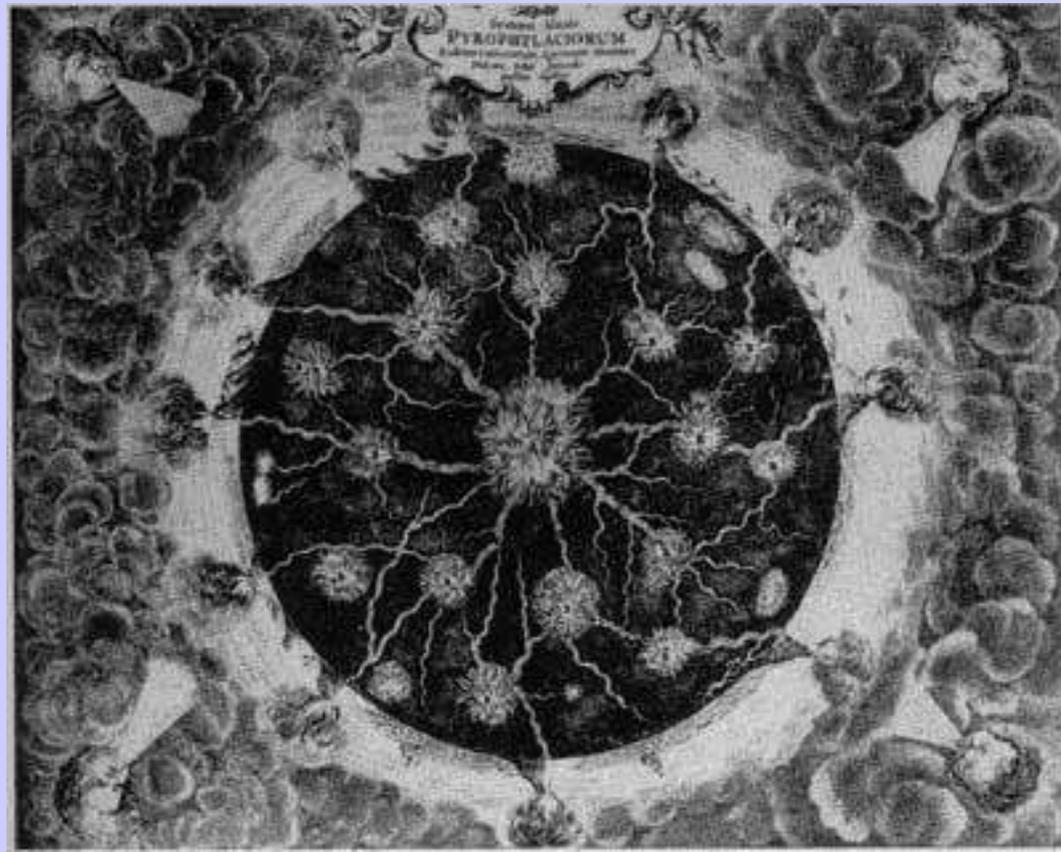


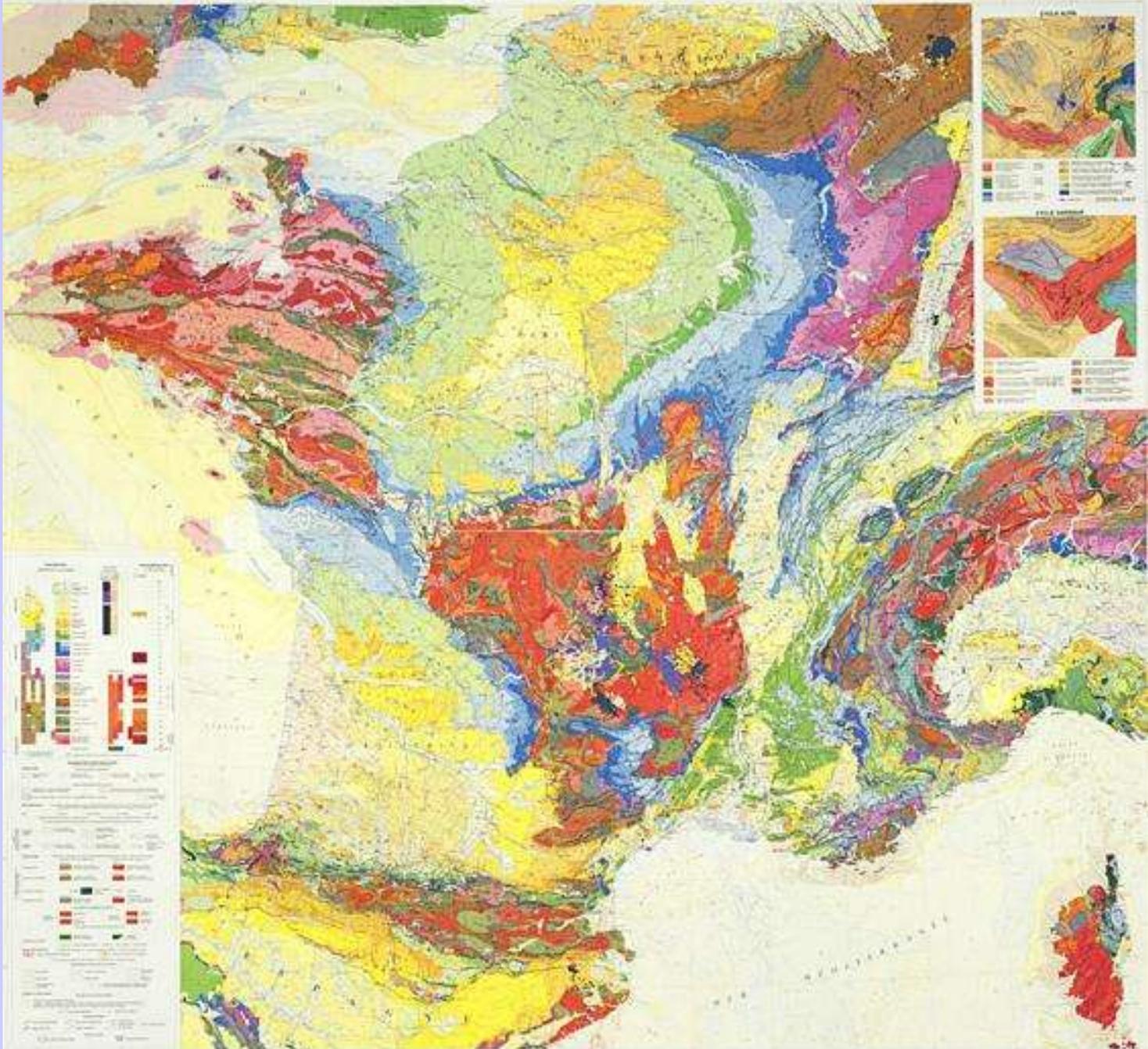


Chapitre II. La structure interne de la Terre

La Terre entourée
d'eau, d'air et de feu
selon Aristote (IVe
siècle av. JC)

Le feu intérieur selon
Kirchner (1665)





Les principales roches magmatiques de la croûte continentale

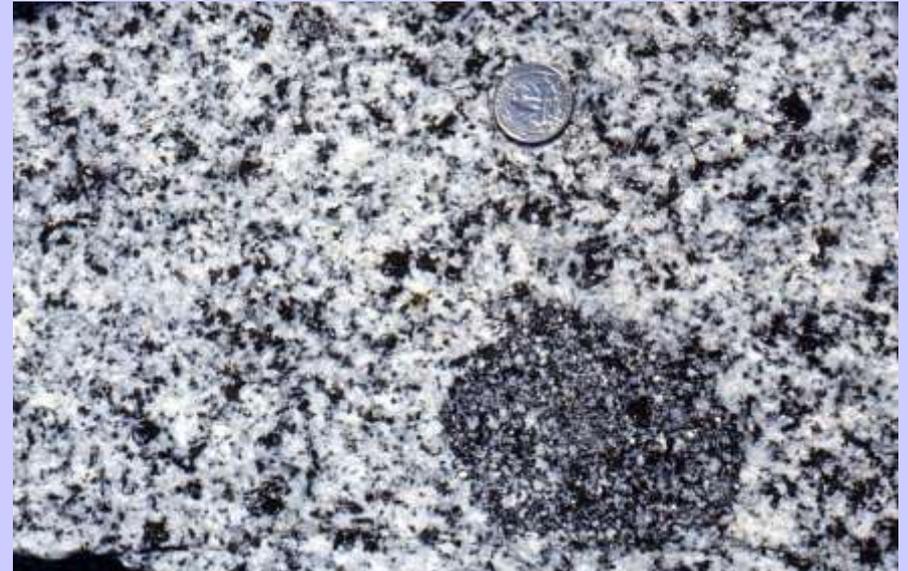


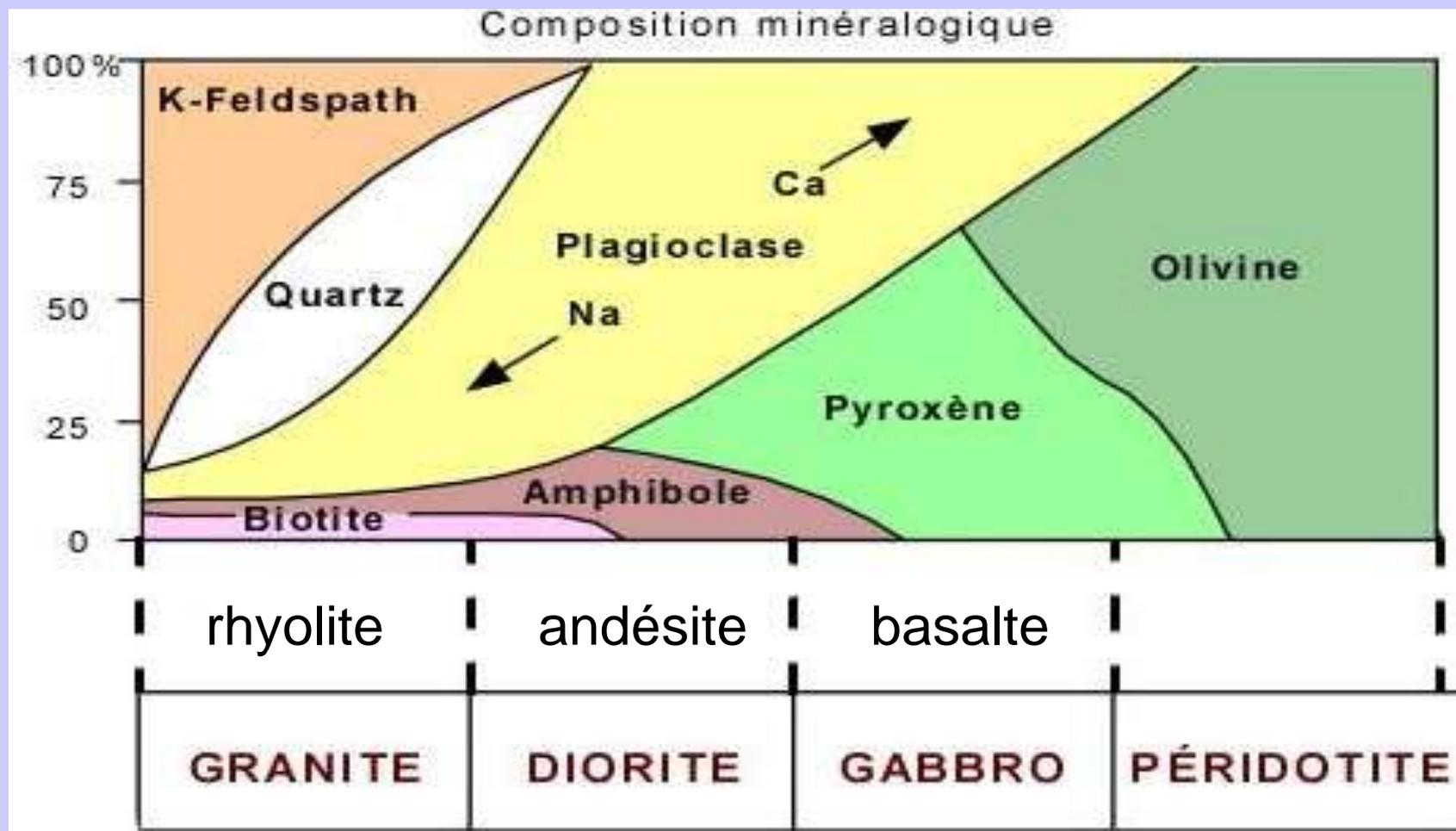
Andésite

Granite



Granodiorite





Document 1. Classification très simplifiée des roches magmatiques.

Première ligne du tableau : roches volcaniques.

Deuxième ligne : roches plutoniques.

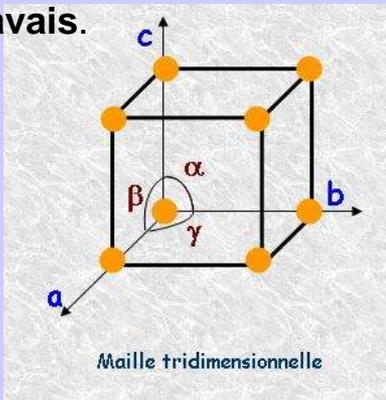
Les systèmes cristallins

Il existe **7 systèmes cristallins simples**.

Les systèmes "simples" ne contiennent qu'un motif par maille = maille dite "élémentaire" :

- **systèmes "centrés"** (un atome au centre de la maille)
- **systèmes faces centrées** (un atome au centre de chaque face)
- **systèmes bases centrées** (un atome au centre de 2 des faces seulement).

L'ensemble de ces systèmes forment les **14 réseaux de Bravais**.



En 3D, la maille présente trois vecteurs (de normes notées a, b et c) et donc trois angles (notés α , β et γ) pour définir le réseau et/ou la maille

Système	Paramètres
Cubique	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Quadratique	$a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Orthorhombique	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Monoclinique	$a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ, \beta \neq 90^\circ$
Triclinique	$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$
Hexagonal	$a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
Rhomboédrique	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$

Mode de réseau Système	Primitif	centré	Bases centrées	Faces centrées
	P	I	C	F
Cubique $a=b=c$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$				
Rhomboédrique $a=b=c$ $\alpha=\beta=\gamma \neq 90^\circ$				
Hexagonal $a=b \neq c$ $\alpha=\beta=90^\circ$ $\gamma=120^\circ$				
Quadratique $a=b \neq c$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$				
Orthorhombique $a \neq b \neq c$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$				
Monoclinique $a \neq b \neq c$ $\alpha=\gamma=90^\circ \neq \beta$				
Triclinique $a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$				

Document 2. Exemples de silicates.

1 : nésosilicate à tétraèdre isolé (ex : péridot).

2 : sorosilicate à tétraèdres unis par deux.

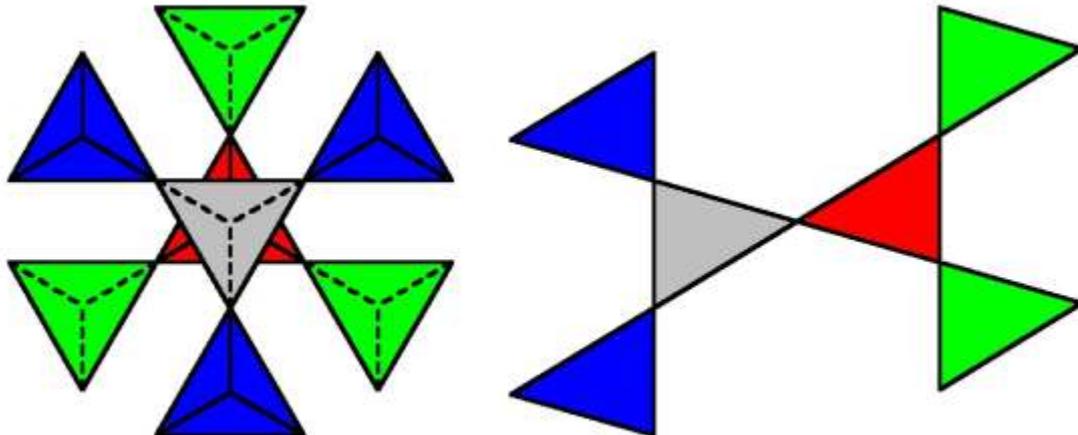
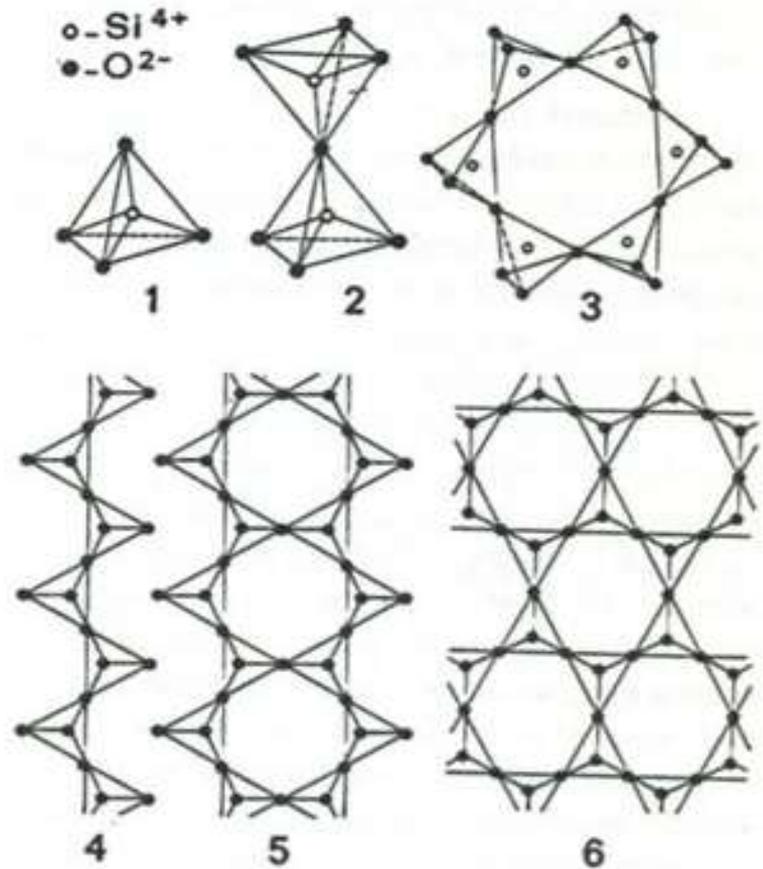
3 : cyclosilicate à tétraèdres unis en anneau.

4 : inosilicate en chaîne droite simple (ex : pyroxène).

5 : inosilicate en chaînes doubles (ex : amphibole).

6 : phyllosilicate à tétraèdres disposés en feuillets (ex : argiles, mica).

(Foucault A. et Raoult J.F. " Dictionnaire de géologie ", Masson Ed.).



Tectosilicate

Tectosilicates

formule de base SiO_2



Quartz

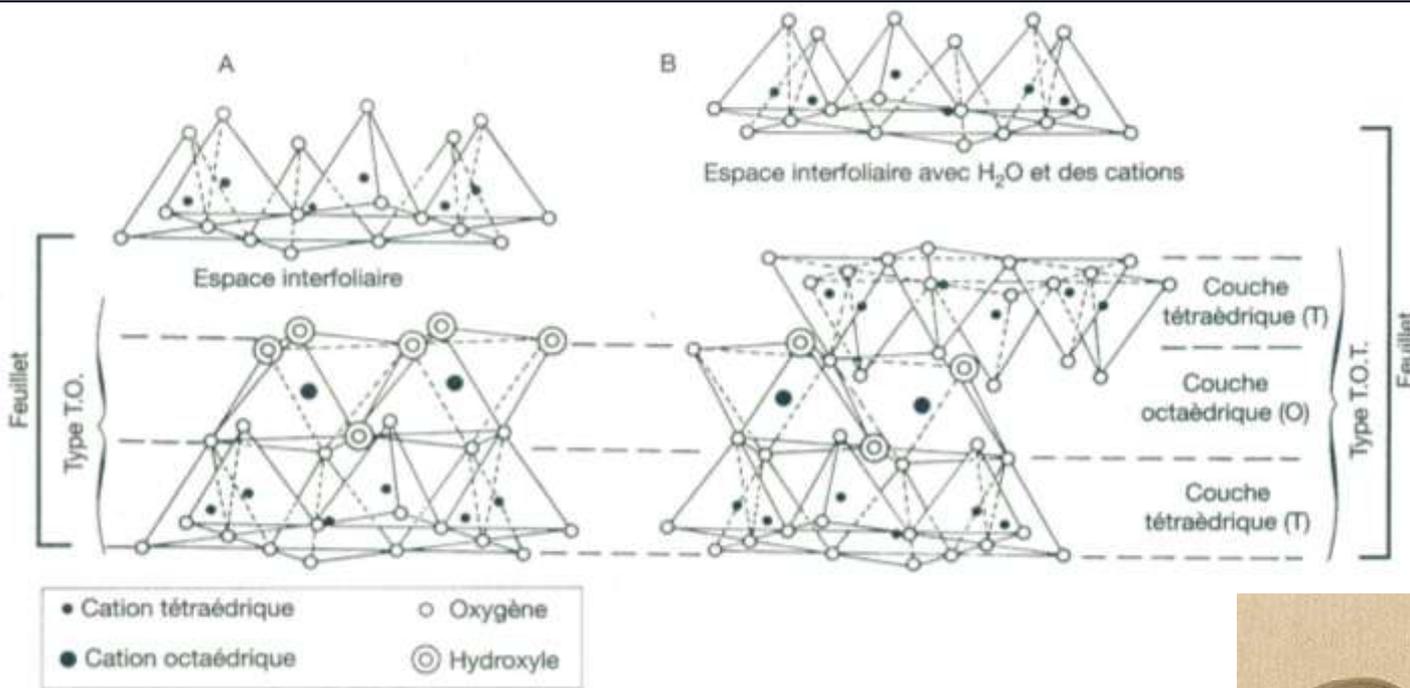


Feldspath plagioclase

Feldspath orthose

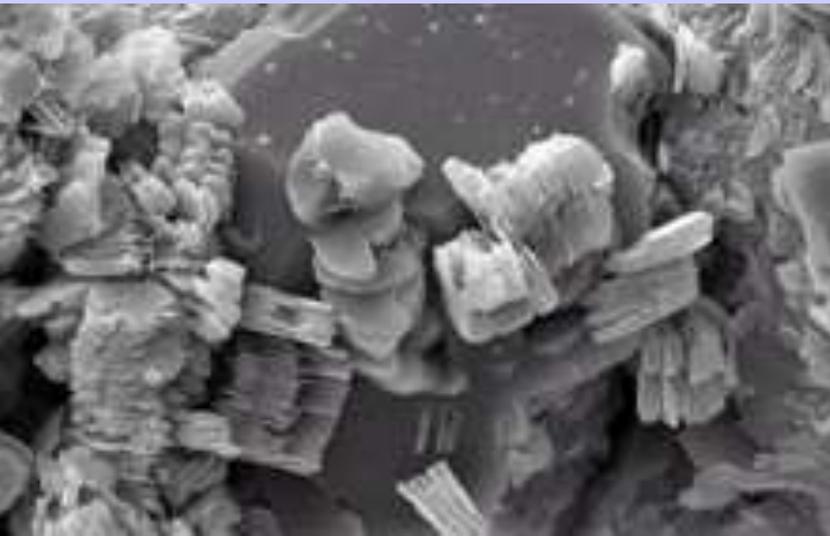
Phyllosilicates

formule de base $[\text{Si}_4\text{O}_{10}]^{4-}$



Document 3. Structure des phyllosilicates.

Chaque cristal est constitué de dizaines ou centaines de feuillets eux-mêmes à base d'associations horizontales de tétraèdres et d'octaèdres. (Schaff A. et Coll. " Sciences de la Terre et de l'Univers ", Vuibert Ed.).



Nanofeuillets d'argile au microscope électronique

Biotite



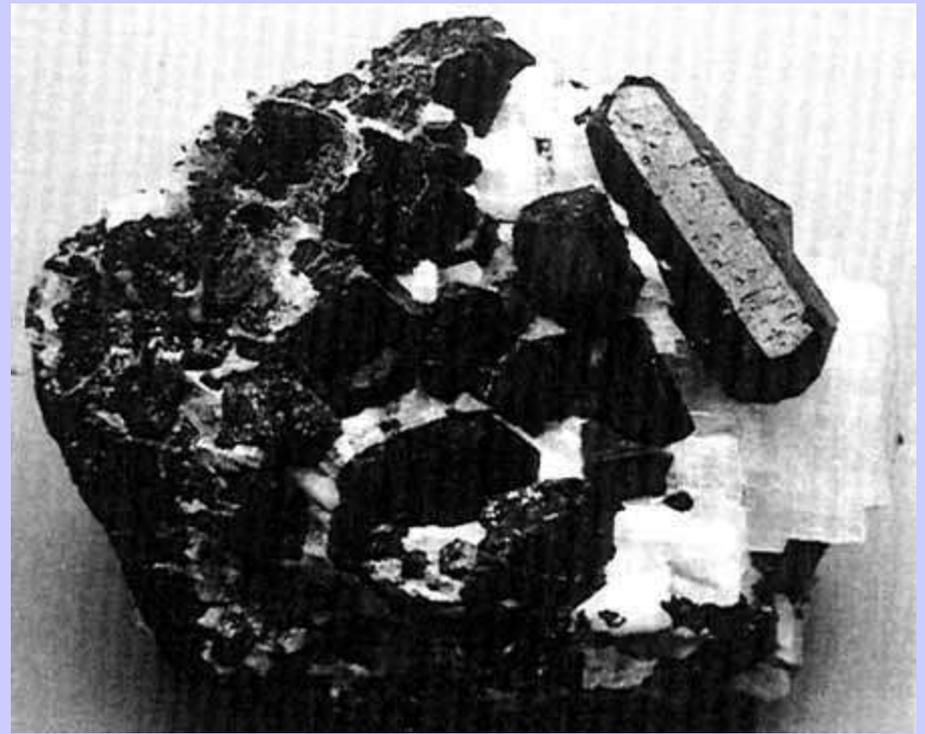
Inosilicates

formule de base $[\text{SiO}_3]^{2-}$ ou $[\text{Si}_2\text{O}_6]^{4-}$ (à chaînes simples)

formule de base $[\text{Si}_4\text{O}_{11}]^{6-}$ (à chaînes doubles)

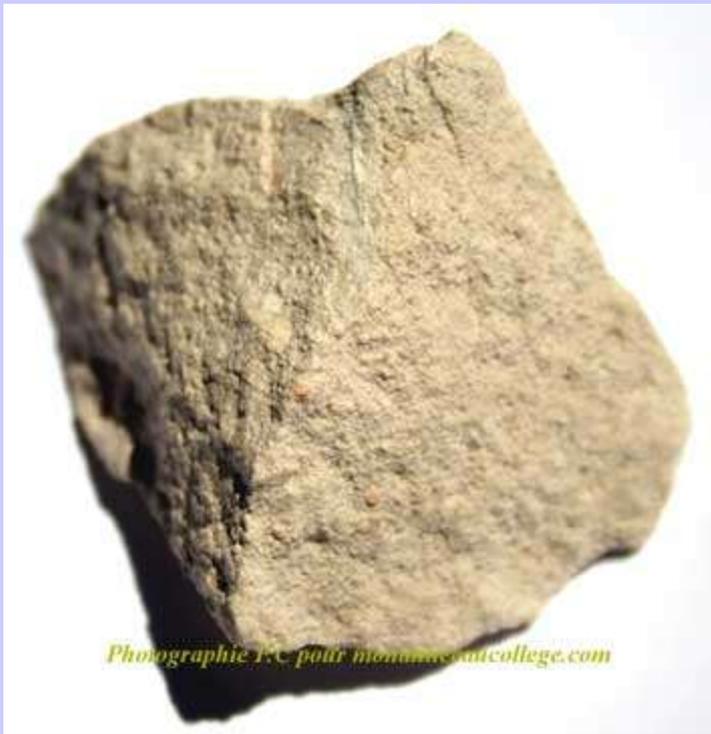


Un pyroxène (augite)



Une amphibole (hornblende)

Les principales roches sédimentaires de la croûte continentale



Calcaire

Photographie F.C pour monanimescollege.com

Grès



Photographie F.C pour monanimescollege.com



Pélite

Les roches magmatiques de la croûte océanique



Basalte



Gabbro

Nésosilicates

formule de base $[\text{SiO}_4]^{4-}$



Olivine



Ophiolite d'Oman

**Les échantillons
du manteau
terrestre**

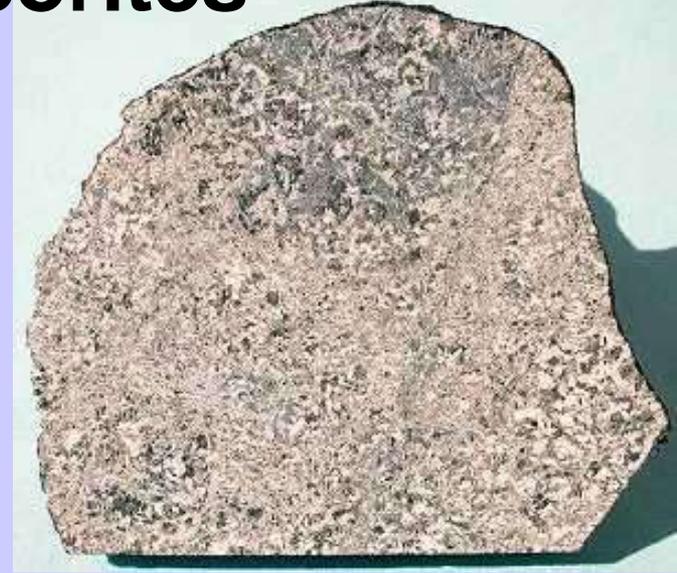
Enclave de péridotite



Les météorites

Chondrite

Achondrite
riche en
plagioclases
(clairs) et en
pyroxènes
(sombres)



Pallasite

On remarque la géométrie parfaitement automorphe des cristaux d'Olivine (en bas à gauche), au sein d'un alliage Fe-Ni.

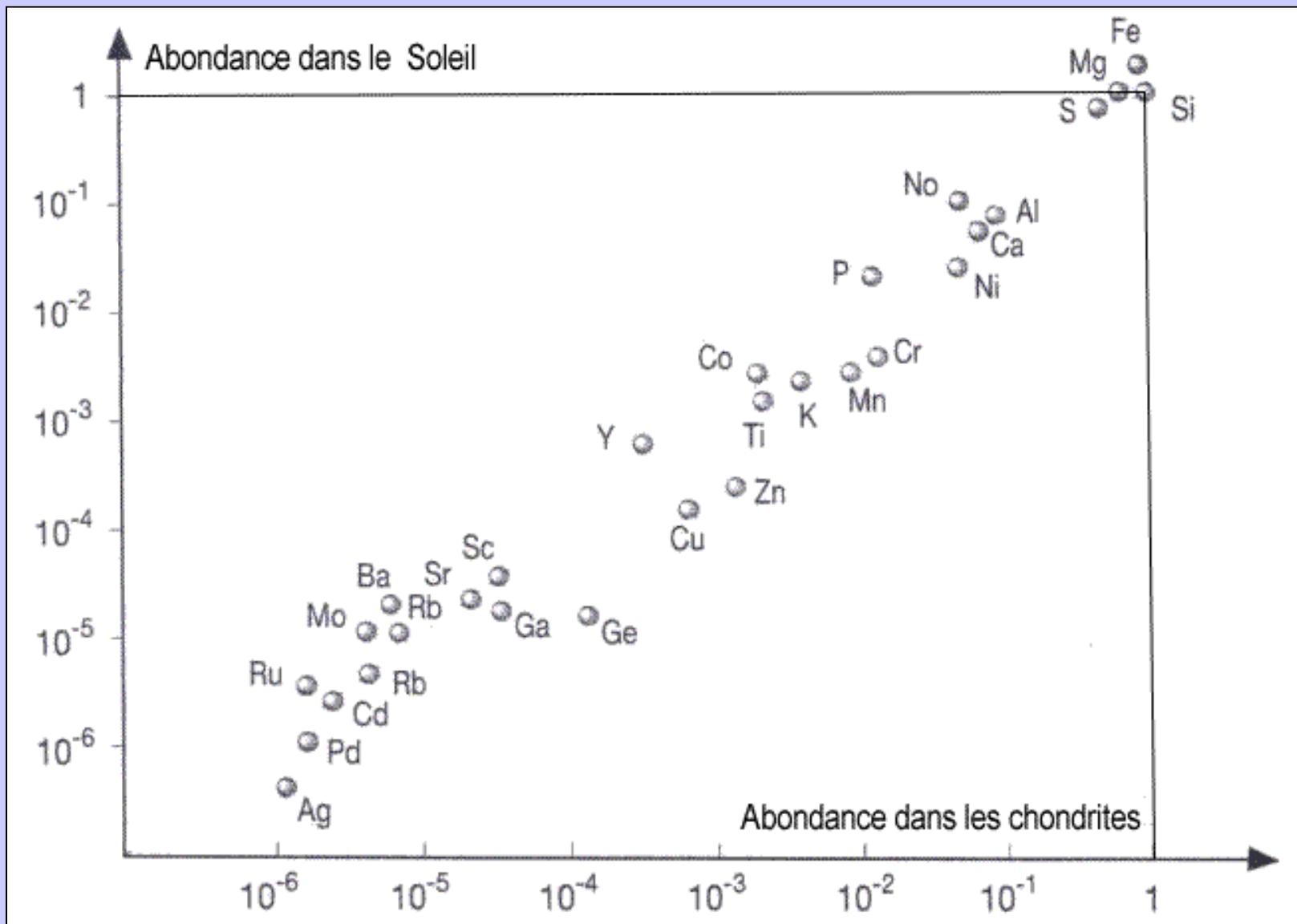


Echantillon / Photographie :
Pierre Thomas

Sidérite

Les bandes entrecroisées correspondent à la séparation des zones pauvres et riches en nickel



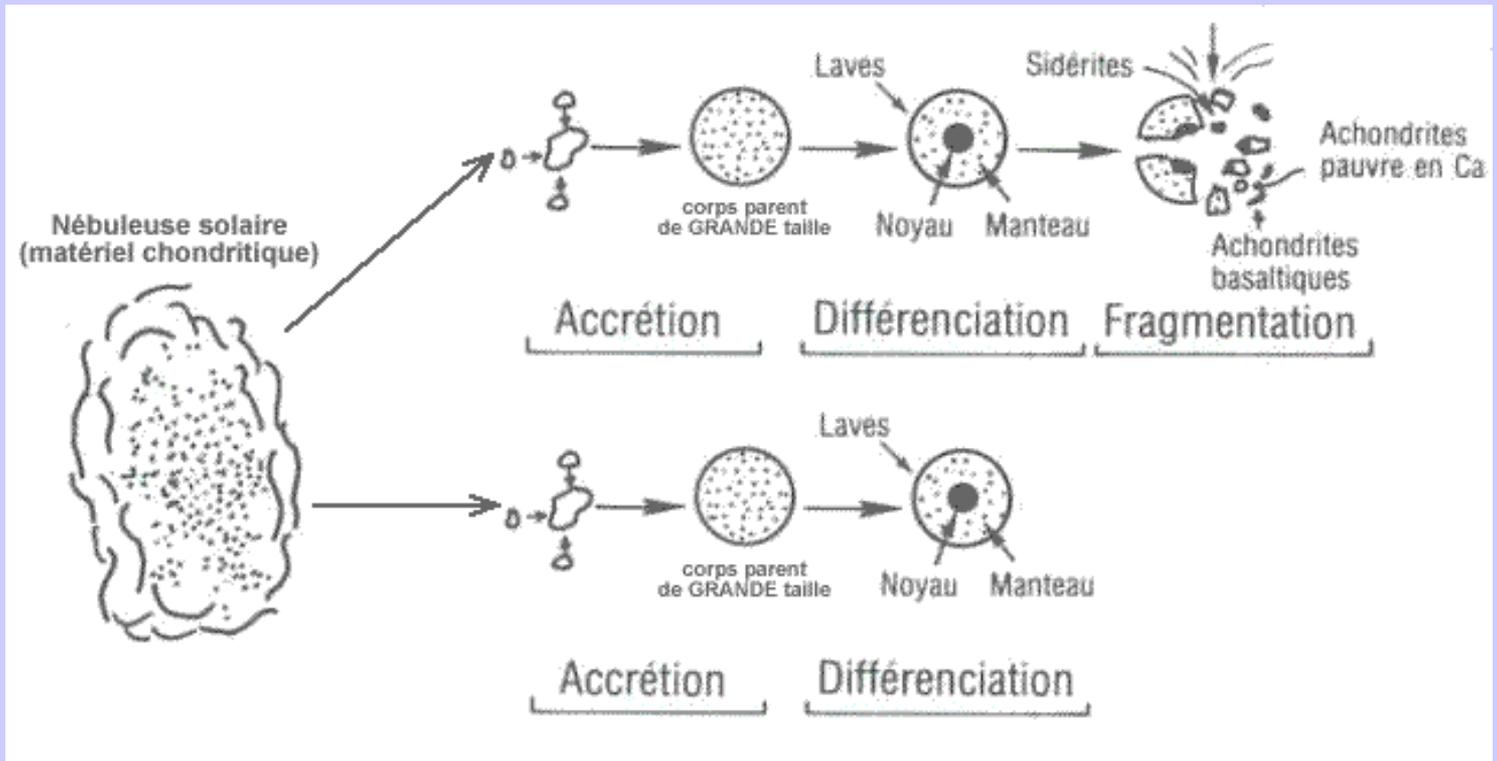


Document 4. Comparaison de l'abondance des éléments chimiques dans les chondrites (chondrites carbonées de type I) et dans le Soleil.

(en nombre d'atomes, normalisé au silicium (Si))

(D'après Mason, 1971)

La formation des météorites



Proportions étudiées	Terre globale	Hydrosphère + atmosphère	Croûte continentale	Croûte océanique	Manteau	Noyau	Chondrite	Achondrite	Sidérite
% de la masse de la Terre	100	0.02	0.7	0.3	74	25	-	-	-
% d'O	30	88	49	44	39	?	31	49	0.7
% de Si	17	-	28	22	23	?	18.5	27	-
% d'Al	1	-	8	7	1.3	-	2	4.8	-
% de Ca	1.1	-	4	7	1.5	-	3.5	7.1	-
% de Mg	18	-	2	8	24	-	14	8.8	-
% de Fe	3	-	3	8	4	-	4.1	1	2.6
% de Fe métallique	23	-	-	-	-	80	23.3	-	94
% de Na	0.5	1	2	1.5	0.7	-	0.6	1.5	-
% de K	0.2	-	2	0.5	0.3	?	0.4	0.2	-
% autre éléments (Ni, H, S, C, P...)	6.2	11	2	2	6.2	20	2.6	0.6	2.7

Document 5. Composition chimique de la Terre globale, de ses enveloppes et de météorites.

La Terre globale correspond à l'ensemble des enveloppes solides et fluides qui constituent la planète.

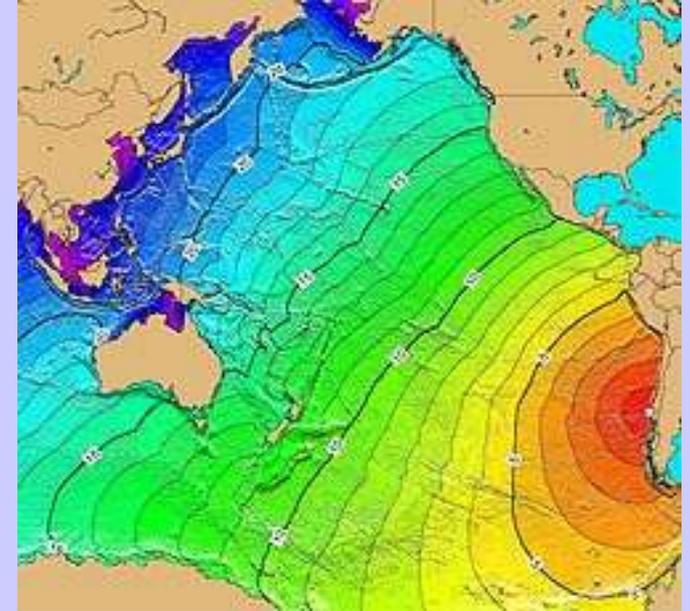
Les éléments indiqués sont présents sous forme d'oxydes dans les minéraux.

(SVT 1^{er}S, Nathan).

Le séisme du 22 mai 1960 (19 h 11 UTC) au CHILI



Rue de Valdivia (700 km S de Santiago) après le séisme

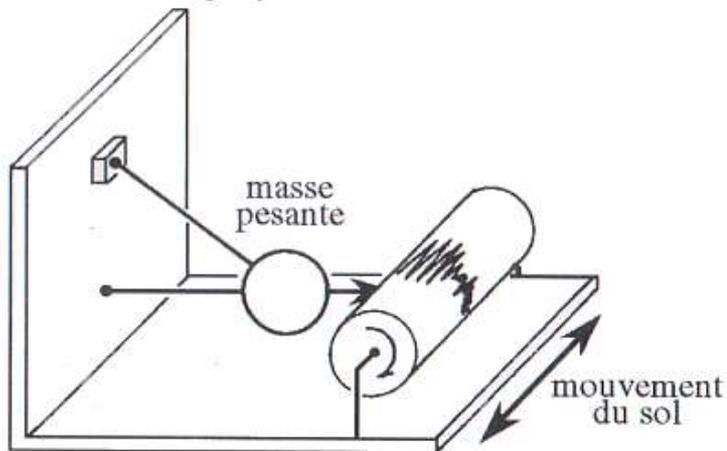


Carte des zones touchées par le tsunami généré par le séisme

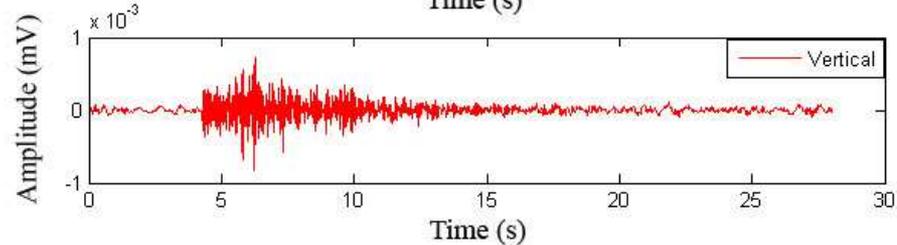
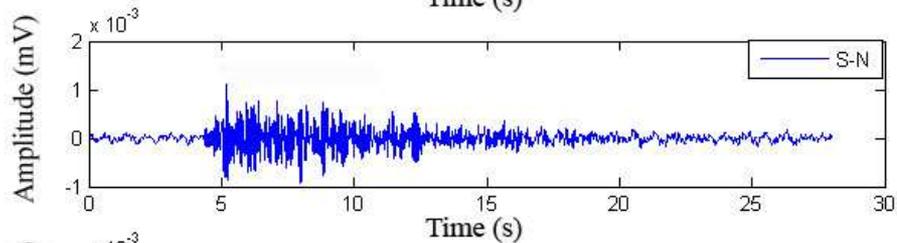
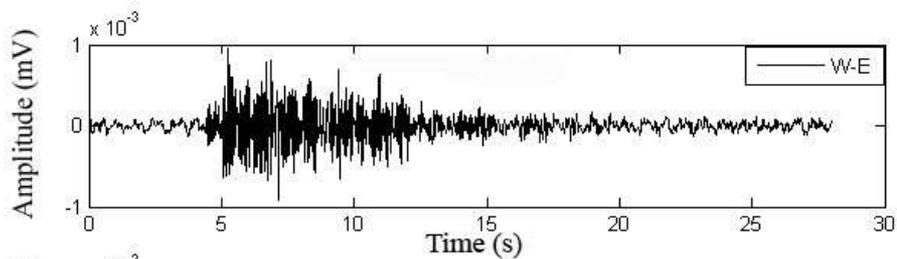
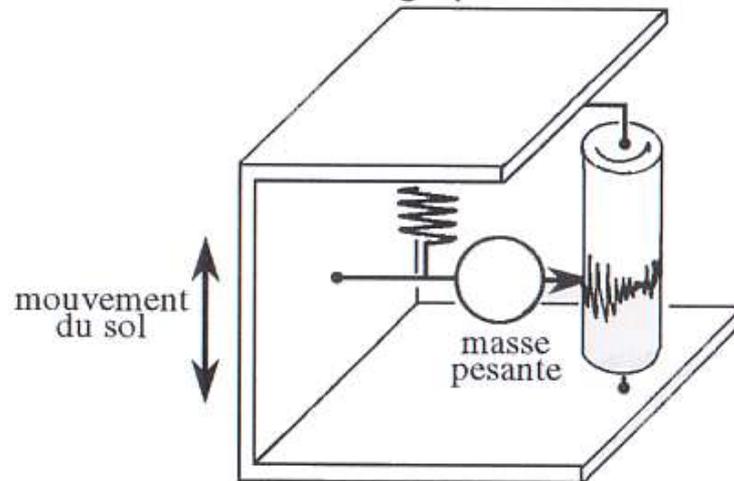
La magnitude de ce séisme, la plus haute jamais enregistrée, est estimée à 9,5.

La magnitude est proportionnelle au \log_{10} de l'amplitude maximale des ondes sismiques enregistrées sur un sismogramme.

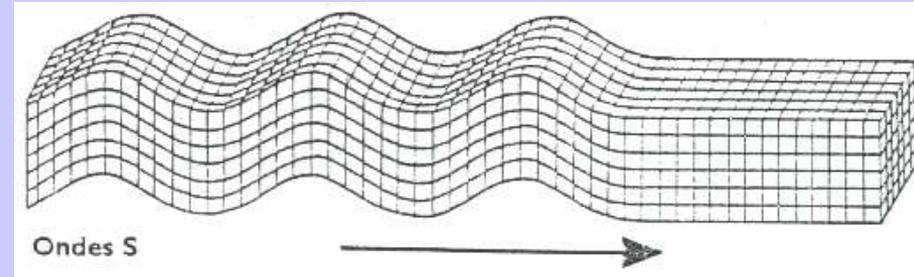
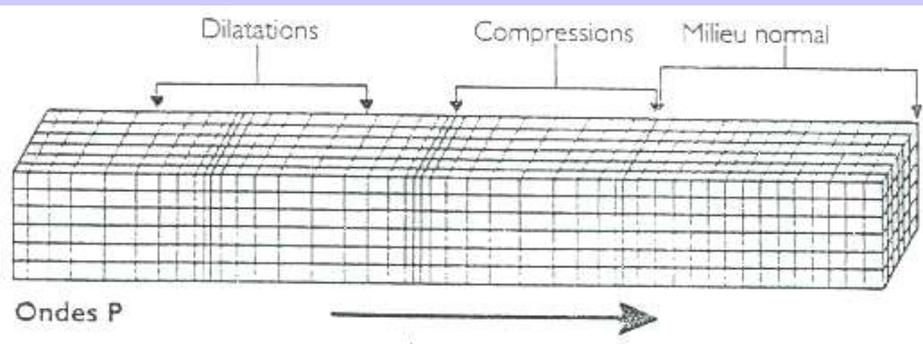
Sismographe horizontal



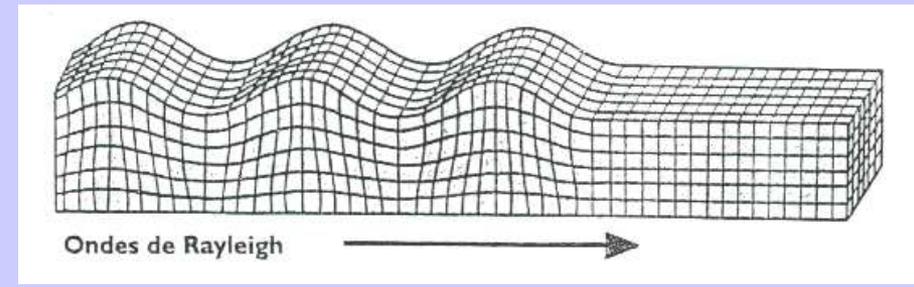
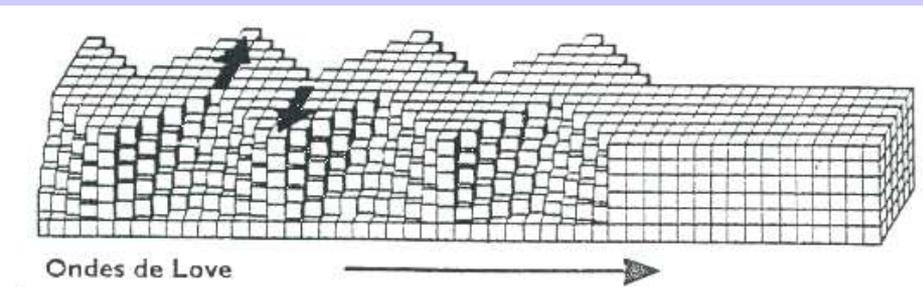
Sismographe vertical



sismogrammes

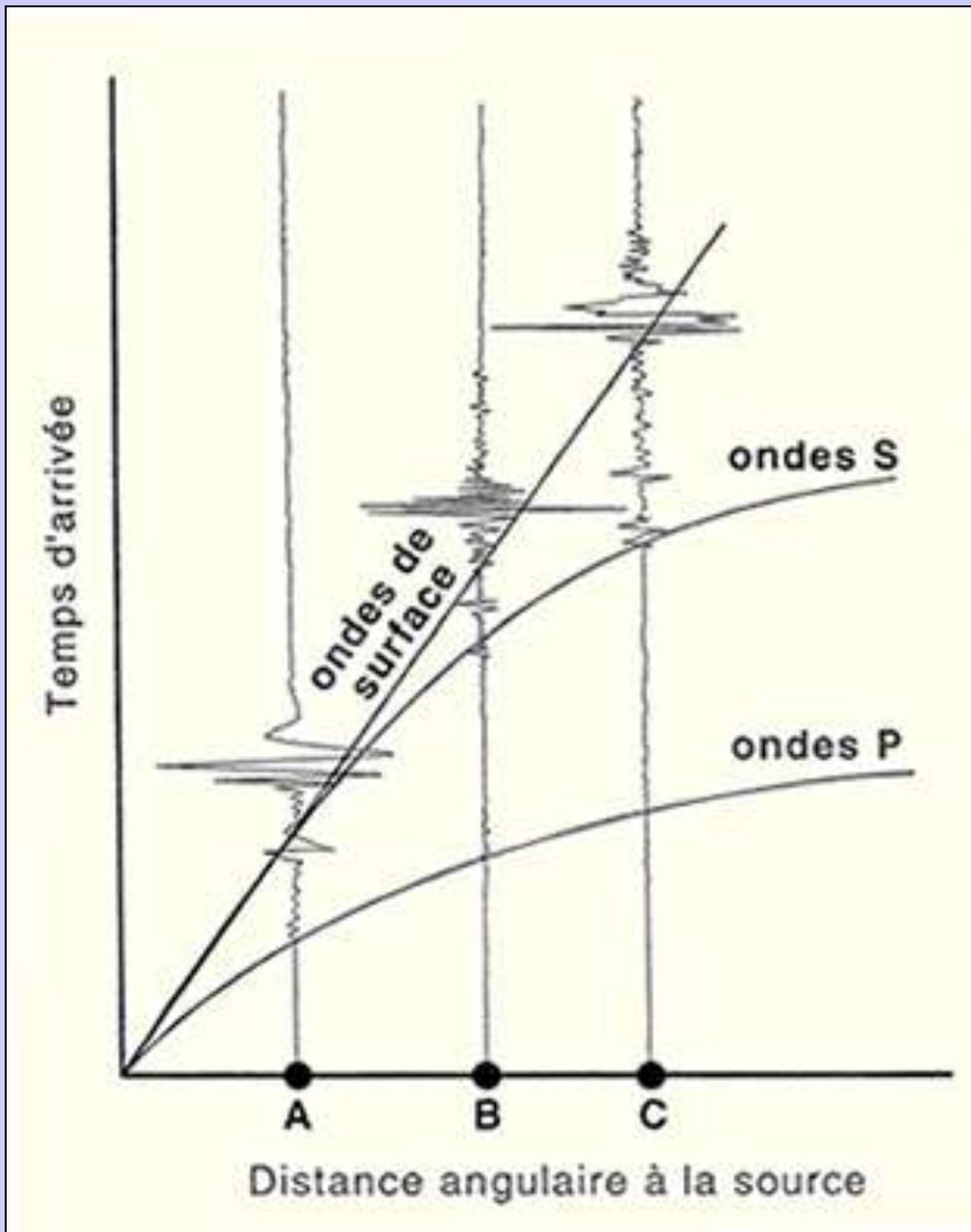


Ondes de volume

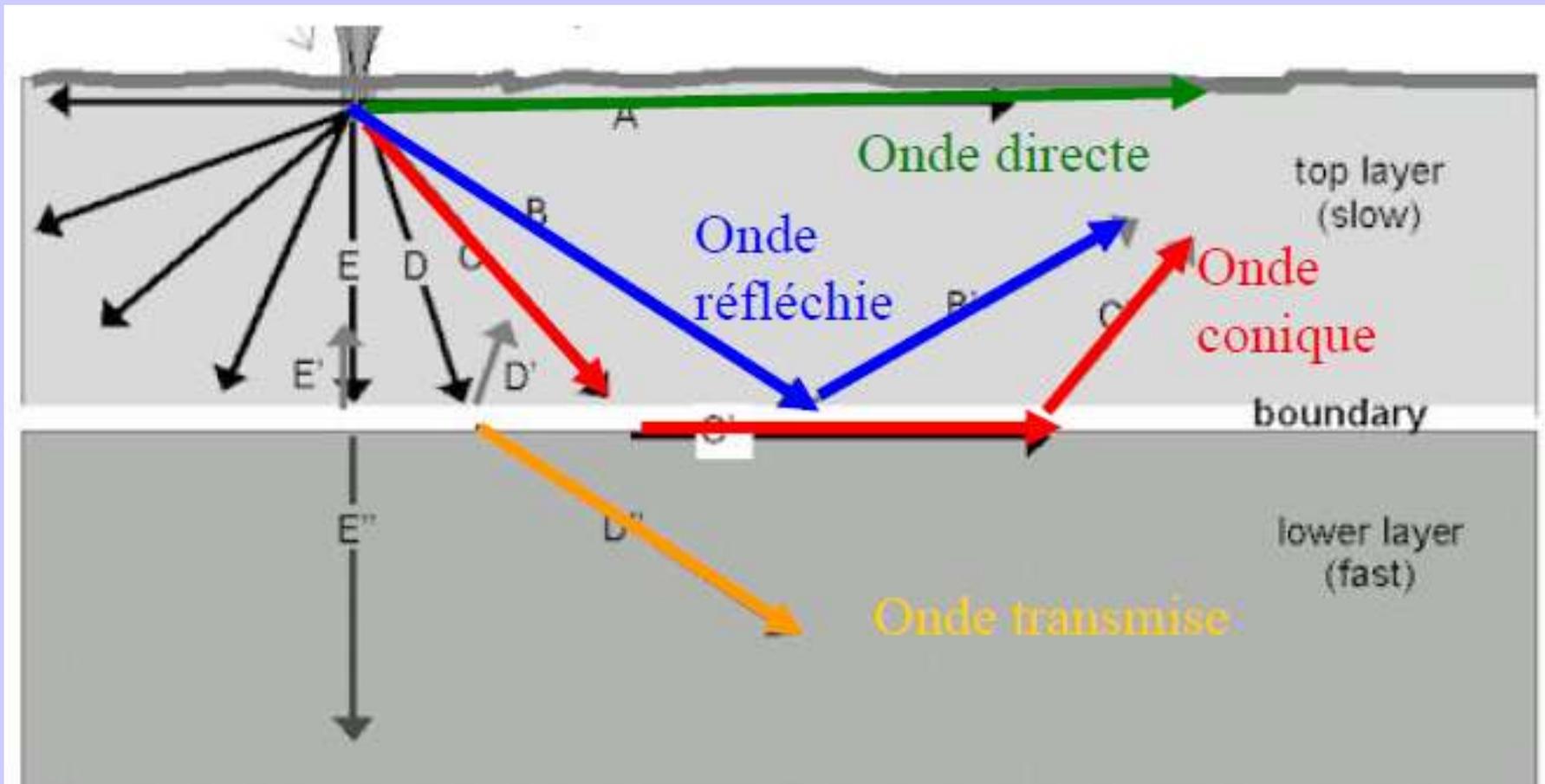


Ondes de surface

Document 6. Les différents types d'ondes sismiques



Document 7.
Courbes hodochrones



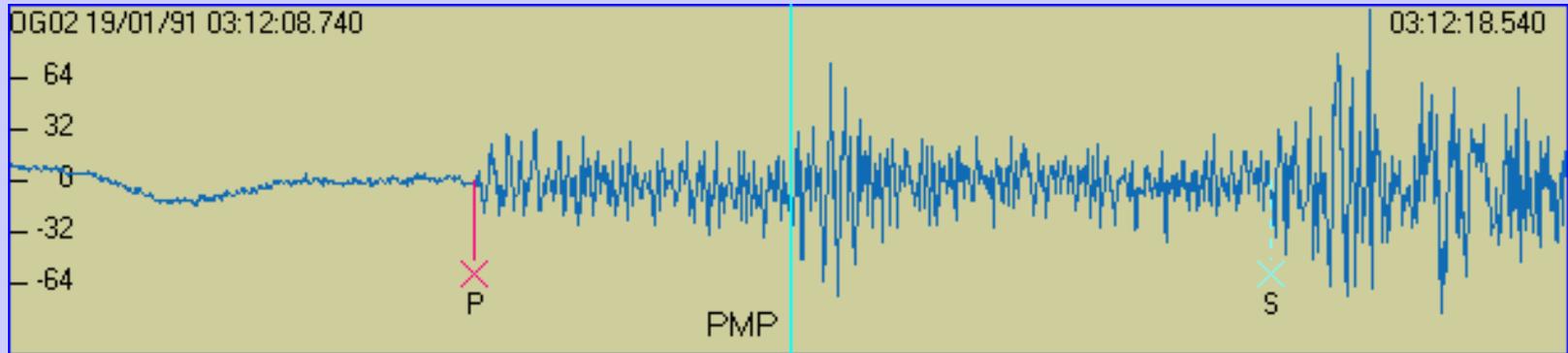
Les trajectoires des ondes sismiques :

Si $V_2 > V_1$ il existe un angle limite $i = i_c$ au-delà duquel il n'y a plus d'onde transmise.

Alors $r = 90^\circ$: l'onde réfractée est une onde cône (utilisée en sismique réfraction).

Mise en évidence et localisation du MOHO

Mohorovicic, 1909



Séisme du 19/01/1991. Sismogramme reçu par la station OG02 (Annemasse).

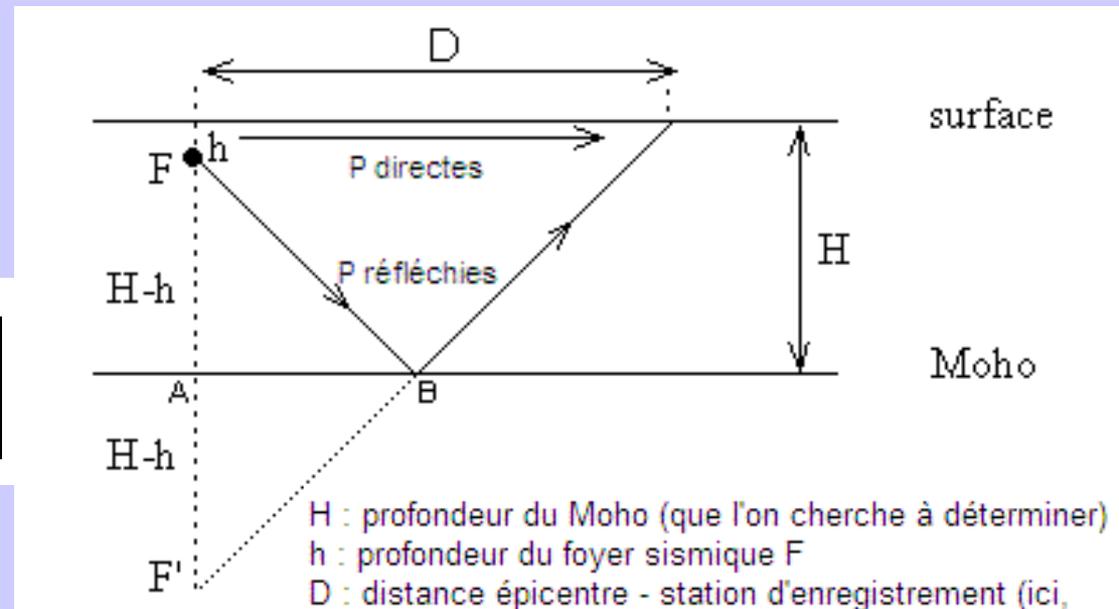
Profondeur focale $h = 11$ km.

Distance épacentrale 63,3 km.

Arrivée des ondes P à 3 h 12 min 15,580 s.

Arrivée des ondes PMP à 3 h 12 min 18,540 s.

Arrivée des ondes S à 3 h 12 min 23,080 s.



$$H = \frac{1}{2} \left[h + \sqrt{\left(V \cdot dt + \sqrt{h^2 + D^2} \right)^2 - D^2} \right]$$

NB : dans cette formule :

- h négligée si le séisme est relativement superficiel
- V = vitesse de propagation des ondes P à travers la croûte terrestre (ici 6,25 km/s)
- dt établi par lecture du sismogramme
- D distance épacentre - station d'enregistrement

$$H = 1/2 \sqrt{[(Vdt + D)^2 - D^2]}$$

Carte des points de réflexion des ondes P sur le MOHO

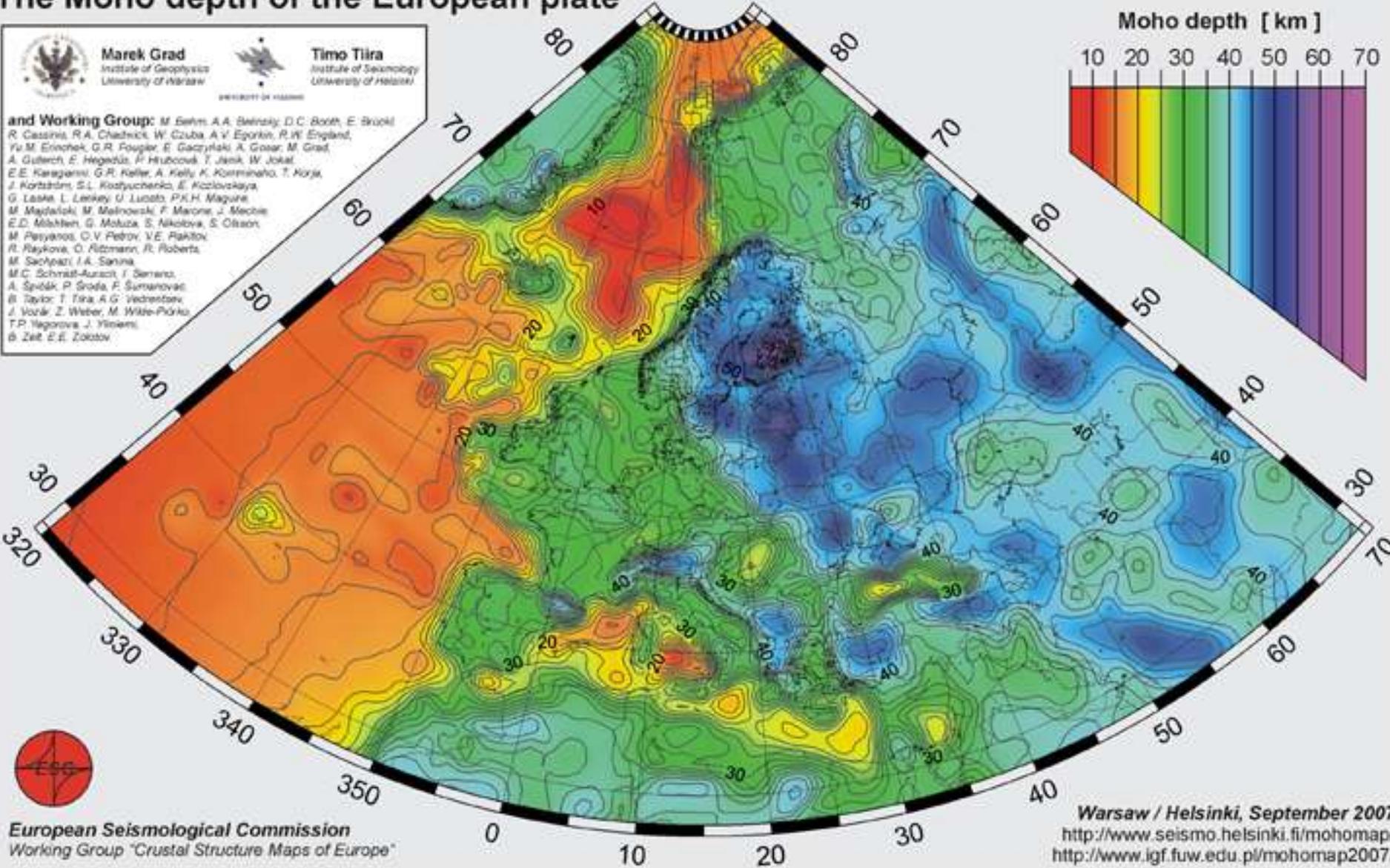
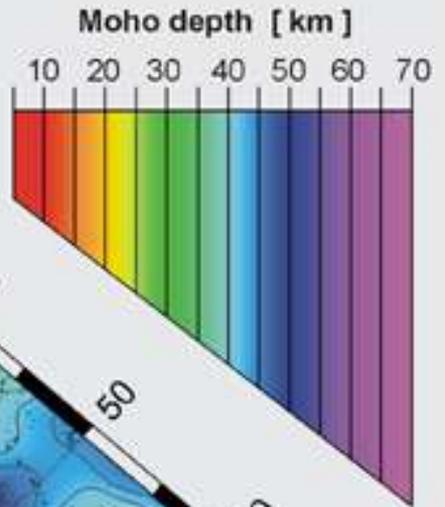


The Moho depth of the European plate


Marek Grad
 Institute of Geophysics
 University of Warsaw

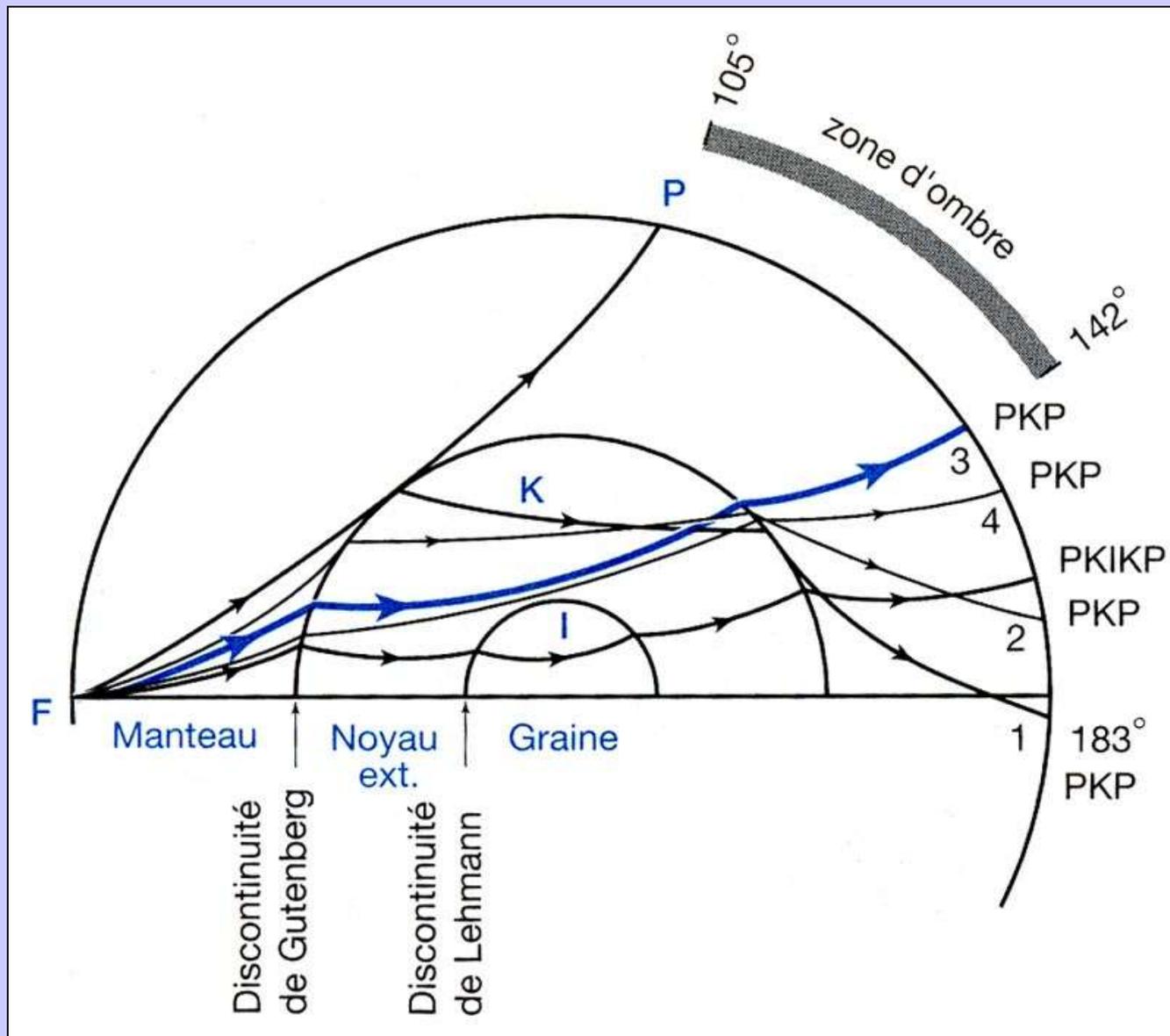

Timo Tiira
 Institute of Seismology
 University of Helsinki

and Working Group: M. Behm, A.A. Belyuk, D.C. Booth, E. Brückl, R. Casarini, R.A. Chadwick, W. Czuba, A.V. Egorin, R.W. England, Yu.M. Eroshenko, G.R. Fougler, E. Gaczyński, A. Gosar, M. Grad, A. Güllérch, E. Hegedüs, P. Hrubcovský, T. Janský, W. Jokat, E.E. Karagennisi, G.R. Keller, A. Kelly, K. Kozminskaya, T. Korja, J. Korbárdos, S.L. Kostyuchenko, E. Kizilovskaya, G. Laske, L. Leskijoki, U. Lubato, P.K.H. Maguire, M. Majdałski, M. Malinowski, F. Marone, J. Mechie, E.D. Mähten, G. Moluza, S. Nikolova, S. Olsson, M. Pasyanos, C.V. Petrov, V.E. Rikhtor, R. Raykova, O. Ritzmann, R. Roberts, M. Sacchi, J.A. Sanja, M.C. Schmal-Arcisz, J. Serrano, A. Spírák, P. Srođa, F. Sumarova, B. Taylor, T. Tiira, A.G. Vedrestov, J. Vozár, Z. Weber, M. Wille-Pöckel, T.P. Yagorova, J. Ylönen, B. Zeit, E.E. Zozlov



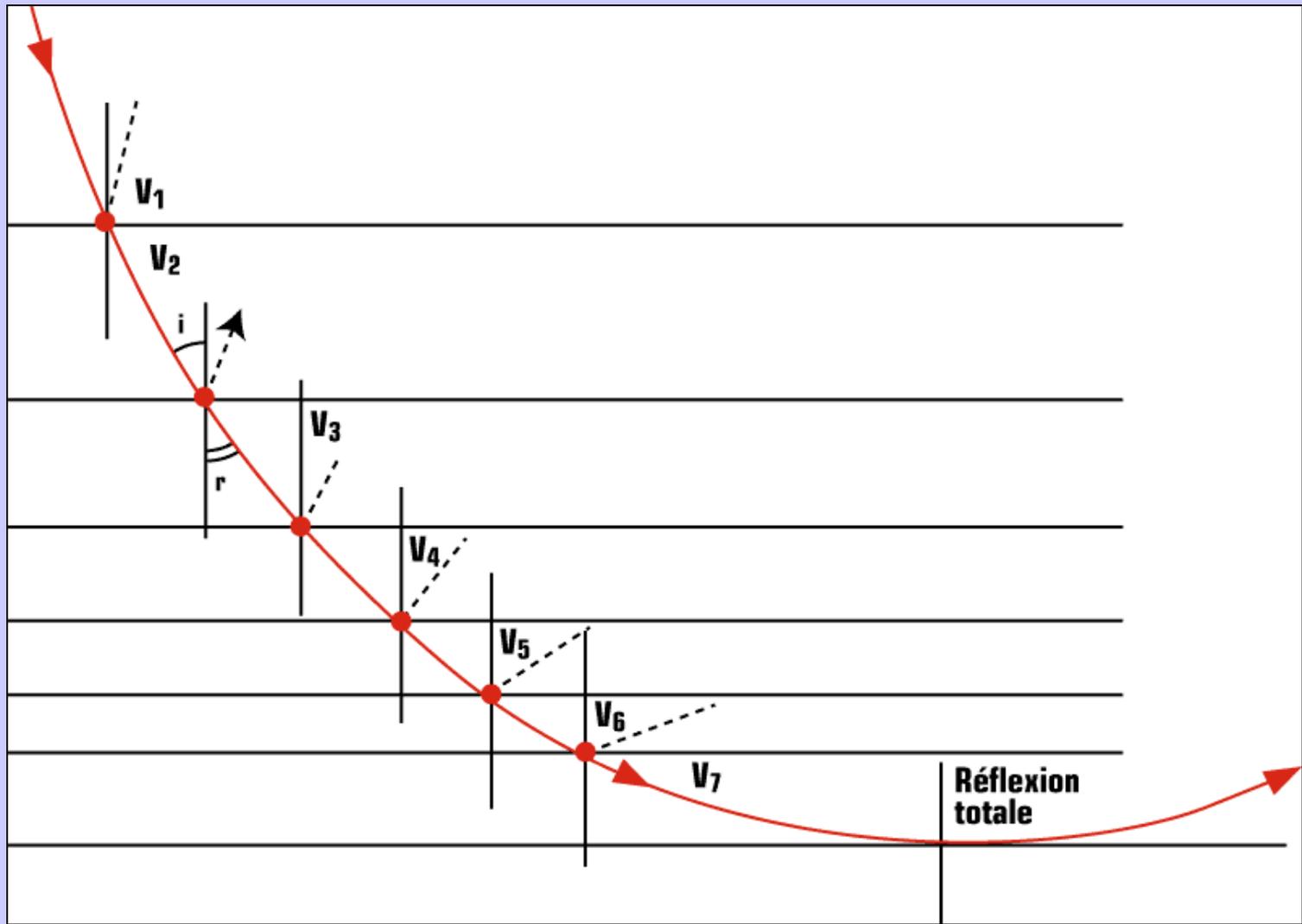
European Seismological Commission
 Working Group "Crustal Structure Maps of Europe"

Warsaw / Helsinki, September 2007
<http://www.seismo.helsinki.fi/mohomap/>
<http://www.igf.fuw.edu.pl/mohomap2007/>



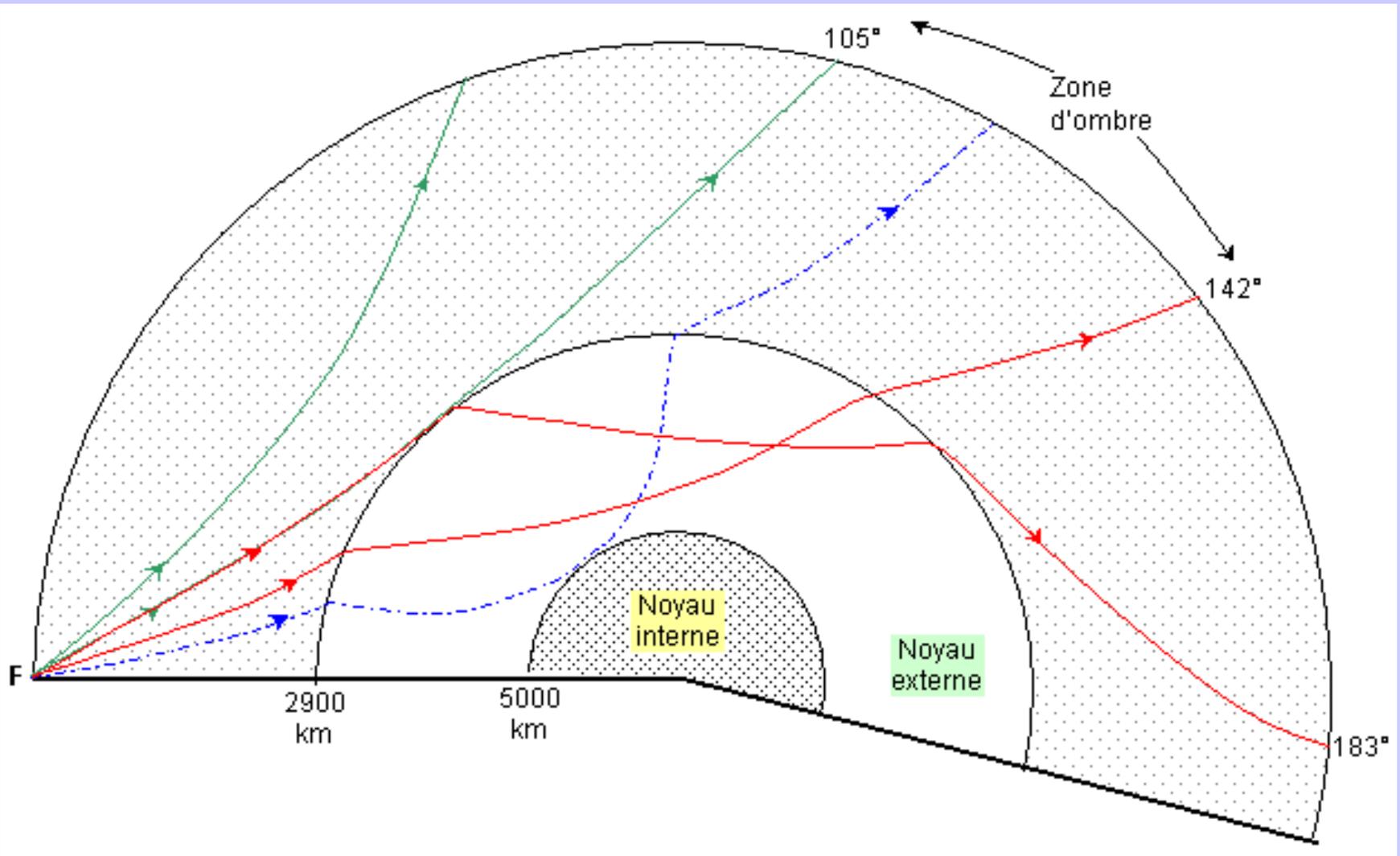
Document 8. Mise en évidence de la zone d'ombre créée par le noyau.

(Schaff A. et Coll. " Sciences de la Terre et de l'Univers ", Vuibert Ed.).



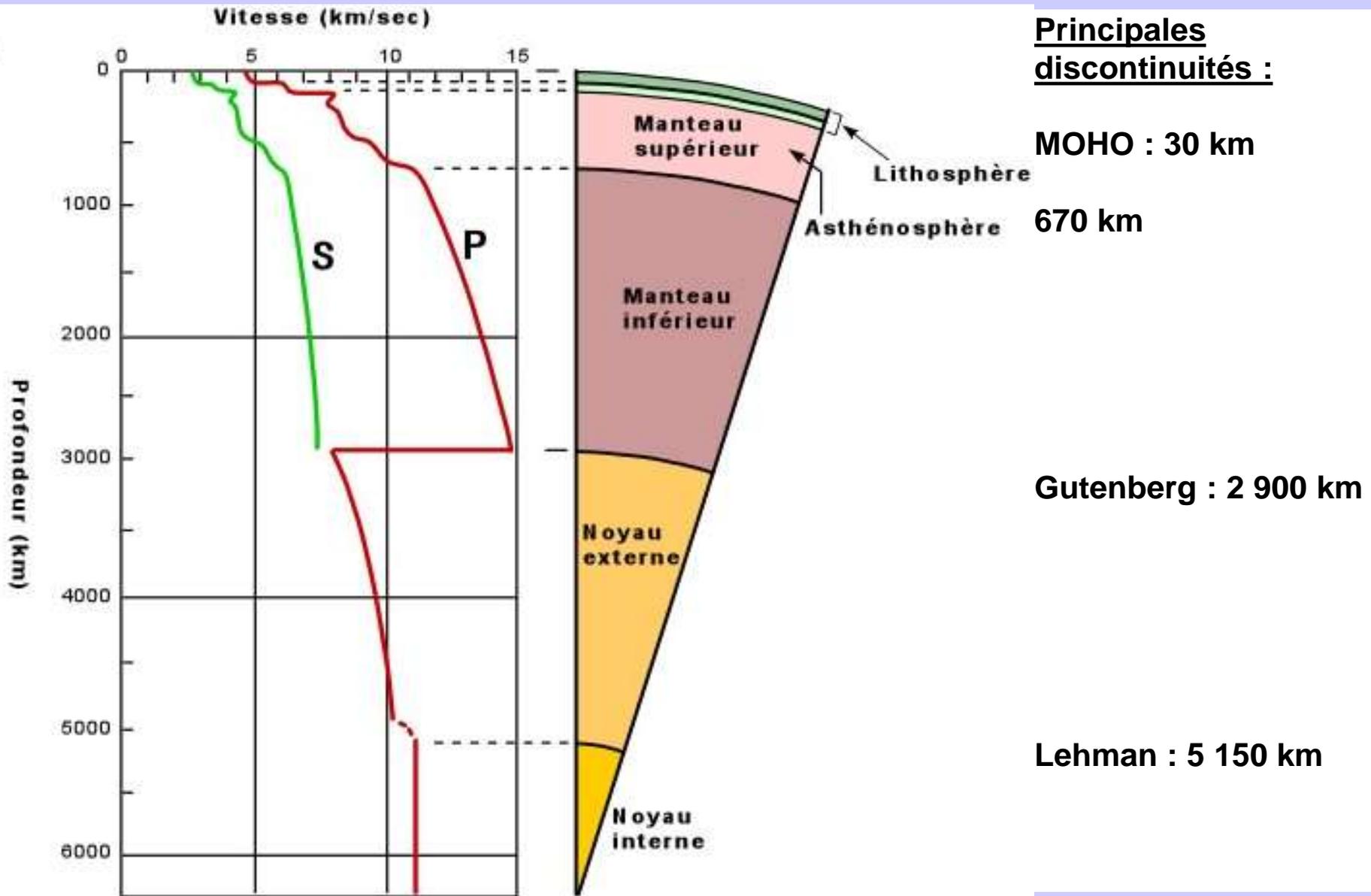
Document 9. Trajectoire des ondes sismiques traversant la Terre.

(<http://crdp.ac-amiens.fr>)



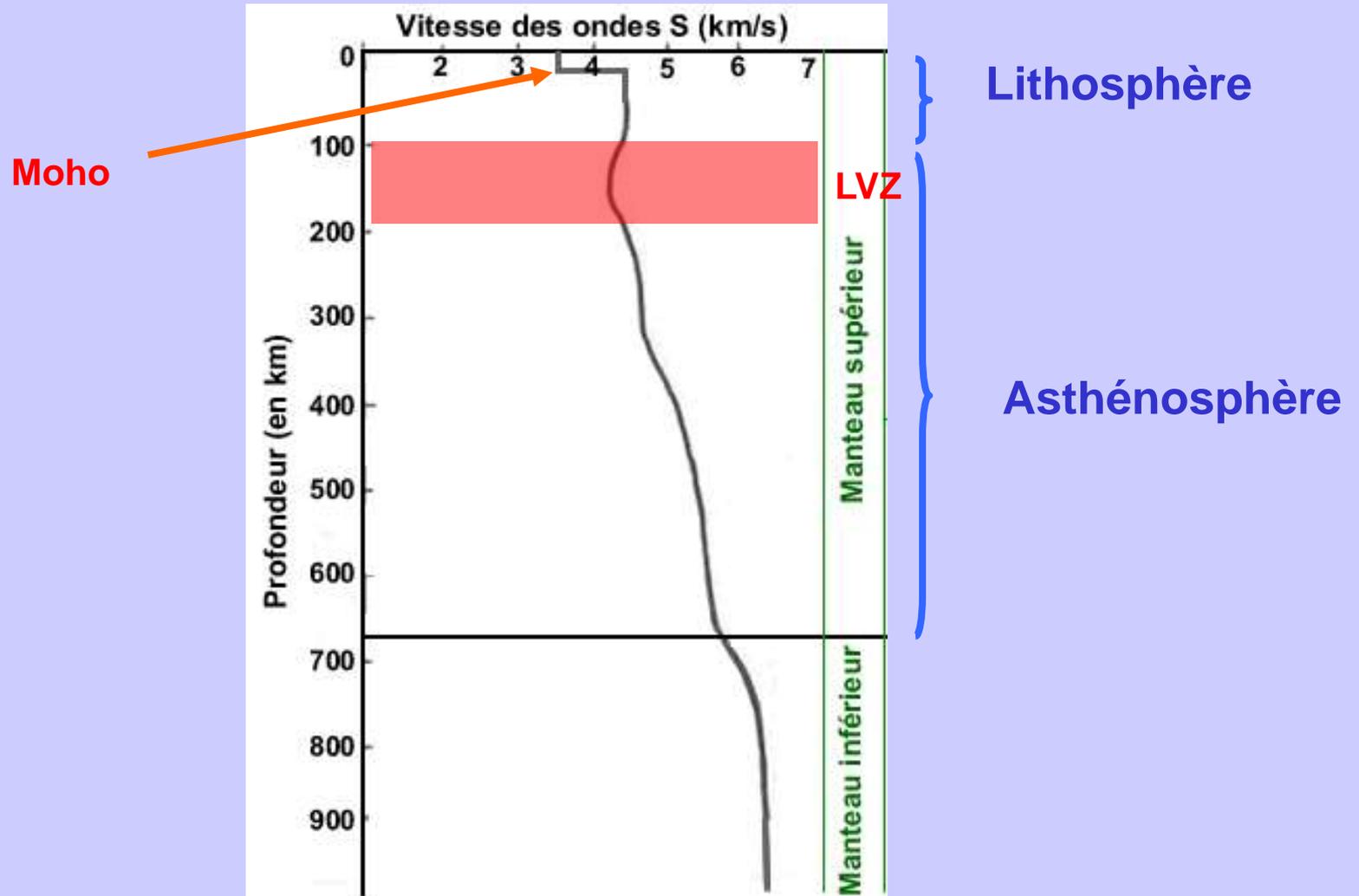
Mise en évidence de la discontinuité de Lehman

Des ondes faibles et tardives arrivent dans la zone d'ombre : elles résultent d'une réflexion sur une discontinuité profonde, la discontinuité de Lehman.



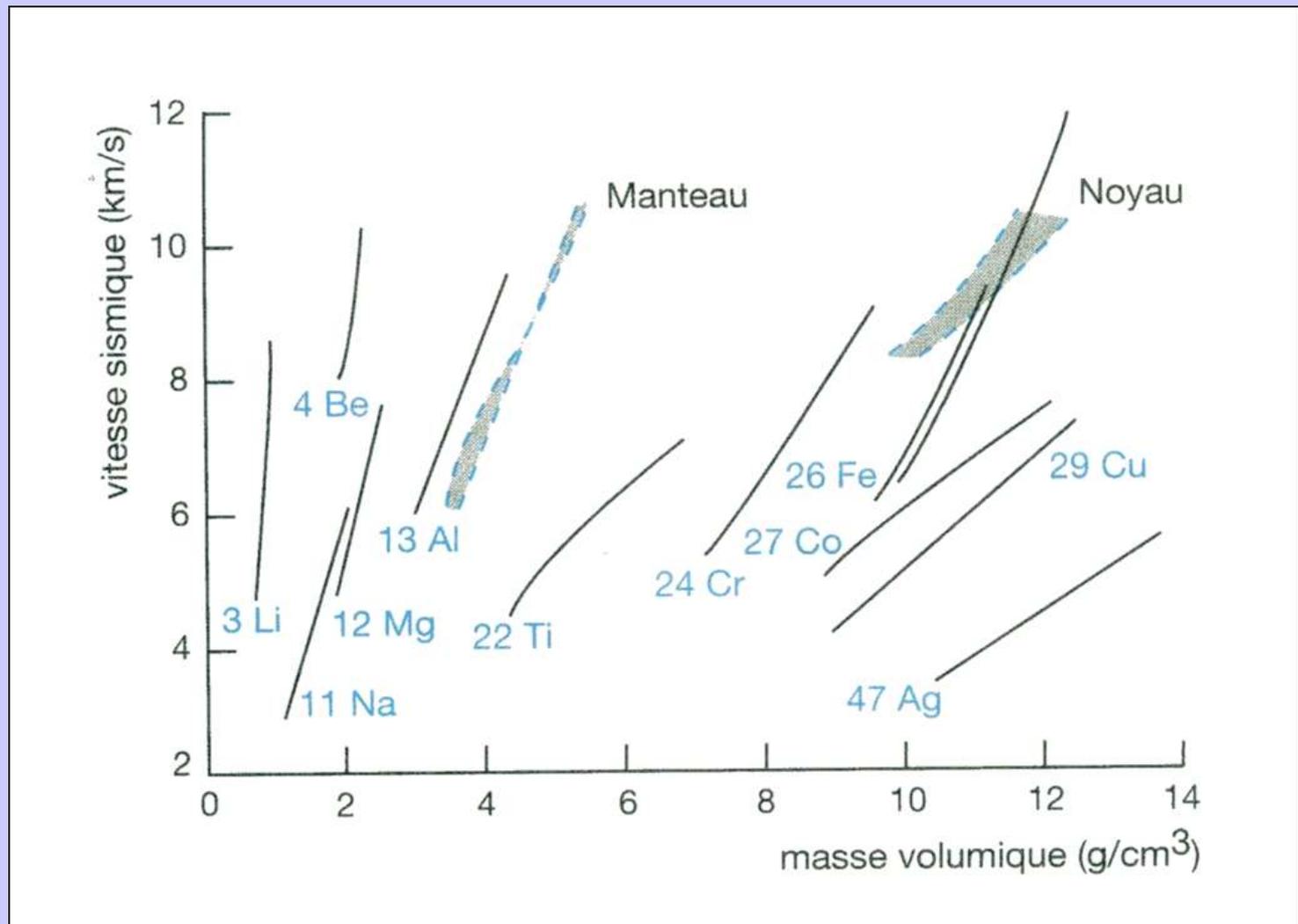
Document 10. Le modèle PREM (Preliminary Reference Earth Model).

(<http://www.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/img.communes.pt/str.interne.terre.html>)



Document 15. Variations de la vitesse des ondes S dans les 1000 premiers km du globe terrestre.

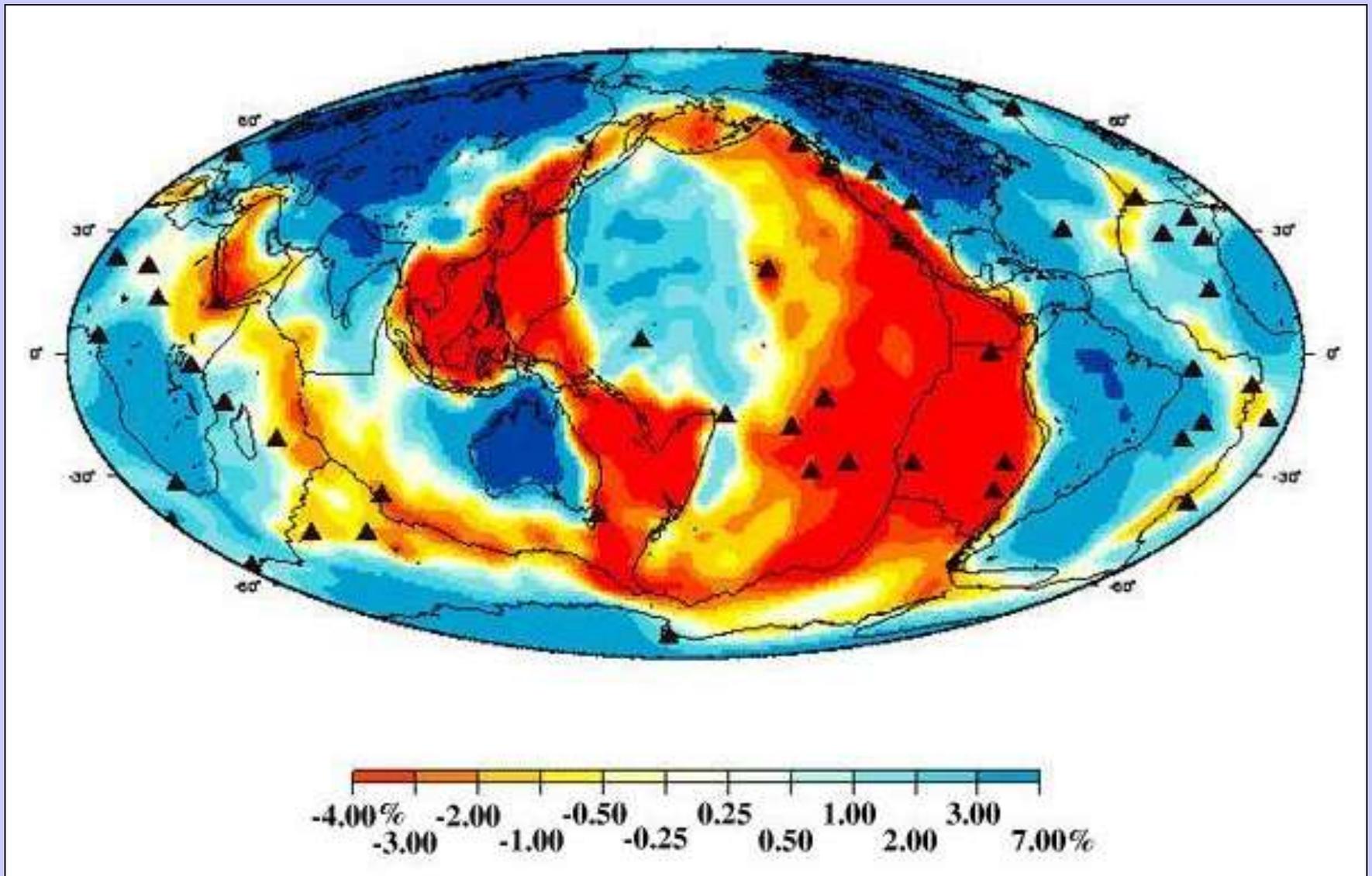
(<http://www.ens-lyon.fr/Planet-Terre>)



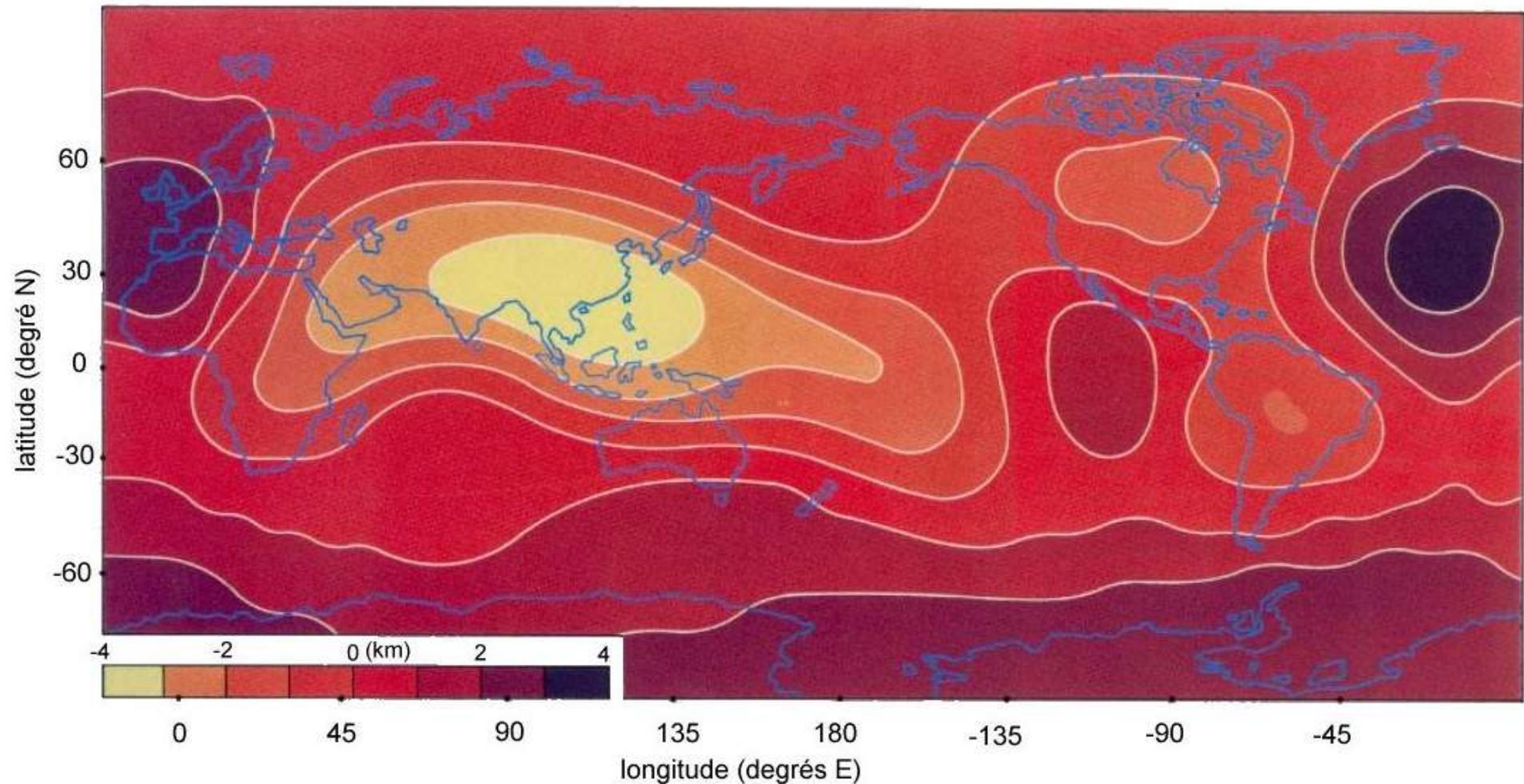
Document 17. Corrélation expérimentale entre la vitesse de propagation des ondes P et la masse volumique de divers éléments chimiques.

En comparant avec les données sismologiques disponibles sur le manteau et le noyau, on observe qu'il est impossible d'obtenir une densité convenable pour le noyau autrement qu'en lui attribuant une composition où le fer est l'élément principal.

(Schaff A. et Coll. " Sciences de la Terre et de l'Univers ", Vuibert Ed.).



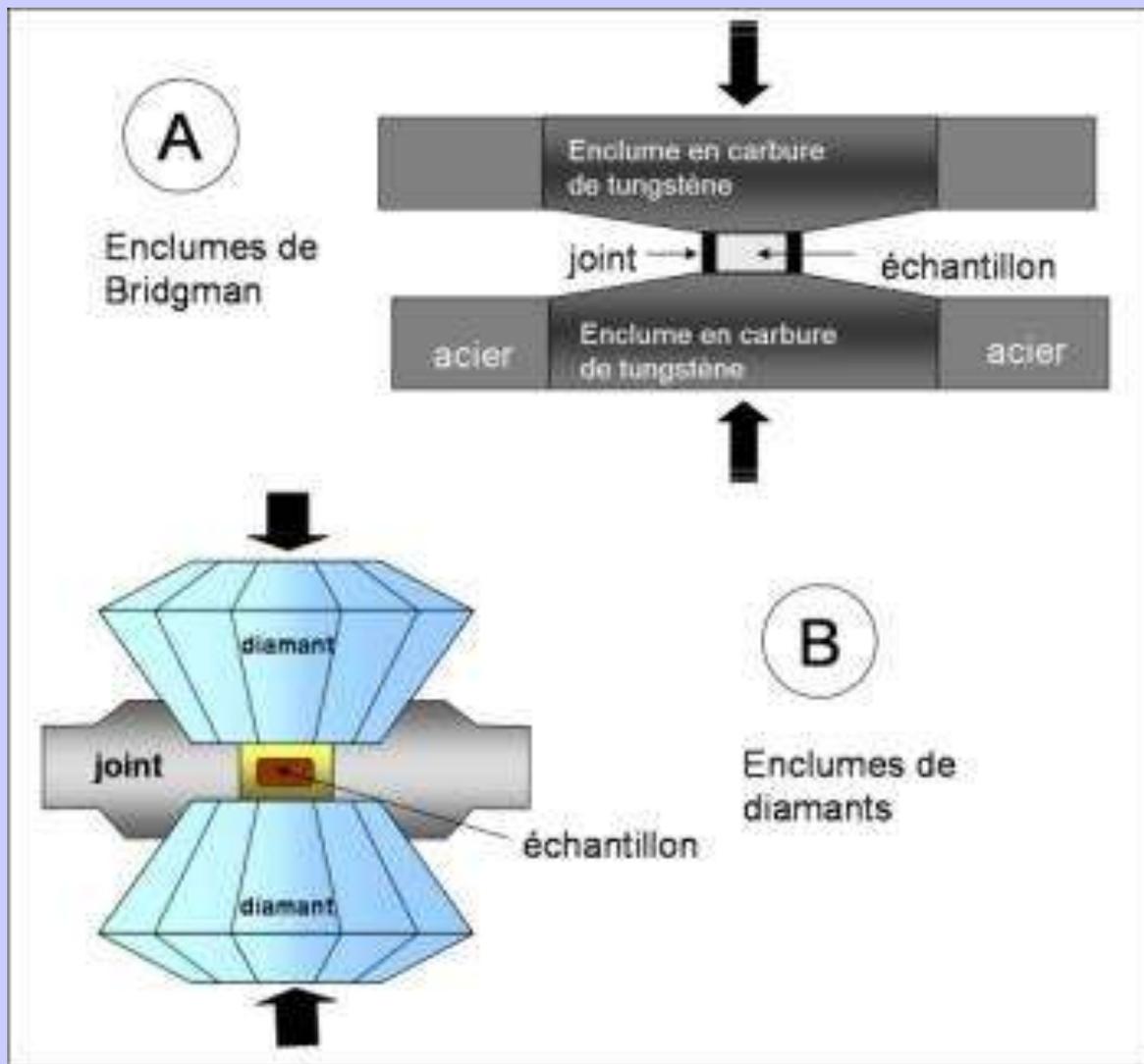
Document 11. Anomalies de vitesse des ondes S à 100 km de profondeur.
(<http://nte-serveur.univ-lyon1.fr/>)



Document 12. Topographie de l'interface noyau-manteau.

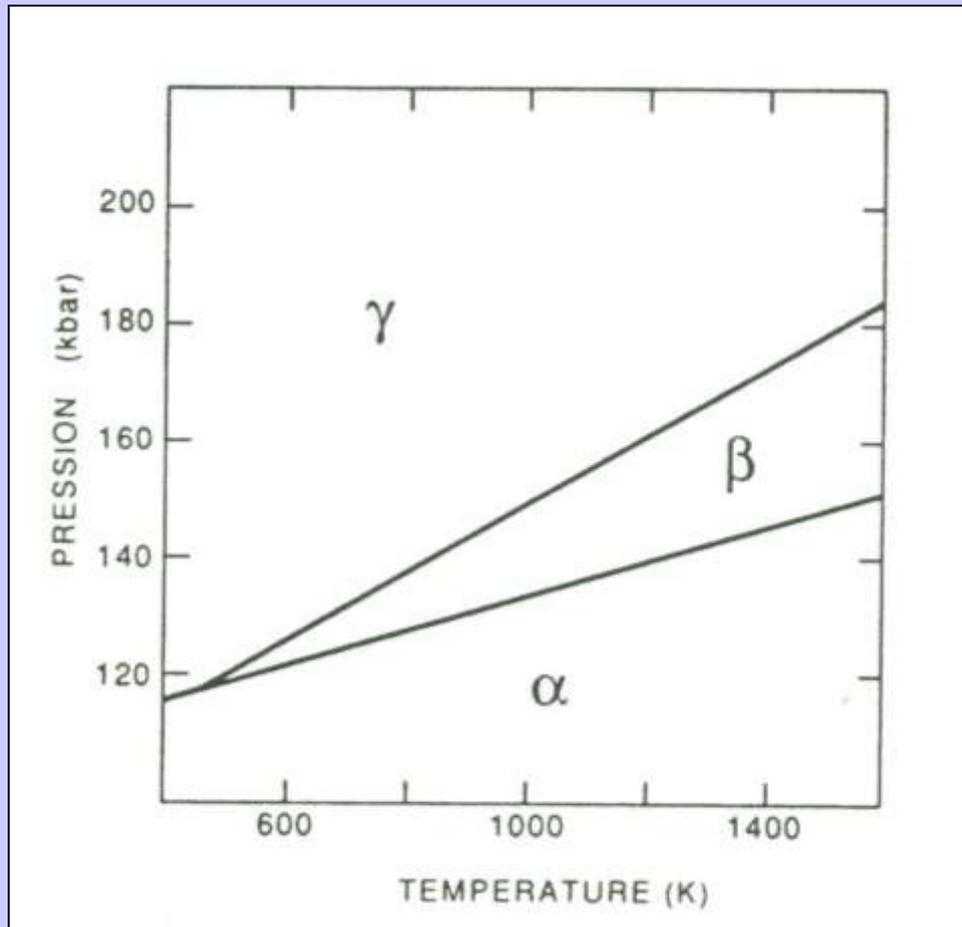
La tomographie sismique met en évidence le relief de la surface externe du noyau: on observe la présence d'un "creux" (en jaune) de 4 km sous l'Asie du sud-est, et d'une "bosse" (en noir) de même amplitude sous l'Atlantique nord.

(Doornbos & Hilton 1989).



Document 13. Principe de la cellule à enclumes de diamant (B).

Il est dérivé de celui des enclumes de Bridgman (A). L'échantillon à étudier sous pression est placé dans un trou (de 50 à 300 μm de diamètre) percé dans une feuille d'acier (le joint) de quelques dixièmes de millimètres d'épaisseur que l'on serre entre deux diamants.



Document 14. Diagramme pression – température des phases de l’olivine Mg_2SiO_4 .

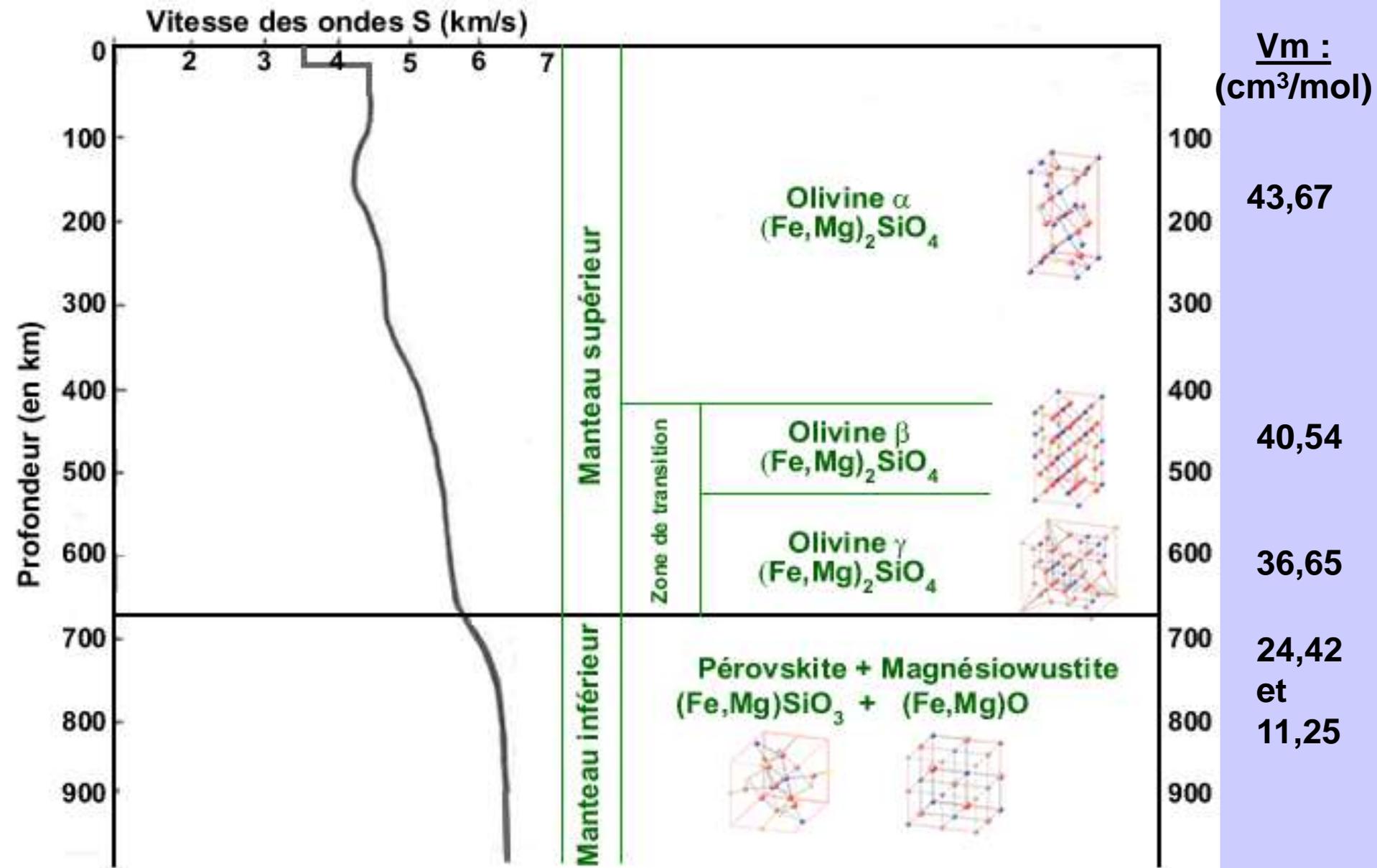
La phase de basse pression α présente la « structure olivine » (orthorhombique).

La phase de haute pression γ présente une structure cubique.

La phase β présente une structure intermédiaire.

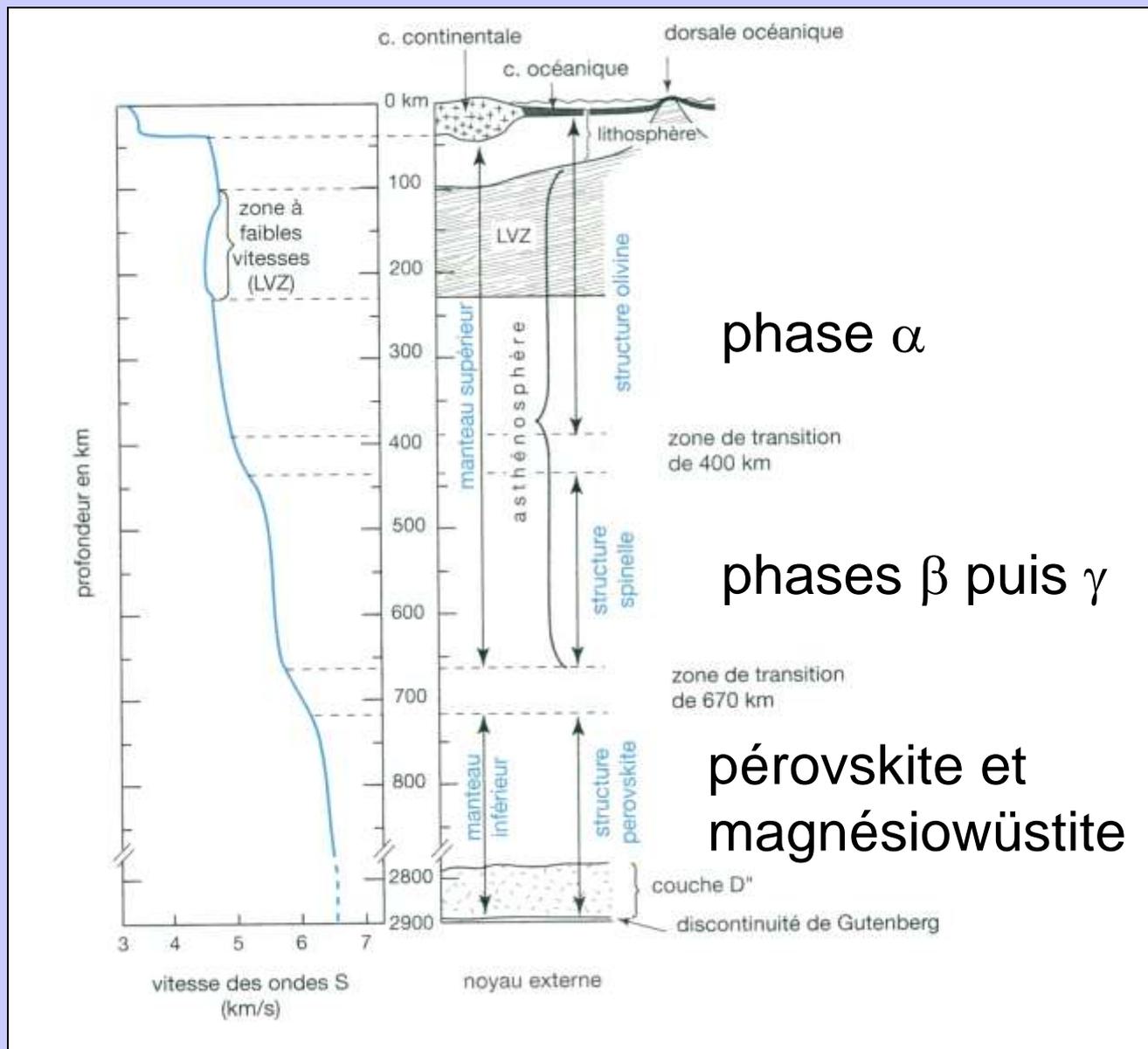
Les phases β et γ sont présentes dans la zone de transition entre 400 et 670 km.

Au-delà, vers 240 kb, les phases β et γ ne sont plus stables, et l’on trouve alors de la pérovskite (+ magnésio-wüstite).



Document 15. Discontinuités dans le manteau et transitions de phases de l'olivine.

(<http://www.ens-lyon.fr/Planet-Terre>)



Document 16. Variations des vitesses des ondes S et structuration de la croûte et du manteau terrestre.

(Schaff A. et Coll. " Sciences de la Terre et de l'Univers ", Vuibert Ed.).

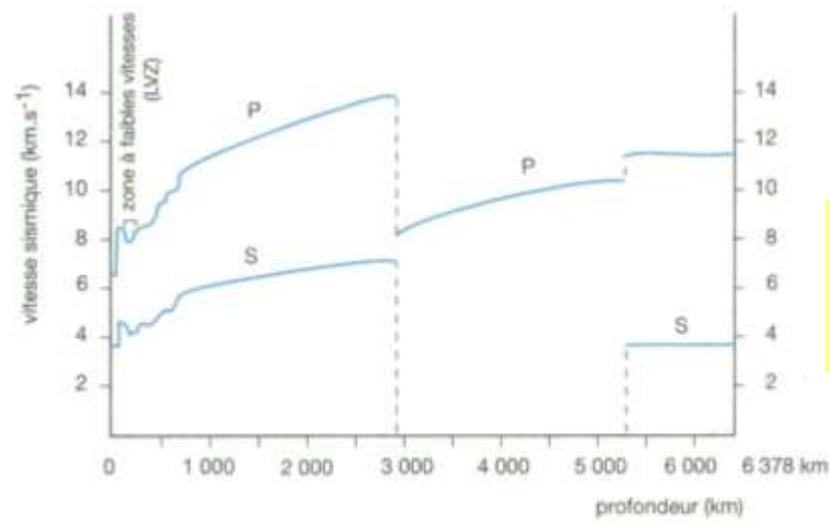
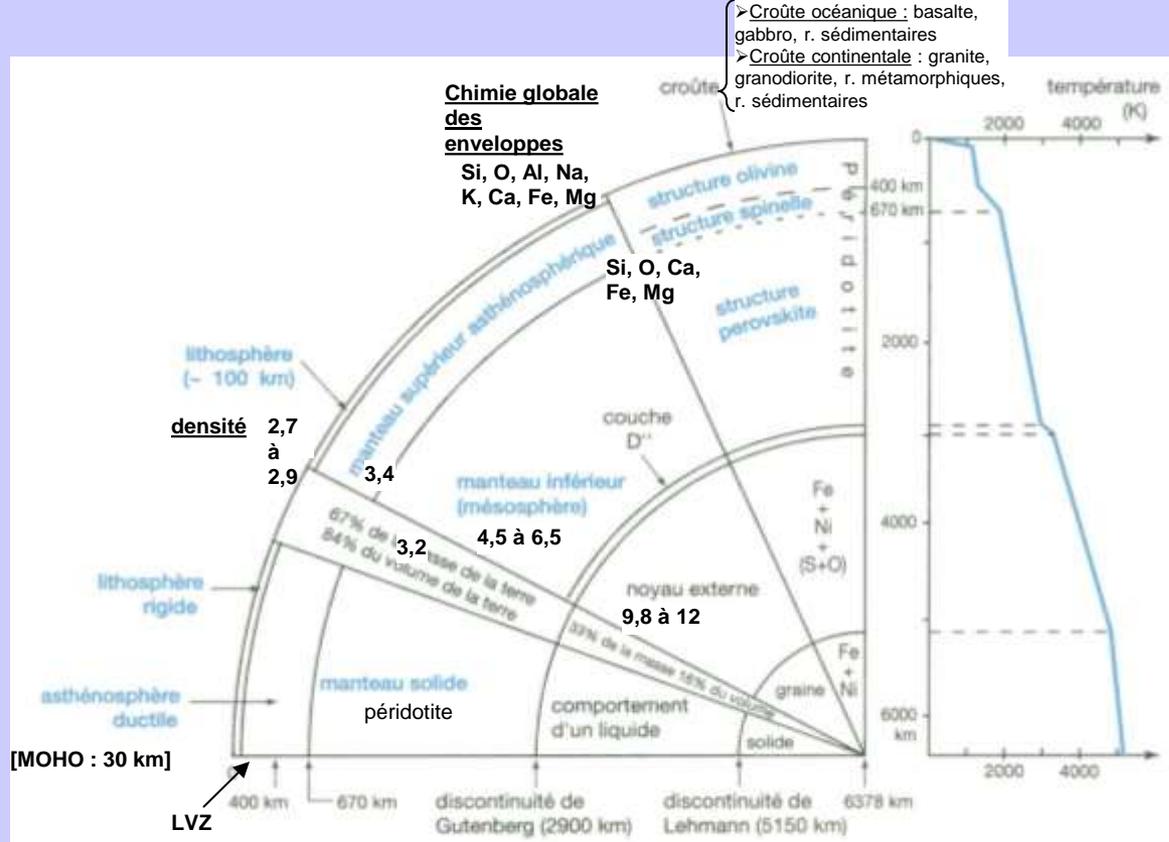


Schéma-bilan : modèle de la structure interne de la Terre

b - La composition minéralogique sera donnée pour 100 g de roche, soient

30 g du minéral A,

50 g du minéral B,

20 g du minéral C.

La masse d'un élément dans 100 g de roche est la somme des masses apportées par chacun des minéraux A, B, et C. Chacune de ces masses est elle-même le résultat du produit du pourcentage massique de l'élément dans le minéral (donné par le tableau 1) par le pourcentage massique du minéral dans la roche (rappelé ci-dessus)

Les résultats des calculs sont récapitulés dans le tableau ci-dessous.

Composition chimique en éléments majeurs de la roche étudiée
Masses en g pour 100 g de roche

	O	Si	Mg	Fe	Al	K	Na	H
masse due à A = %massique x 0.3	15,99	14,01						
masse due à B = %massique x 0.5	23,70	15,55			5,00	3,60	2,15	
masse due à C = %massique x 0.2	8,02	3,50	1,00	4,66	1,12	1,62		0,08
TOTAL	47,71	33,06	1,00	4,66	6,12	5,22	2,15	0,08

La teneur en silice est la masse de SiO_2 contenue dans 100 g de roche.

Le nombre de moles d'atomes N_{Si} de Silicium contenus dans 100 g de roche s'obtient en divisant la masse correspondante de silicium m_{Si} par la masse molaire de cet élément M_{Si}

$$N_{\text{Si}} = m_{\text{Si}} / M_{\text{Si}}$$

$$N_{\text{Si}} = 33,06 / 28 = 1,18 \text{ moles}$$

Il y a donc 1,18 moles de silice (SiO_2) dans 100 g de roche, soit une masse m_{SiO_2}

$$m_{\text{SiO}_2} = N_{\text{Si}} \times M_{\text{SiO}_2}$$

$$m_{\text{SiO}_2} = 1,18 \times (28 + 2 \times 16) = 1,18 \times 60 = 70 \text{ g}$$

La roche contient donc 70 % de silice.

c - Le nombre de moles n_{EM} d'un élément E dans un minéral M s'obtient en faisant le rapport de son pourcentage massique dans M (trois premières lignes du tableau 1) par sa masse molaire (dernière ligne du tableau 1).

Pour obtenir la formule d'un minéral, on rapporte le nombre de chacun de ses éléments au nombre des atomes de Silicium pour A, Aluminium pour B et C (consignes de l'énoncé).

Minéral A

$$n_{SiA} = 46,7 / 28 = 1,67$$

$$n_{OA} = 53,3 / 16 = 3,33$$

$$\text{D'où } n_{OA} / n_{SiA} = 2$$

Le minéral A a donc pour formule SiO_2 (on pouvait se dispenser du calcul)

Minéral B

$$n_{AlB} = 10,0 / 27 = 0,37$$

$$n_{OB} = 47,4 / 16 = 2,96$$

$$n_{SiB} = 31,1 / 28 = 1,11$$

$$n_{KB} = 7,2 / 39 = 0,18$$

$$n_{NaB} = 4,3 / 23 = 0,19$$

$$n_{OB} / n_{AlB} = 8$$

$$n_{SiB} / n_{AlB} = 3$$

$$n_{KB} / n_{AlB} = 0,5$$

$$n_{NaB} / n_{AlB} = 0,5$$

Le minéral B a donc pour formule $K_{0,5} Na_{0,5} Al Si_3 O_8$

Minéral C

$$n_{AlC} = 5,6 / 27 = 0,21$$

$$n_{OC} = 40,1 / 16 = 2,51$$

$$n_{SiC} = 17,5 / 28 = 0,63$$

$$n_{MgC} = 5 / 24 = 0,21$$

$$n_{FeC} = 23,3 / 56 = 0,42$$

$$n_{KC} = 8,1 / 39 = 0,21$$

$$n_{HC} = 0,4 / 1 = 0,40$$

$$n_{OC} / n_{AlC} = 12$$

$$n_{SiC} / n_{AlC} = 3$$

$$n_{MgC} / n_{AlC} = 1$$

$$n_{FeC} / n_{AlC} = 2$$

$$n_{KC} / n_{AlC} = 1$$

$$n_{HC} / n_{AlC} = 2$$

Le minéral C a donc pour formule $K MgFe_2 AlSi_3 O_{12}H_2$ qu'on écrira plutôt $K MgFe_2 AlSi_3 O_{10} (OH)_2$