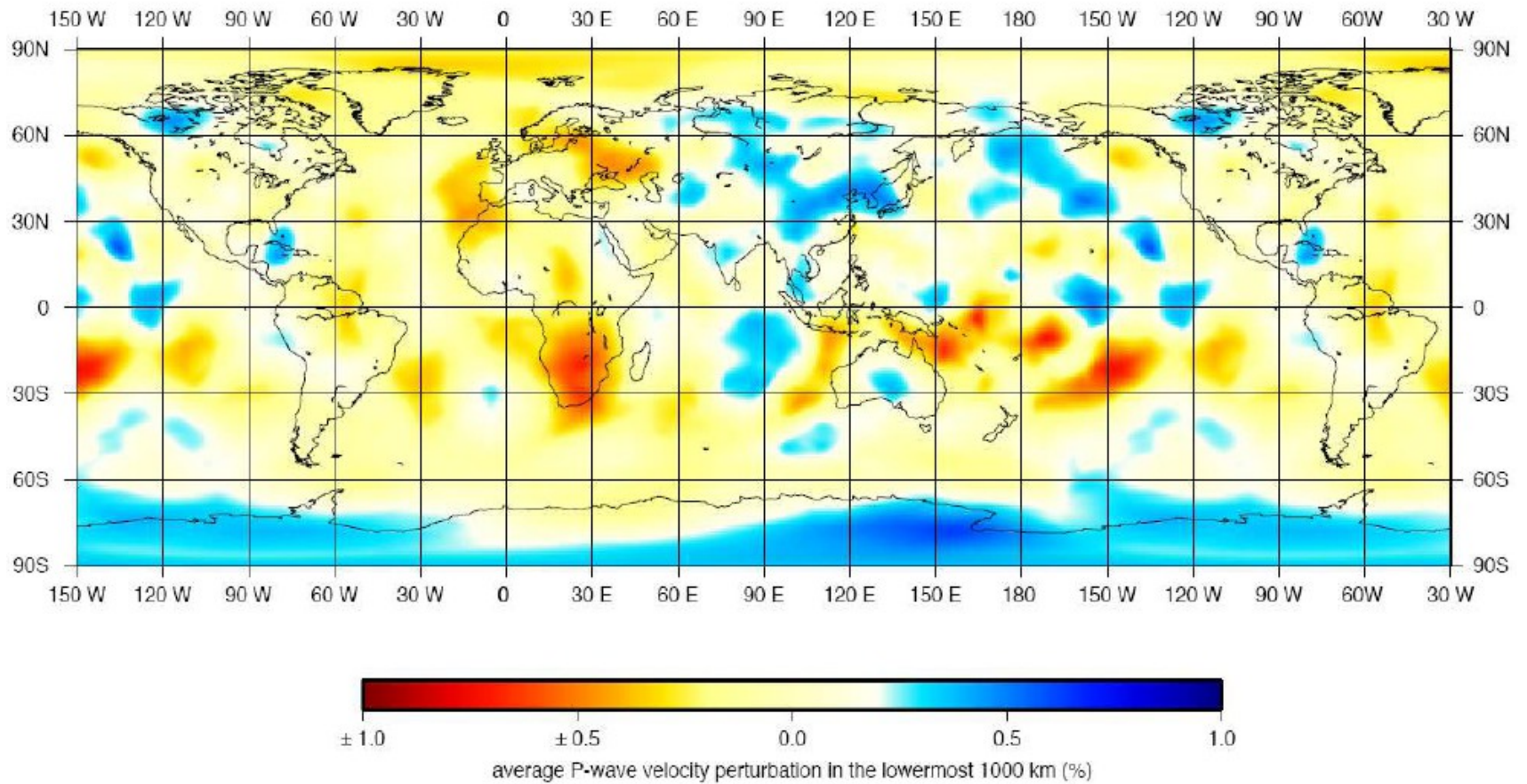
b. Spherical slow anomaly



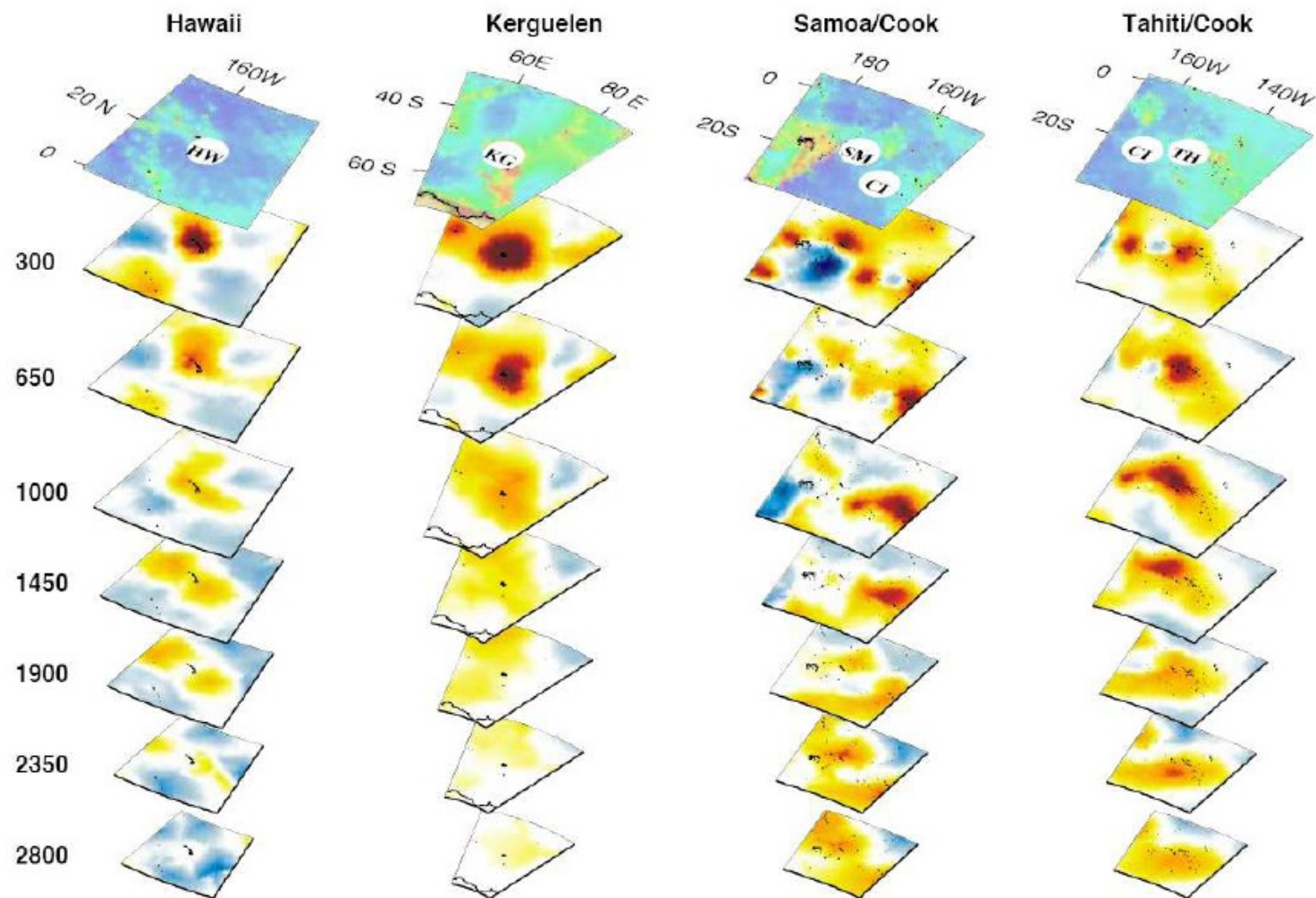
c. Spherical fast anomaly

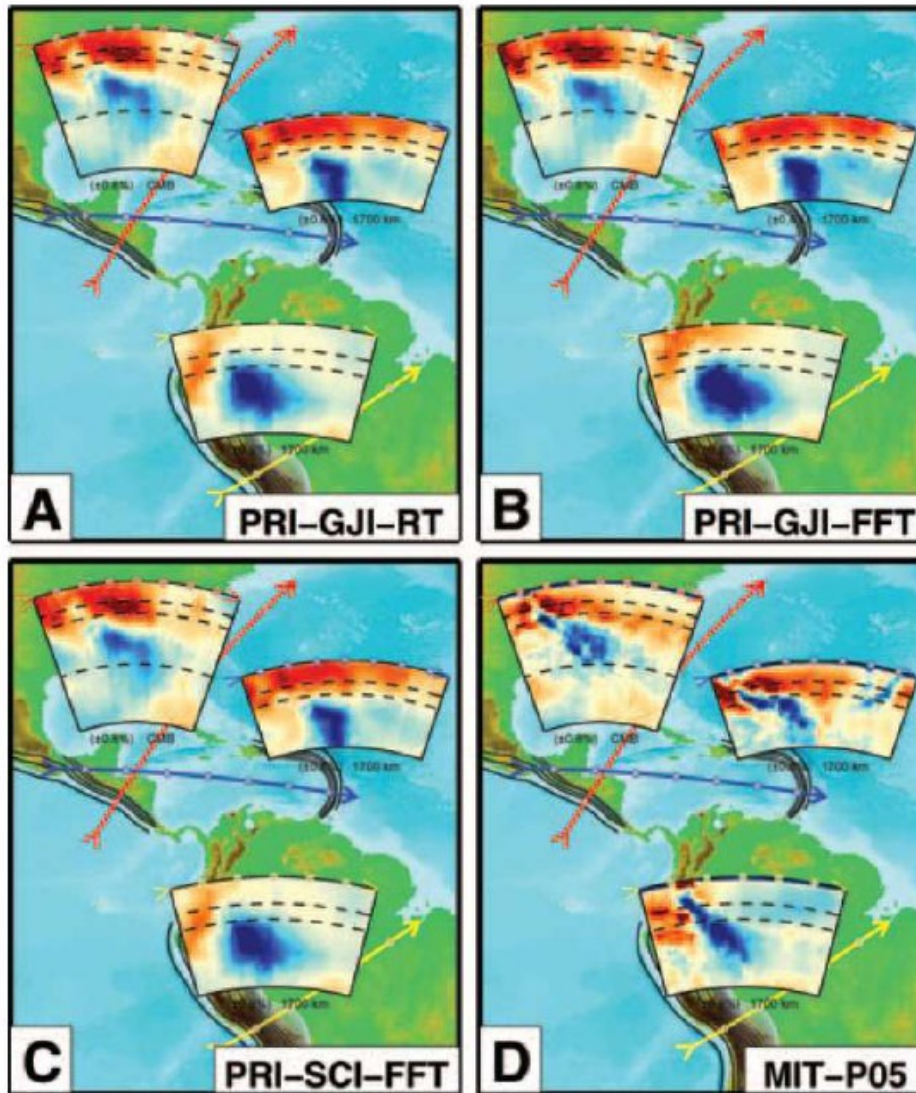


L'école de Princeton



Montelli et al., 2004





Comparaisons :

- modèles Princeton (PRI) avec théorie des rays (RT) et fréquences finies (FFT)
- Modèle MIT (fréquences finies)

Formes d'ondes et
méthode des éléments spectraux (SEM)
(Vilotte, Komatitsch, Capdeville, Chaljub, 1997-2000)

Spectral Element Method

Very accurate and efficient for solving the wave equation in the general case:

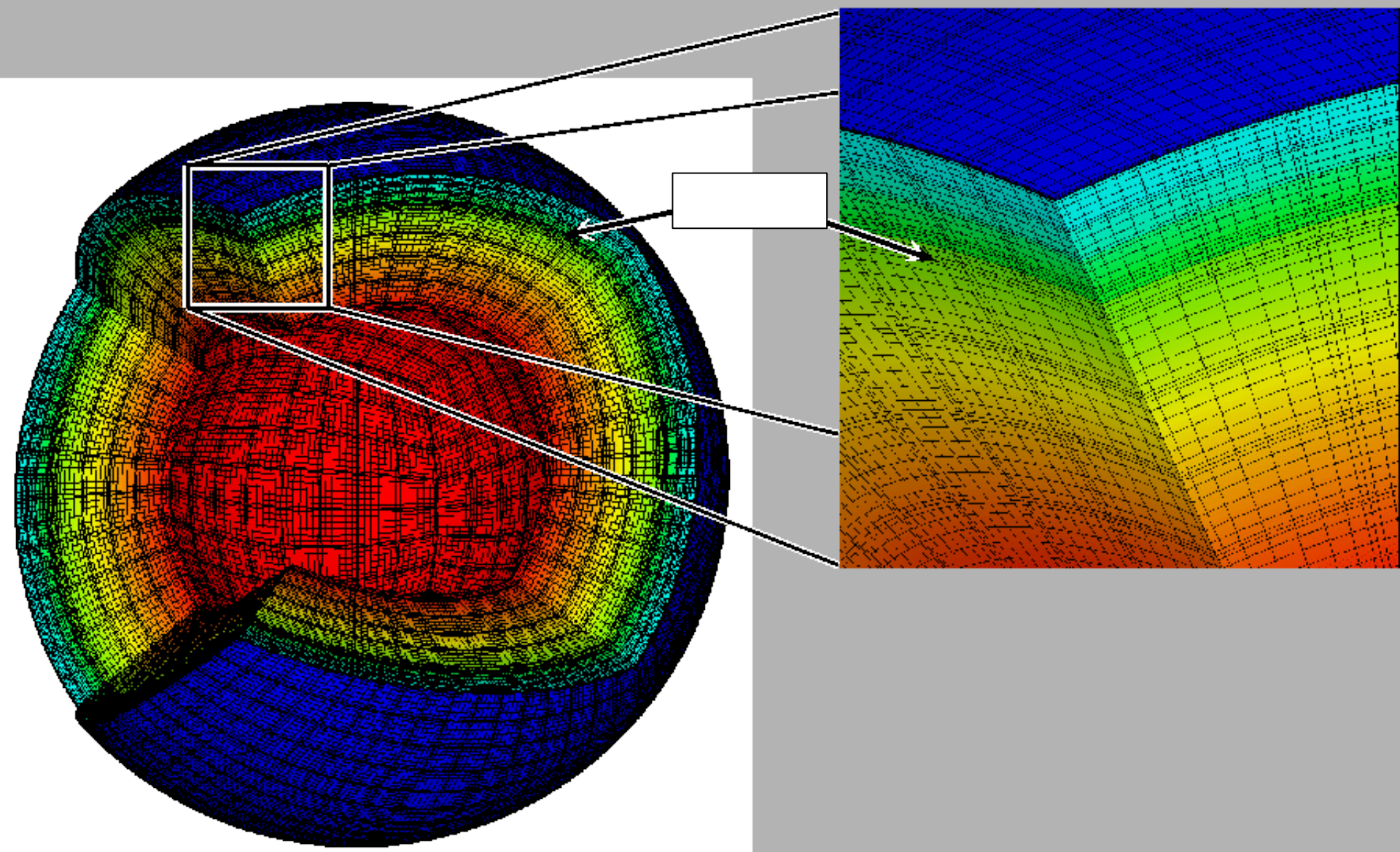
- large velocity contrasts
- topography
- liquid
- gravity
- anisotropy
- anelasticity

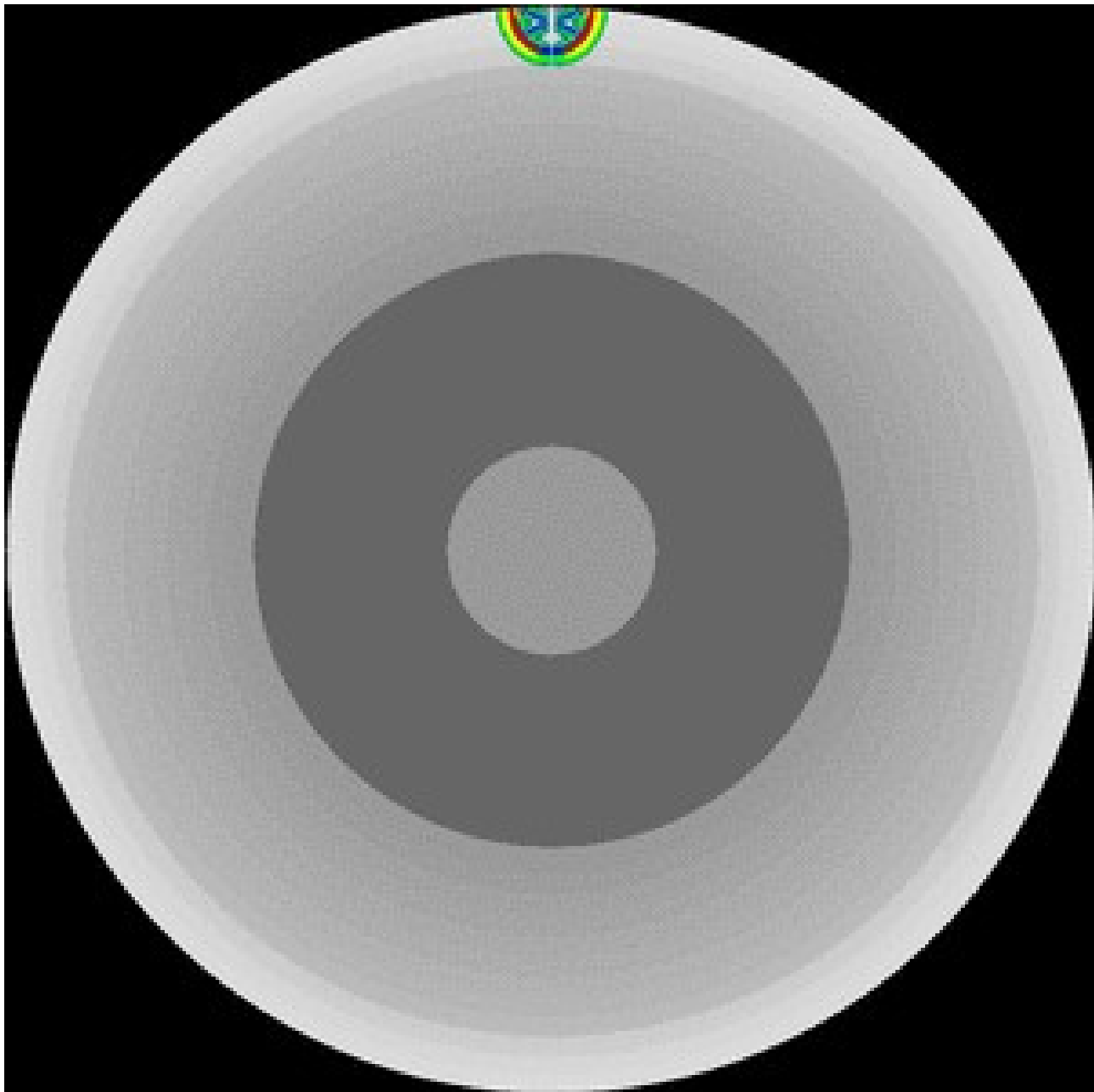
SEM

Advantages:

- variational method: implementation of boundary conditions is natural (e.g. surface waves)
- flexibility in geometry: no problem at poles, can handle interface topography
- spectral precision: small numerical dispersion
- efficient: mass matrix diagonal, problem well parallelized

Disadvantages: high numerical cost





Animation E. Chaljub

