

Qui suis-je:

Yanick Ricard

DR CNRS

www/perso.ens-lyon.fr/yanick.ricard

Mes spécialités :

Mécanique des milieux continus (fluides et solides)

Milieux complexes (multiphasés, grains)

Sismologie

Physique des matériaux

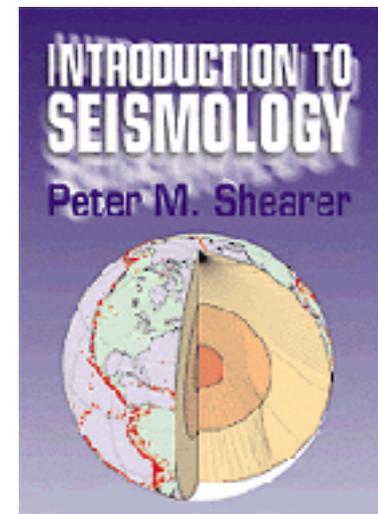
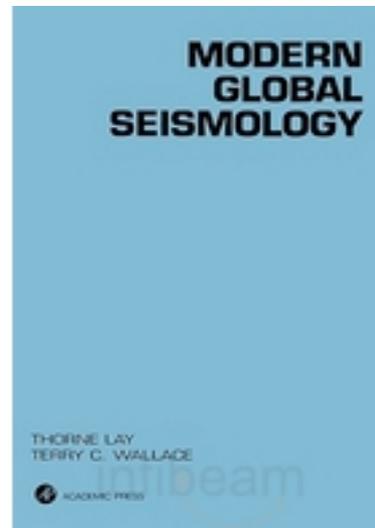
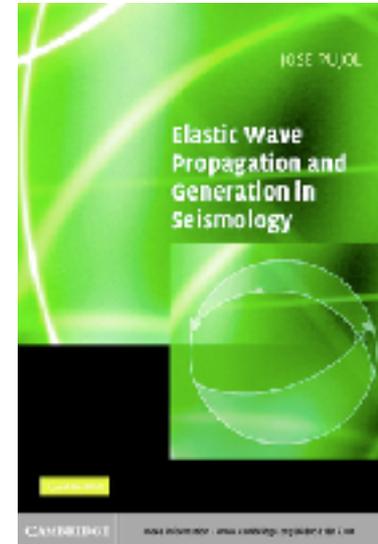
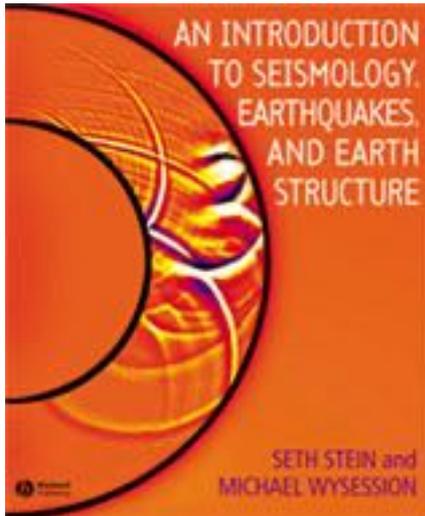
Mes objects :

Convection du manteau et du noyau

Structure du manteau

Intérieur des planètes condensées

Livres



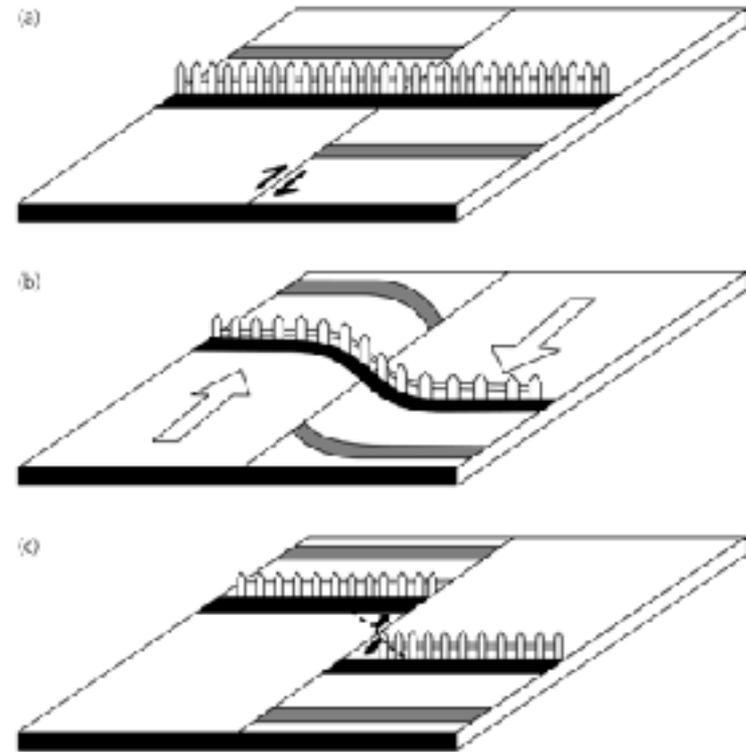
Introduction / historique

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.





Figure 4.1-3 Cartoon of the elastic rebound model for a strike-slip earthquake.

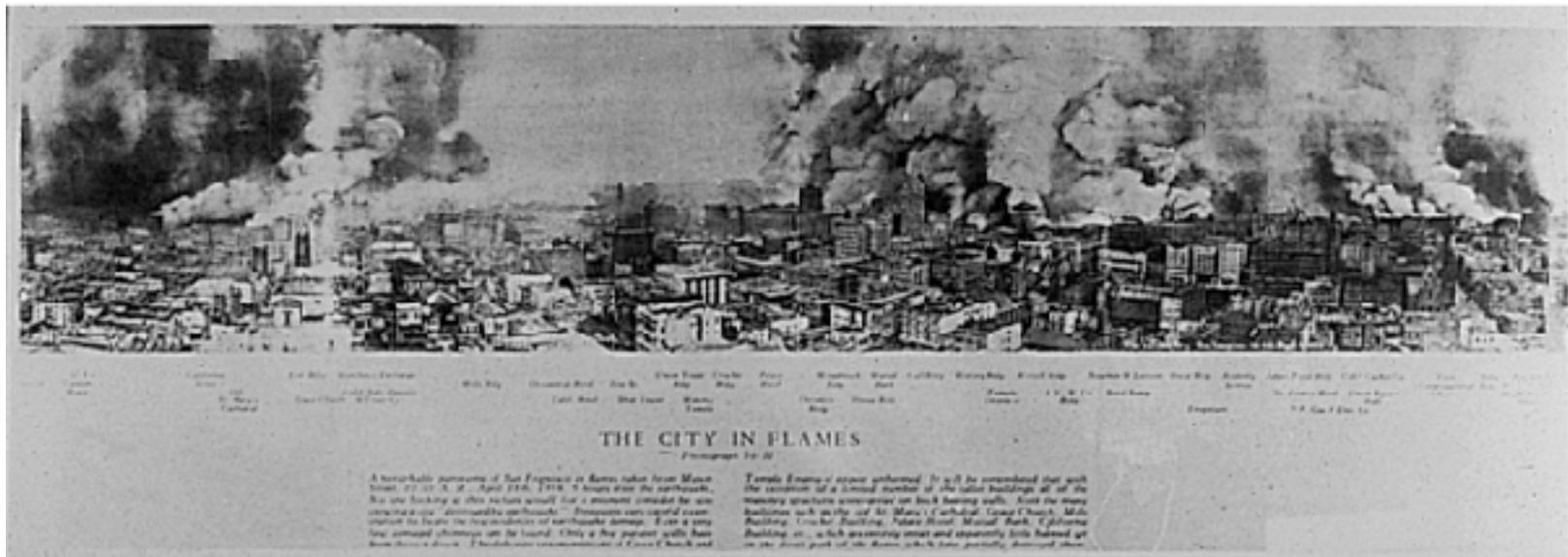


- 1) mise en charge élastique de la croûte terrestre
- 2) la croûte cède en son lieu le plus fragile : la faille
- 3) elle coulisse brusquement, générant les ondes sismiques, avant de se bloquer dans une autre position.

L'explication physique des séismes repose sur deux phénomènes:

1) La Terre se comporte dans son ensemble comme un corps élastique quasi parfait. L'anglais John Mitchell est le premier à associer séisme et ondes élastiques vers 1760.

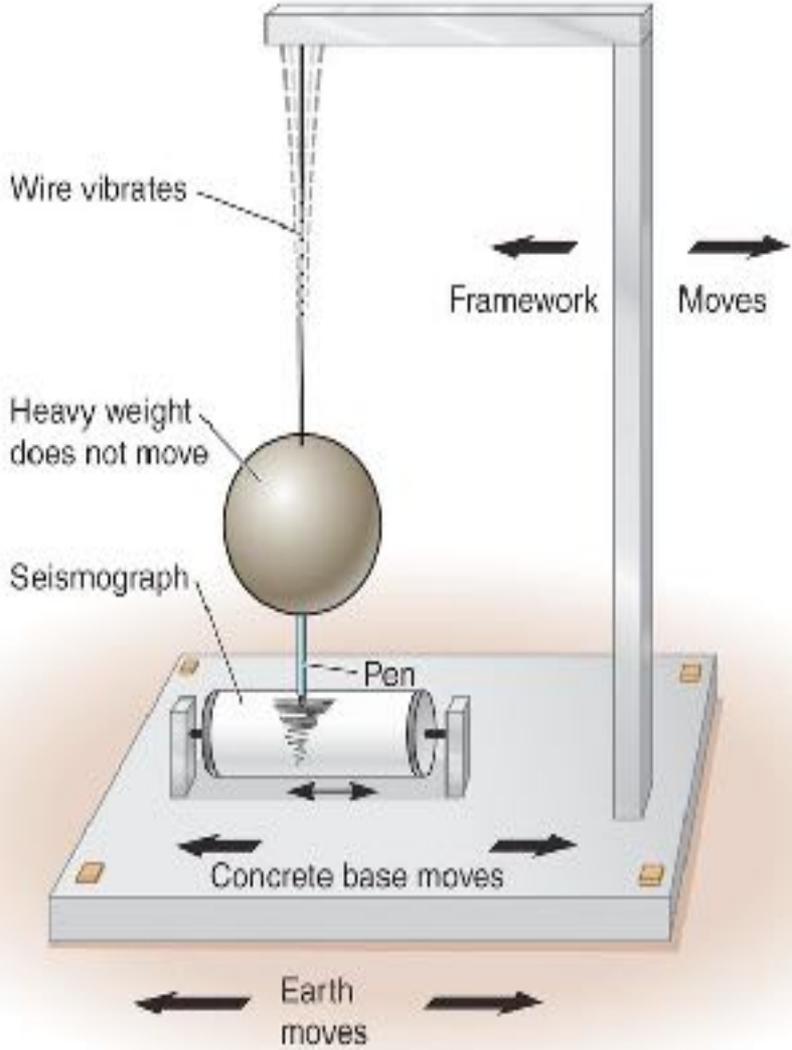
2) La majorité des séismes ont leur siège dans la croûte terrestre et sont dus au mouvement brusque d'une faille tectonique (première description détaillée des mouvements associés à un grand séisme après le séisme de San Francisco du 18 avril 1906 par l'américain Harry Reid).



China 132BC



Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.



Premiers sismomètres : simples pendules horizontaux non amortis

La masse peut donc continuer à osciller après l'excitation et ces oscillations parasites peuvent masquer l'arrivée d'autres ondes.

L'oscillateur amorti :

Equation de l'oscillateur amorti :

$$\ddot{\xi} + 2\alpha\dot{\xi} + \omega_0^2\xi = -\ddot{u}$$

Fréquence propre du système :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Amortissement : $\alpha = \frac{c}{2m}$

c est le coefficient d'amortissement

Les frottements visqueux sont caractérisé par une force dissipative proportionnelle à la vitesse :

$$\vec{F} = -c\dot{\xi}$$

Pour minimiser les frottements solides, les premiers instruments mécaniques ont cherché à maximiser la masse déplacée

Figure 6.6-1: Diagram of a vertical seismograph.

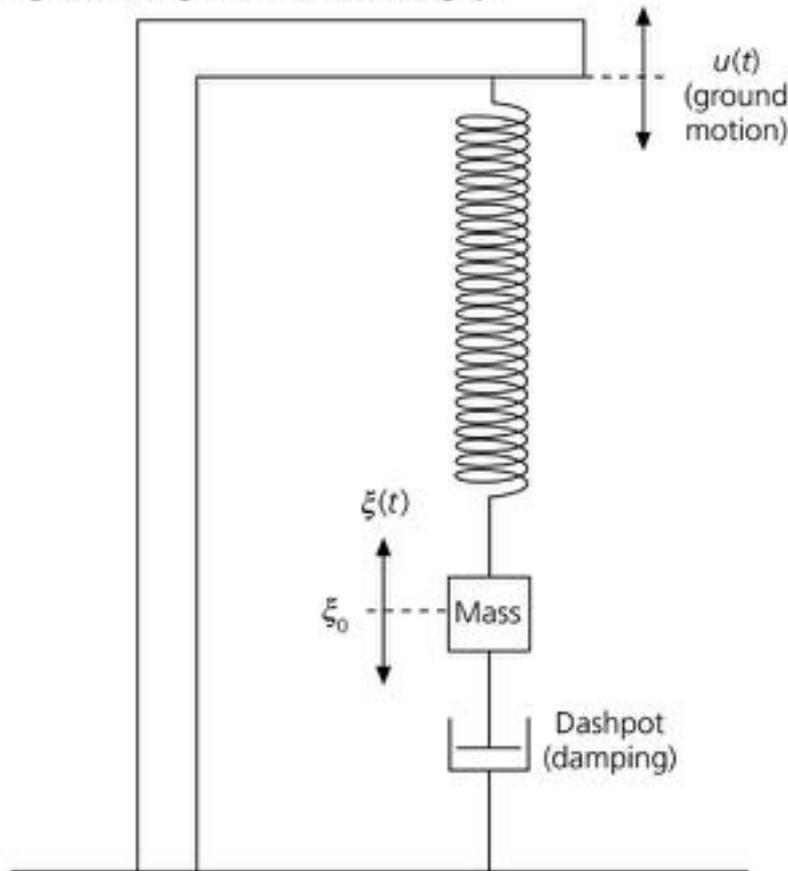
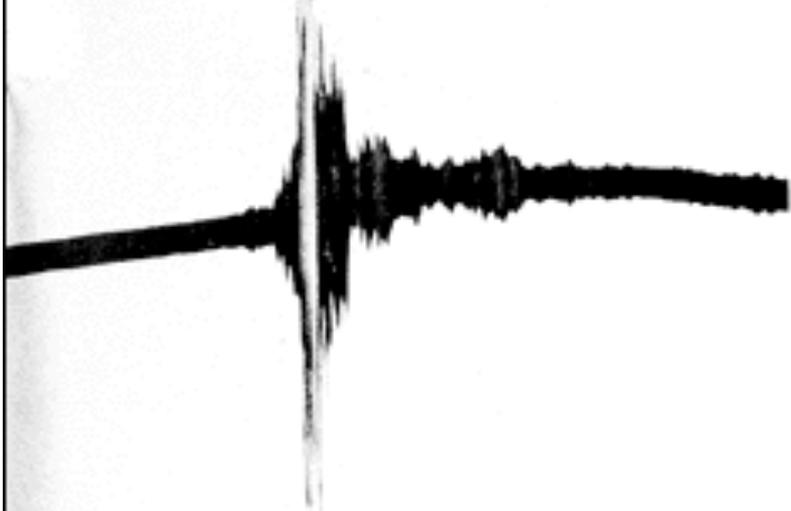
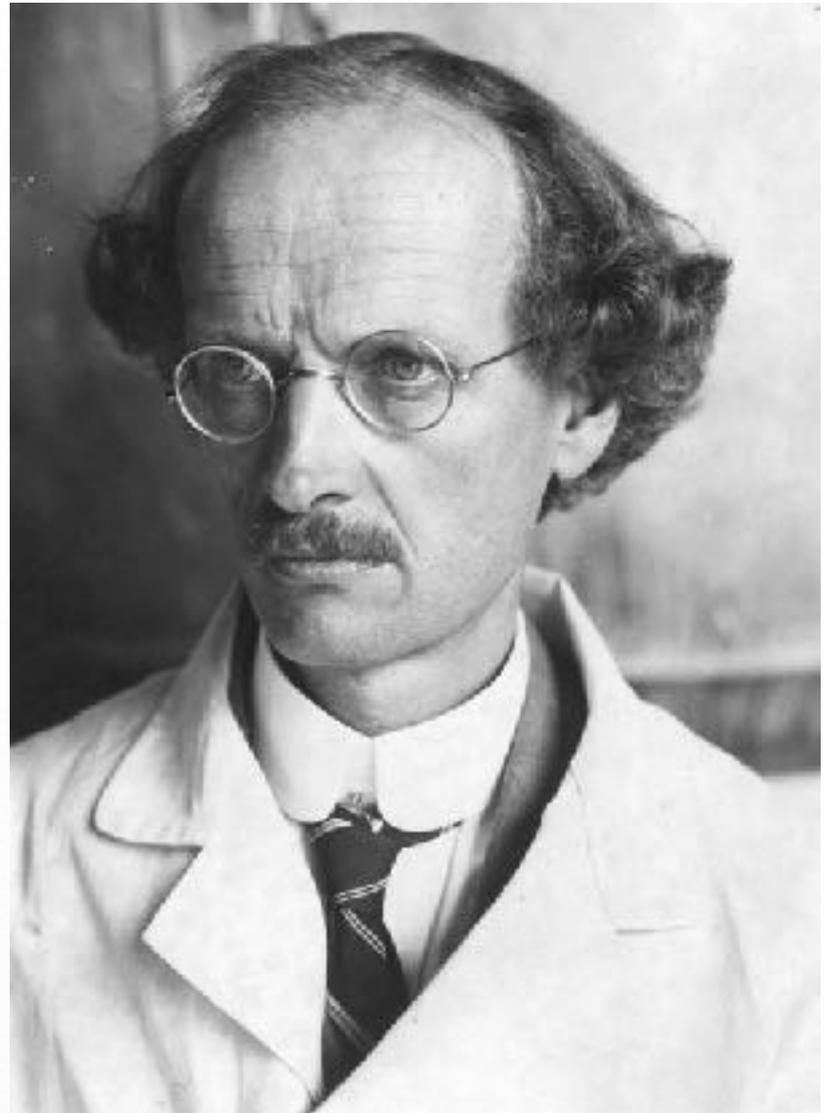


Fig. 18. Potsdam. 1889 April 17, 15^h - 22^{1/2}^h
(Erdbeben in Japan.)



Quervain-Piccard
20 Tonnes
Martinique
Montagne Pelée
(1929 - 30000
morts)



La sismologie commence vraiment après le bombardement
d'Hiroshima et Nagasaki

Qui a la bombe ?

Combien ?

De quelle puissance ?



Actuellement, bien sûr, tous les sismomètres sont électromagnétiques et numériques;

Idéalement on voudrait :

- Mesurer sur une large game de fréquence (100 Hz->0,0001 Hz)
- Mesurer le mouvement du sol avec une grand dynamique

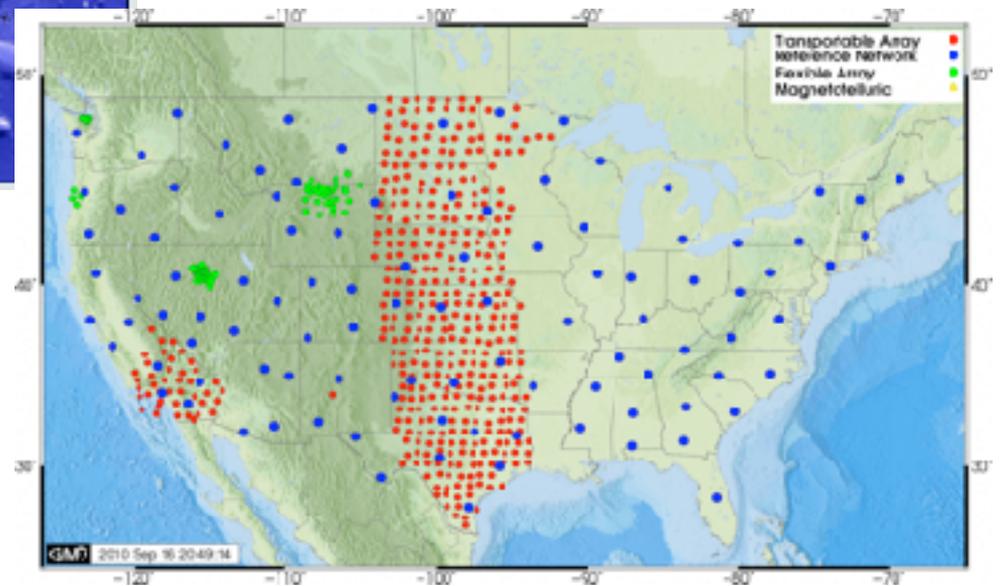
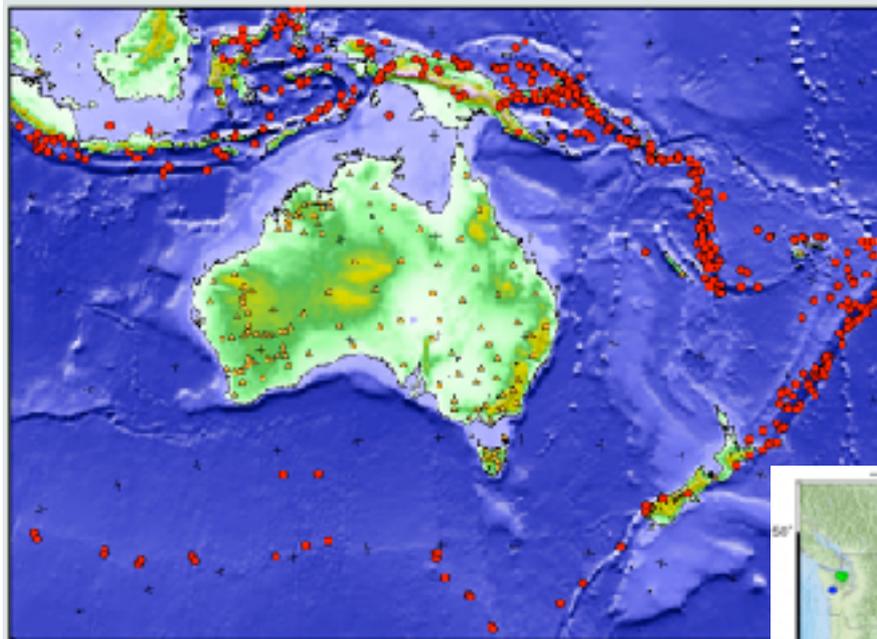
Dynamique : rapport entre les amplitudes extrêmes des mouvements du sol : $X(\text{dB}) = 20 \log_{10}(A/A_0)$

- Séisme de $M= 2$ -> déplacement de $\sim 10^{-10}$ m
- Séisme de $M= 8$ -> déplacement de $\sim 10^{-1}$ m
-> 9 ordres de grandeurs=180 Db de dynamique!

En général les sismomètres modernes enregistrent avec un spectre plat sur 3 ordres de grandeur en fréquence (10Hz -> 0,01Hz) avec une dynamique de ~ 140 dB (7 ordres de grandeur)

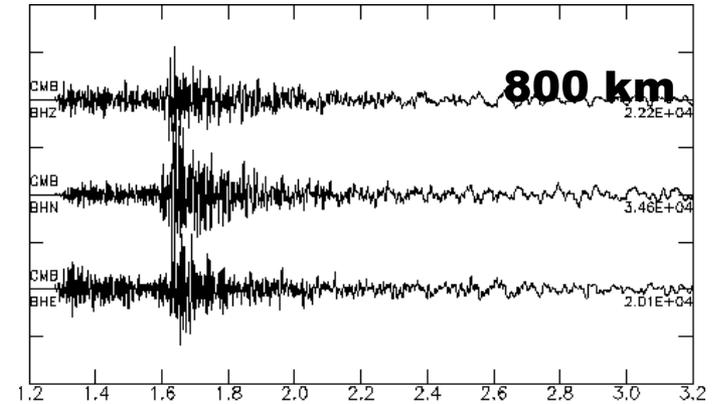
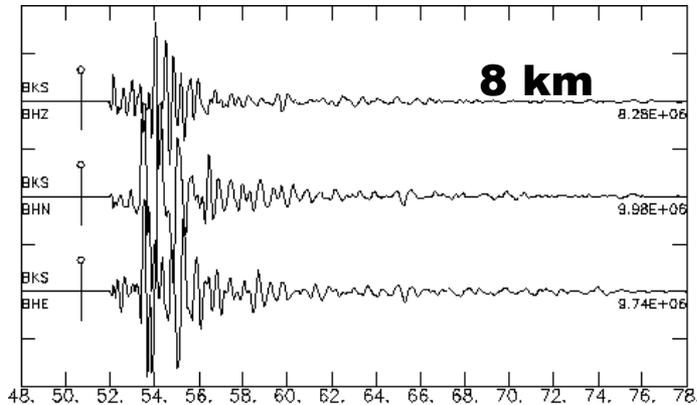
Depuis les années 1990 :

Déploiements temporaires sur le terrain un peu partout dans le monde :

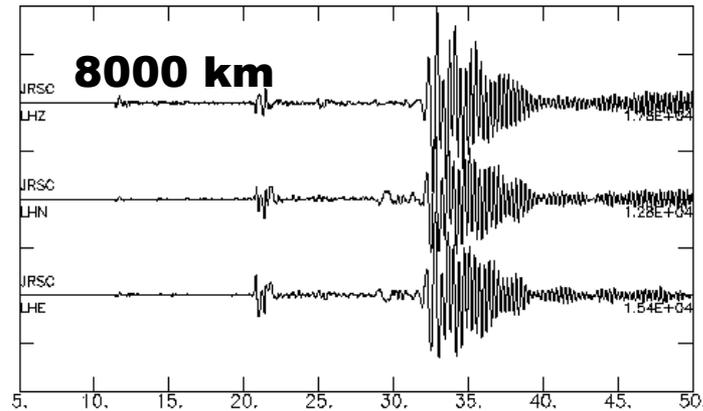


Le sismogramme

Plus un séisme est enregistré loin, plus il dure longtemps ...



secondes

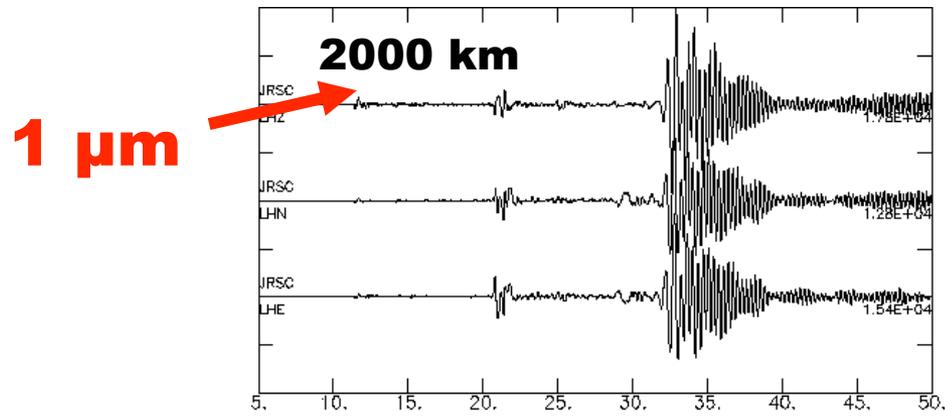
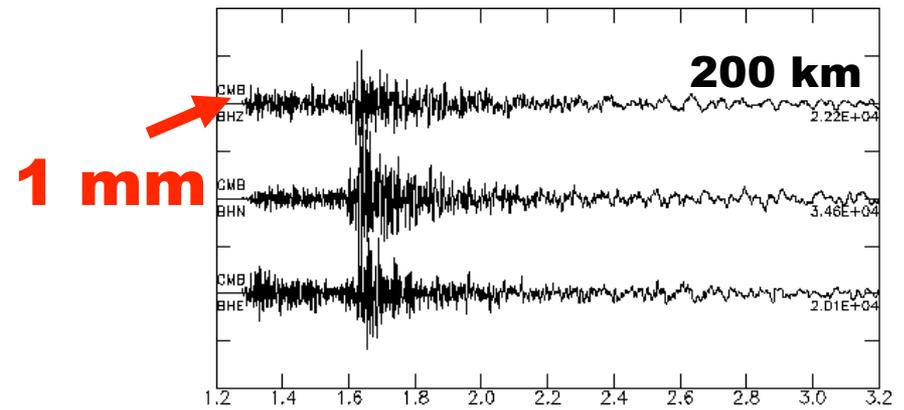
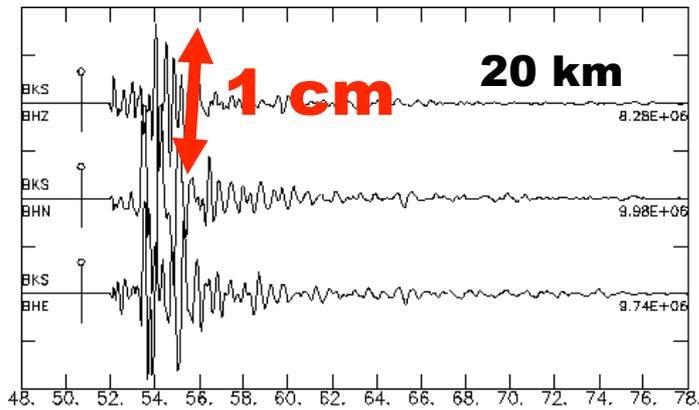


minutes

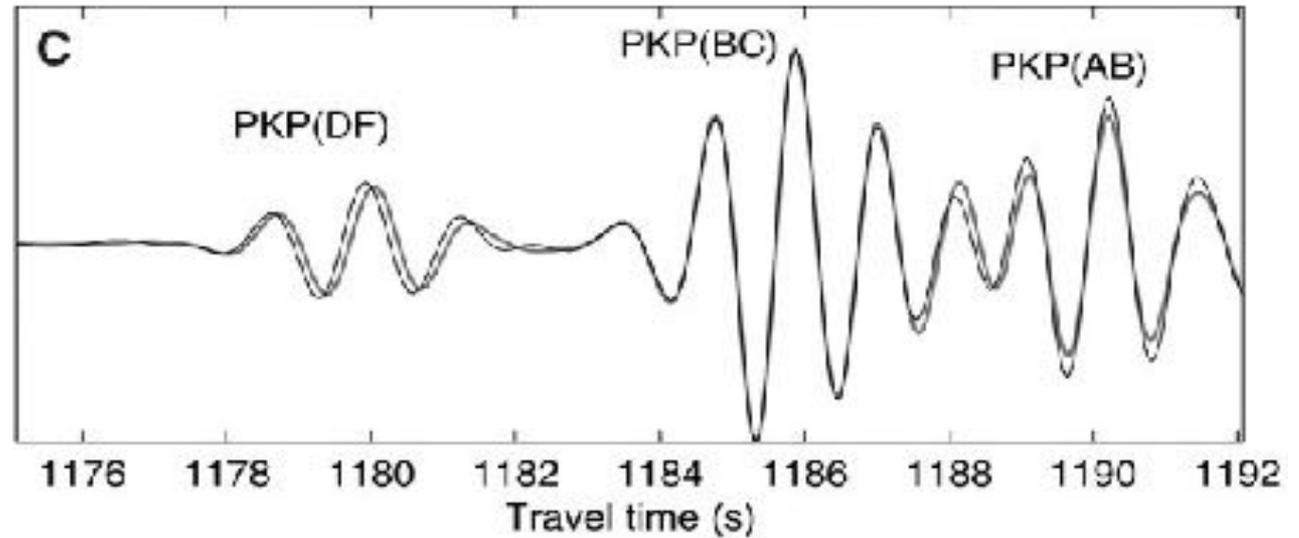
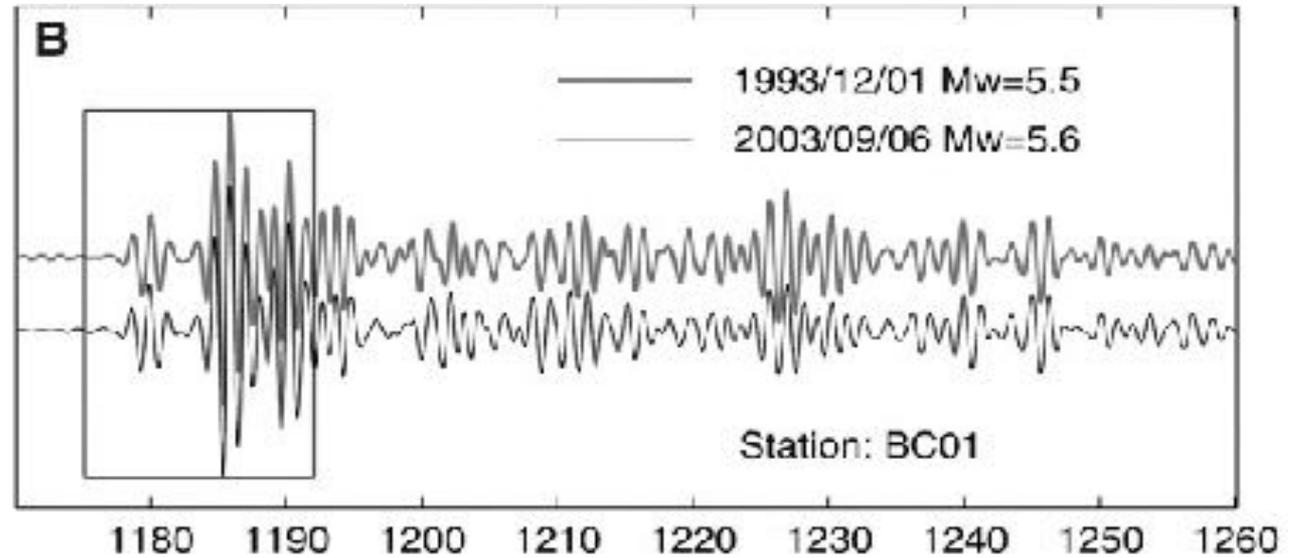
minutes

Le sismogramme

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

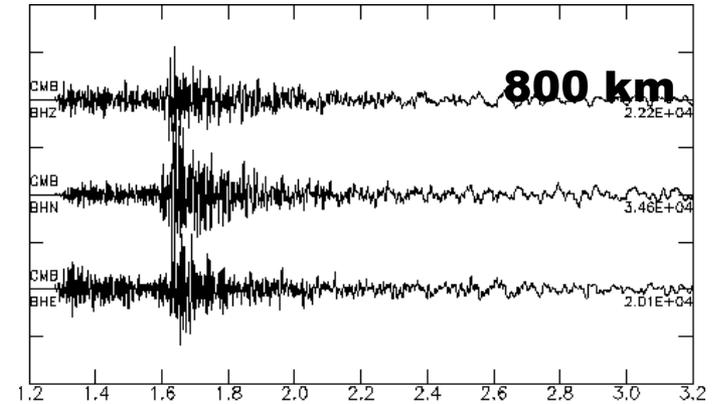
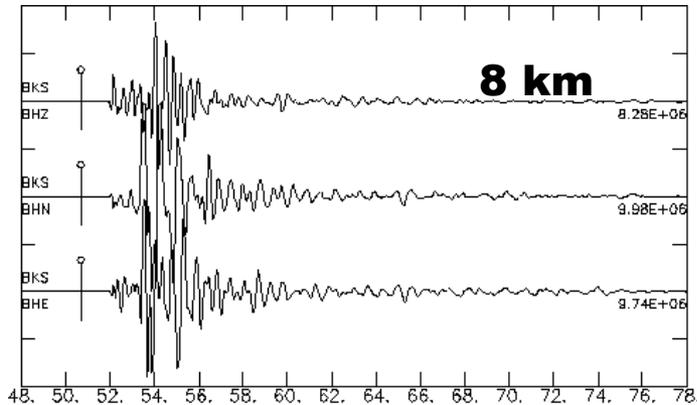


2 séismes, se produisant au même endroit, enregistrés au même endroit (ici aux antipodes)

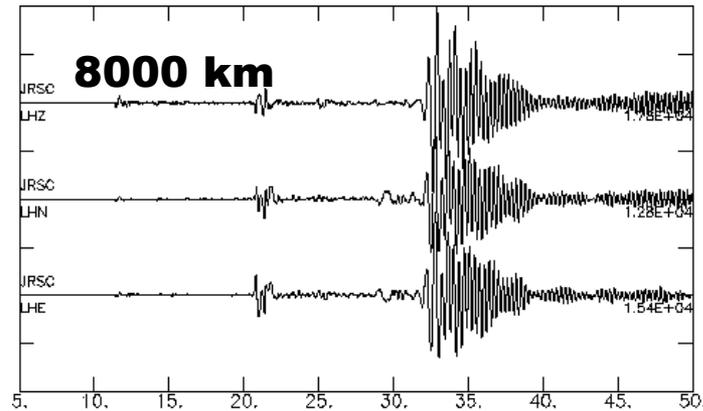


Le sismogramme

Plus un séisme est enregistré loin, plus il dure longtemps ...



secondes

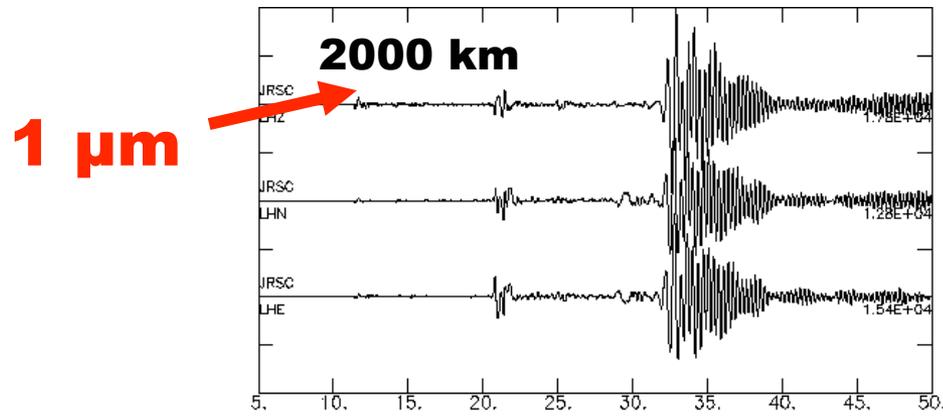
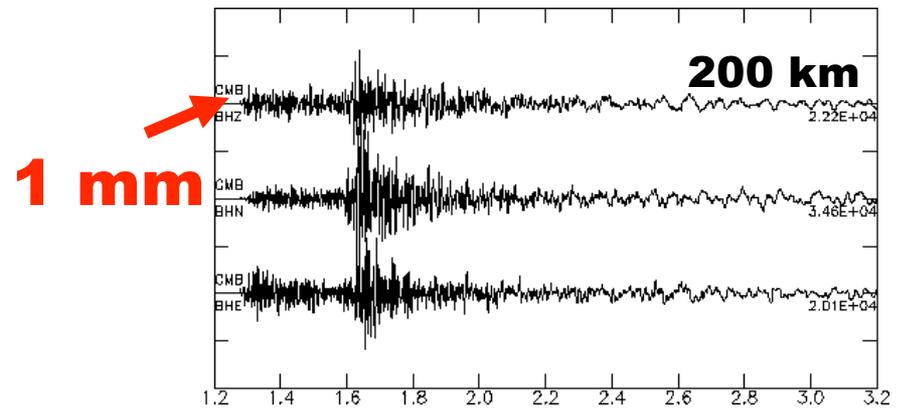
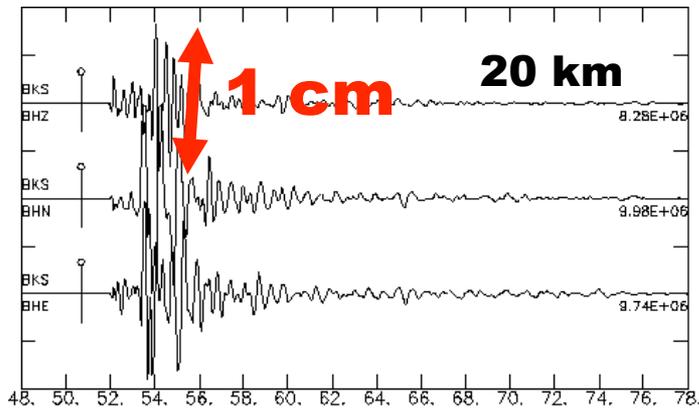


minutes

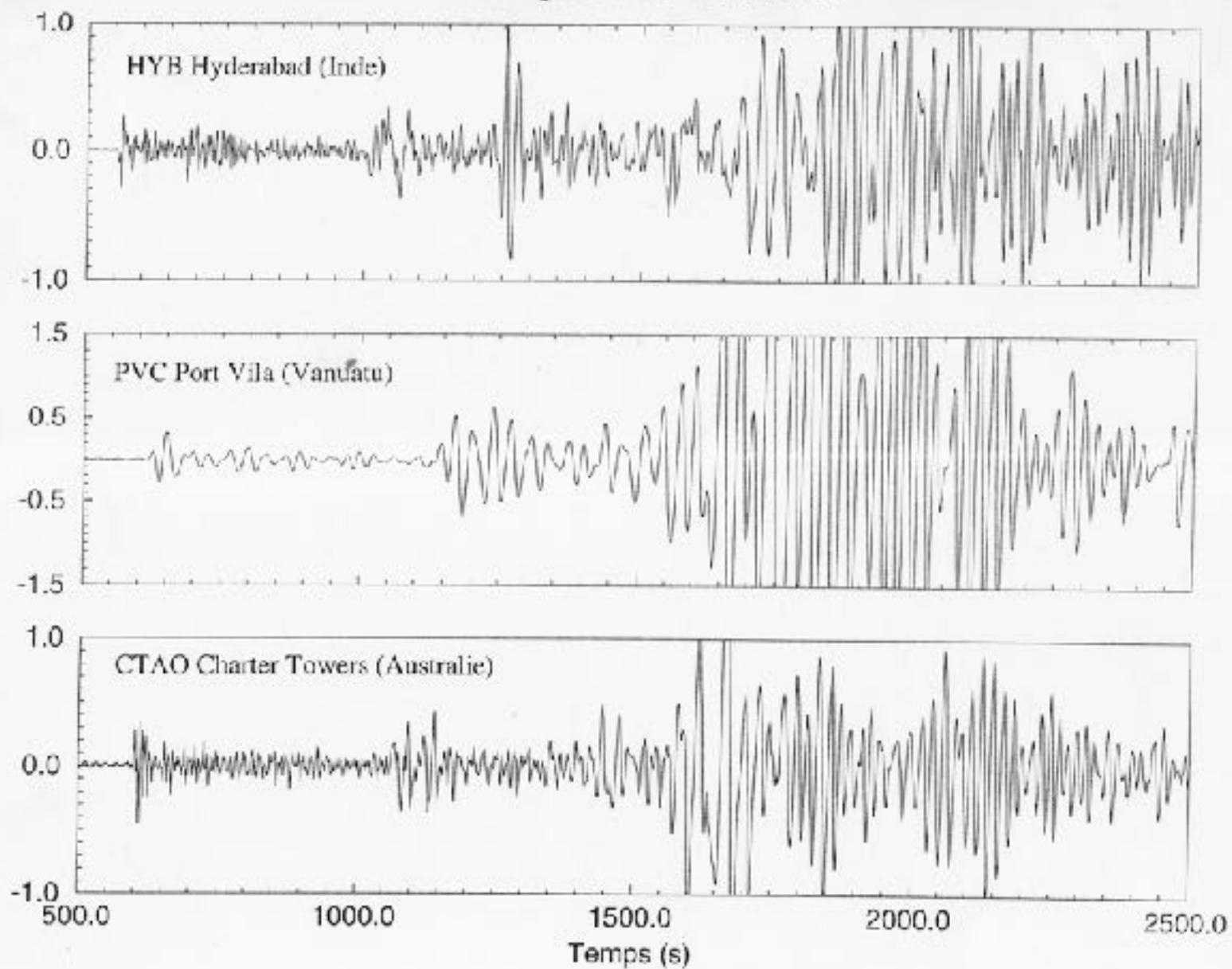
minutes

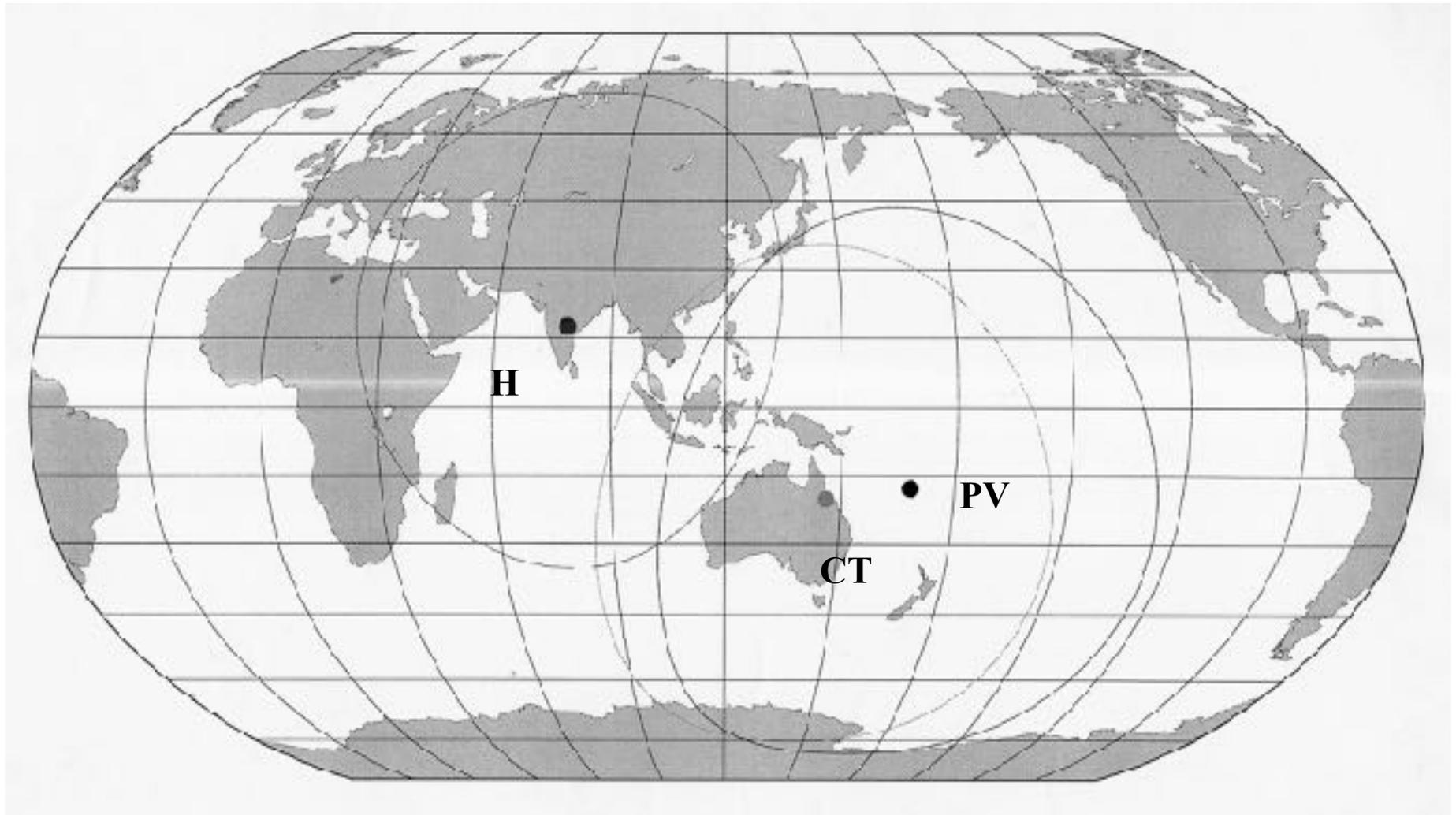
Le sismogramme

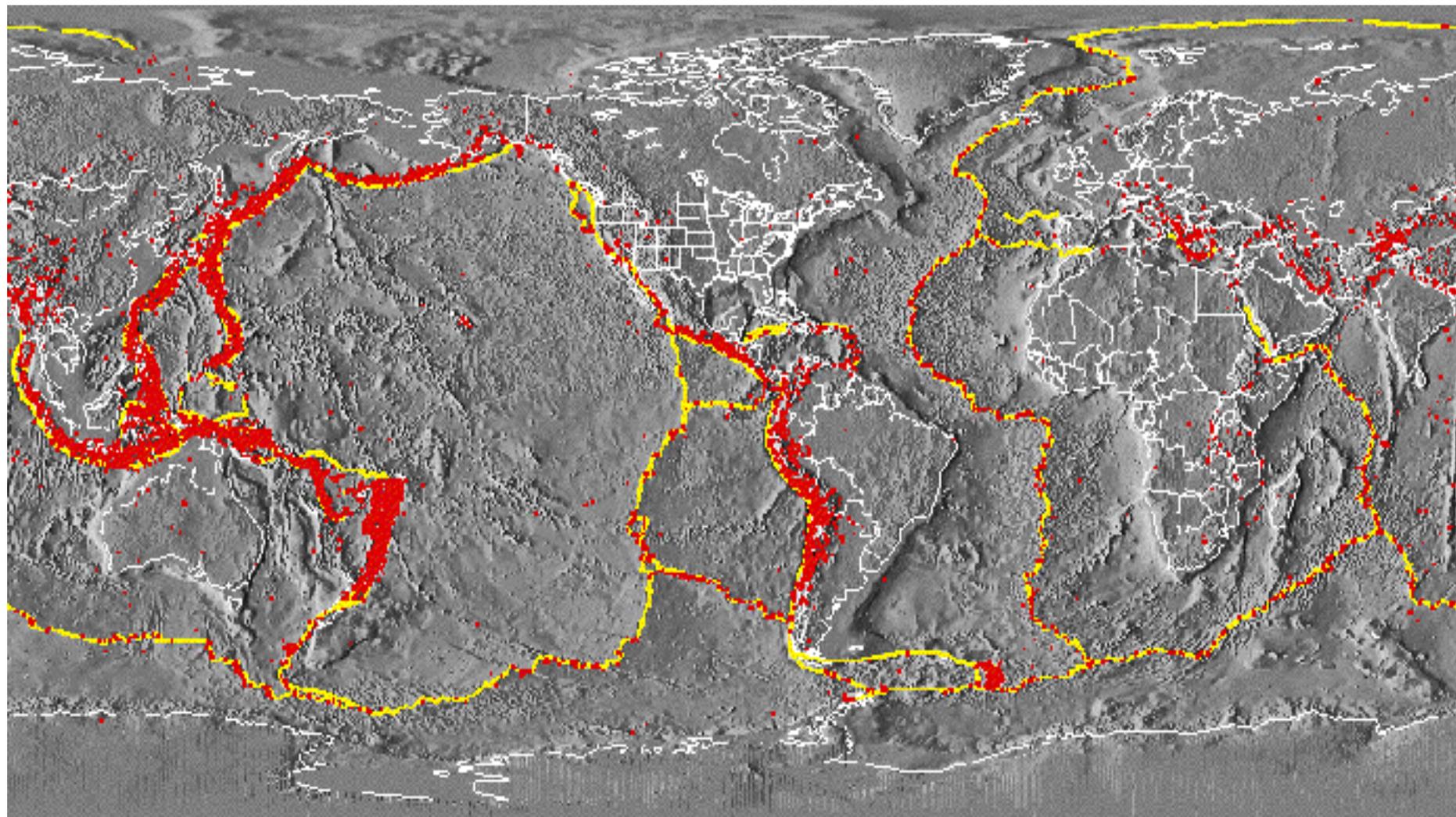
Mais plus l'amplitude du mouvement est faible ...



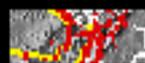
Composante verticale



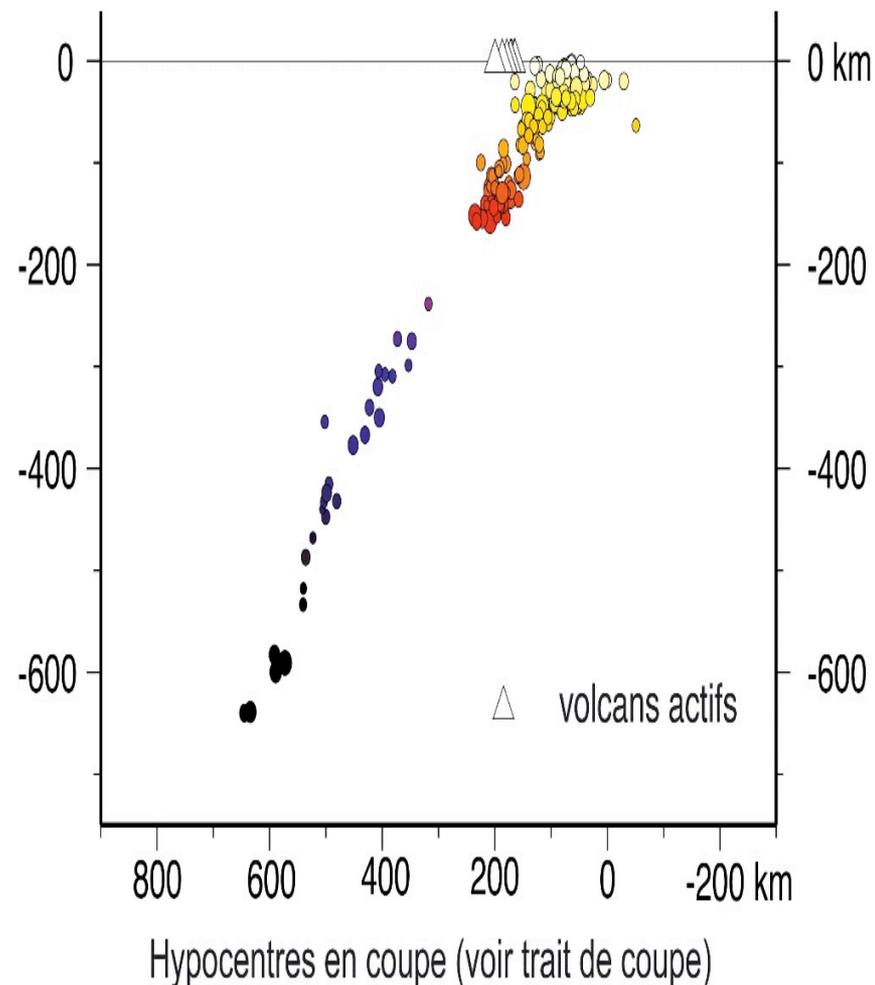
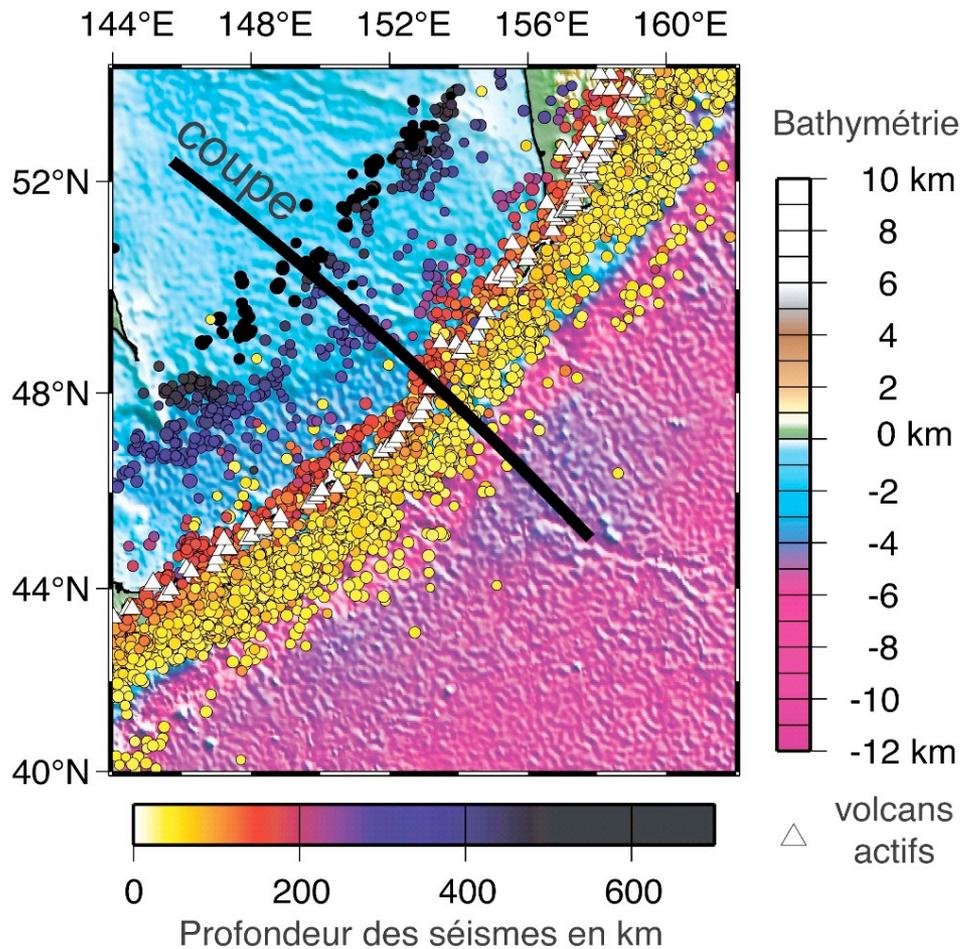




Crustal Plate Boundaries



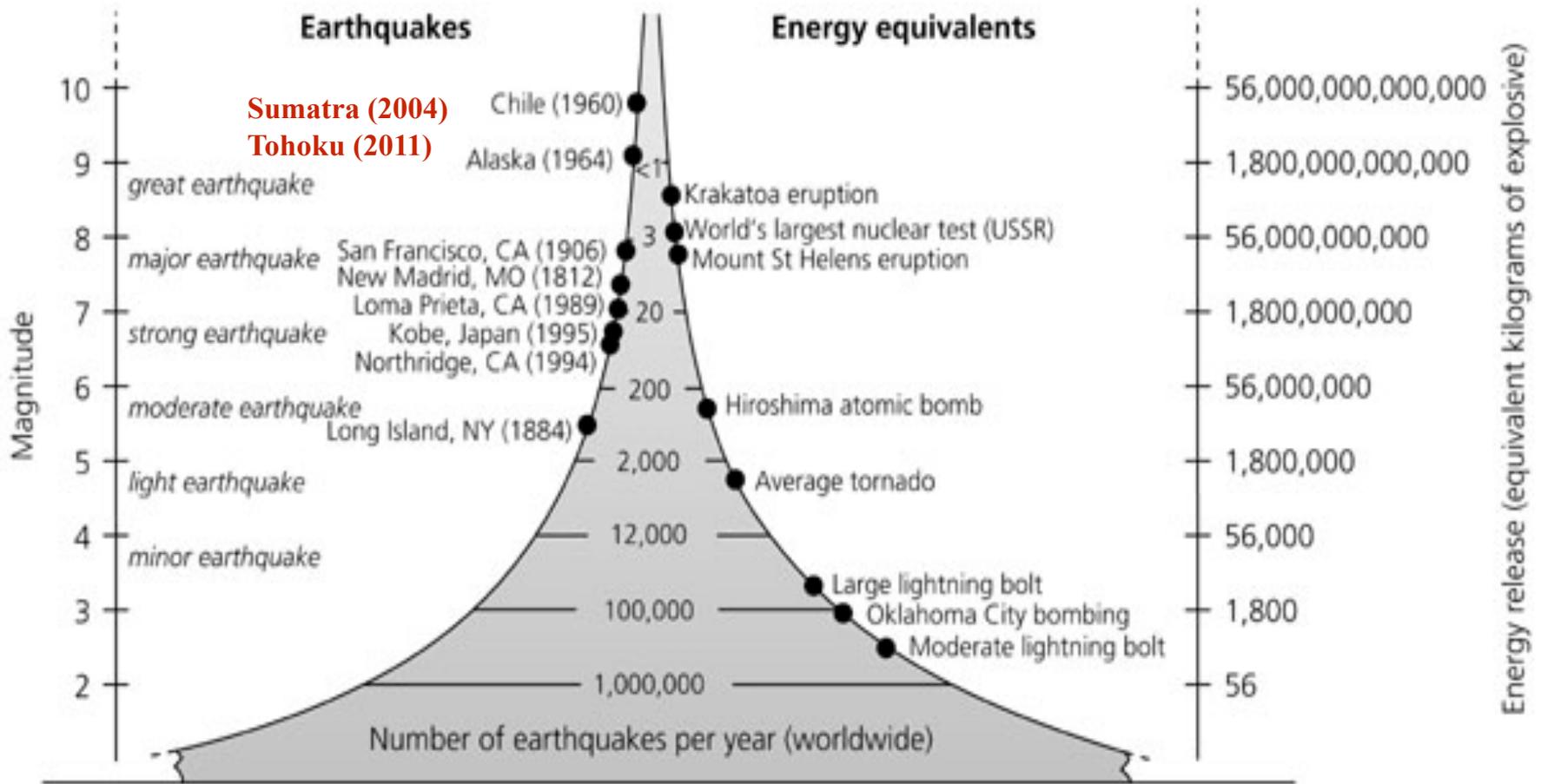
Earthquake Epicenters, $M > 5$, 1980-1990
Coastlines, Political Boundaries



Zone de subduction des Kouriles en plan et en coupe. 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 épiscopentrale, 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

Figure 1.2-2: Comparison of frequency, magnitude, and energy release.



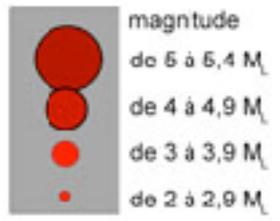
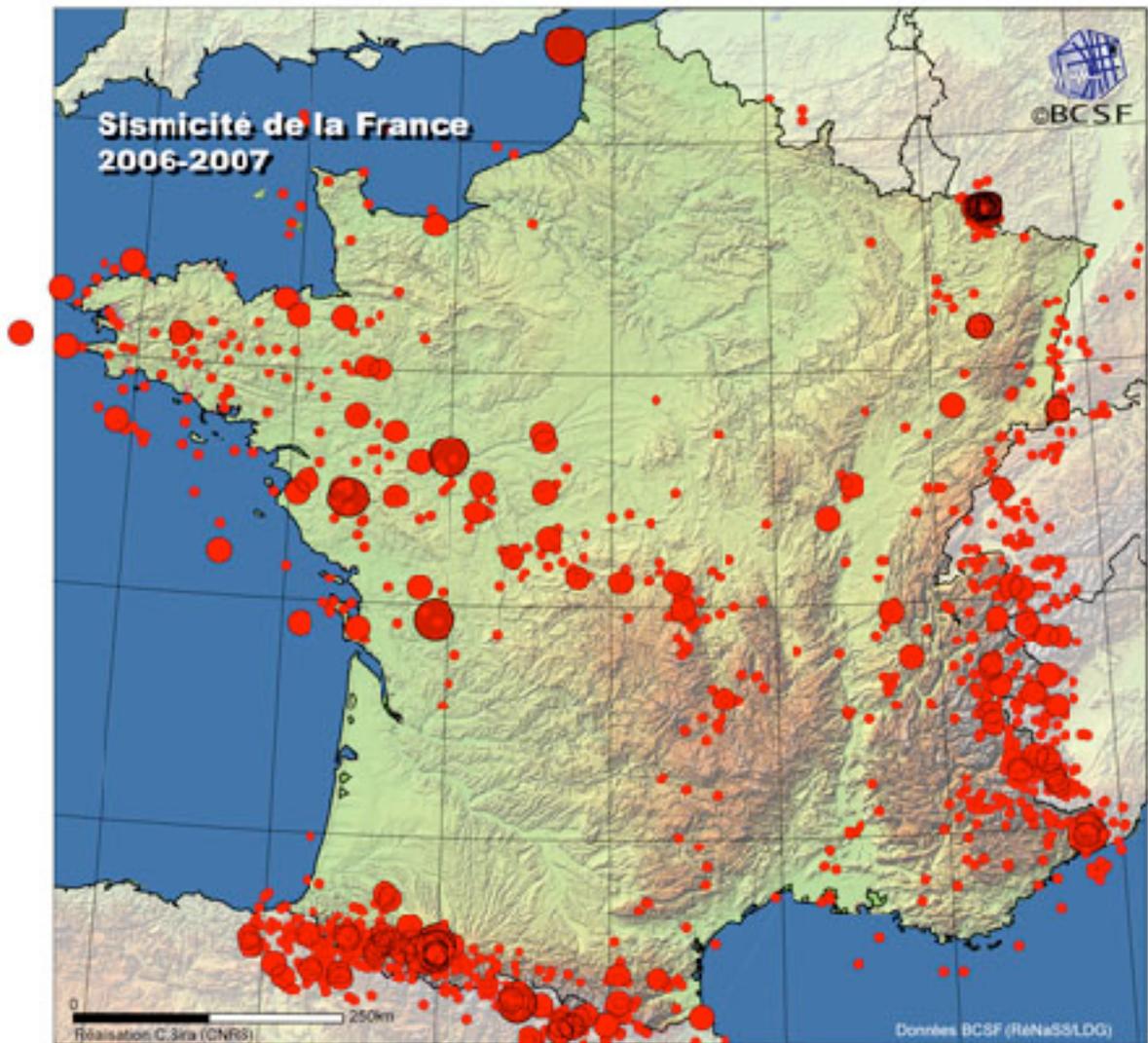
Un en
magnitude

Un facteur
30 en énergie

Séisme du Chili 1960 :

21 m de glissement d'une faille de 200 x 800 km, 10^{19} Joules d'énergie élastique relâchée

Consommation annuelle d'énergie mondiale : 3×10^{20} Joules.



*cartographie de la sismicité limitée
aux 50 premiers kilomètres
à l'extérieur des frontières françaises.*

Sismicité
de l'hexagone

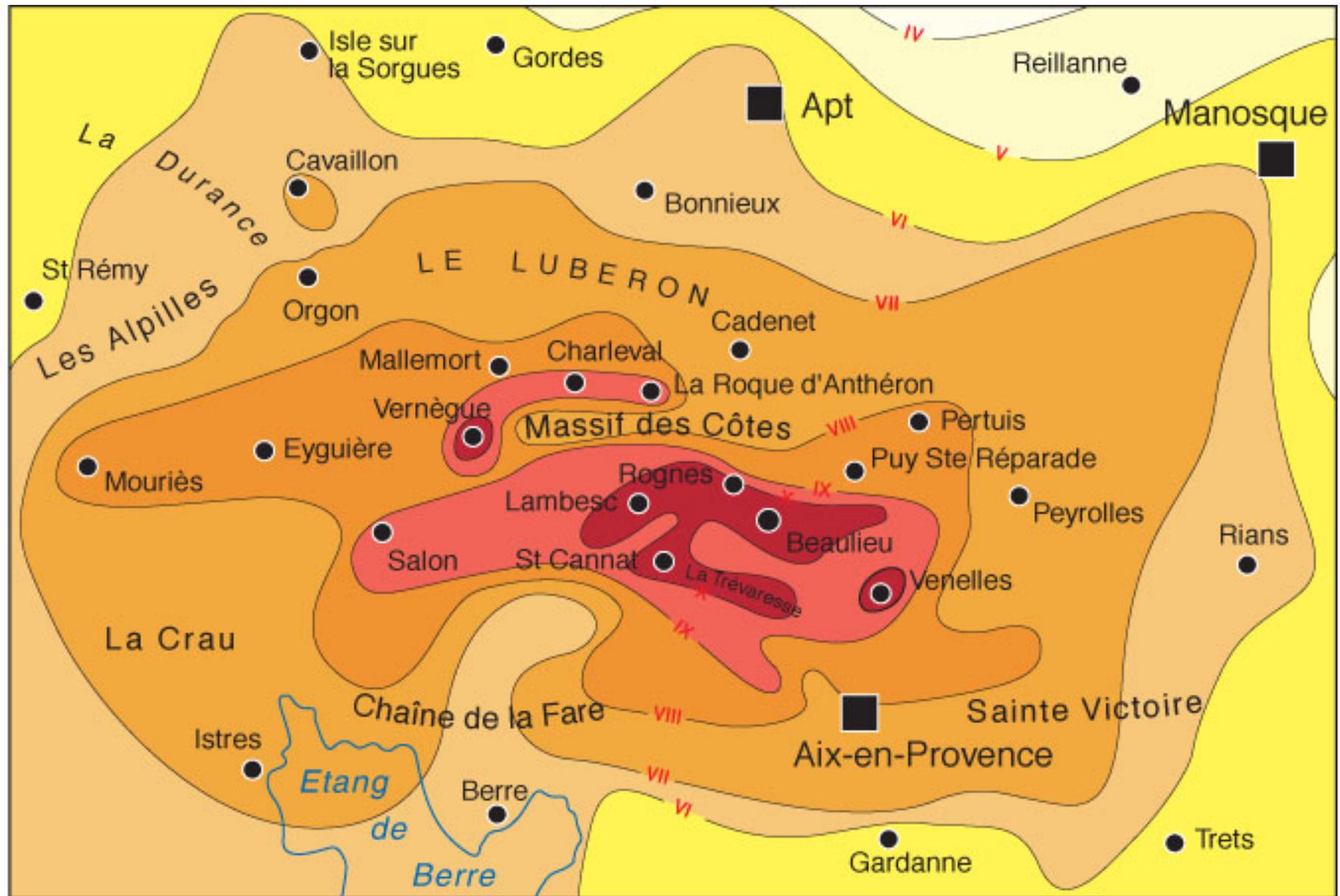
La forme abrégée de l'Echelle Macrosismique Européenne, tirée de la partie principale, est conçue pour donner une vision très simplifiée et générale de l'échelle EMS. Elle peut, par exemple, être utilisée à des fins éducatives. *Cette forme abrégée ne convient pas pour les estimations d'intensité.*

Intensité EMS	Définition	Description des effets typiques observés (résumée)
I	Non ressenti	Non ressenti.
II	Rarement ressenti	Ressenti uniquement par quelques personnes au repos dans les maisons.
III	Faible	Ressenti à l'intérieur des habitations par quelques personnes. Les personnes au repos ressentent une vibration ou un léger tremblement.
IV	Largement observé	Ressenti à l'intérieur des habitations par de nombreuses personnes, à l'extérieur par très peu. Quelques personnes sont réveillées. Les fenêtres, les portes et la vaisselle vibrent.
V	Fort	Ressenti à l'intérieur des habitations par la plupart, à l'extérieur par quelques personnes. De nombreux dormeurs se réveillent. Quelques personnes sont effrayées. Les bâtiments tremblent dans leur ensemble. Les objets suspendus se balancent fortement. Les petits objets sont déplacés. Les portes et les fenêtres s'ouvrent ou se ferment.
VI	Dégâts légers	De nombreuses personnes sont effrayées et se précipitent dehors. Chute d'objets. De nombreuses maisons subissent des dégâts non structuraux comme de très fines fissures et des chutes de petits morceaux de plâtre.
VII	Dégâts	La plupart des personnes sont effrayées et se précipitent dehors. Les meubles se déplacent et beaucoup d'objets tombent des étagères. De nombreuses maisons ordinaires bien construites subissent des dégâts modérés: petites fissures dans les murs, chutes de plâtres, chutes de parties de cheminées; des bâtiments plus anciens peuvent présenter de larges fissures dans les murs et la défaillance des cloisons de remplissage.
VIII	Dégâts importants	De nombreuses personnes éprouvent des difficultés à rester debout. Beaucoup de maisons ont de larges fissures dans les murs. Quelques bâtiments ordinaires bien construits présentent des défaillances sérieuses des murs, tandis que des structures anciennes peu solides peuvent s'écrouler.
IX	Destructions	Panique générale. De nombreuses constructions peu solides s'écroulent. Même des bâtiments bien construits présentent des dégâts très importants: défaillances sérieuses des murs et effondrement structural partiel.
X	Destructions importantes	De nombreux bâtiments bien construits s'effondrent.
XI	Catastrophe	La plupart des bâtiments bien construits s'effondrent, même ceux ayant une bonne conception parasismique sont détruits.
XII	Catastrophe généralisée	Pratiquement tous les bâtiments sont détruits.

L'intensité =
une échelle de dégâts
(pour la protection civile)

La magnitude =
une mesure en log
de l'énergie du séisme

Un « petit séisme », Lambesc 1909, Intensité



Dégâts à Rogne



Dégâts à Lambesc



Séisme de 1909	Simulation de 1982 (estimation)
Victimes	
46 morts 250 blessés	400 à 970 morts 1850 à 5650 blessés
Domages aux habitations	
Plusieurs milliers de logements détruits ou endommagés gravement (dont 1500 à Aix-en-Provence). Village de Lambesc entièrement détruit.	(25 470 bâtiments sur la zone étudiée) 450 bâtiments entièrement détruits. 21850 endommagés. 315 intacts
Coûts directs (reconstruction ou réparation)	
600 à 1200 M€ (millions d'euros)	Habitations : 1500 M€ Autres bâtiments : 900 M€ Équipements et infrastructures : 70 M€ Moblier : 70 M€ Total : 2540 M€

Dégâts correspondant en euros (1982). Les dégâts dus à ce séisme représenteraient 0,7% du budget de l'état et 600% du budget de la région P.A.C.A. et ceci pour un tremblement de terre somme toute mineur. La très forte croissance économique et humaine de la région entre 1982 et aujourd'hui fait que les dégâts humains et matériels seraient beaucoup plus élevés aujourd'hui.

Différentes ondes

23 octobre 2023

Le théorème fondamental de la dynamique pour les milieux continus s'écrit :

$$\nabla \cdot \sigma = \rho \frac{D^2 \mathbf{u}}{Dt^2}$$

où σ est le tenseur des contraintes (la force exercée, pour un volume fermé, dans la direction \mathbf{e} , sur une surface de normale extérieure \mathbf{n} , est $\mathbf{e} \cdot \sigma \cdot \mathbf{n}$), D la dérivée Lagrangienne, \mathbf{u} le déplacement, le ∇ l'opérateur symbolique qui appliqué à un tenseur donne $\nabla \cdot \sigma = \sum_j \partial_j \sigma_{ij}$, noté $\partial_j \sigma_{ij}$, (je somme sur la deuxième variable, mais ça dépend des auteurs...). En élasticité on les déplacements sont très faibles on néglige le transport Lagrangien et on écrit

$$\nabla \cdot \sigma = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = \rho \partial_{tt}^2 \mathbf{u} = \rho \ddot{\mathbf{u}}$$

Le tenseur des contraintes est relié au tenseur des déformations :

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = \frac{1}{2} (\partial_j u_i + \partial_i u_j)$$

par (cas simple! sans anisotropie, mais l'anisotropie est très présente dans la Terre!)

$$\sigma_{ij} = \lambda \epsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij}$$

La "rigidité" μ est nulle dans les liquides.

Exprimer ϵ_{kk} en fonction de \mathbf{u} .

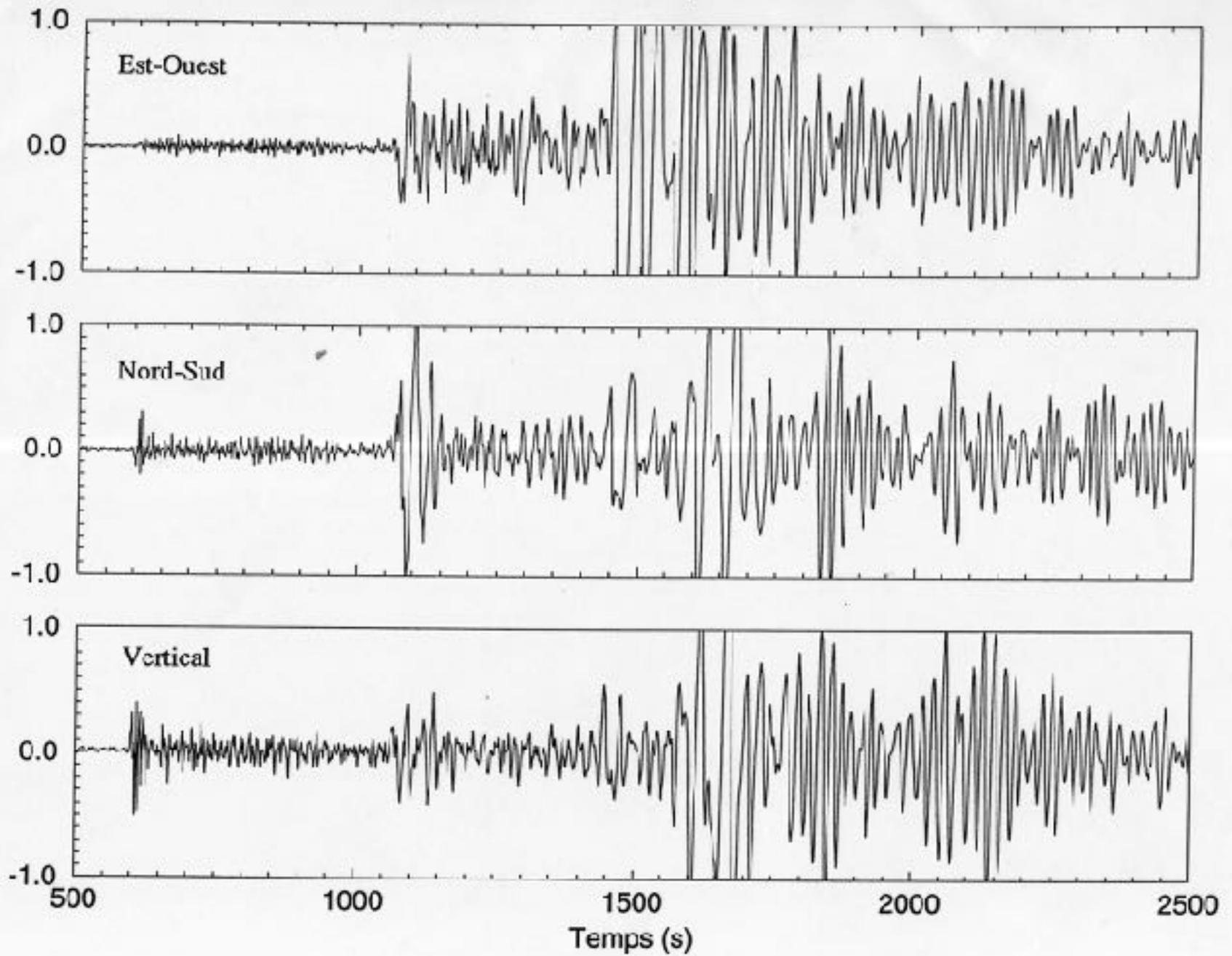
Exprimer $P = -\frac{1}{3} \sigma_{kk}$. On définit l'incompressibilité K par $P = -K \nabla \cdot \mathbf{u}$ Exprimer λ en fonction de K et μ .

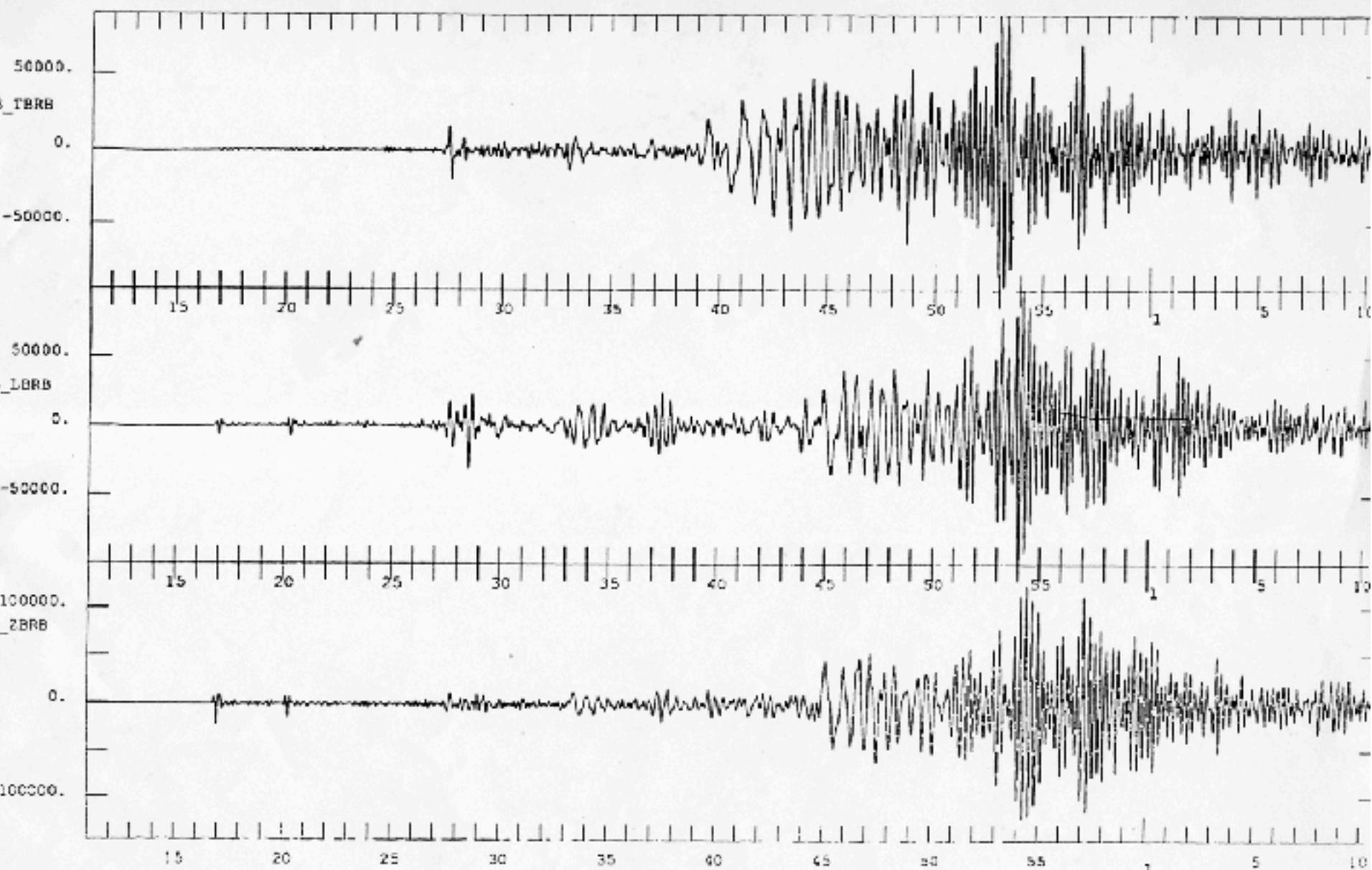
Exprimer les conditions d'équilibre mécanique vérifiées par \mathbf{u}

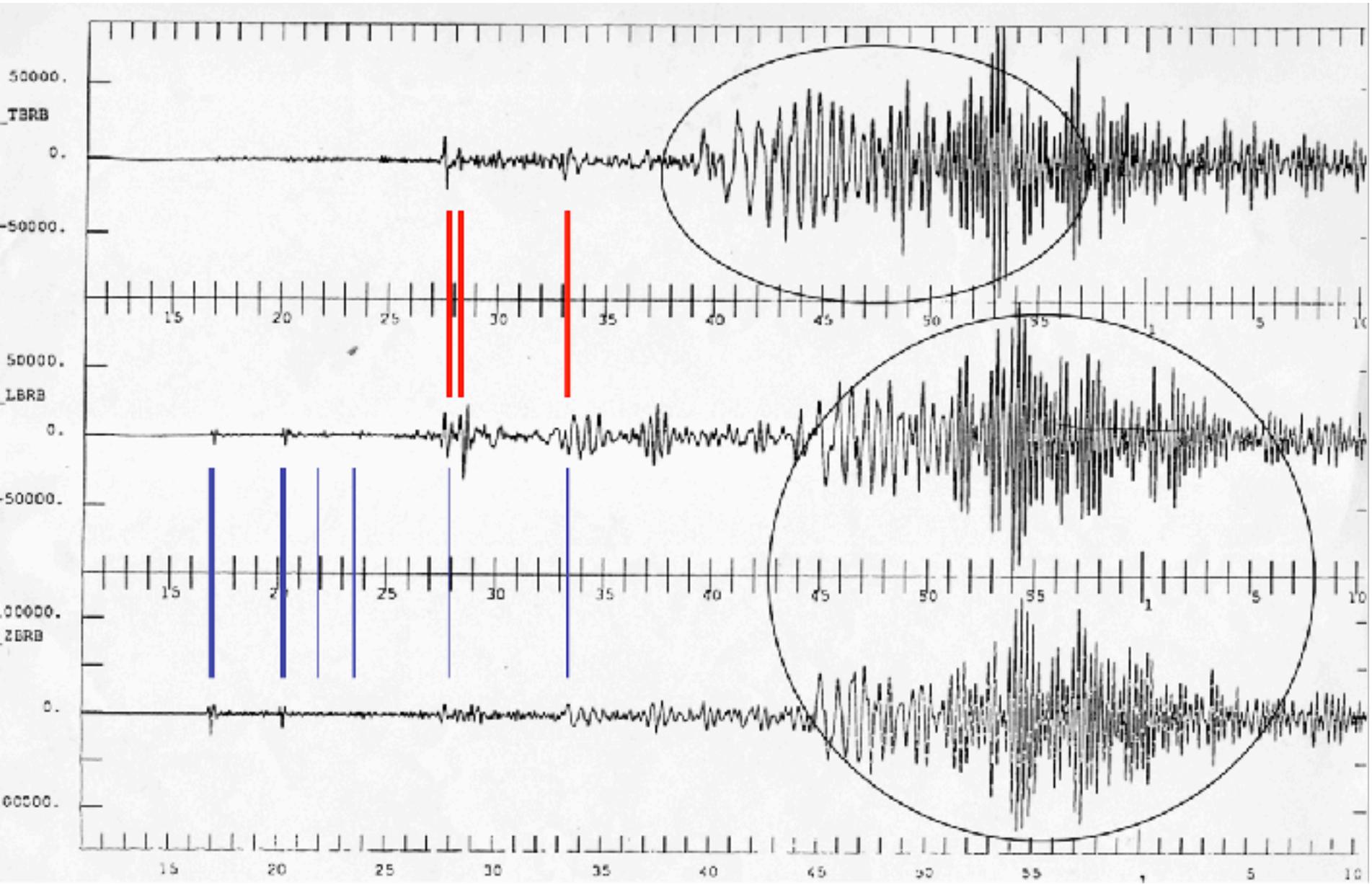
On cherche des solutions sous la forme d'onde plane se propageant dans la direction \mathbf{e}_x , $\mathbf{u} = \mathbf{A} \exp(i(kx - \omega t))$

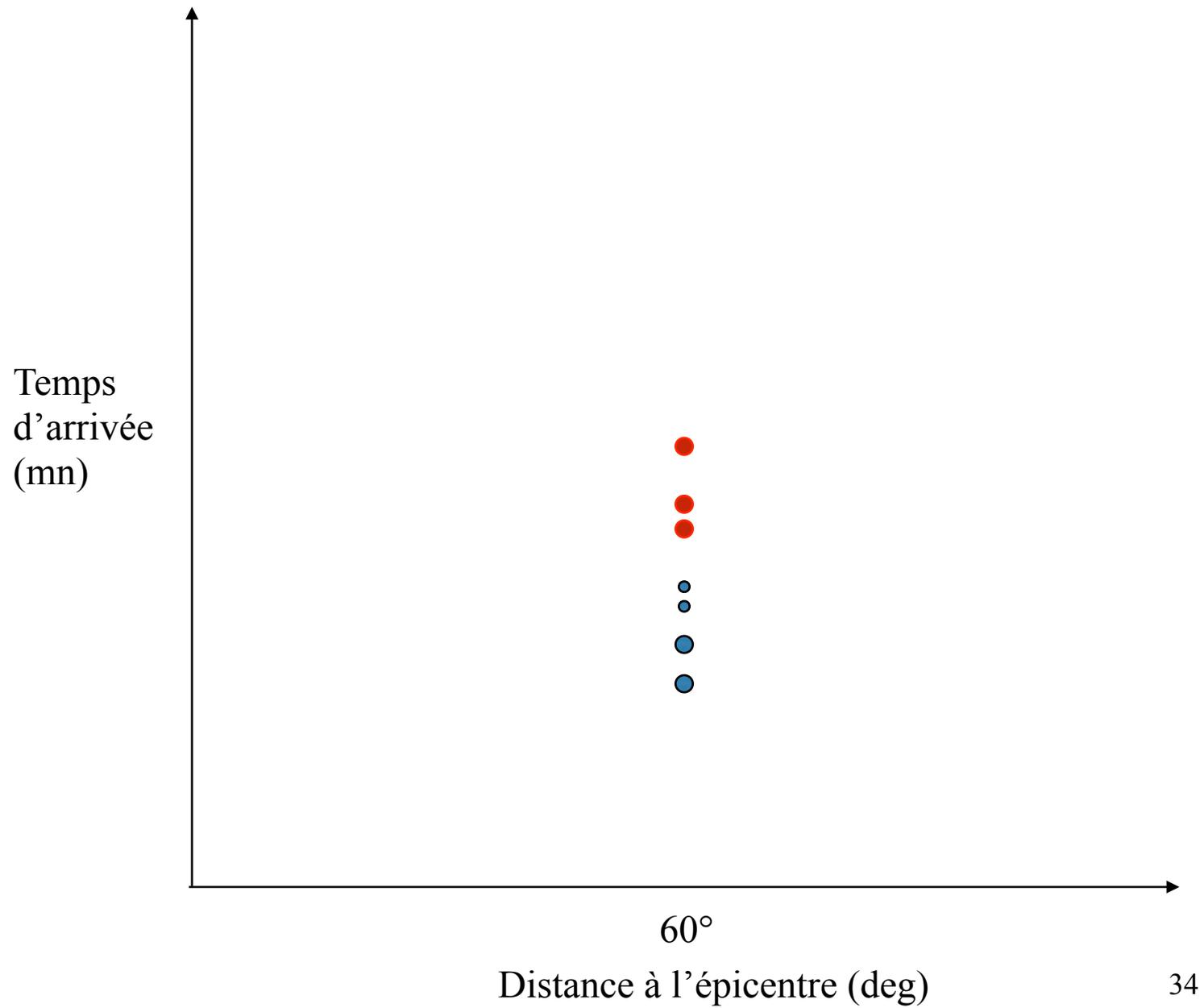
Montrer l'existence de deux ondes de vitesses $\sqrt{\frac{K+4/3\mu}{\rho}}$ et $\sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$

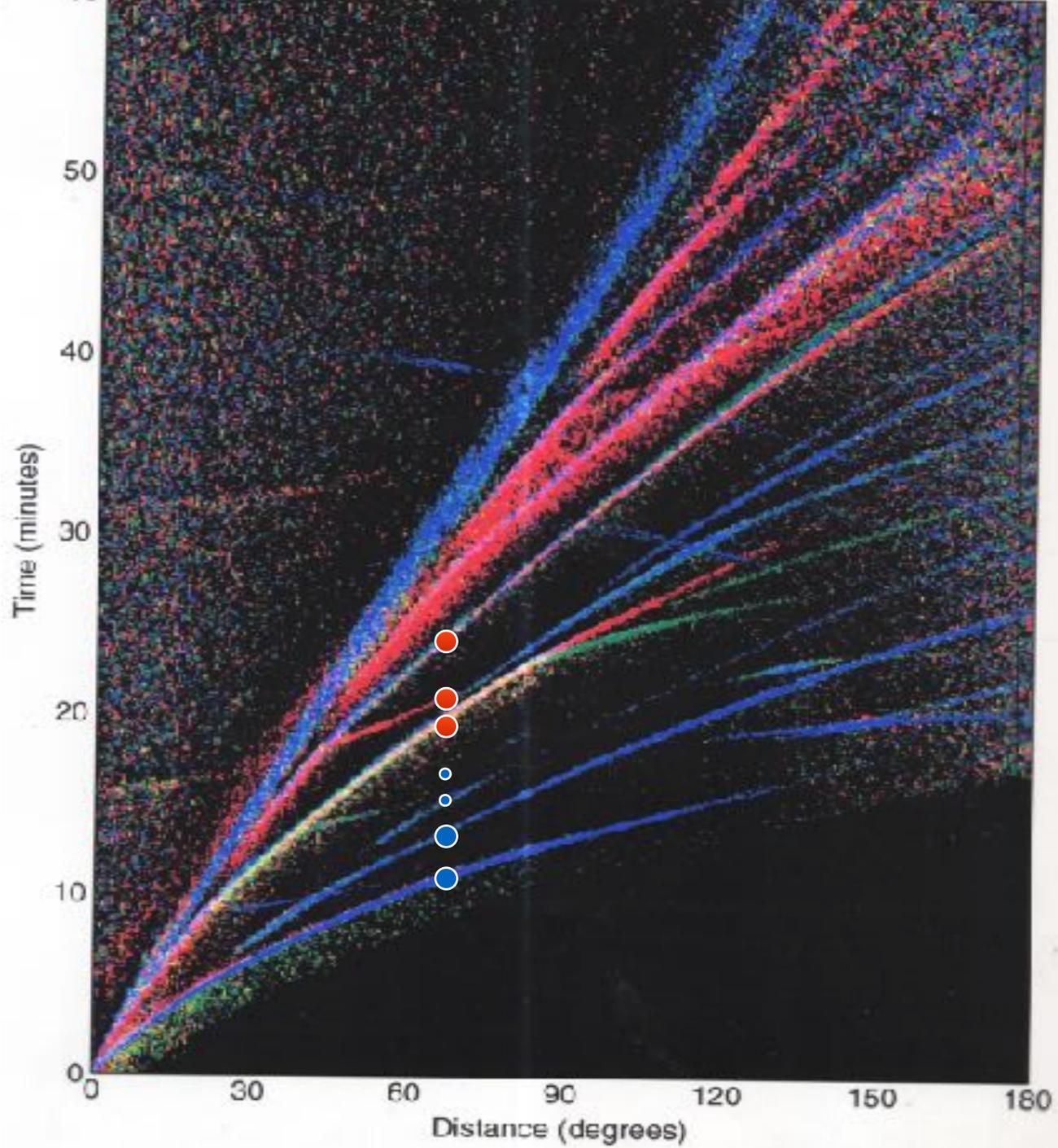
Charter Towers, Australie





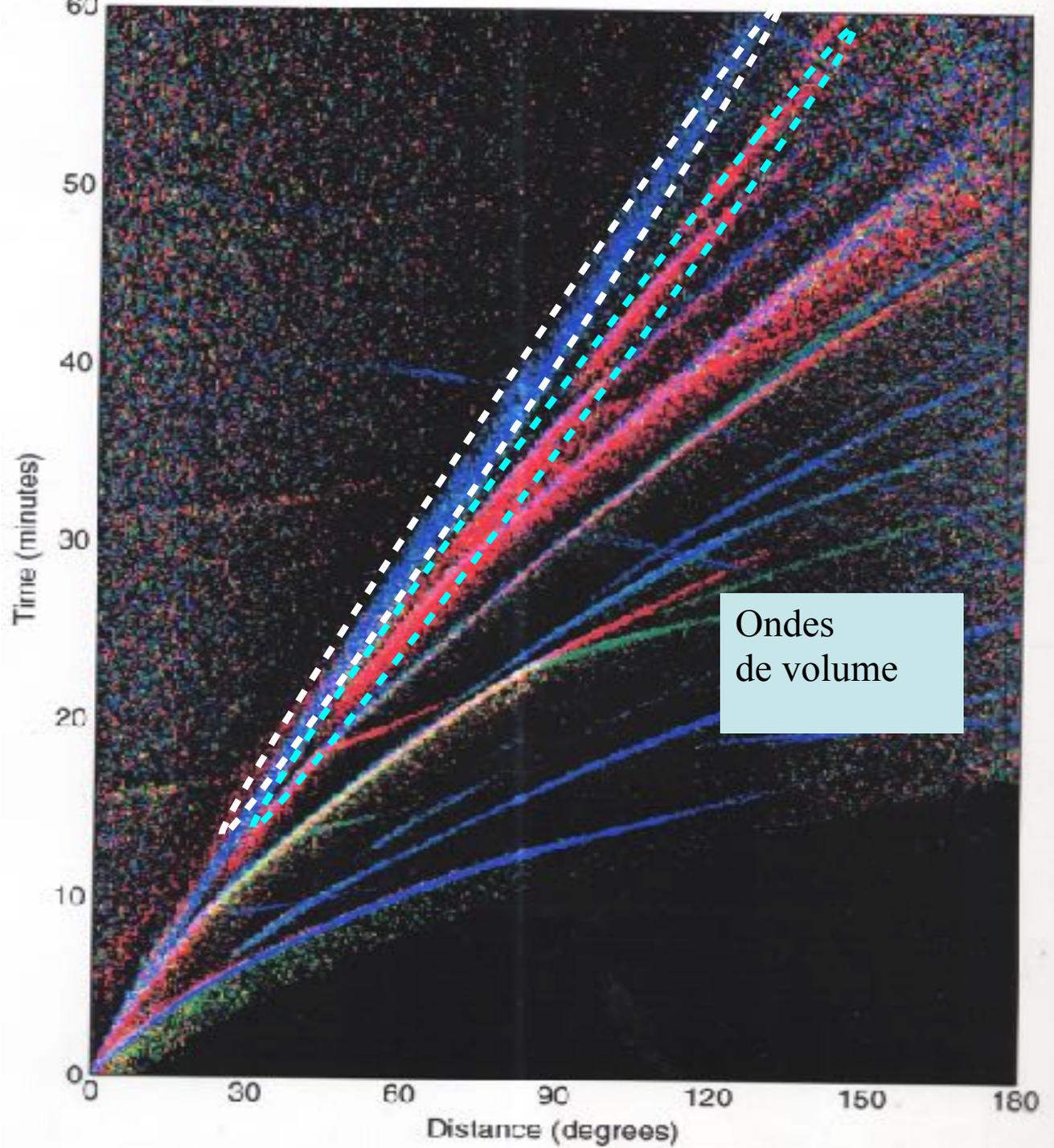


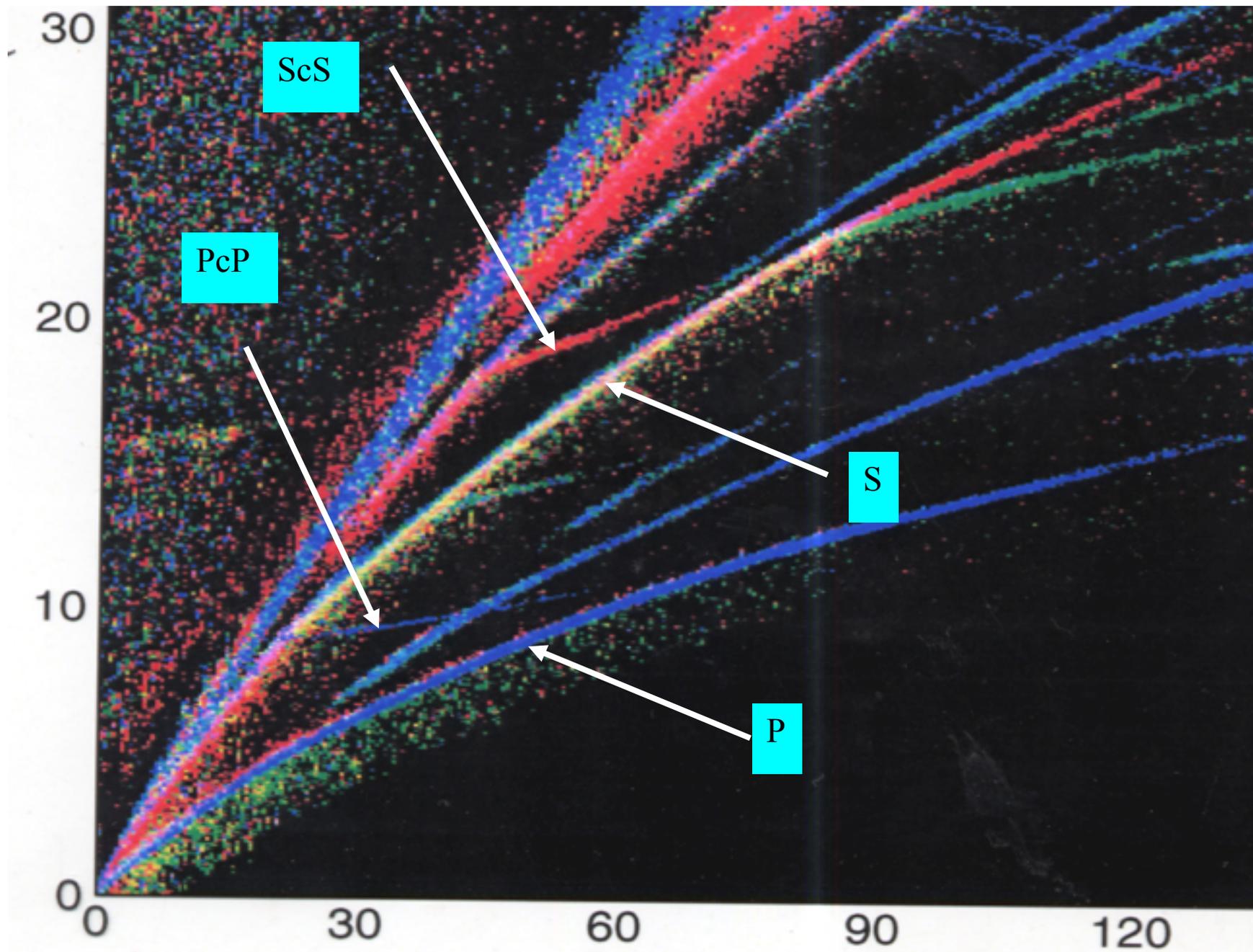


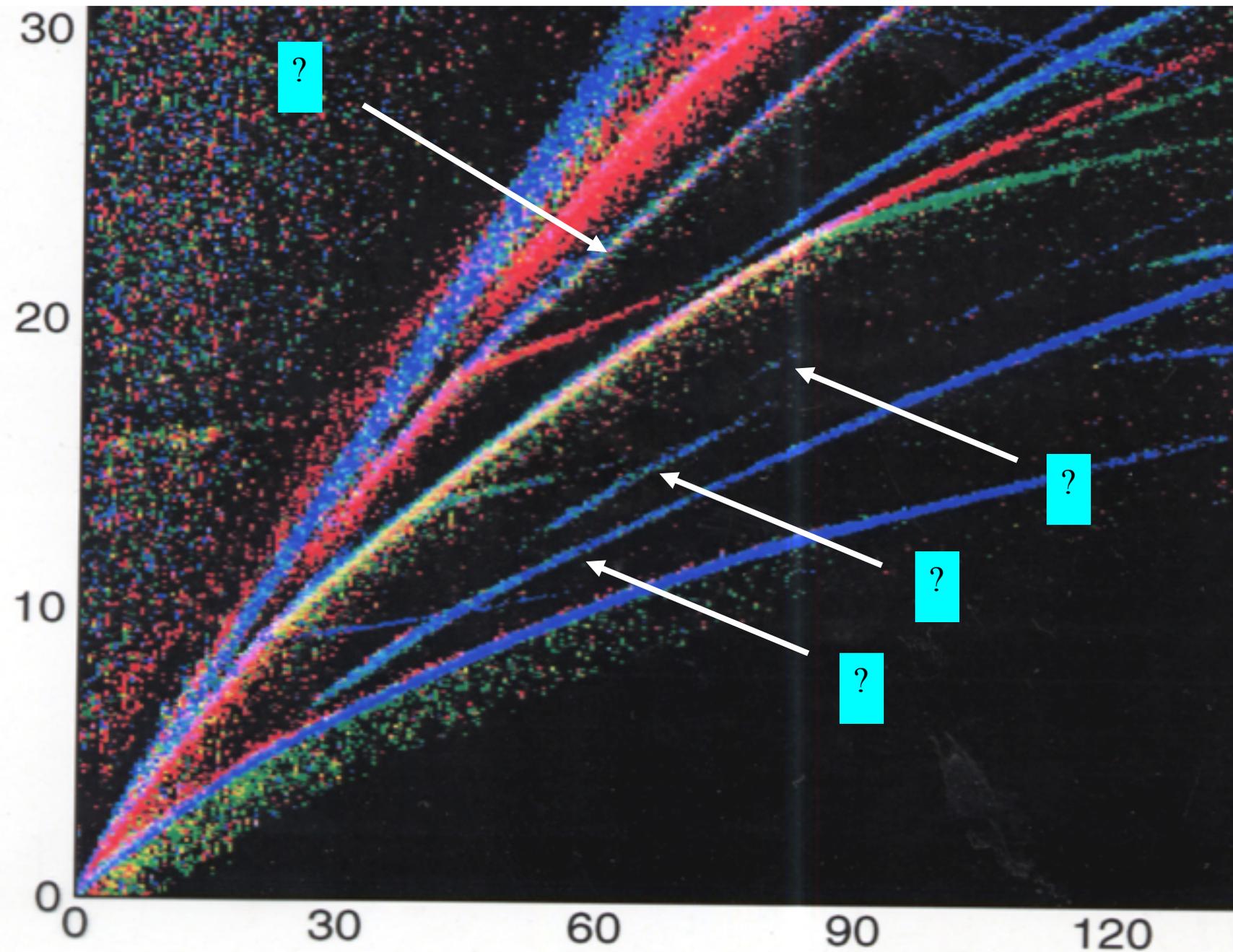


Bleu=Z
Vert=L
Rouge=T

Rayleigh
Love =
Ondes de surface



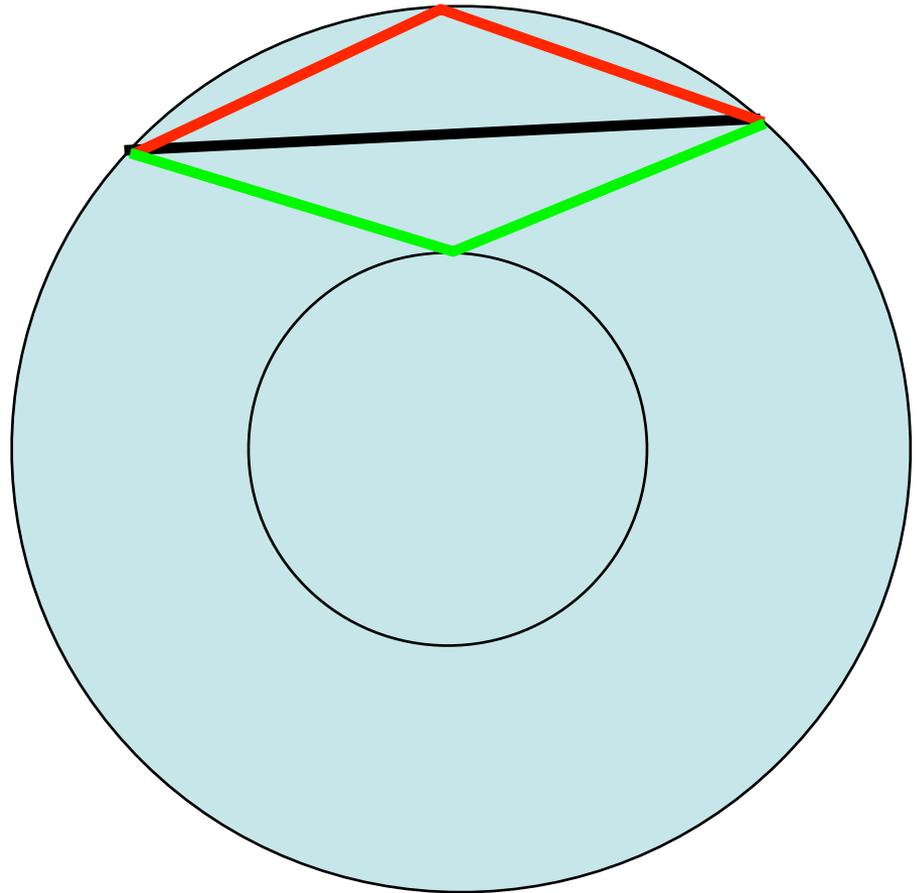


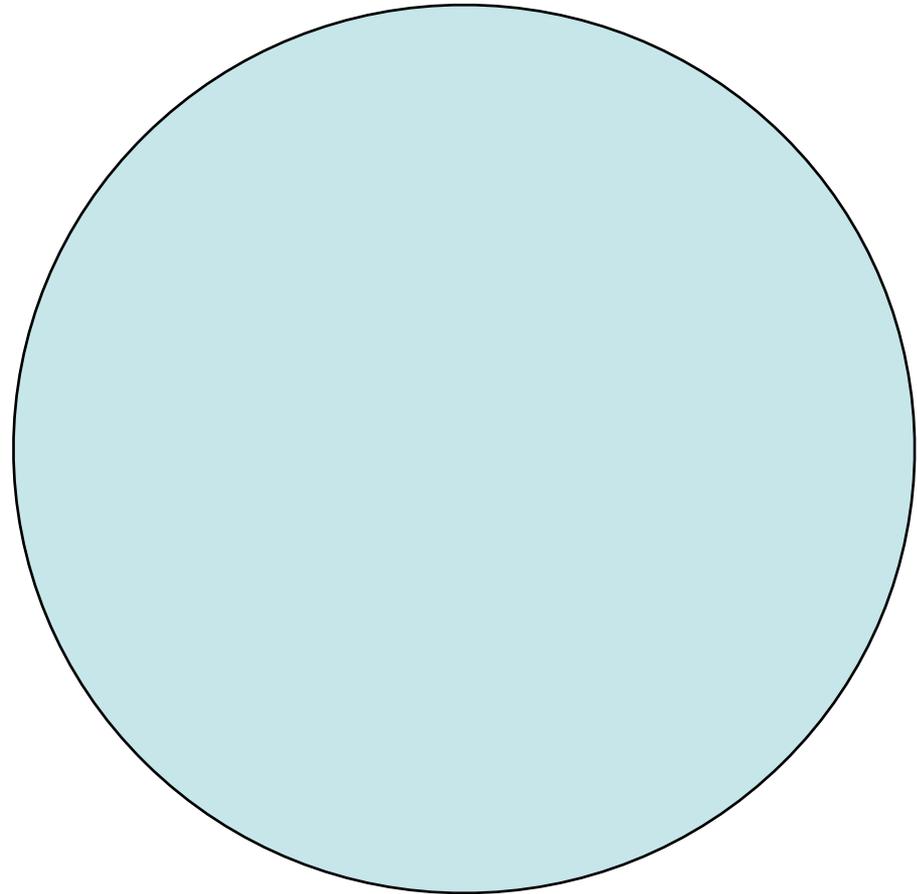


Ondes P, PP, PCP, Love et Rayleigh

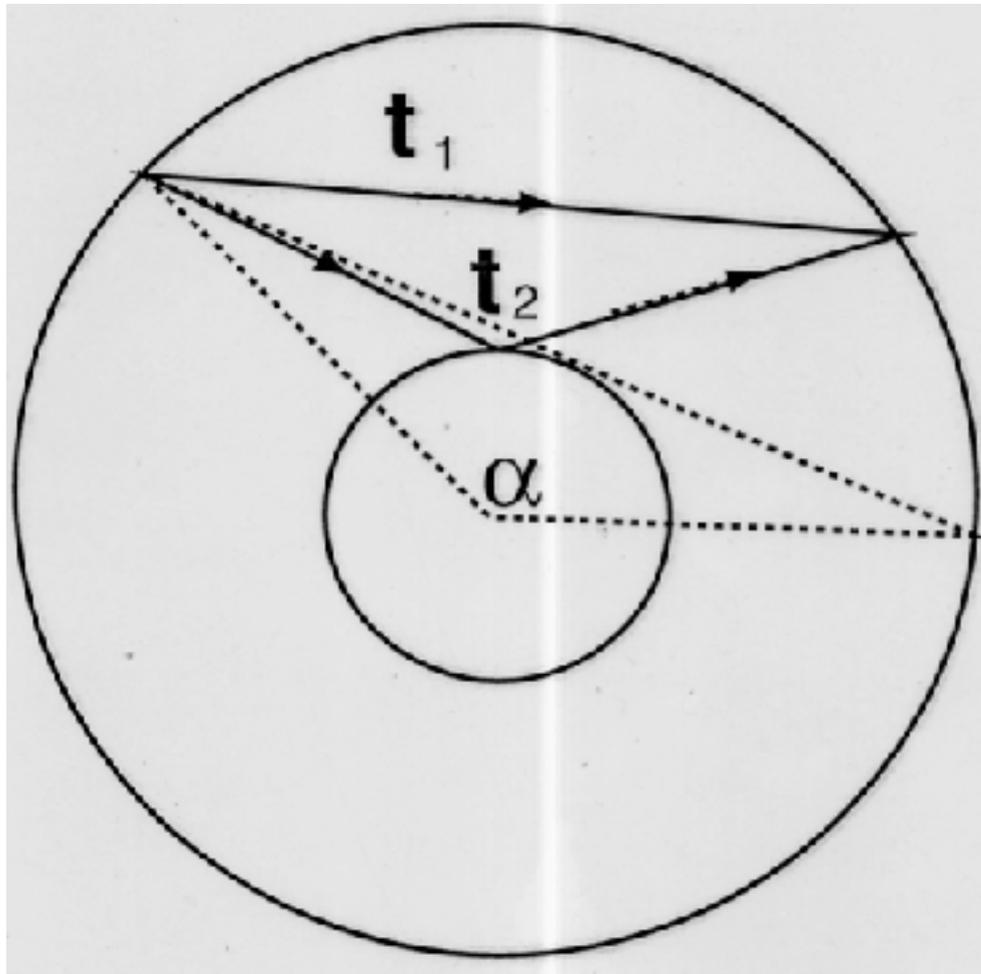
On considère une planète formée d'un manteau et d'un noyau homogènes

- calculer les hodochrones des ondes de volume et de surface
- proposer des vitesses pour ces ondes
- Comment peut on localiser un séisme avec une seule station ?





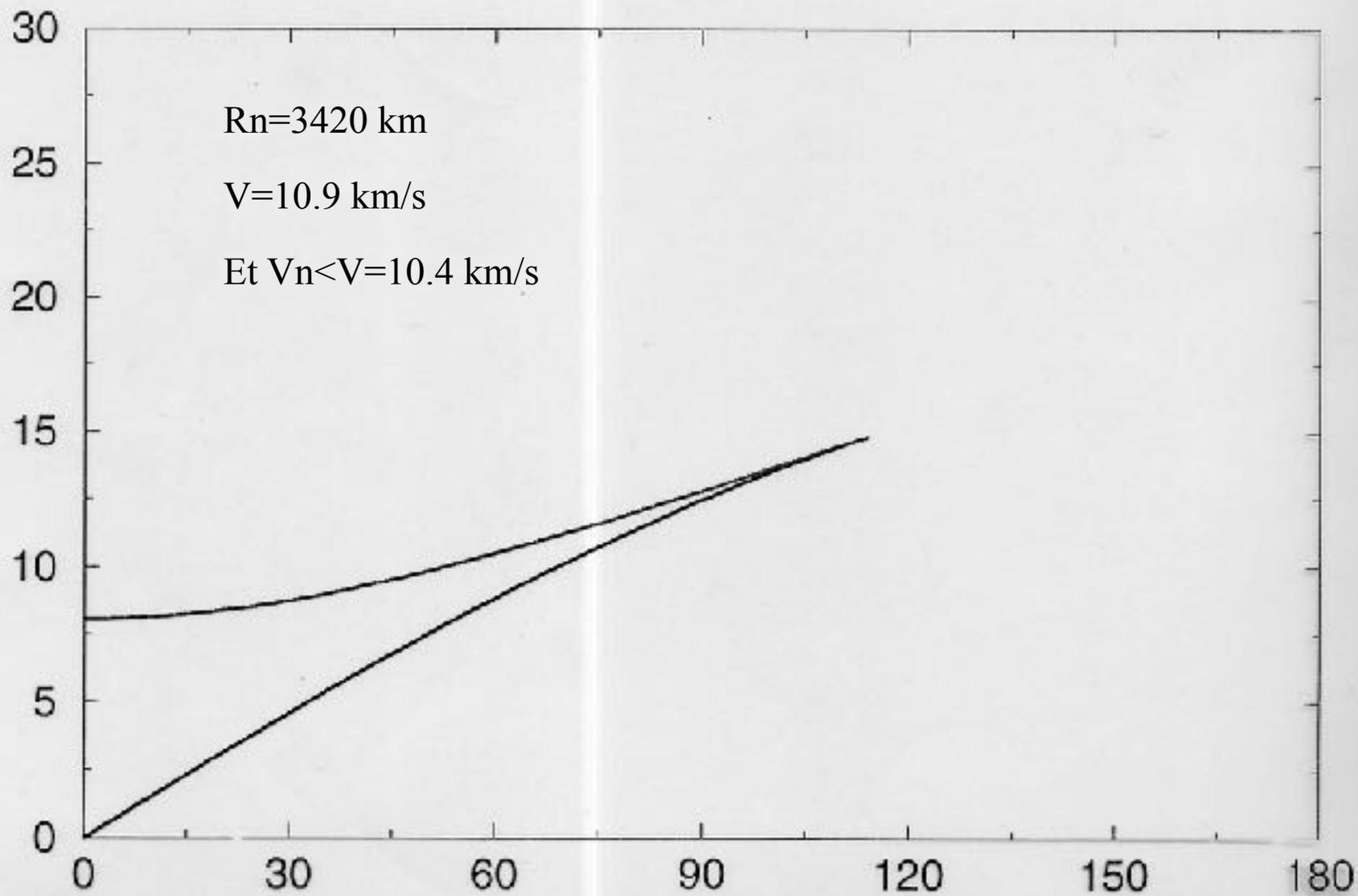
Love = 4.3 km/s
Rayleigh = 3.7 km/s

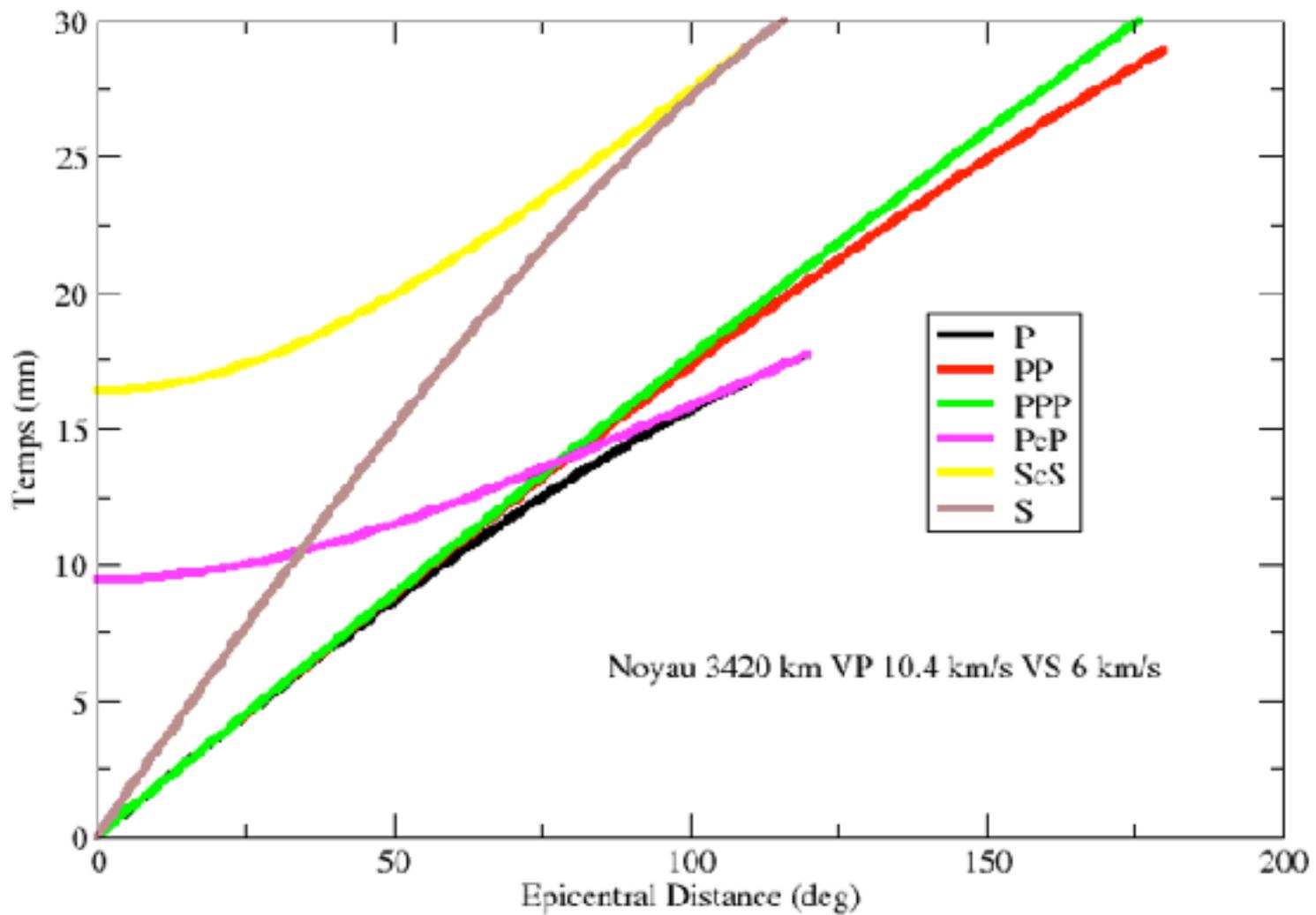


$$t_1 = 2 \frac{R}{V} \sin \frac{\alpha}{2}$$

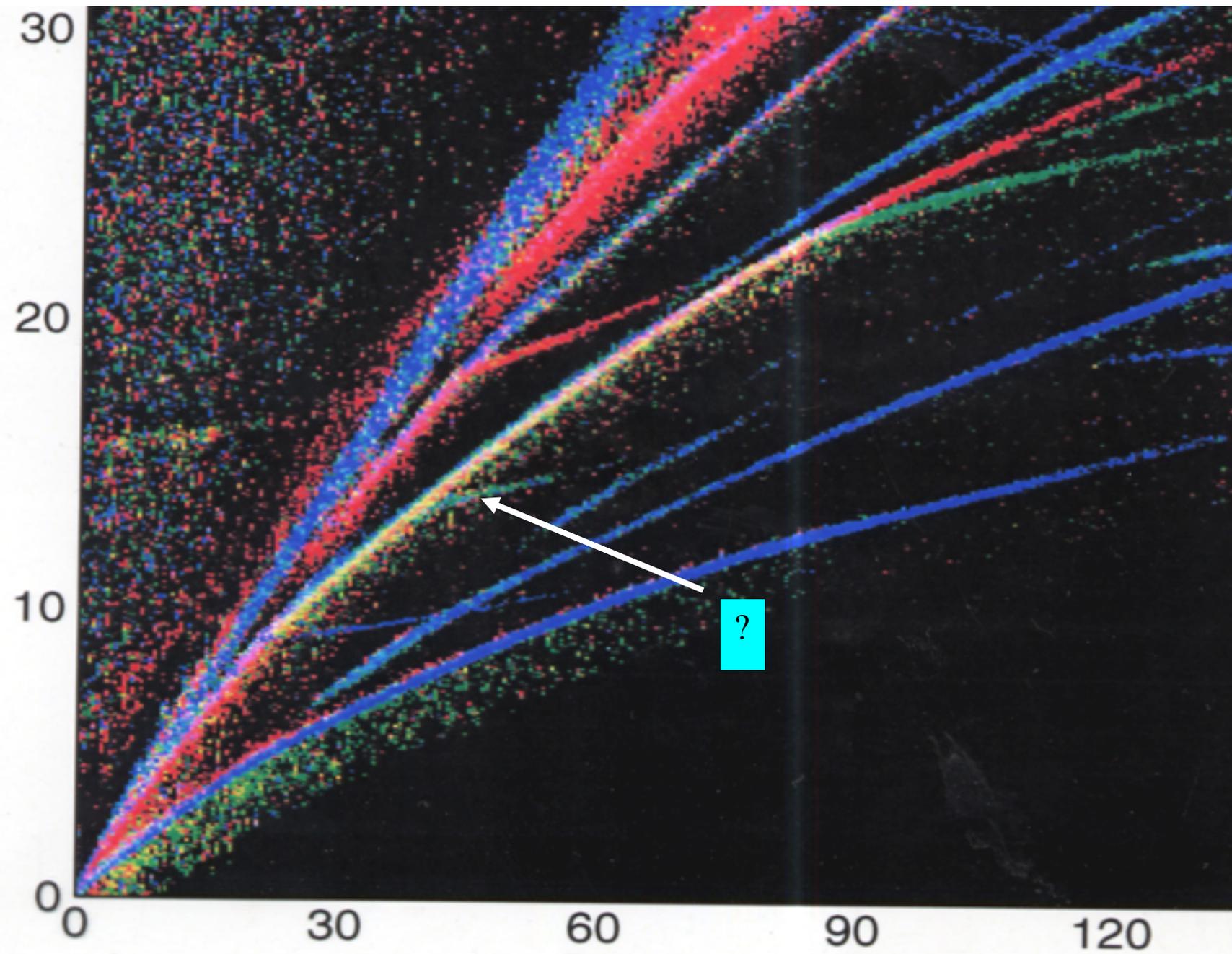
$$t_2 = \frac{2}{V} \sqrt{R^2 + R_N^2 - 2RR_N \cos \frac{\alpha}{2}}$$

$$\cos \frac{\alpha}{2} \geq \frac{R}{R_N}$$





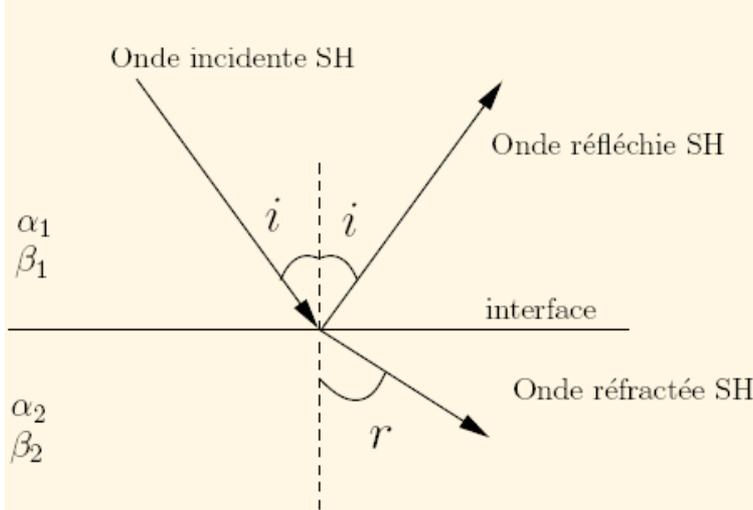
$$t_n = 2n \frac{R}{V} \sin \frac{\alpha}{2n}$$



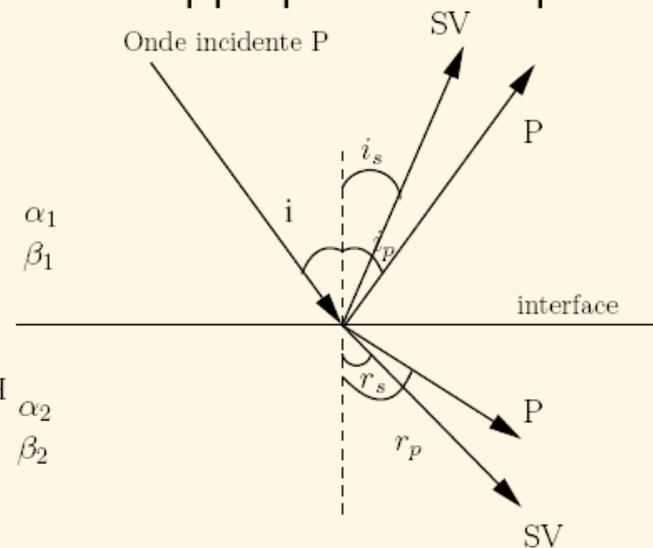
Des conversions P en S et S en P!

SV= S polarisées dans le plan vertical (enregistrées sur les composantes Z et L)

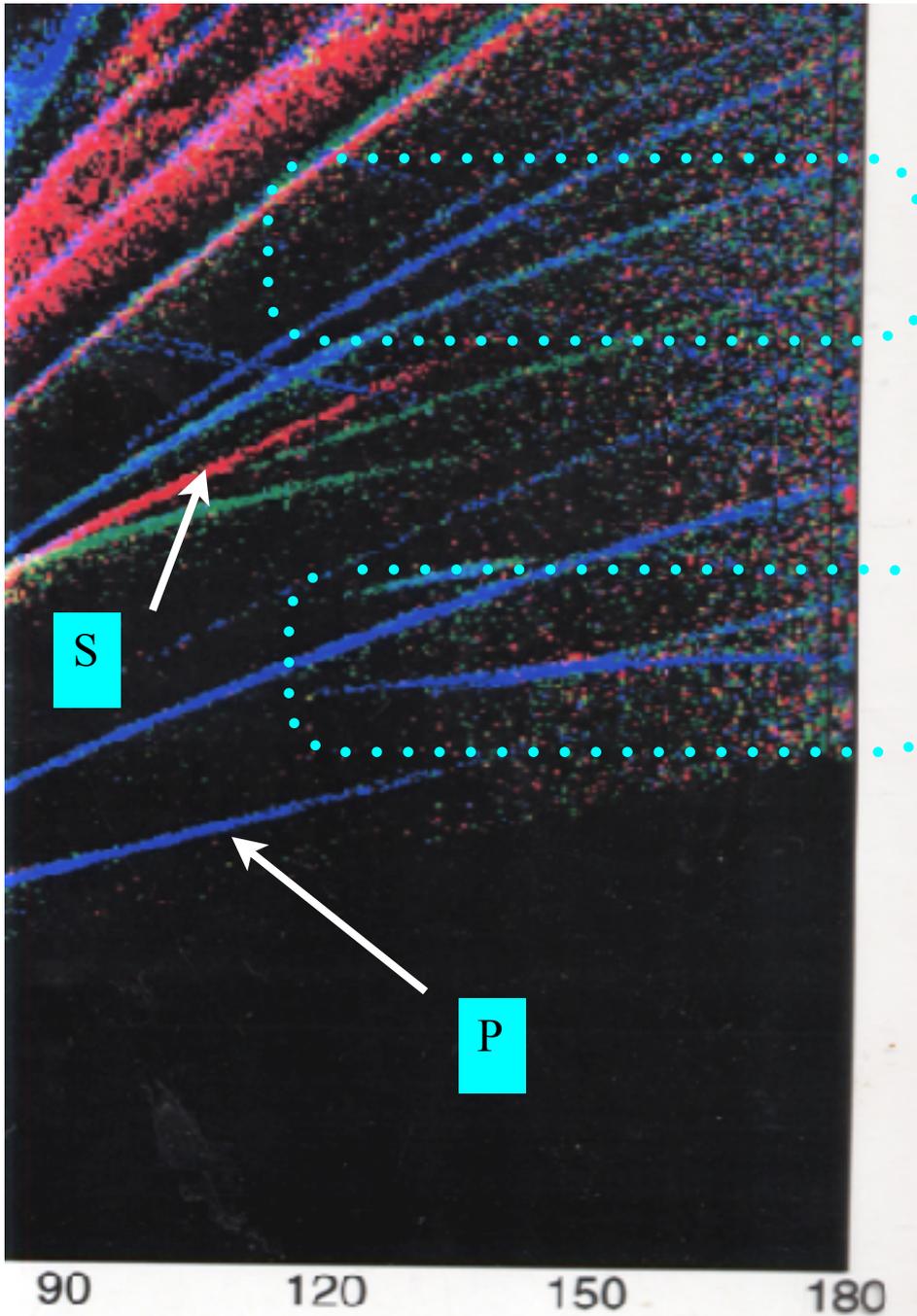
Il peut y avoir conversion $P \rightarrow P + SV$, $SV \rightarrow P + SV$. Une onde SH reste SH. Les lois de Snell–Descartes s'appliquent. Cas plan :



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



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



Pas d'onde S?

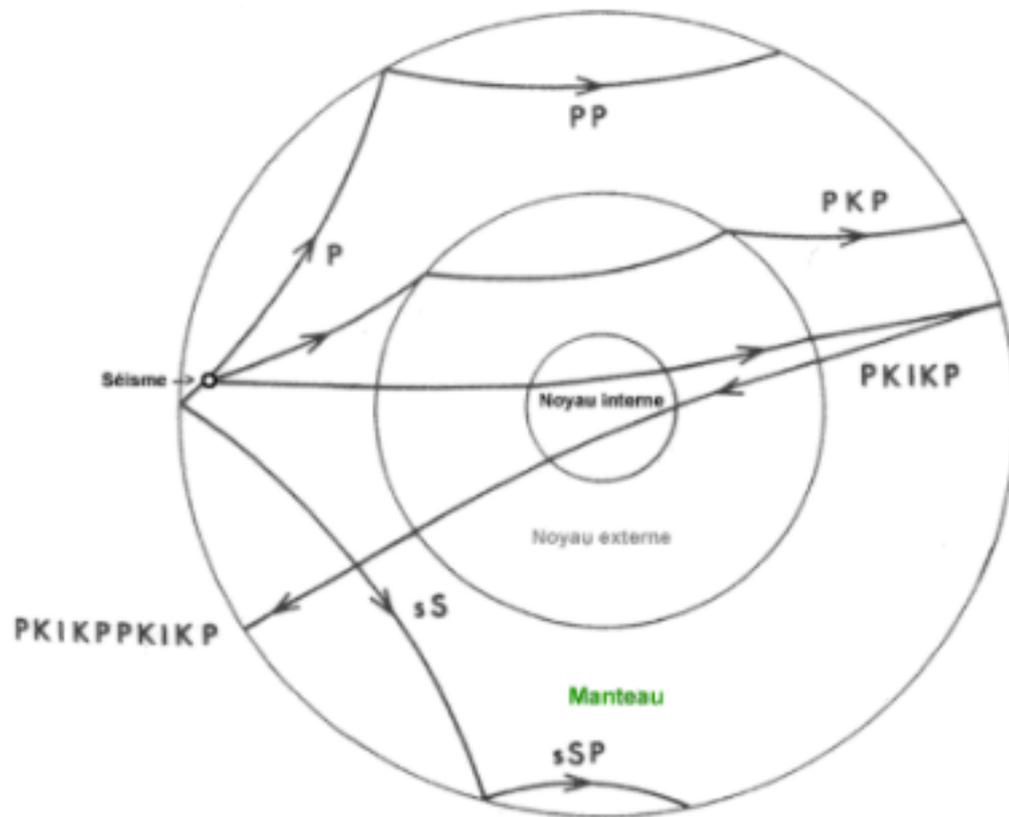
Des ondes P
plus lentes



Beno Gutenberg 1911 «le noyau»



Inge Lehman 1936 «la graine»



Droits réservés - © 2001 Cédric Lemery

Nomenclature pour les réflexions

- c : réflexion sur l'interface manteau-noyau externe
- i : réflexion sur l'interface noyau externe- noyau interne
- p : réflexion des ondes P à la surface du globe, à proximité du séisme
- s : réflexion des ondes S à la surface du globe, à proximité du séisme

Nomenclature pour les ondes

- P : ondes P dans le manteau
- S : ondes S dans le manteau
- K : onde P dans le noyau externe
- I : onde P dans le noyau interne
- J : onde S dans le noyau interne

PRELIMINARY REFERENCE EARTH MODEL (PREM)

