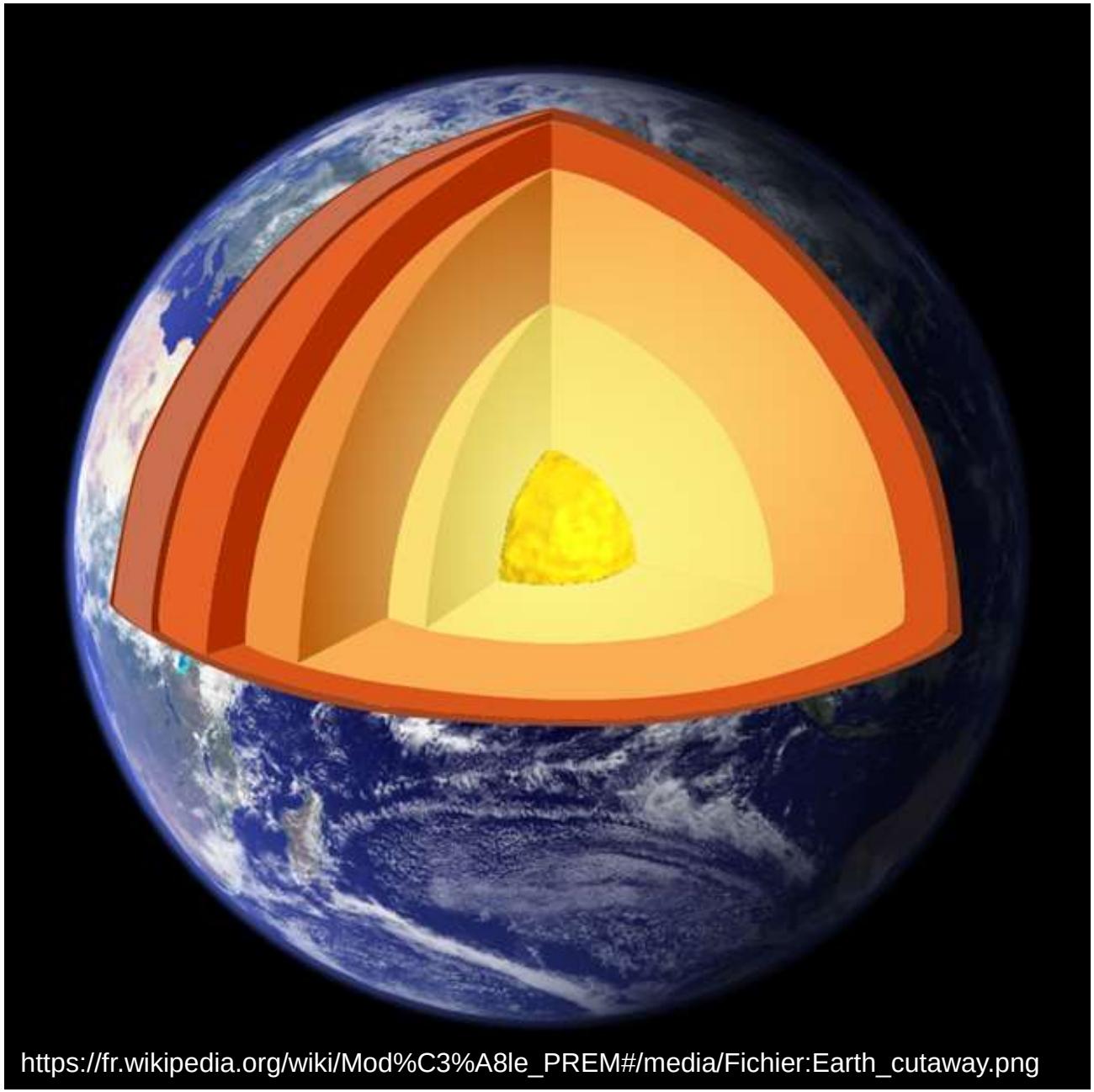
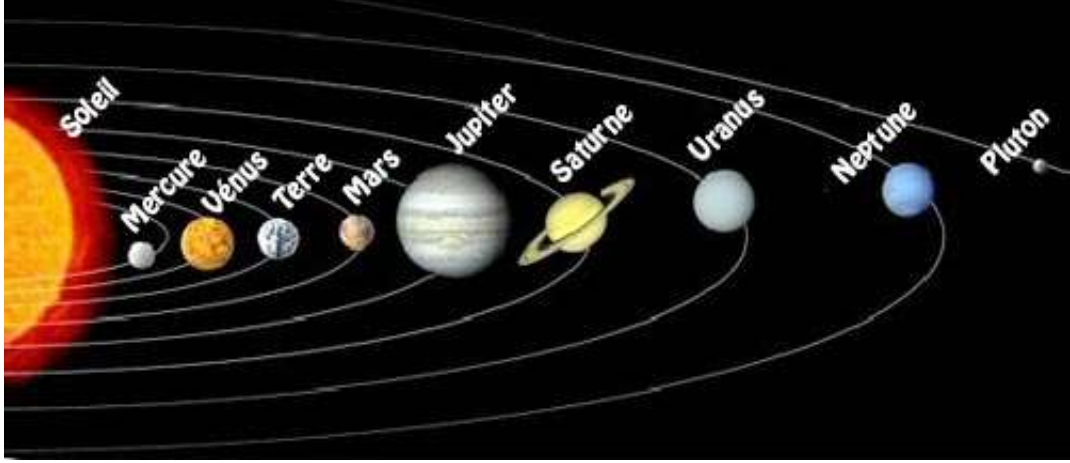
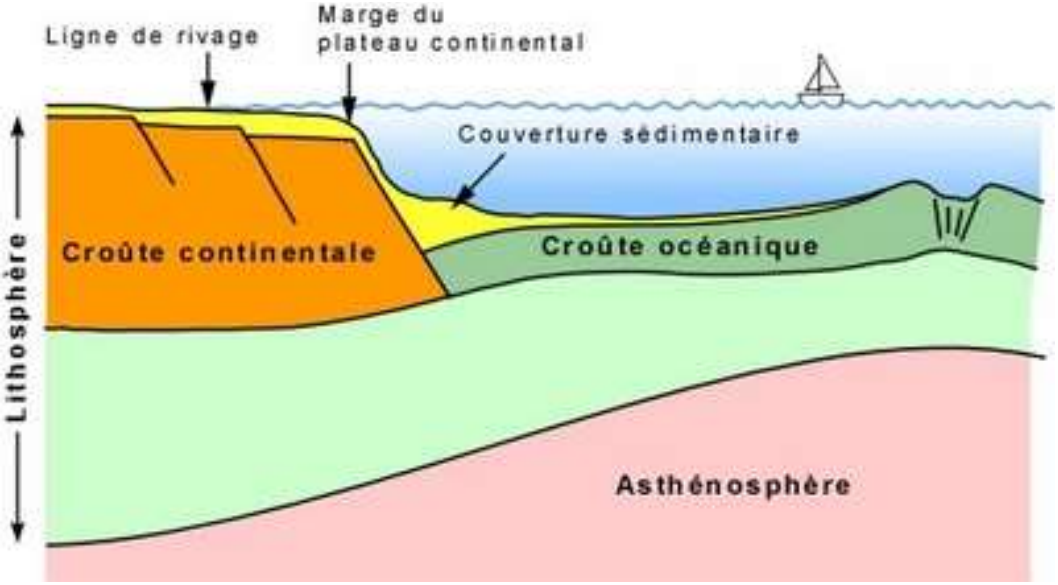
ST – B : La structure de la planète Terre

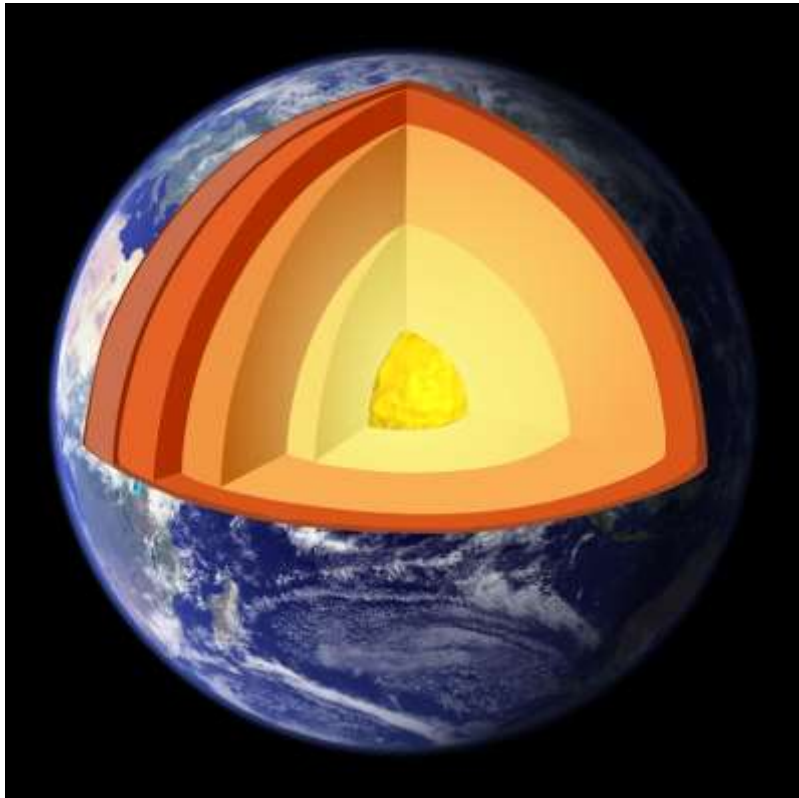


https://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A8le_PREM#/media/Fichier:Earth_cutaway.png



Quelques acquis du lycée….



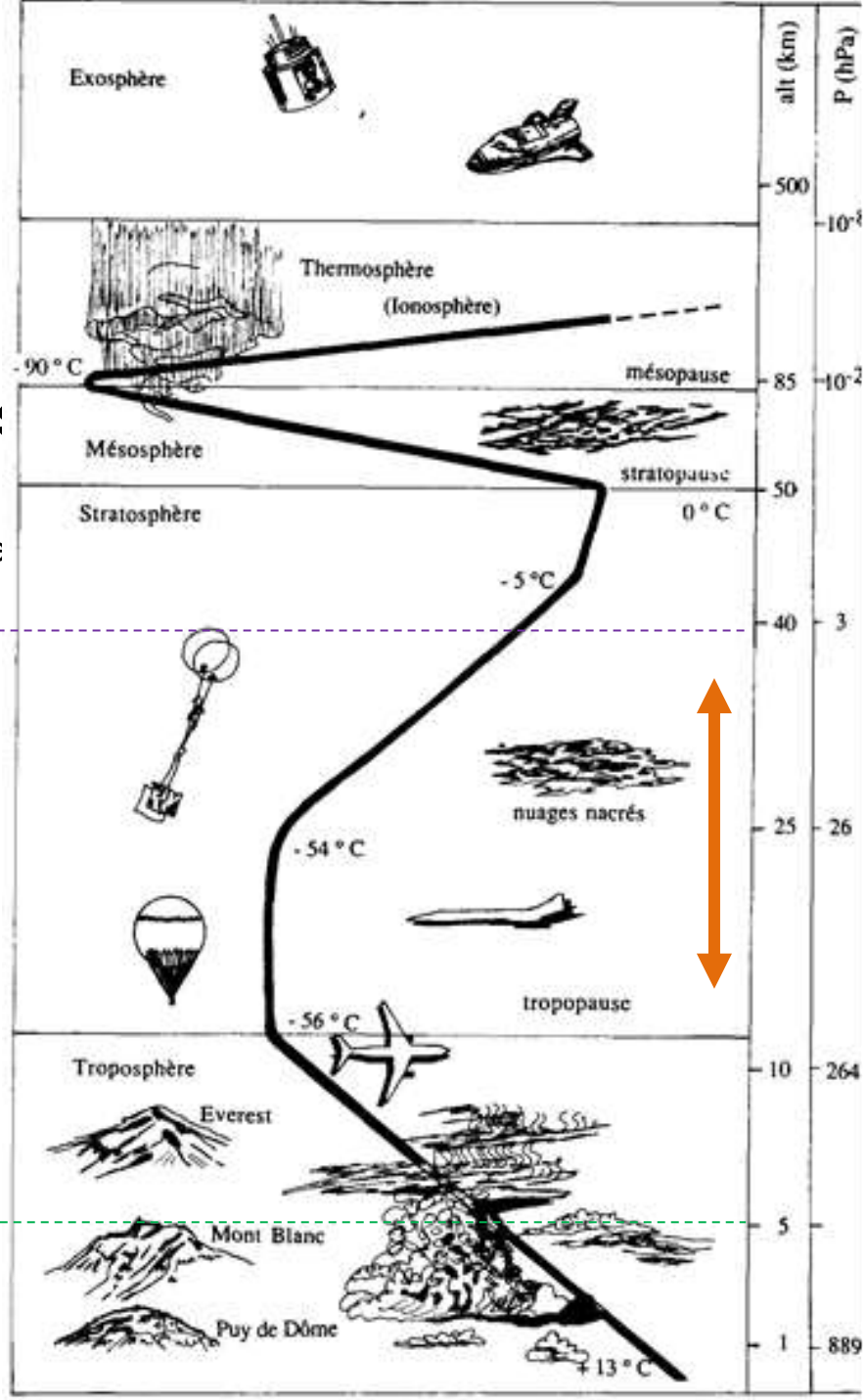


Document 2.

Structure verticale de l'atmosphère

(l'échelle des altitudes n'est pas respectée).

(Caron et coll. "Comprendre et enseigner la Planète Terre", Ophrys Ed.).



Epaisseur maximale 1 000 km

99 % de la masse de l'atmosphère

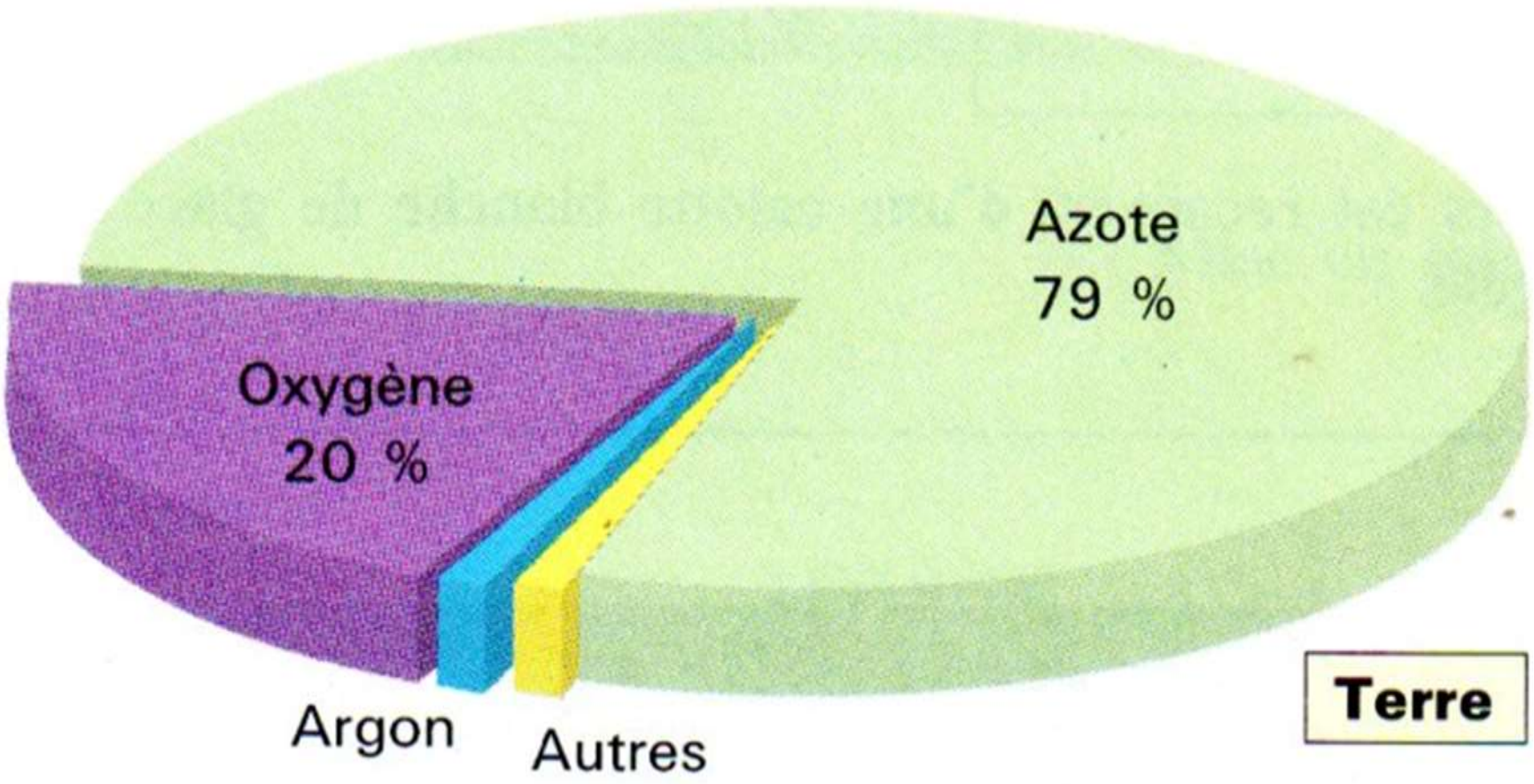
Masse atmosphère : 5 10^{18} kg

50 % de la masse de l'atmosphère

couche d'ozone
(15 – 35 km)
absorbant les UV

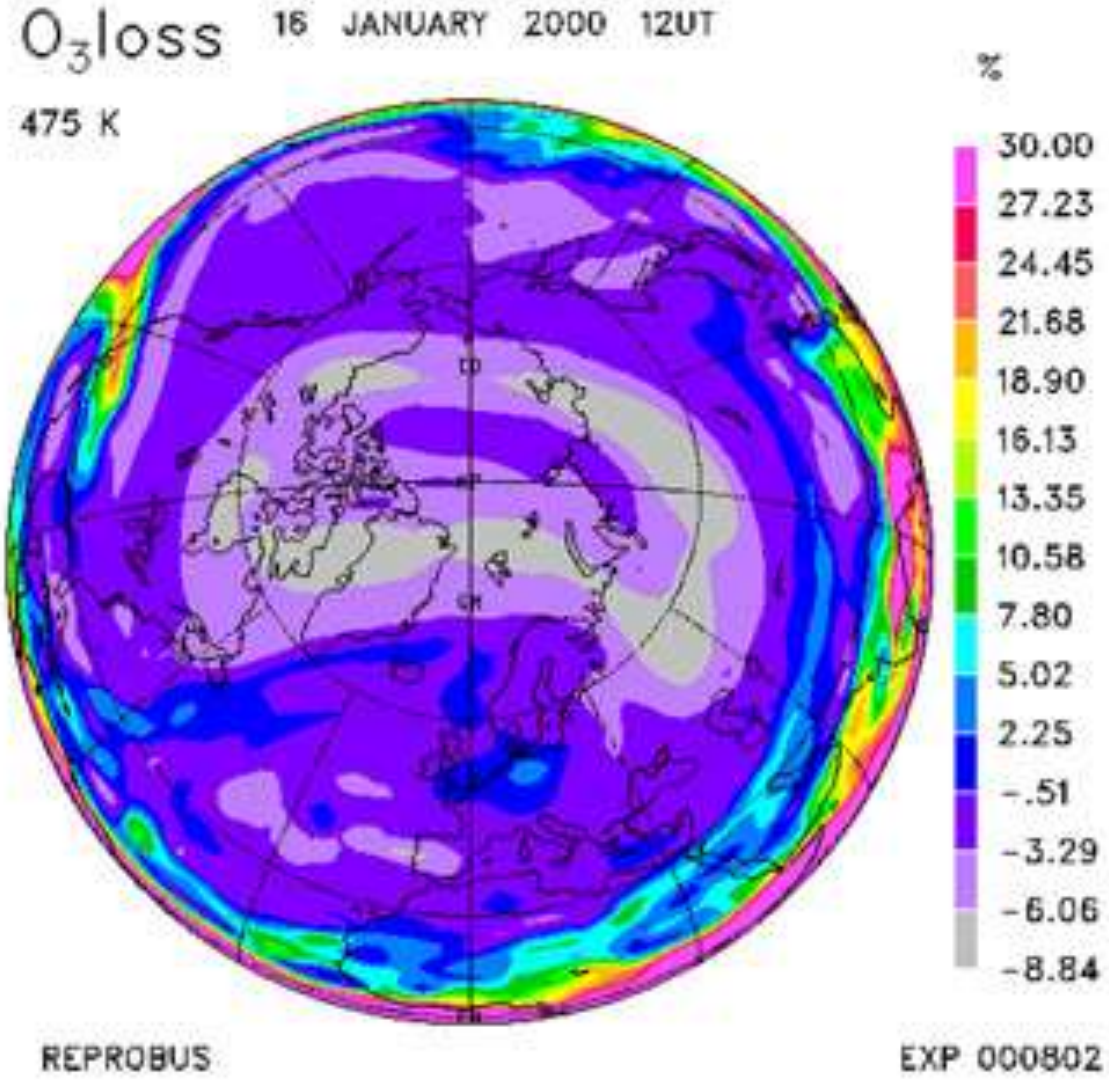
Eau à l'état vapeur : jusqu'à 7 %

Composition de l’atmosphère terrestre



<u>Document 1</u>. Composition détaillée de l'atmosphère terrestre.

b	Constituants dont la composition ne varie pas en fonction de l'altitude
Gaz constituant l'air sec	**Volume** (en pourcentage)
Diazote (N_2)	78,084
Dioxygène (O_2)	20,948
Argon (A)	0,934
Dioxyde de carbone (CO_2)	0,035
Néon (Ne)	$1,8.10^{-3}$
Hélium (He)	$5,24.10^{-4}$
Krypton (Kr)	$1,14.10^{-4}$
Méthane (CH_4)	2.10^{-4}
Autres hydrocarbures	2.10^{-4}
Constituants dont la composition varie…	
Gaz	**Volume** (en pourcentage)
Eau (H_2O)	0 à 7
Dioxyde de soufre (SO_2)	0 à 10^{-4}
Ozone (O_3)	0 à 10^{-5}



Modèle photochimique à trois dimensions, simulant l'ozone de l'atmosphère et modélisant sa diminution dans la stratosphère arctique.

Le modèle a été réalisé le 16 janvier 2000 pendant la campagne Theseo/Solve.

Service d'aéronomie - Verrières-le-Buisson © CNRS Photothèque / LEFEVRE F.

Une atmosphère stratifiée

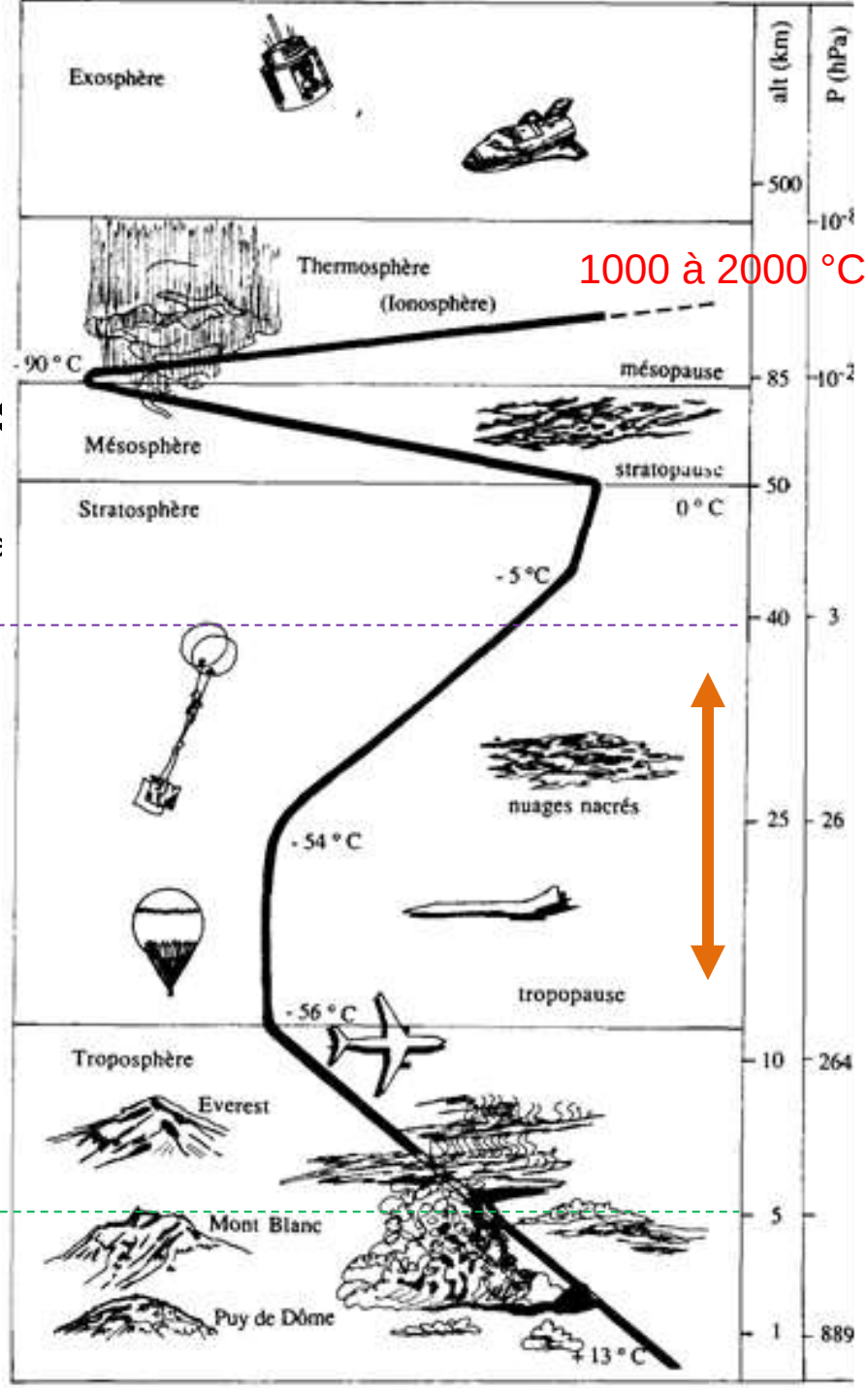
Le volcan Redoubt en éruption en Alaska le 21 avril 1990. Le dégagement de poussières et de gaz s'étend jusqu'à la tropopause mais, faute d'énergie suffisante, le nuage s'étale horizontalement et ne s'étend pas dans la stratosphère car cette région accuse une importante inversion de température, très peu d'humidité et pas de mouvements convectifs. La masse d'air est donc stratifiée et présente un caractère de stabilité quasi absolu.

Stratification de la stratosphère observée le 22 juin 1996 depuis la navette spatiale lors du lever du Soleil.

Document 2.

Structure verticale de l'atmosphère (l'échelle des altitudes n'est pas respectée).

(Caron et coll. "Comprendre et enseigner la Planète Terre", Ophrys Ed.).



Ionisation des molécules → aurores boréales

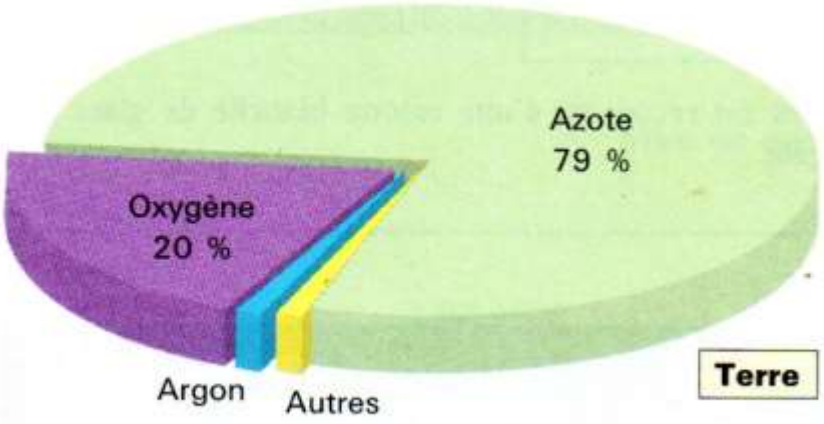
Inversion de température due à la présence de la couche d'ozone (15 – 35 km) **absorbant les UV**

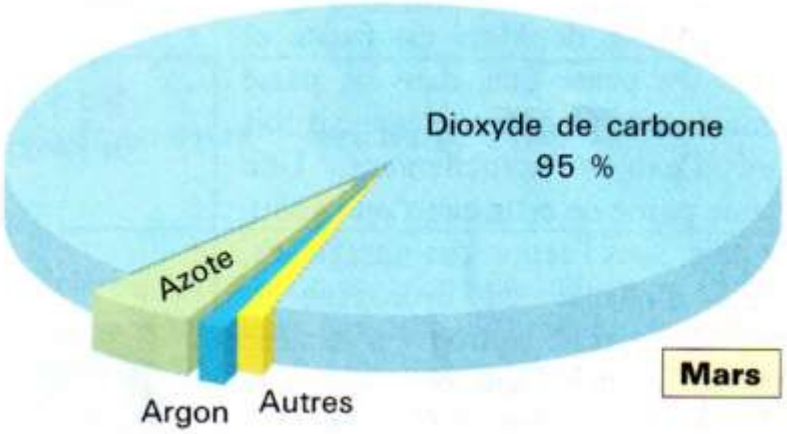
Zone des vents, des nuages et autres phénomènes météorologiques

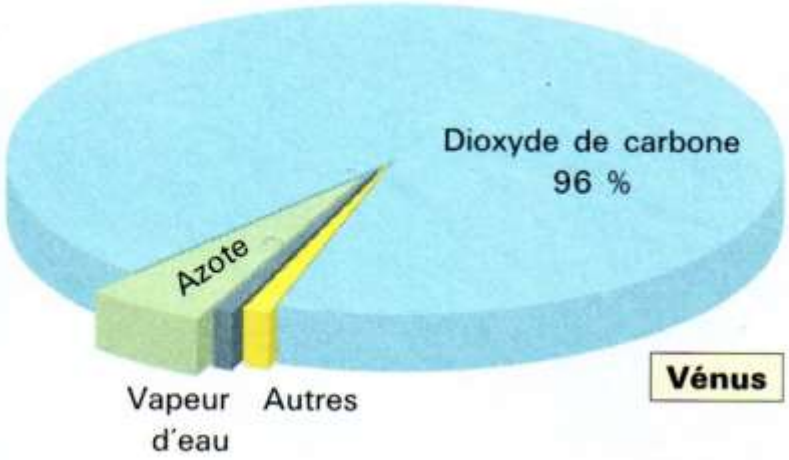
99 % de la masse de l'atmosphère

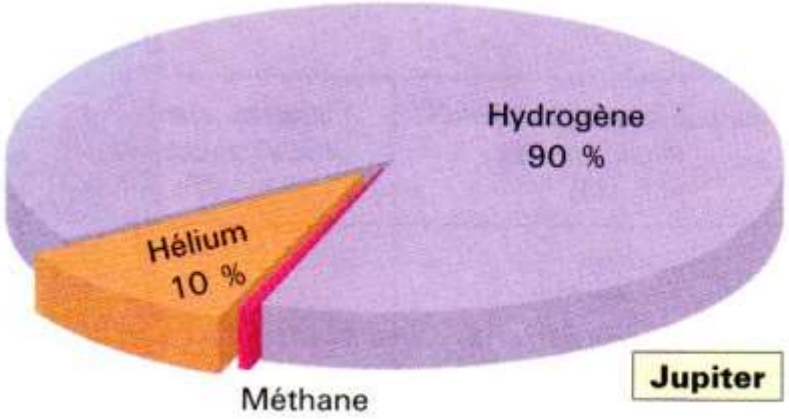
50 % de la masse de l'atmosphère

<u>Document 3.</u> Composition de l'atmosphère terrestre et d'autres planètes.

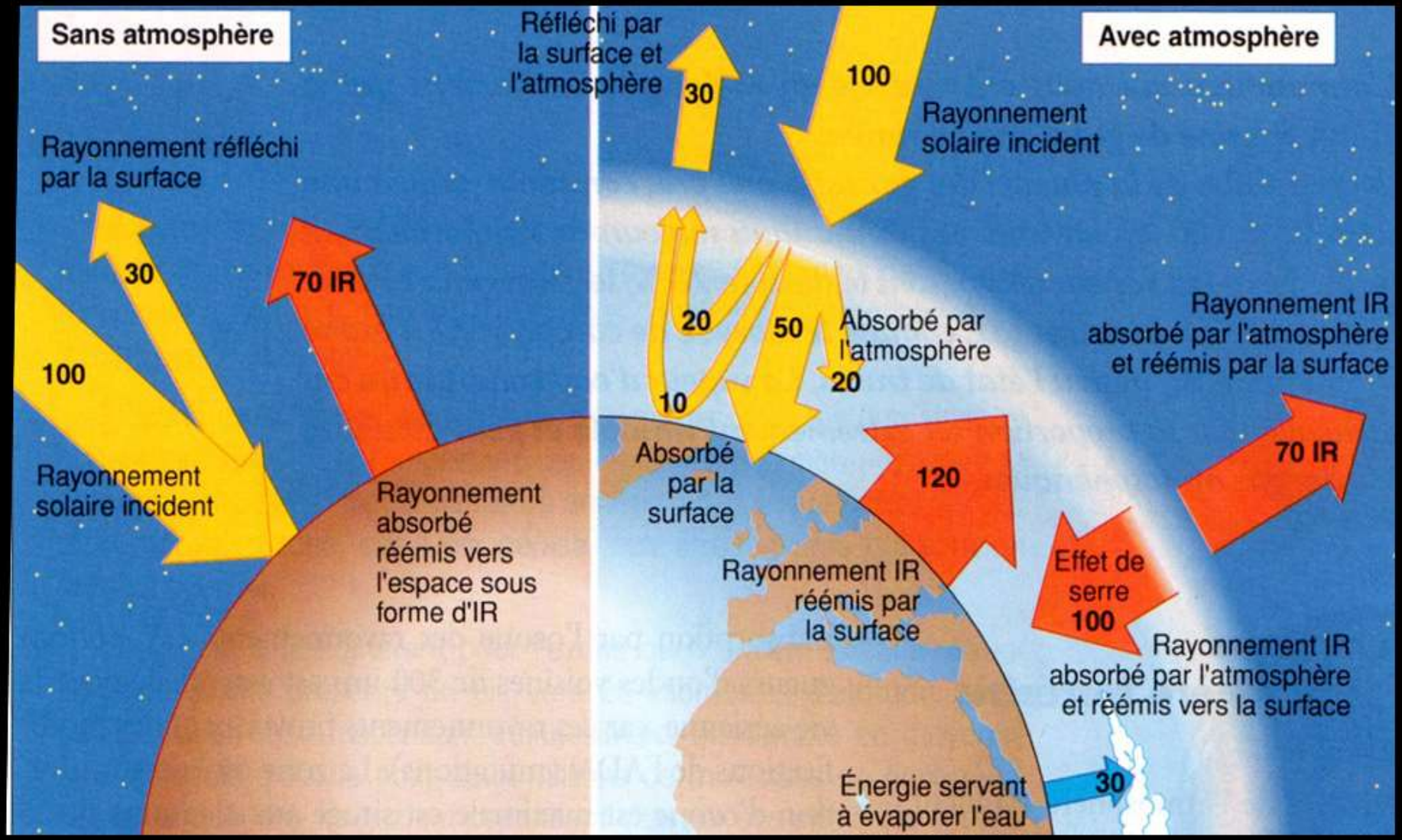






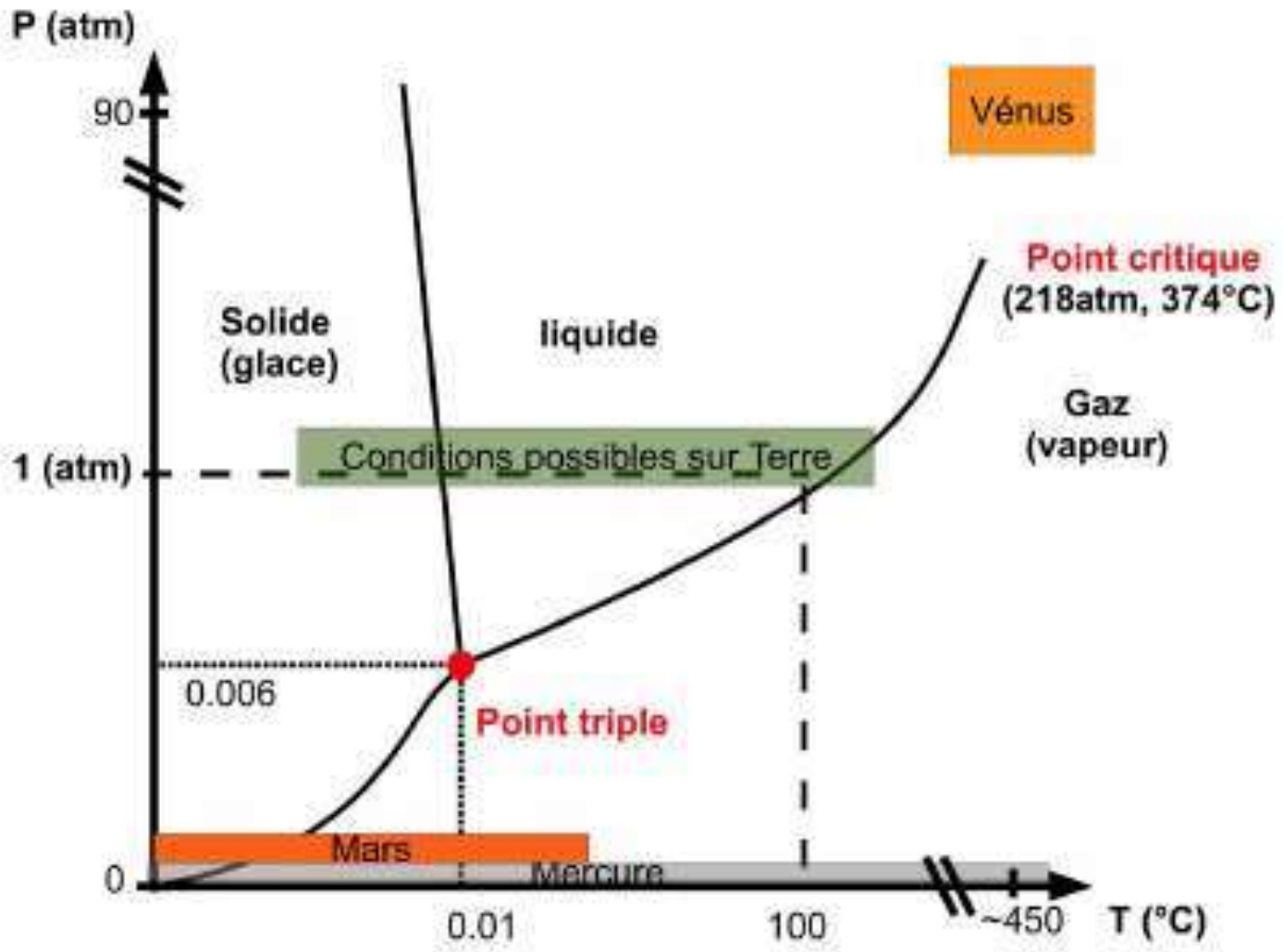


Atmosphère terrestre et effet de serre



T = -18°C

T = +14°C



<u>Document 4</u>. Diagramme de phase de l'eau avec les différentes conditions pression-température régnant sur les planètes telluriques.

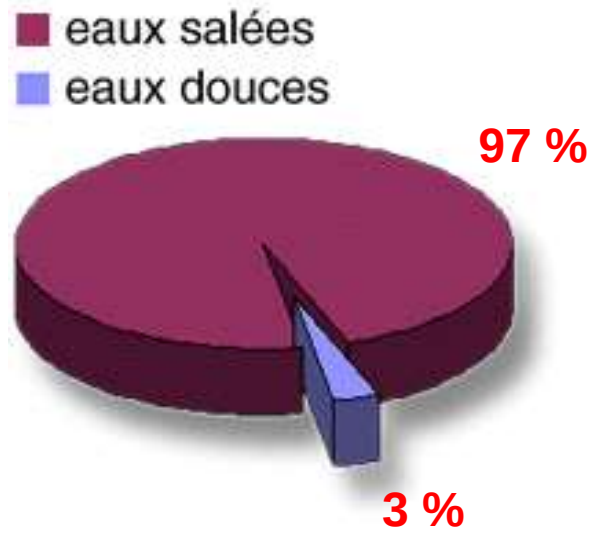
http://tristan.ferroir.free.fr

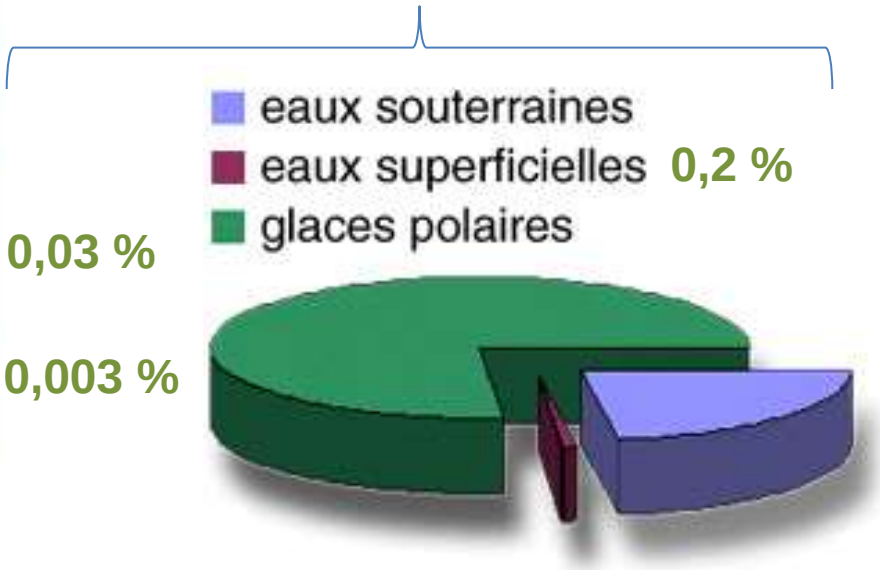
Document 5. Les réservoirs d'eau sur Terre.

(Caron et coll. «Comprendre et enseigner la Planète Terre», Ophrys Ed.).

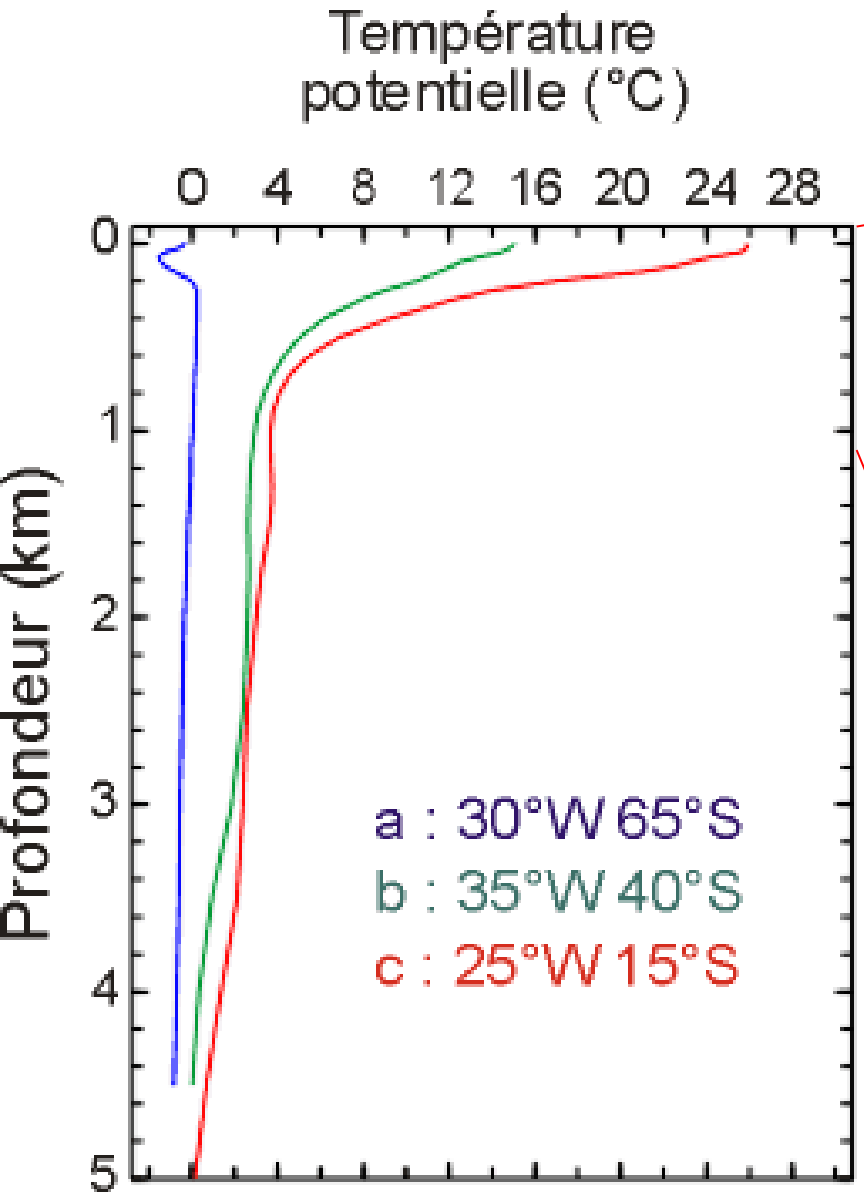
Les réservoirs	Les stocks
Océans	1 350 000 000
Eaux continentales	35 976 700
Glaciers	27 500 000
Eaux souterraines	8 200 000
Mers intérieures	105 000
Lacs d'eau douce	100 000
Humidité des sols	70 000
Rivières	1 700
Atmosphère (humidité de l'air)	13 000
Biosphère (cellules vivantes)	1 100

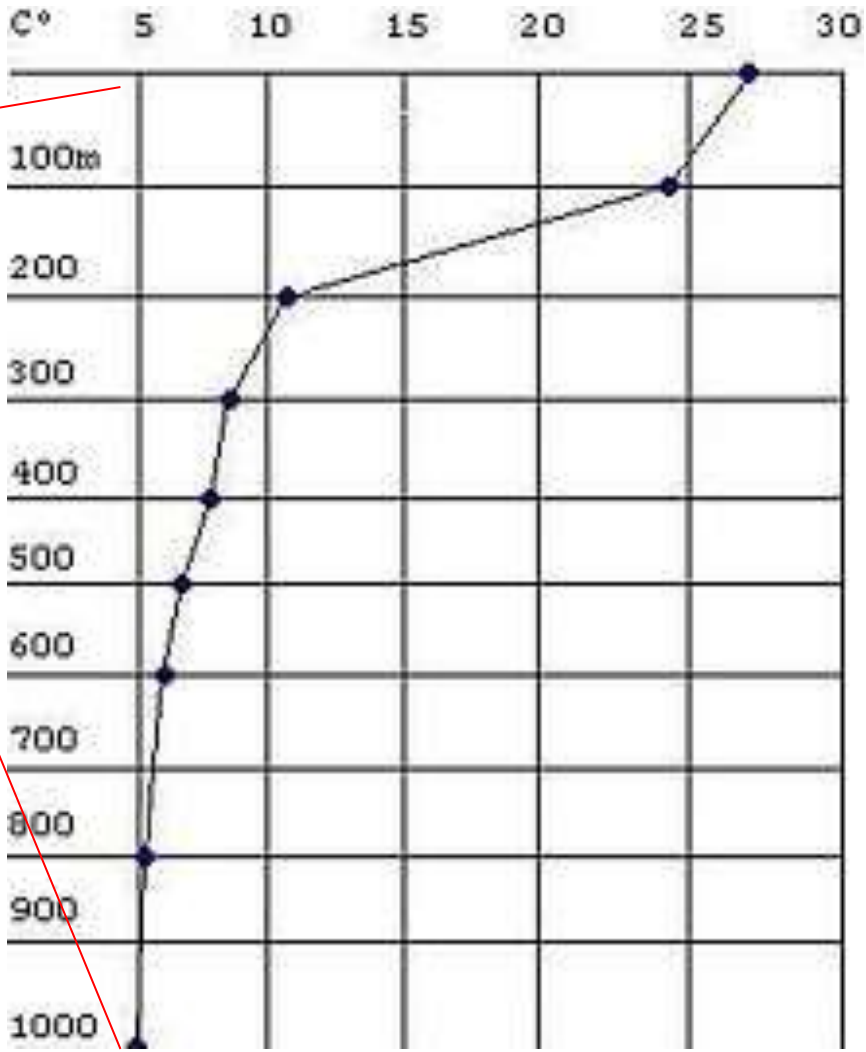
Données en km³





<u>Document 6</u>. La stratification thermique des océans.

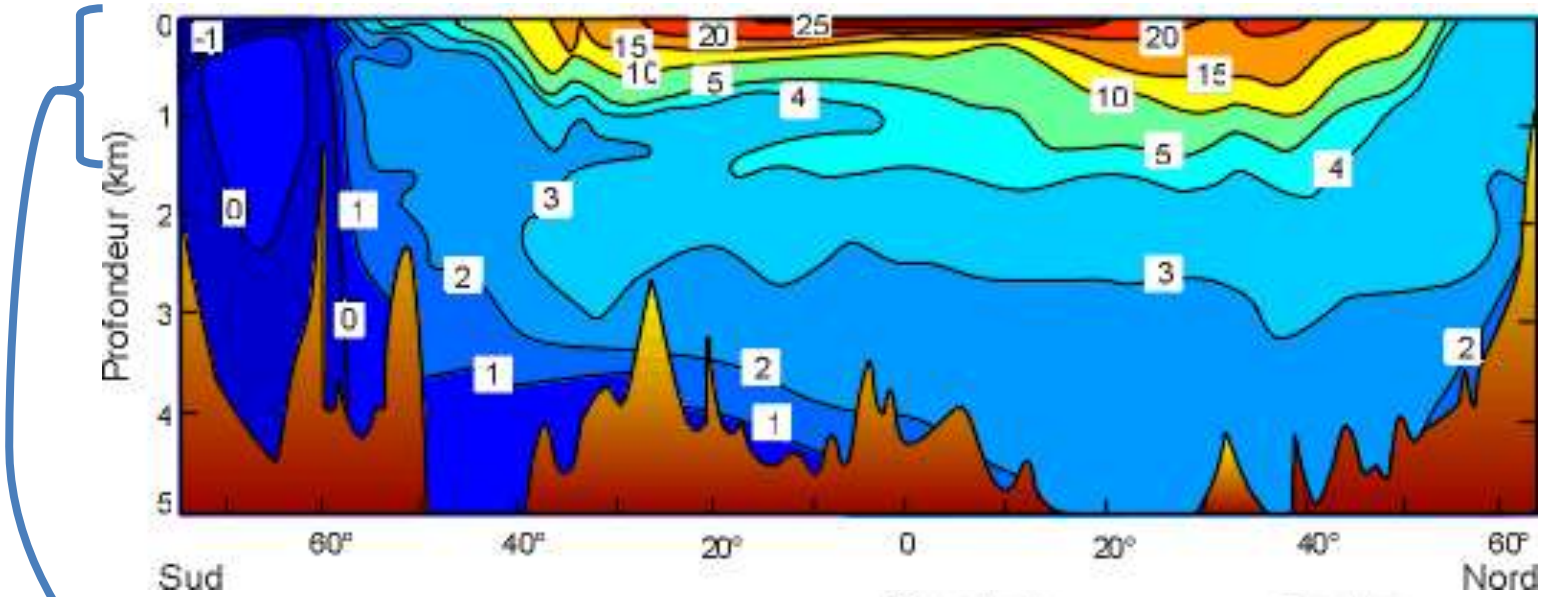


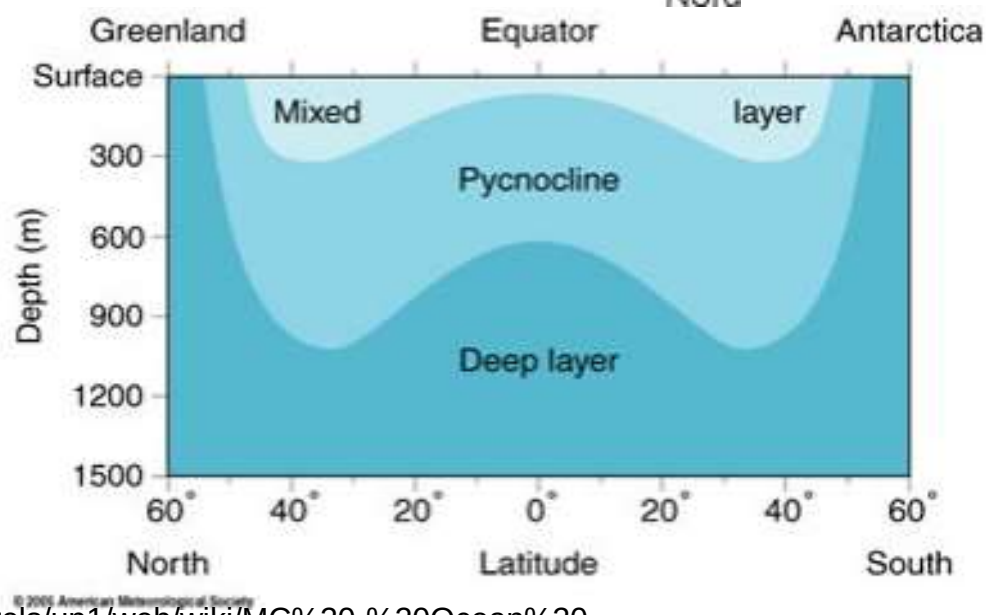


http://lecalve.univ-tln.fr/oceano/figures/fig44.htm

https://fr.wikipedia.org/wiki/Thermocline

Document 6. La stratification thermique des océans.

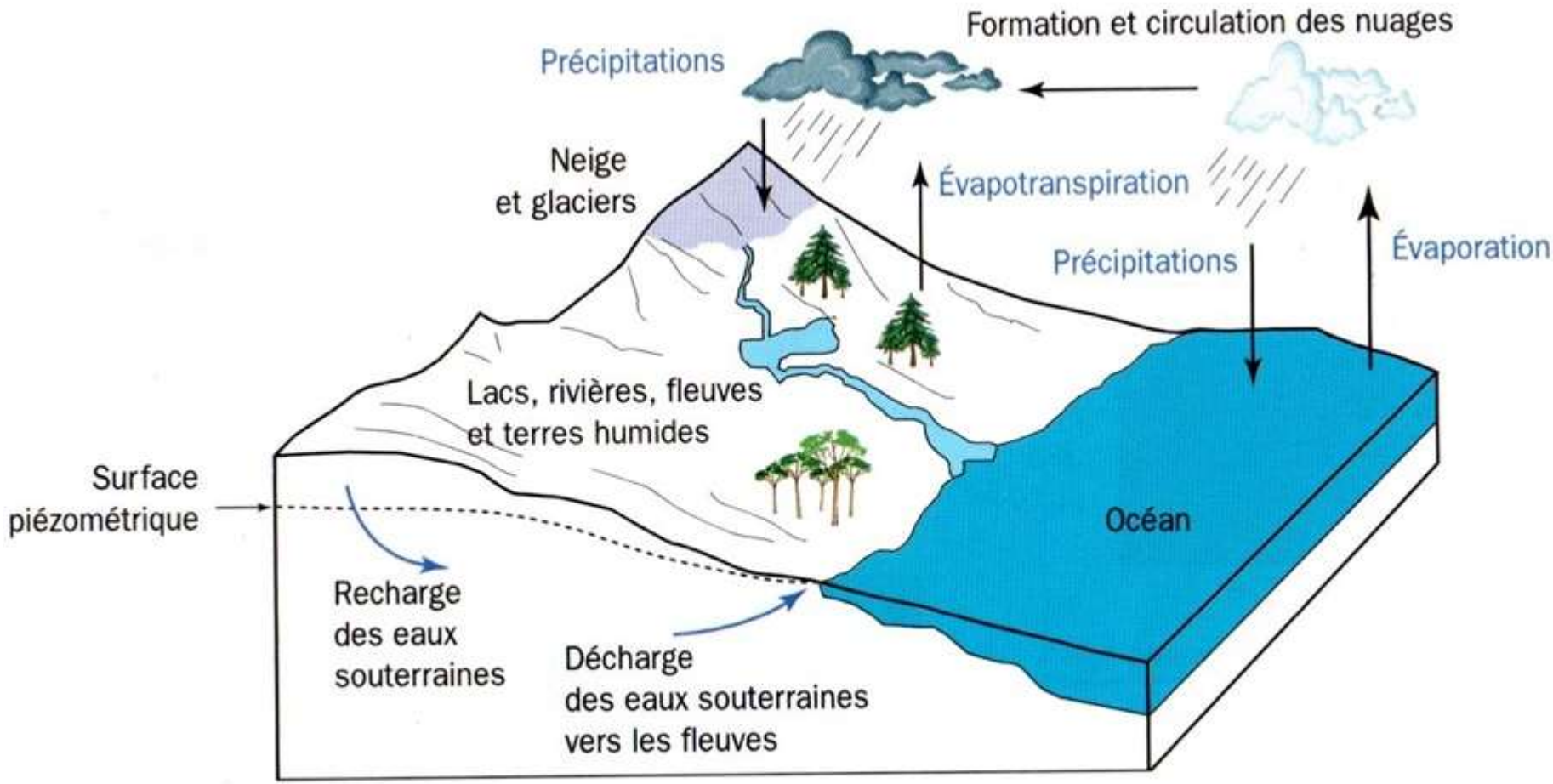




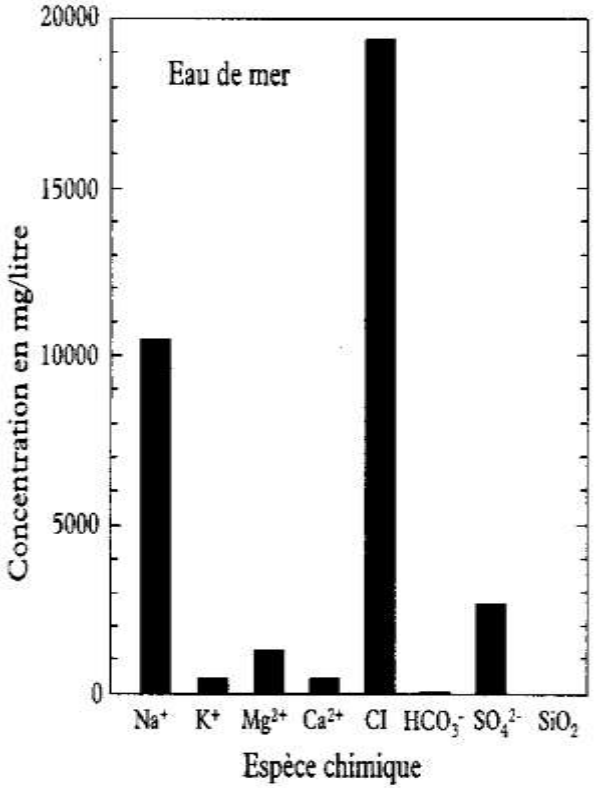
http://lecalve.univ-tln.fr/oceano/fiches/fiche4B.htm

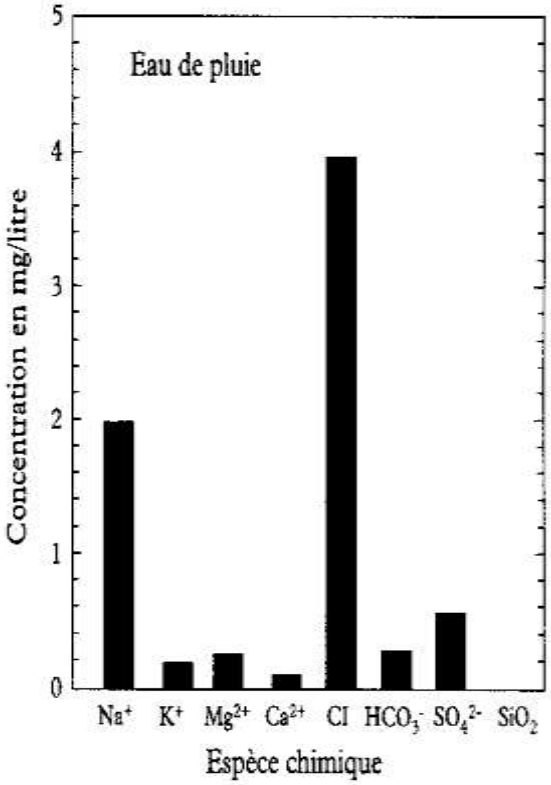
https://www.emse.fr/~bouchardon/enseignement/processus-naturels/up1/web/wiki/MC%20-%20Ocean%20-%20Circulation%20thermohaline%20-%20Belkatir%20Coutens%20&%20Rondeau.htm

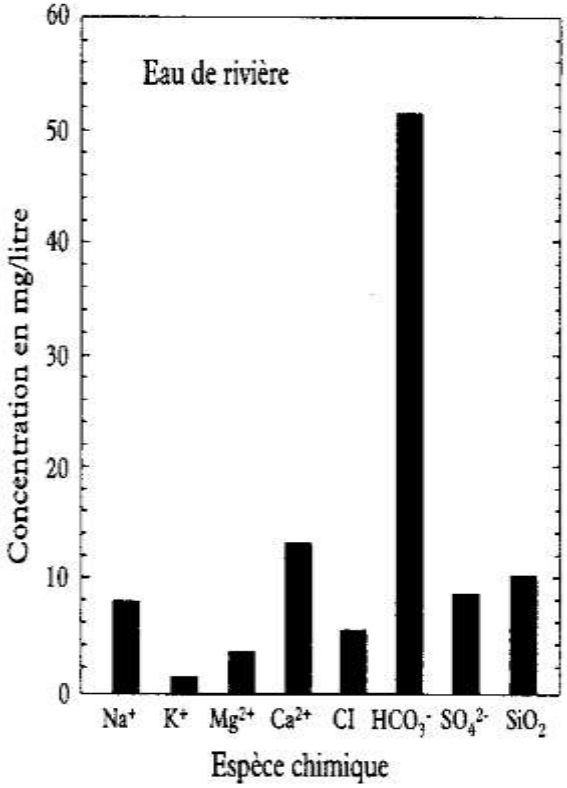
<u>Document 7.</u> Le cycle de l'eau.



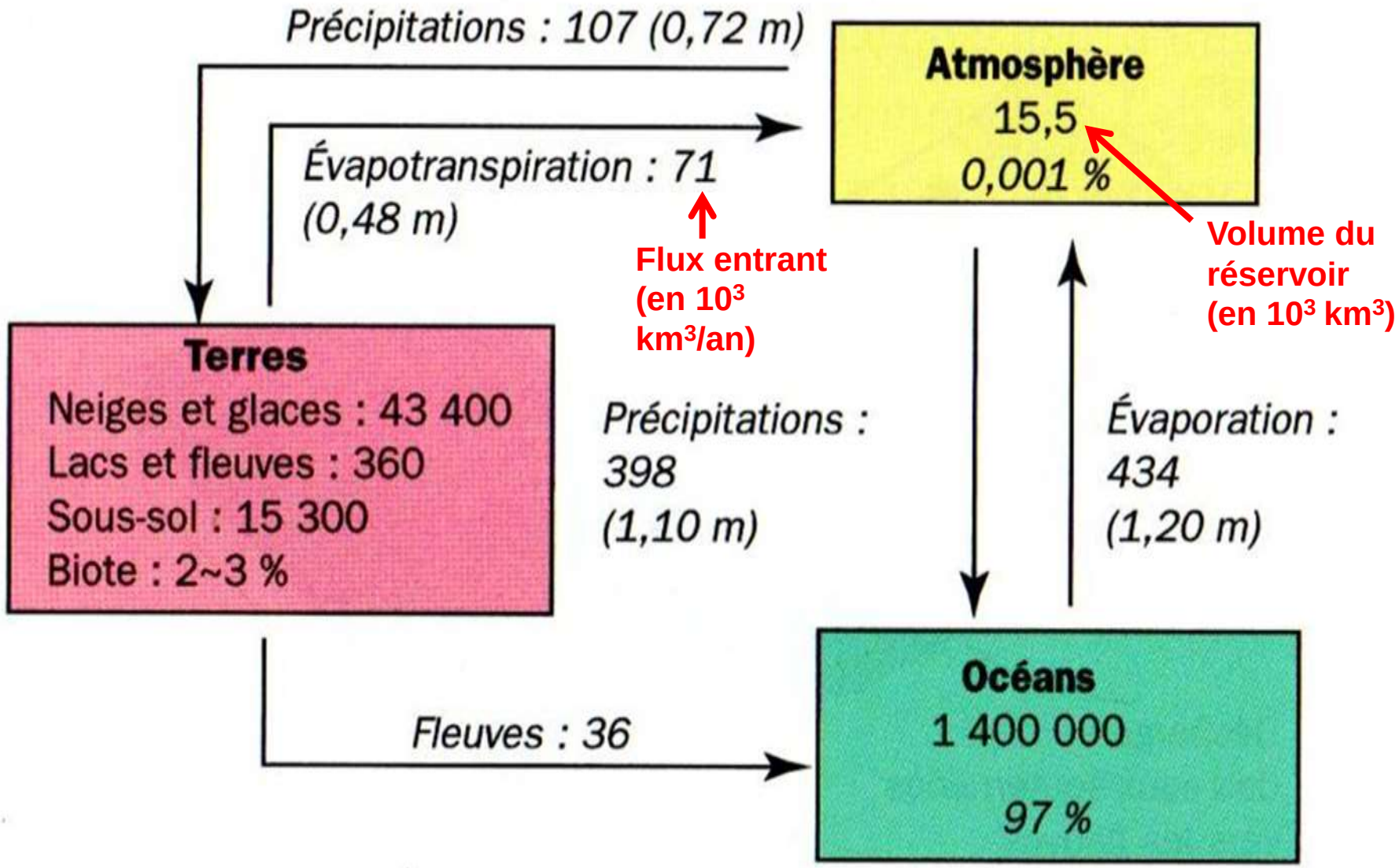
Composition chimique de différents réservoirs superficiels



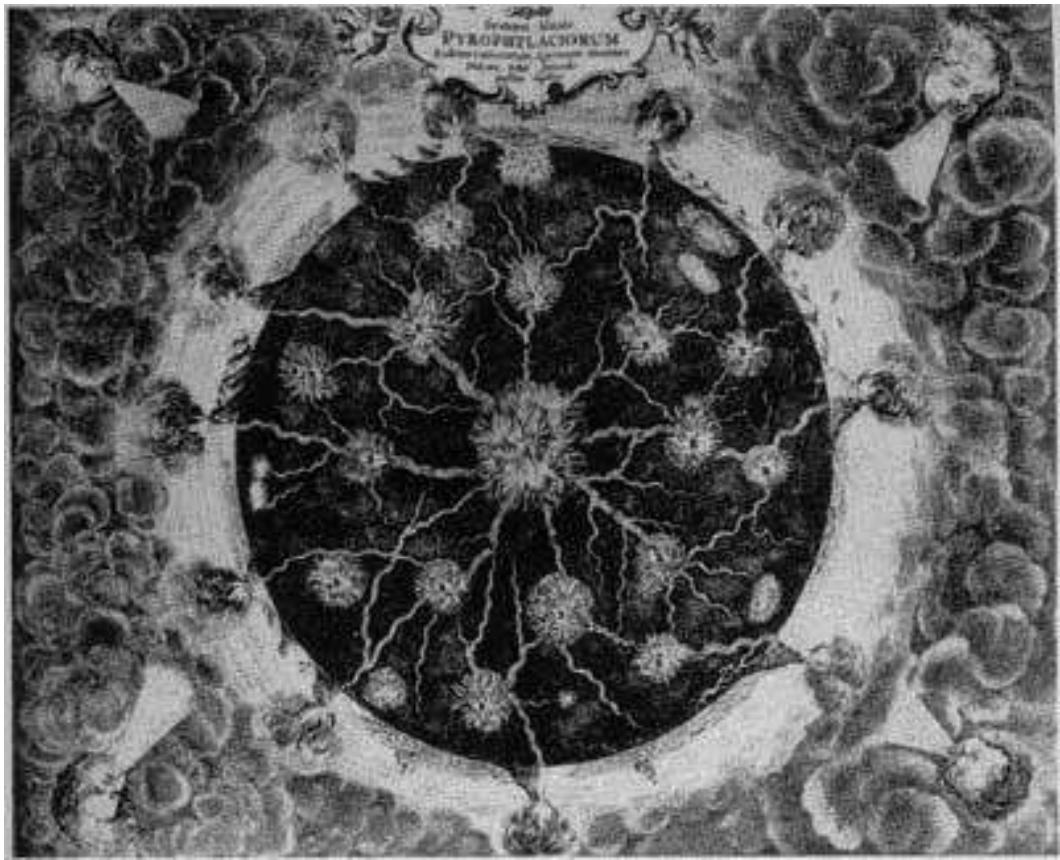




Approche quantitative : flux et temps de résidence de l'eau dans un réservoir



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



Le feu intérieur selon Kirchner (1665)

Le forage profond de Kola : de 1970 à 1989

Profondeur atteinte : 12 262 m

COMMISSION FOR THE GEOLOGICAL MAP OF THE WORLD
COMMISSION DE LA CARTE GÉOLOGIQUE DU MONDE

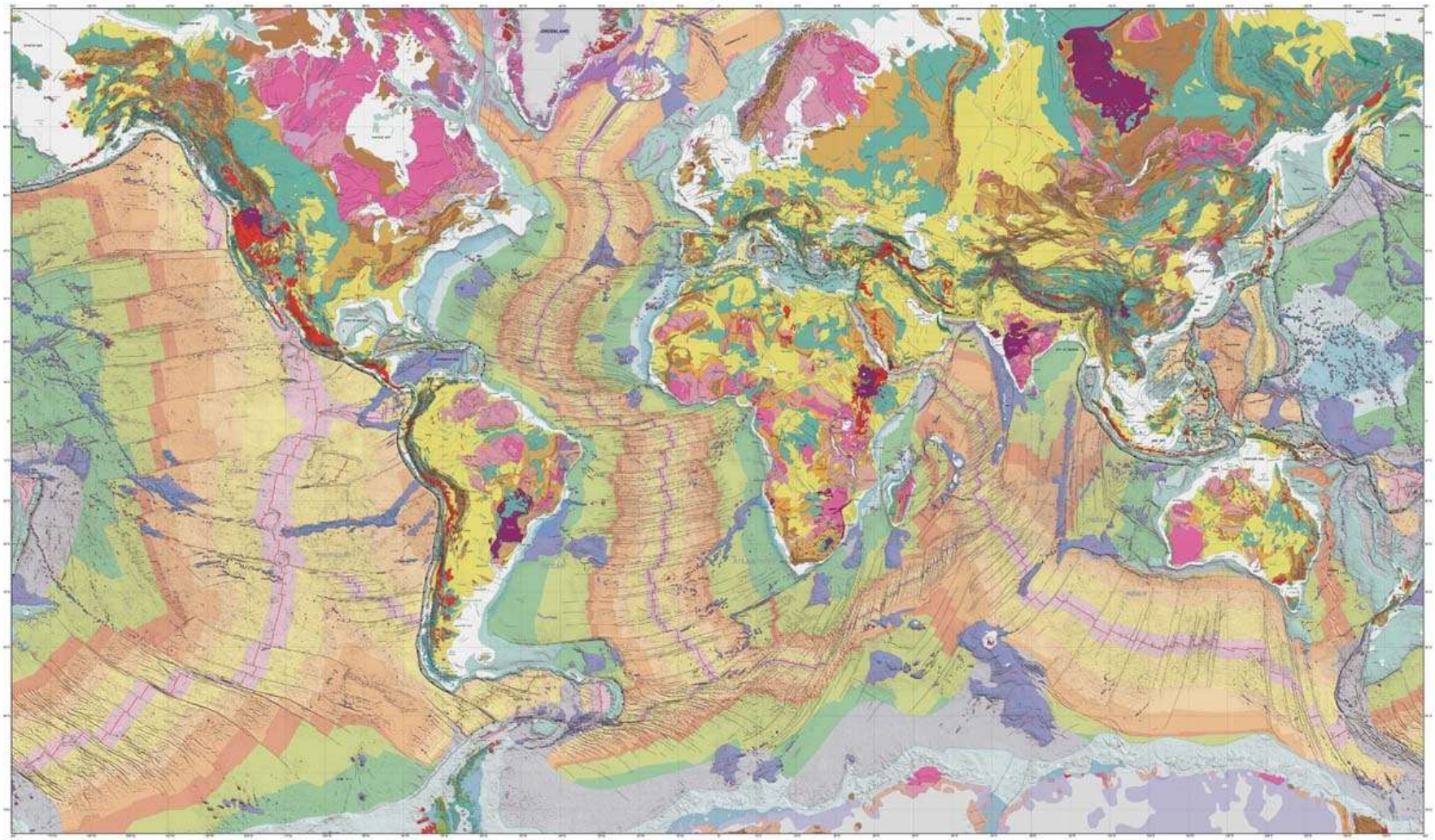
GEOLOGICAL MAP OF THE WORLD
CARTE GÉOLOGIQUE DU MONDE

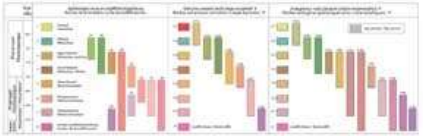
GEOLOGICAL MAP OF THE WORLD

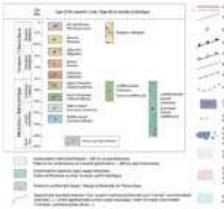
CARTE GÉOLOGIQUE DU MONDE

Philippe BOUYSSE (CGMW)

2014





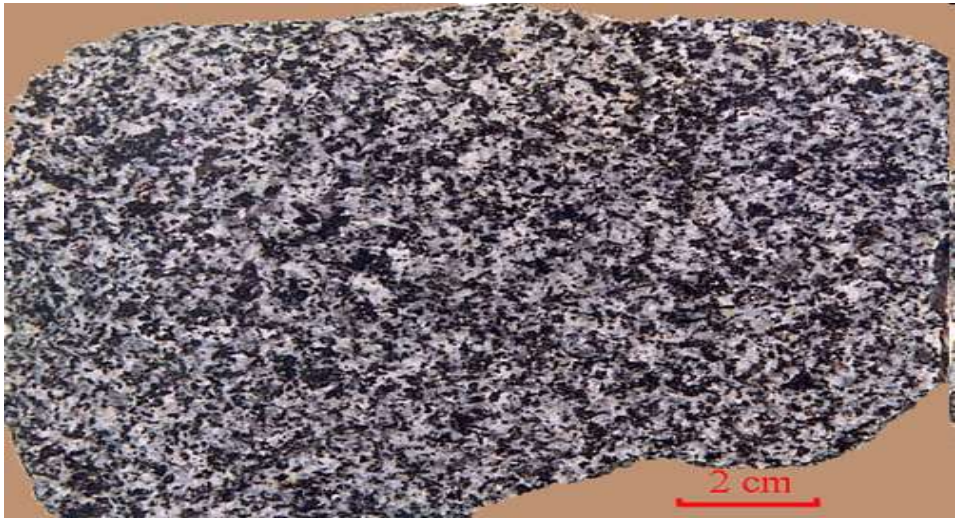


TOTAL

brgm

Roches magmatiques de la croûte continentale

Le granite



La granodiorite (haut) et l’andésite (bas)

composition chimique moyenne en % pondéraux d'oxydes (ordre de grandeur)		
	Croûte continentale *30 km en moy.*	Croûte océanique *7 km en moy.*
SiO_2	60	50
Al_2O_3	15	15
FeO	10^-	10^+
MgO	5	8
CaO	7	12
Na_2O + K_2O	> 4	< 3

<u>Document 8.</u> Composition chimique moyenne des roches échantillonnées.

Basaltes faciès pillow

Roches magmatiques de la croûte océanique

Gabbro

composition chimique moyenne en % pondéraux d'oxydes (ordre de grandeur)		
	Croûte continentale *30 km en moy.*	Croûte océanique *7 km en moy.*
SiO_2	60	50
Al_2O_3	15	15
FeO	10^-	10^+
MgO	5	8
CaO	7	12
Na_2O + K_2O	> 4	< 3

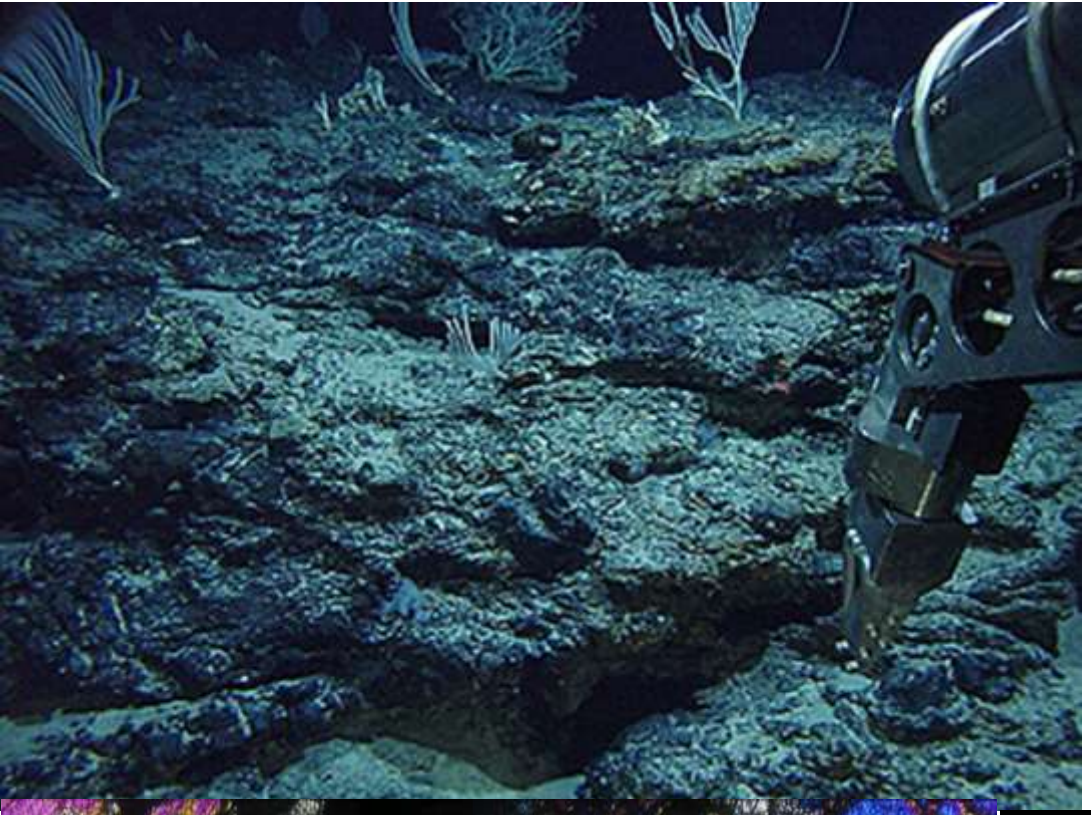
<u>Document 8.</u> Composition chimique moyenne des roches échantillonnées.

L'ophiolite d'Oman

En **Oman**, cet "échantillon" fait plus de 500 km de long, 50 km de large en moyenne, et jusqu'à 15 km d'épaisseur.

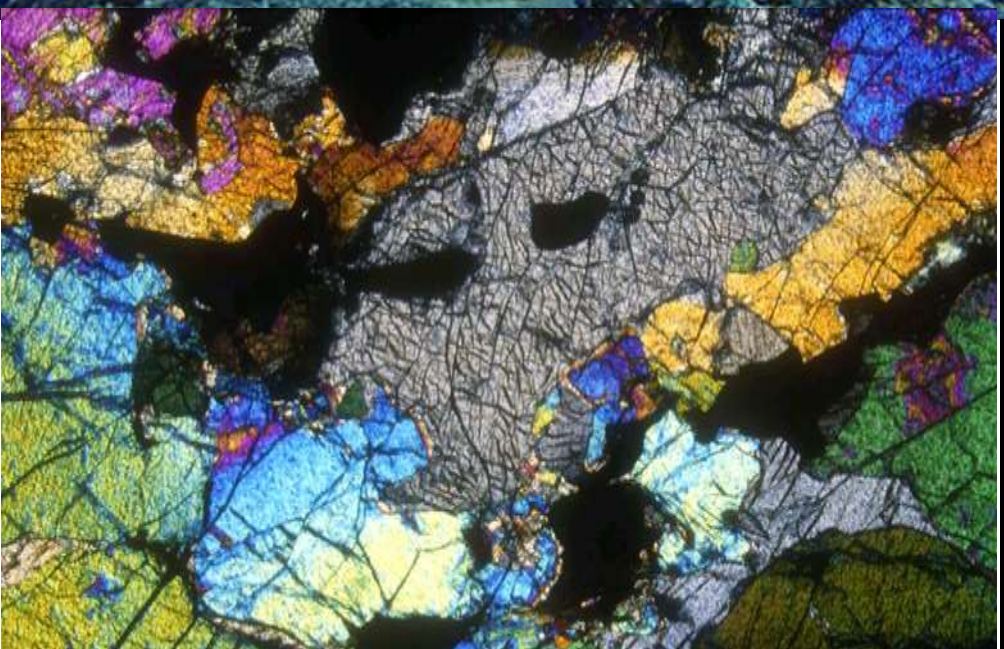
www.dstu.univ-montp2.fr/.../1_situ.gif
www.geol.ucsb.edu/.../OmanOphiolite.jpg

Péridotites de l'ophiolite
d'Oman



Echantillons du manteau terrestre :

- plancher océanique
- en enclave dans du basalte
- en lame mince (x 40)

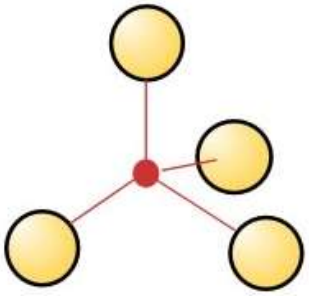


composition chimique moyenne en % pondéraux d'oxydes (ordre de grandeur)	
	Moyenne des péridotites échantillonnées
SiO_2	45
Al_2O_3	3
FeO	7
MgO	40
CaO + Na_2O + K_2O	5

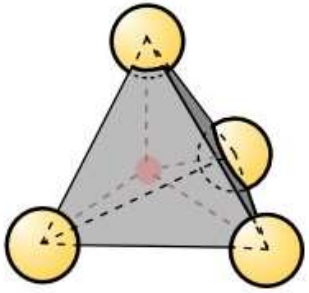
<u>Document 8.</u> Composition chimique moyenne des roches échantillonnées.

Par rapport aux roches crustales, les péridotites sont riches en fer et magnésium et pauvres en silice.

Les minéraux silicatés

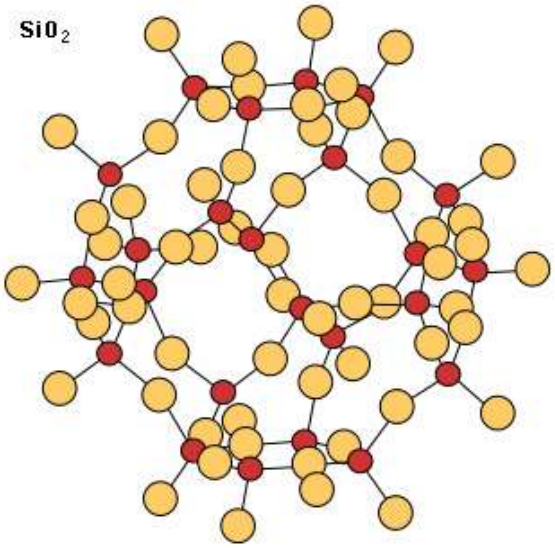


Structure de base des silicates

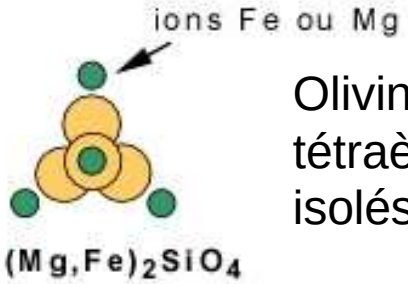


Le tétraèdre de base

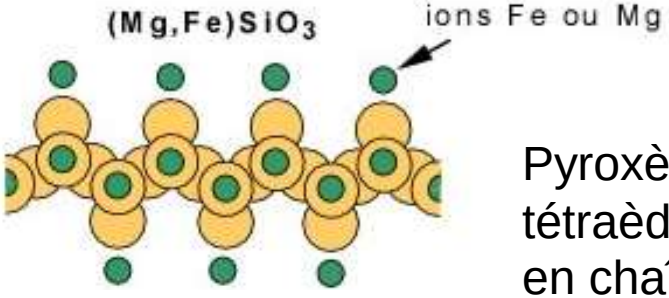
MINÉRAL		FORMULE CHIMIQUE IDÉALISÉE	CLIVAGE	RÉSEAU CRISTALLIN
Olivine		$(Mg,Fe)_2SiO_4$	Aucun	Tétraèdre isolé (B)
Groupe des **pyroxènes**		$(Mg,Fe)SiO_3$	2 plans à angle droit	Chaîne simple (C)
Groupe des **amphiboles**		$(Mg,Fe)_7Si_8O_{22}(OH)_2$	2 plans (60° et 120°)	Chaîne double (D)
Micas	Muscovite	$KAl_2(AlSi_3O_{10}(OH)_2$	1 plan	Couche planaire (E)
	Biotite	$K(Mg,Fe)_3Si_3O_{10}(OH)_2$		
Feldspath	Orthoclase	$KAlSi_3O_8$	2 plans à 90°	Réseau en 3 dimensions
	Plagioclase	$(Ca,Na)AlSi_3O_8$		
Quartz		SiO_2	Aucun	



Quartz : tétraèdres associés en réseau 3D



Olivine : tétraèdres isolés

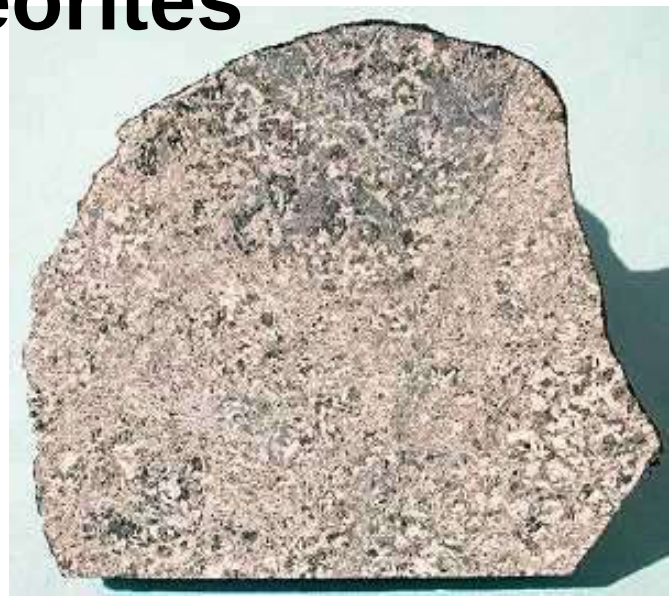


Pyroxènes : tétraèdres associés en chaîne simple

https://coursgeologie.com/les-principaux-mineraux-constitutifs-de-l-ecorce-terrestre-87/

Les météorites

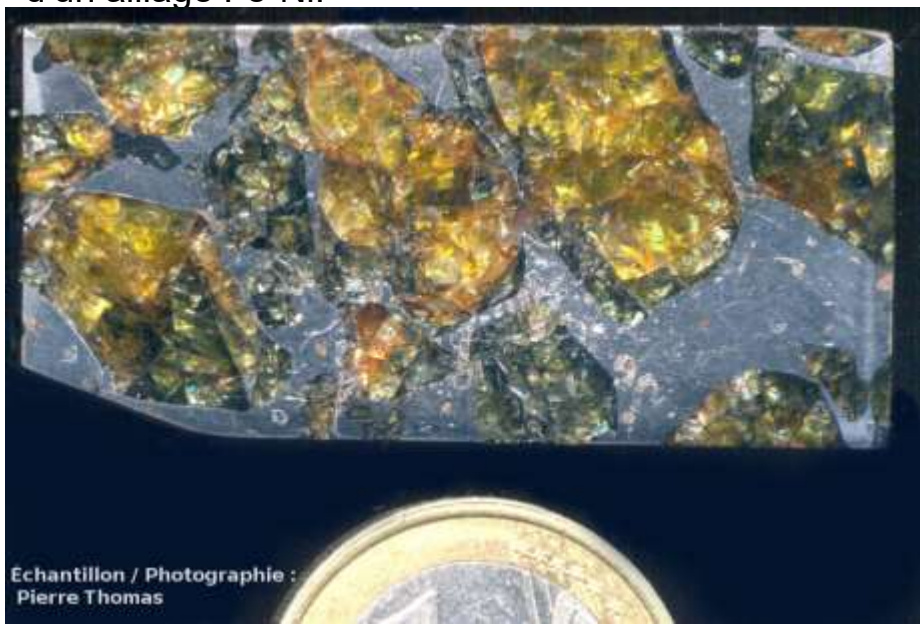
Chondrite
« péridotites ferreuses »
Ol, Px et Fe

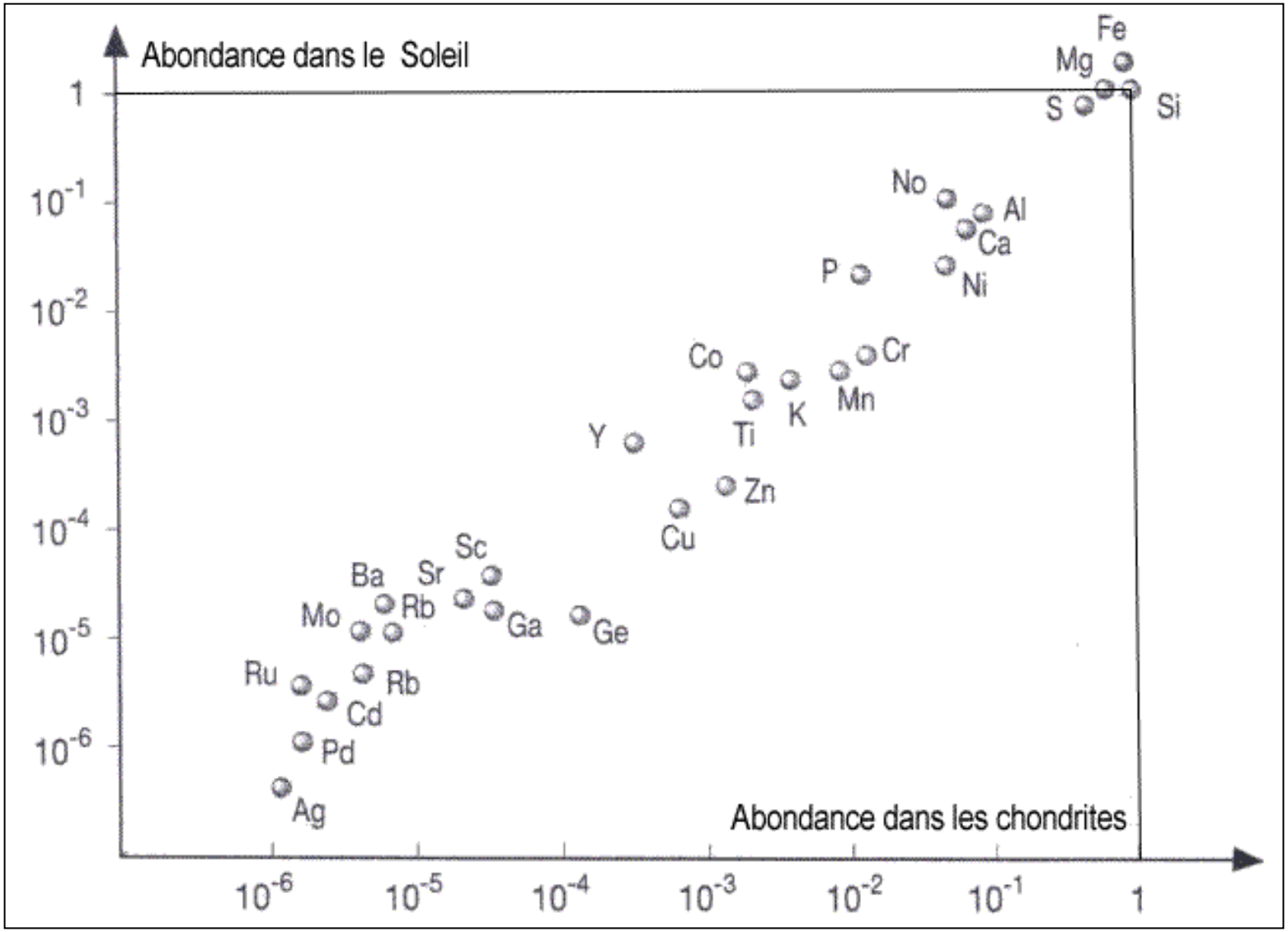


Achondrite
riche en plagioclases (clairs) et en pyroxènes (sombres)

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

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





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)

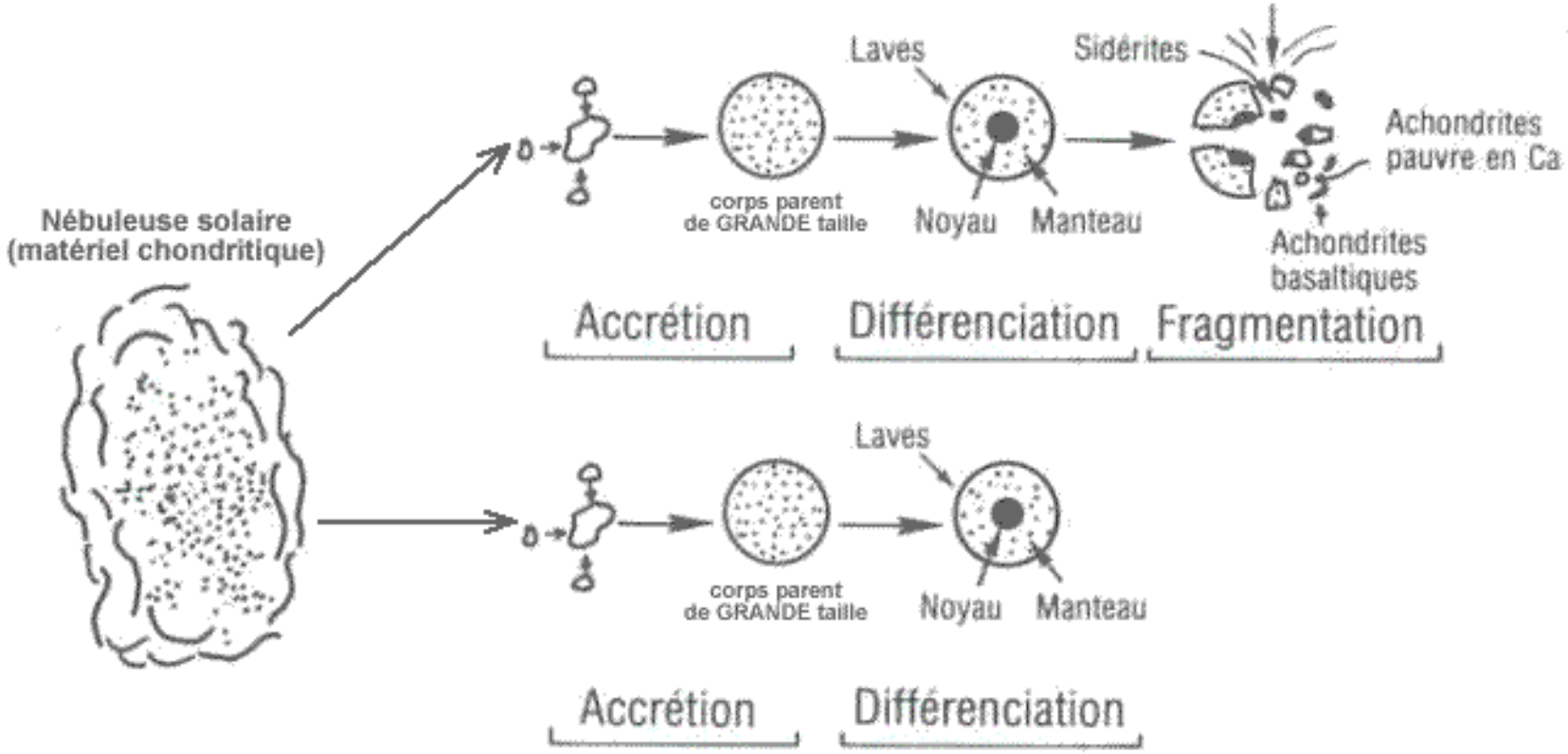
Proportions étudiées	Terre globale	Hydrosphère + atmosphère	Croûte continentale	Croûte océanique	Manteau	Noyau	Chondrite	Achondrite	Sidérite
% de la masse de la Terre	100	0.02	0.7	0.3	74	25	-	-	-
% d'O	30	88	49	44	39	?	31	49	0.7
% de Si	17	-	28	22	23	?	18.5	27	-
% d'Al	1	-	8	7	1.3	-	2	4.8	-
% de Ca	1.1	-	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

<u>Document 9.</u> Composition chimique de la Terre globale, de ses enveloppes et de météorites.

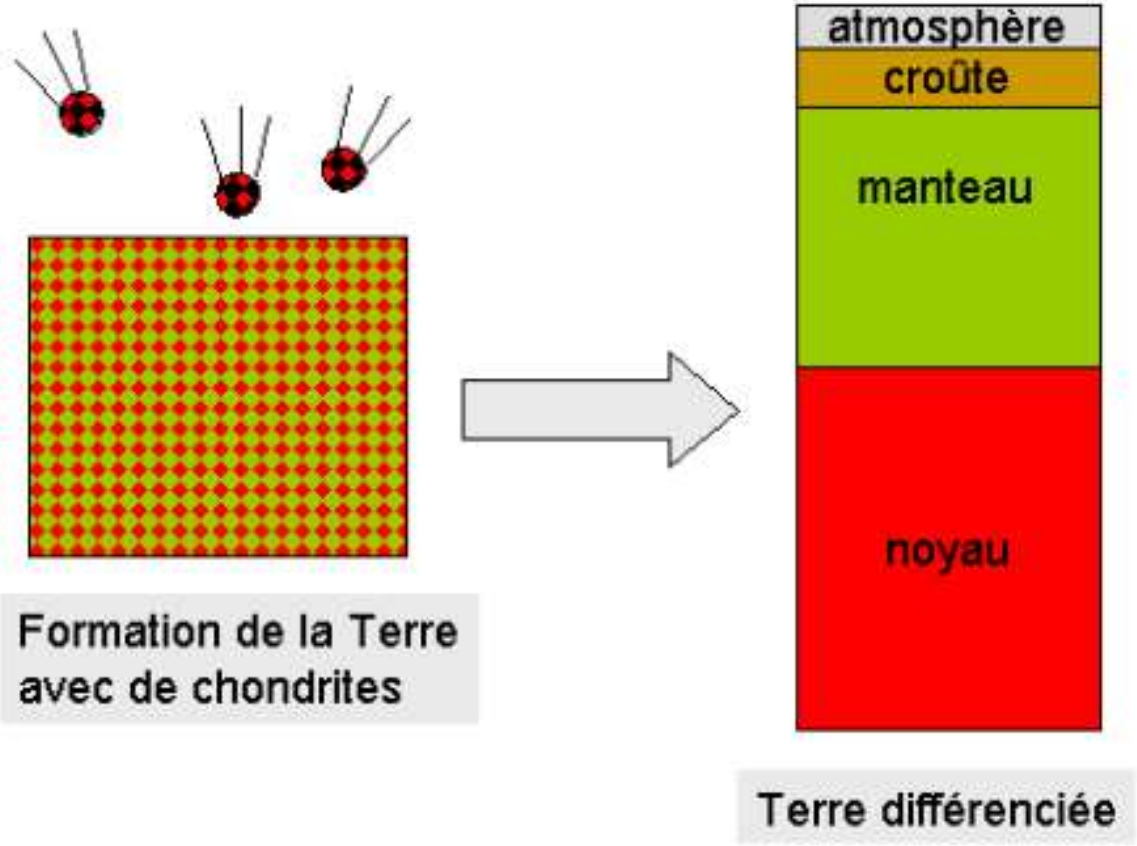
La Terre globale correspond à l'ensemble des enveloppes solides et fluides qui constituent la planète. Les éléments indiqués sont présents sous forme d'oxydes dans les minéraux.

(SVT 1°S, Nathan).

La formation des météorites

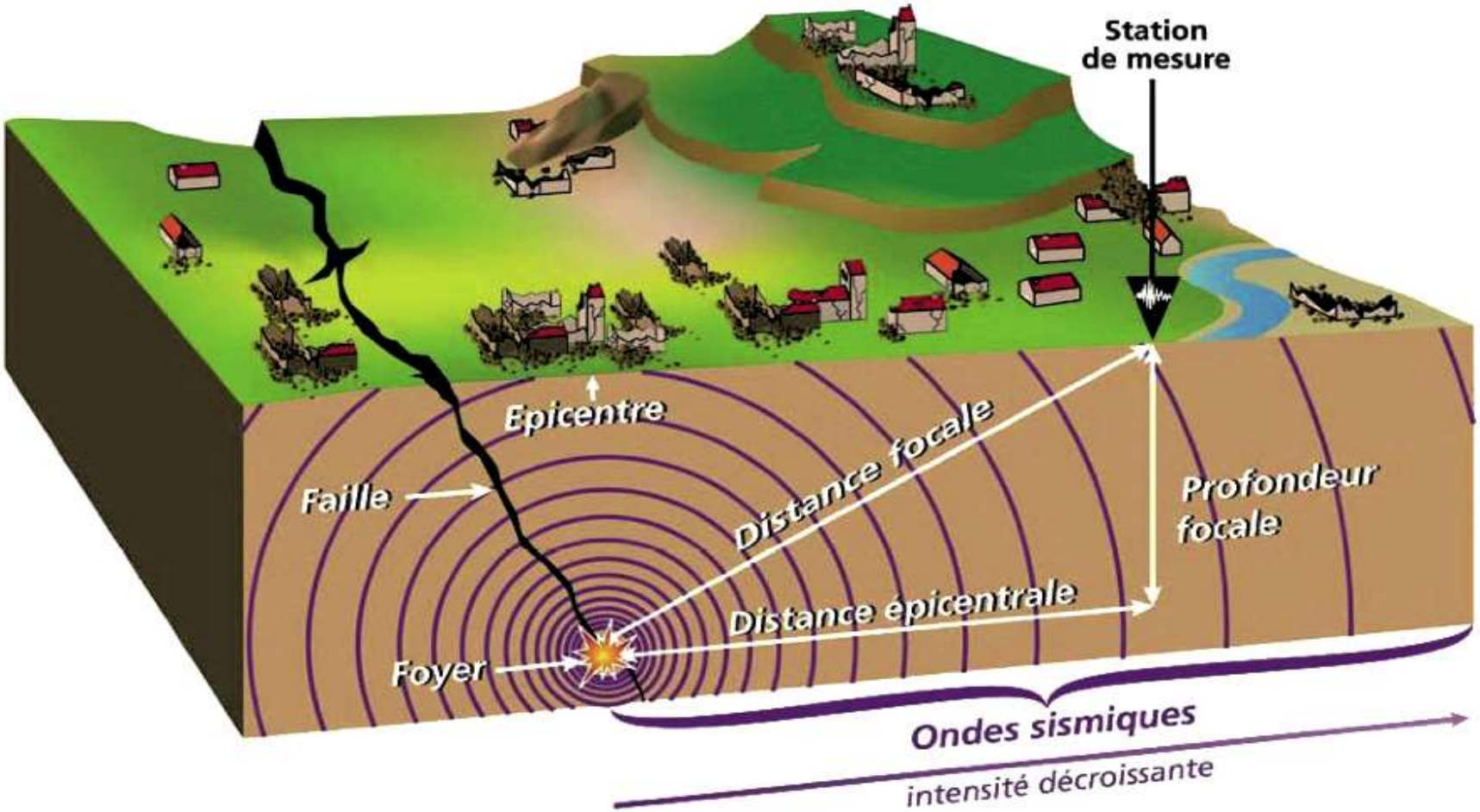


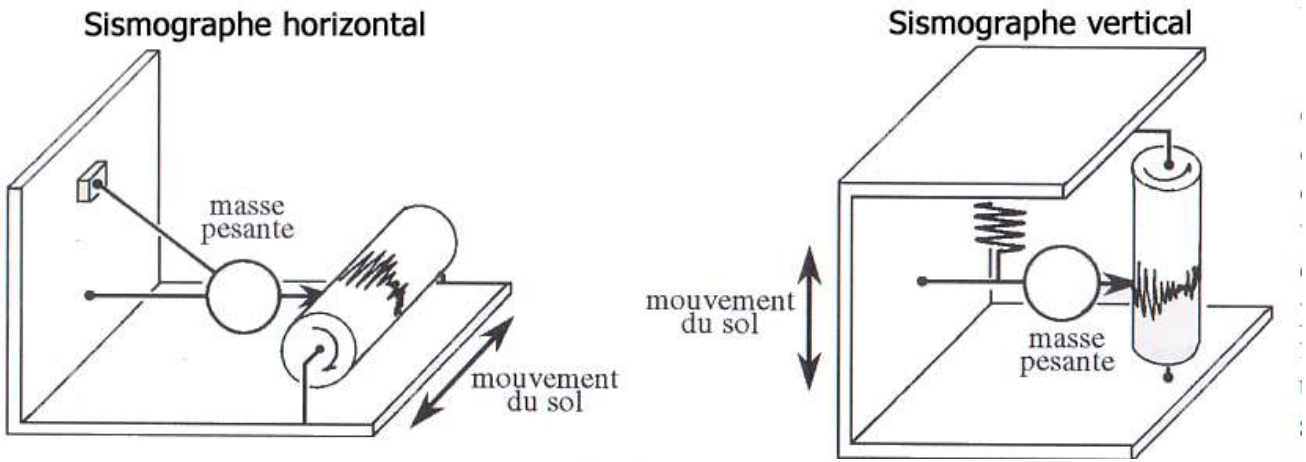
<u>Document 10</u>. La formation de la planète Terre



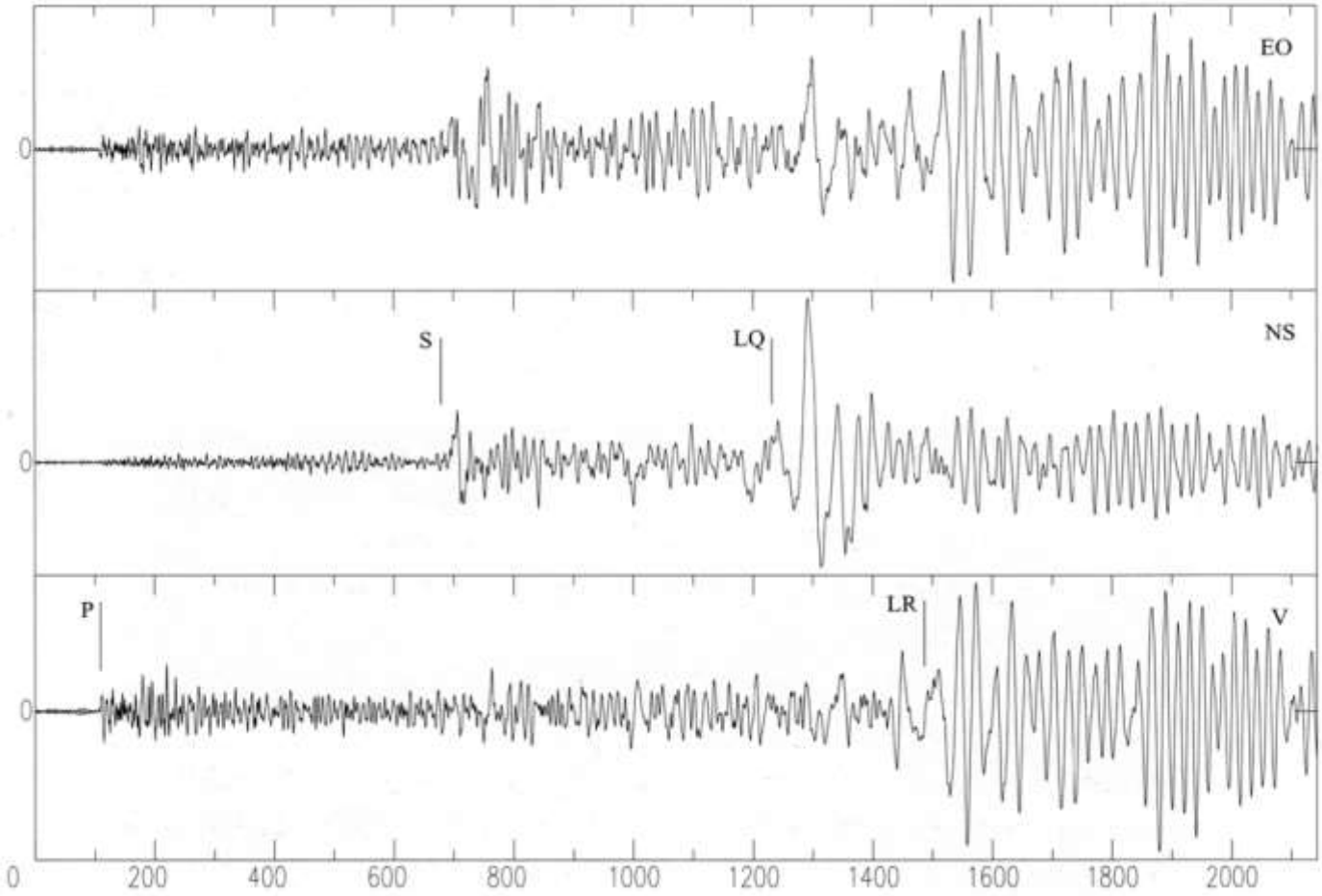
https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/paf-2005-manteau-gillet-conf.xml

Les séismes

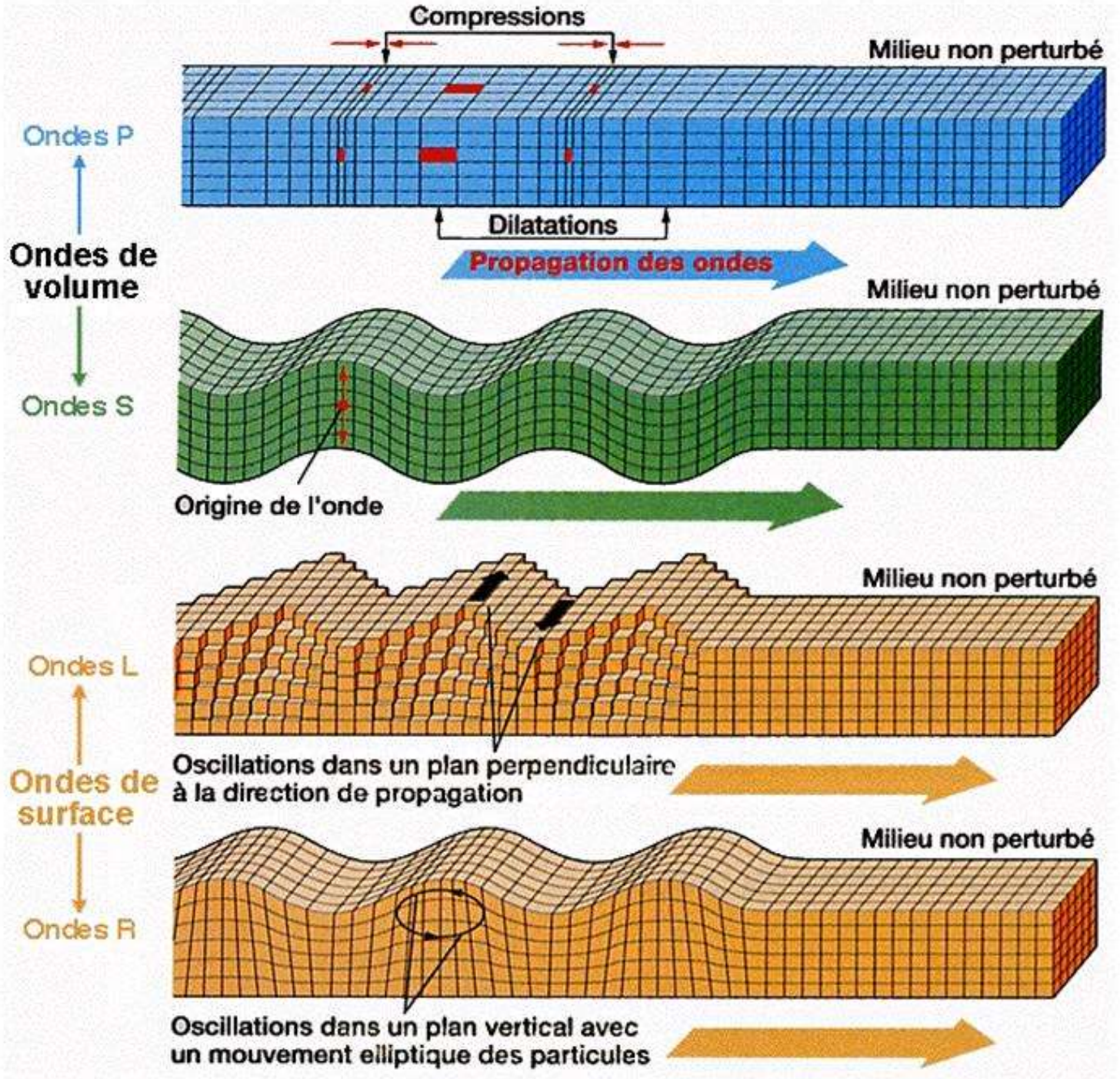

Station
de mesure
Epicentre
Faille
Distance focale
Profondeur
focale
Distance épicentrale
Foyer
Ondes sismiques
intensité décroissante

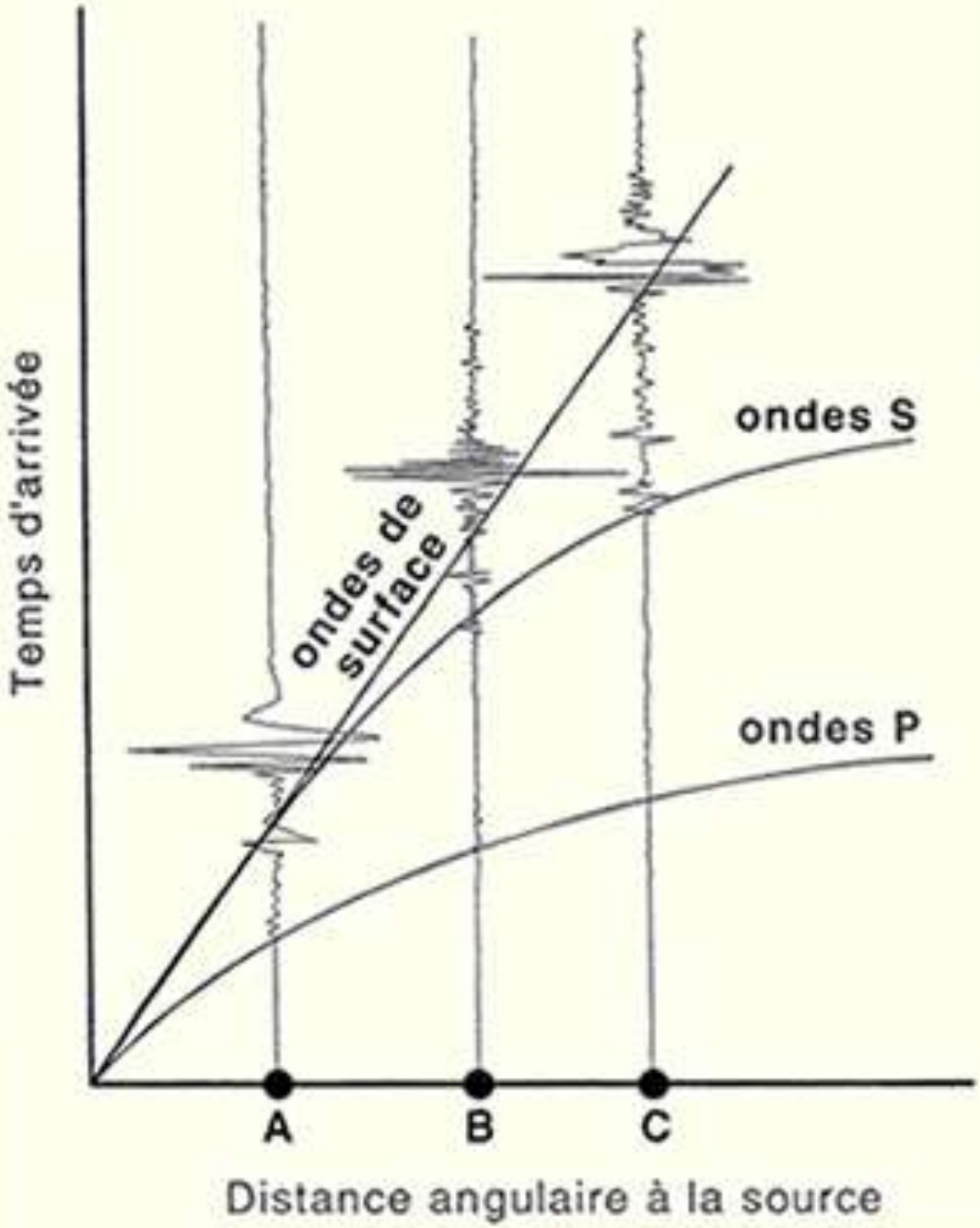


Sismographes et 3 sismogrammes d'un même séisme.



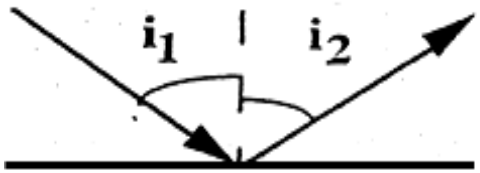
Document 11. Les différents types d'ondes sismiques.





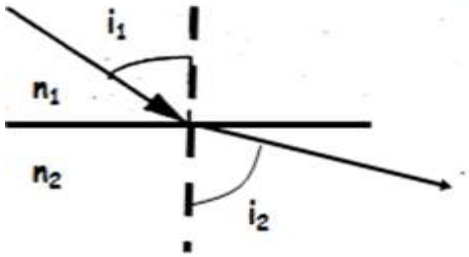
<u>Document 12.</u>
Courbes hodochrones.

REFLEXION



$$i_1 = i_2$$

REFRACTION



$$n_1 . \sin i_1 = n_2 . \sin i_2$$

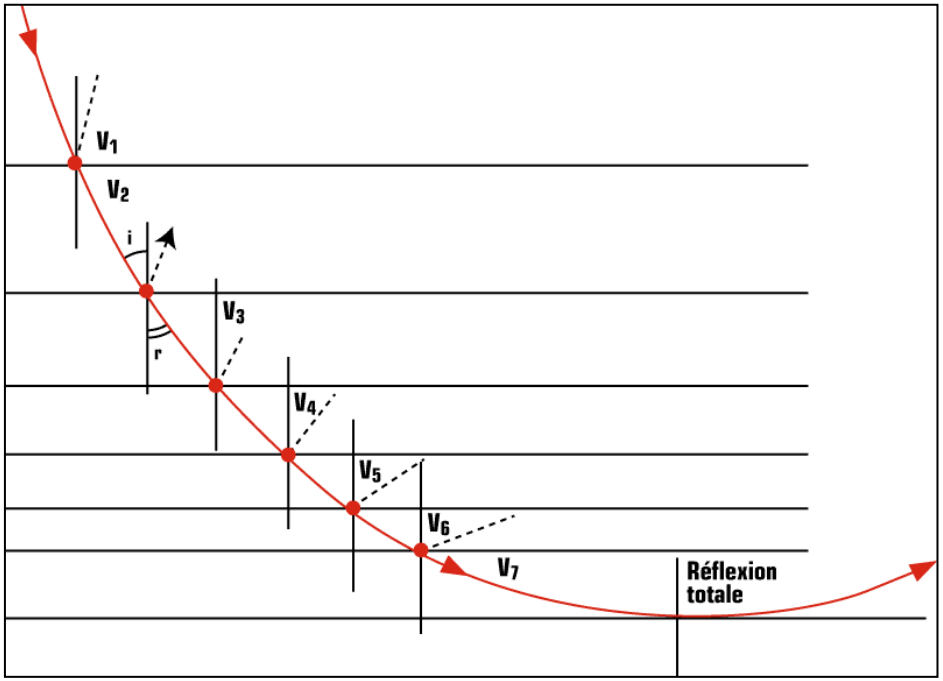
OR

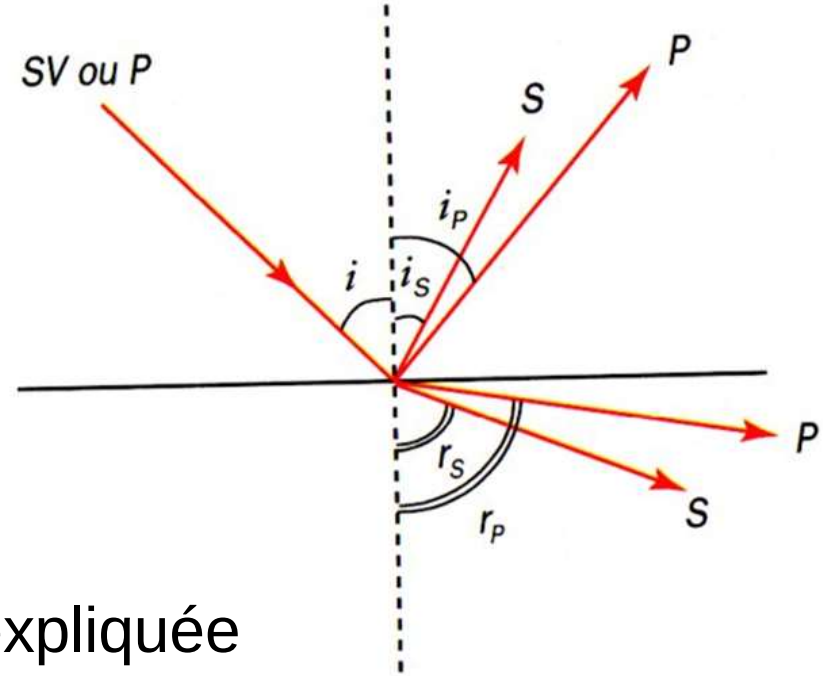
$$v = 1/n$$

donc

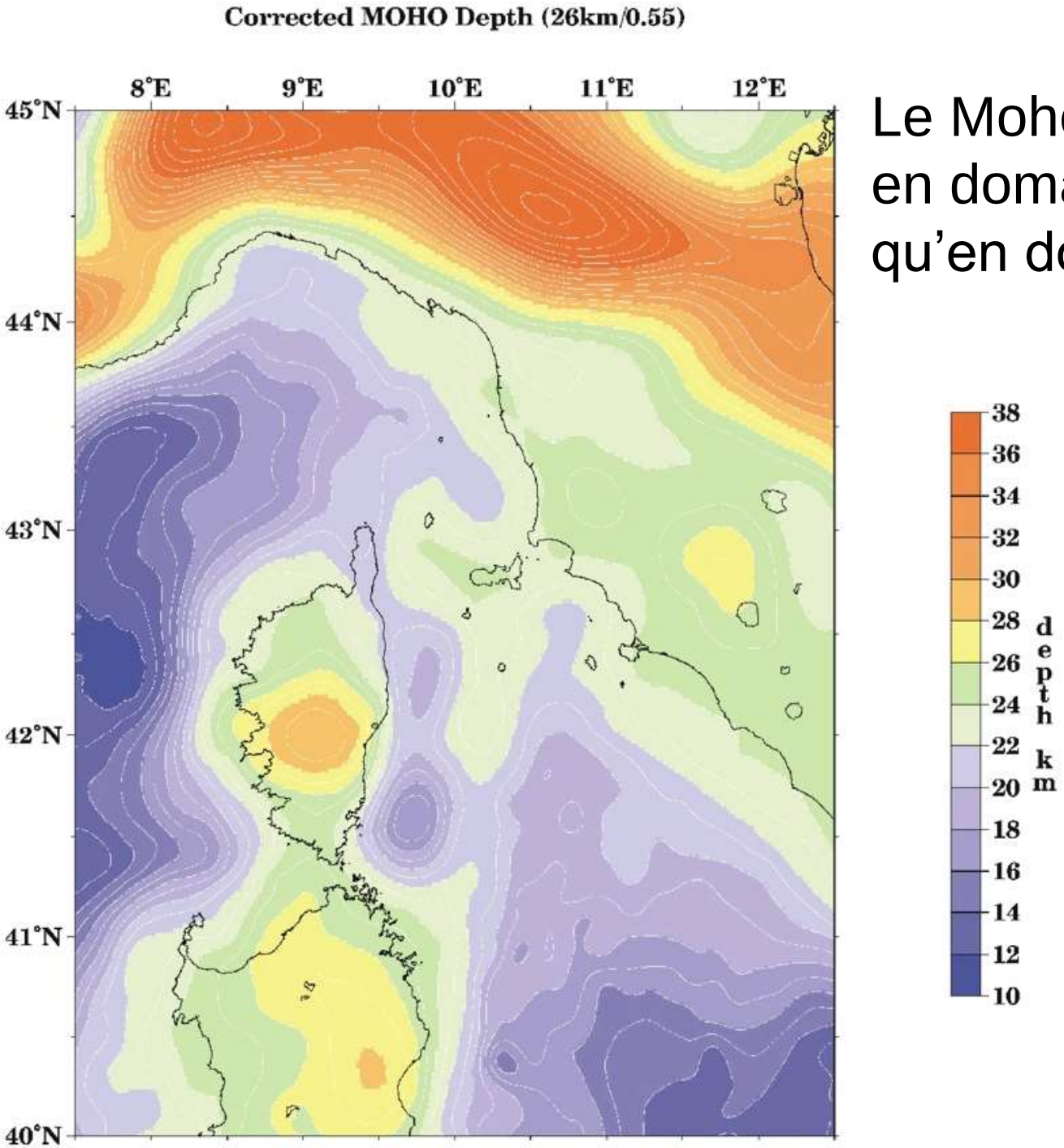
$$v_2 . \sin i_1 = v_1 . \sin i_2$$

Notion de rai sismique

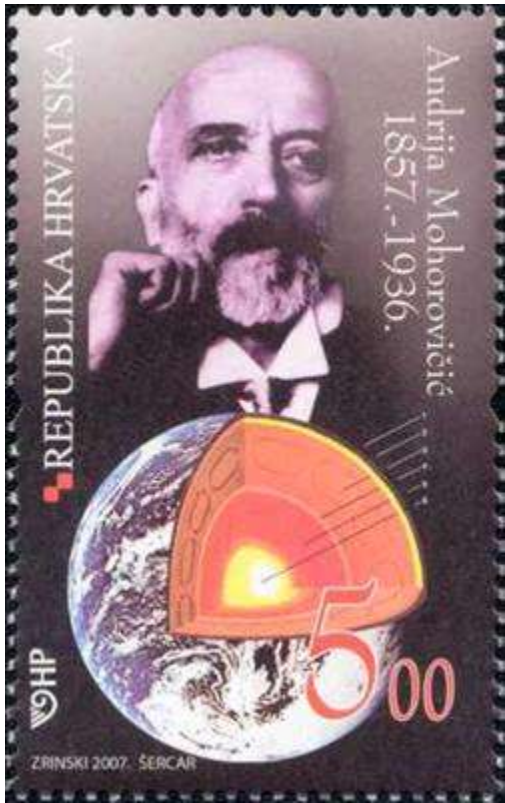




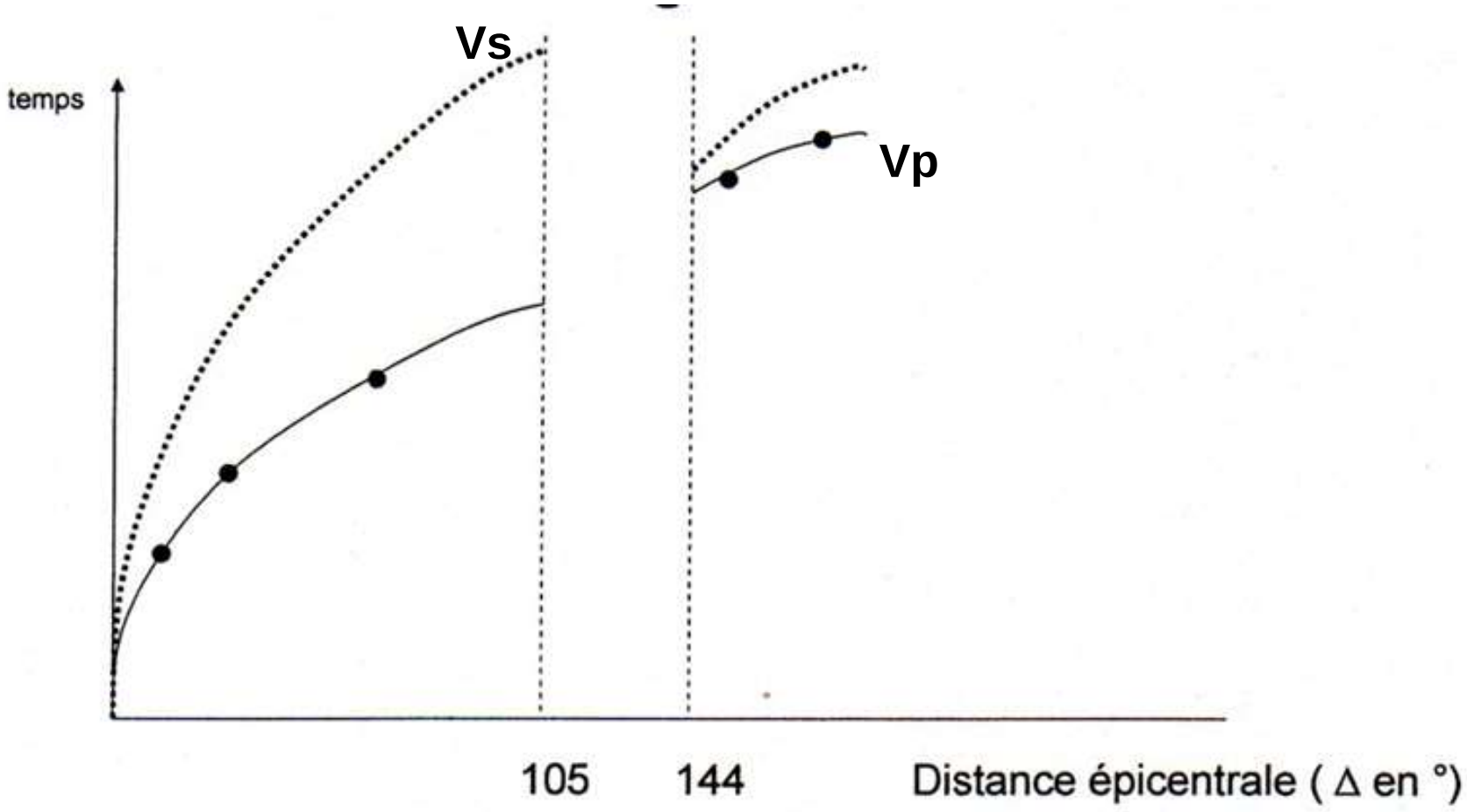
La « courbure » des rais sismiques expliquée

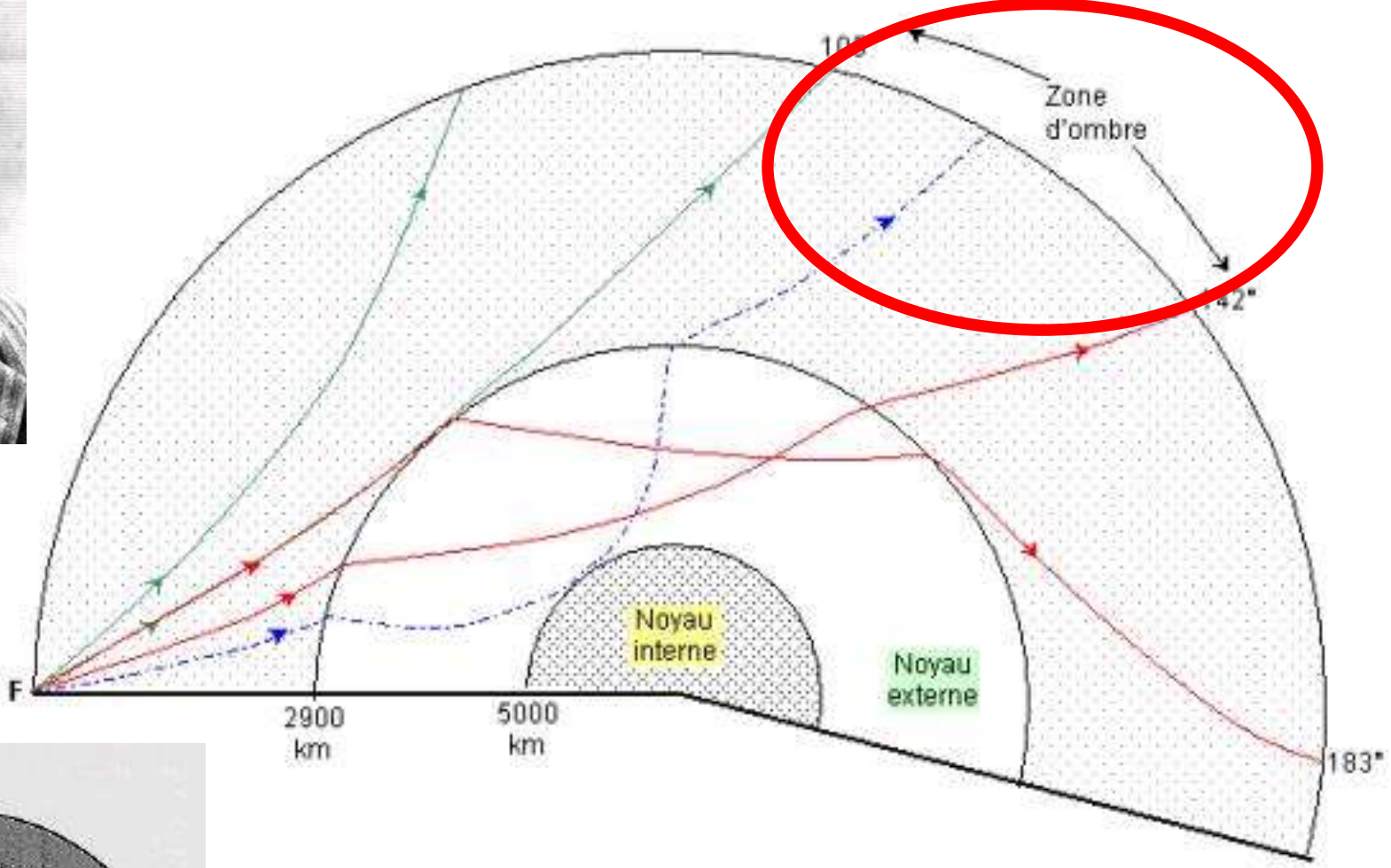


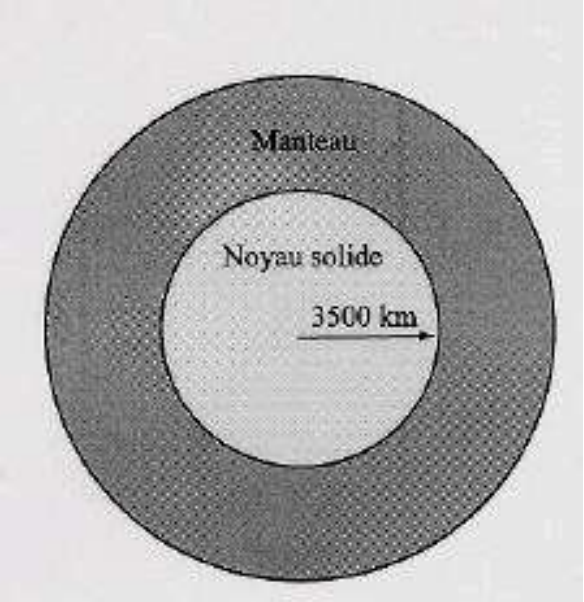
Le Moho est plus profond en domaine continental qu'en domaine marin



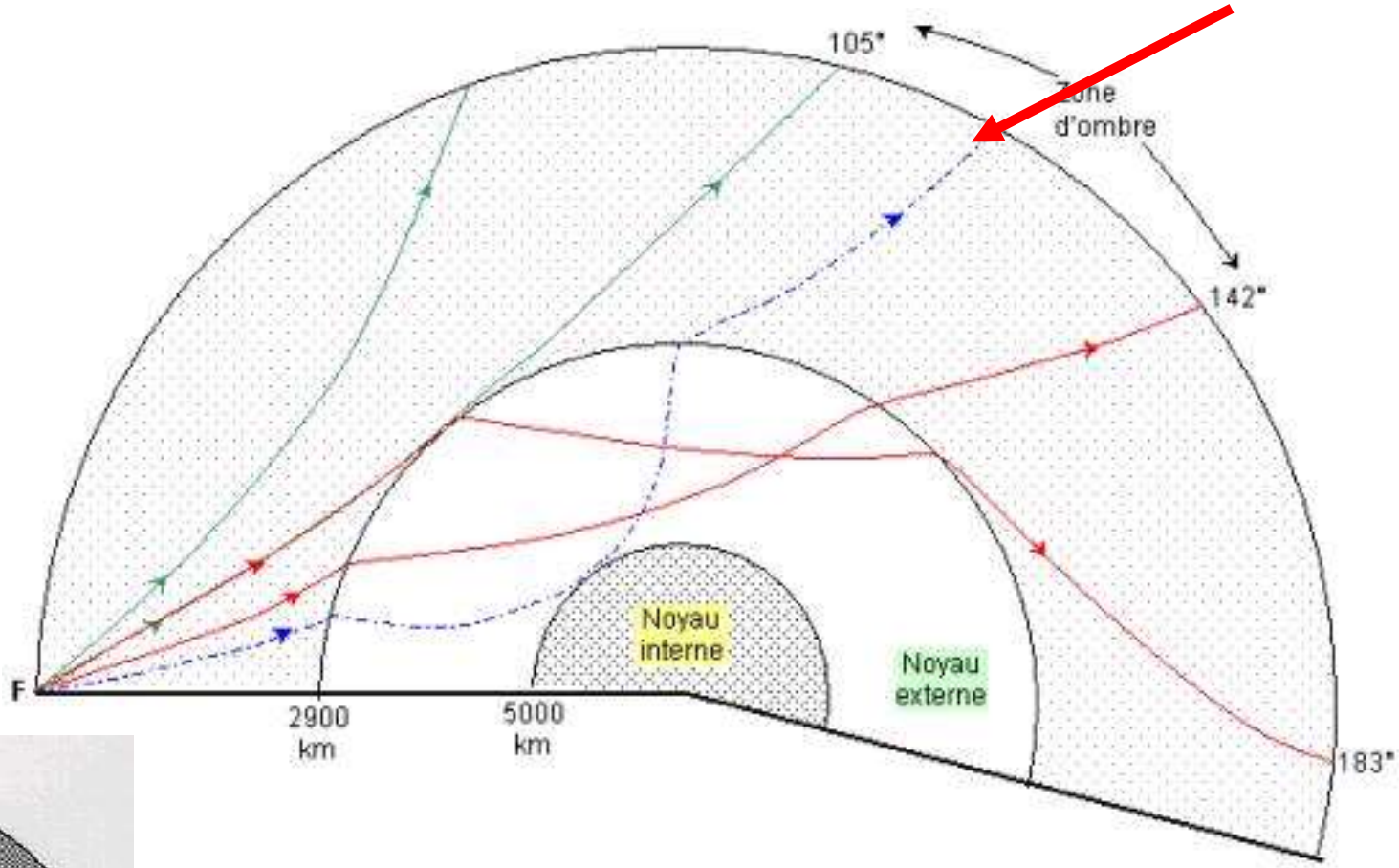
Mise en évidence de la discontinuité noyau/manteau à partir des données de vitesse des ondes de volume

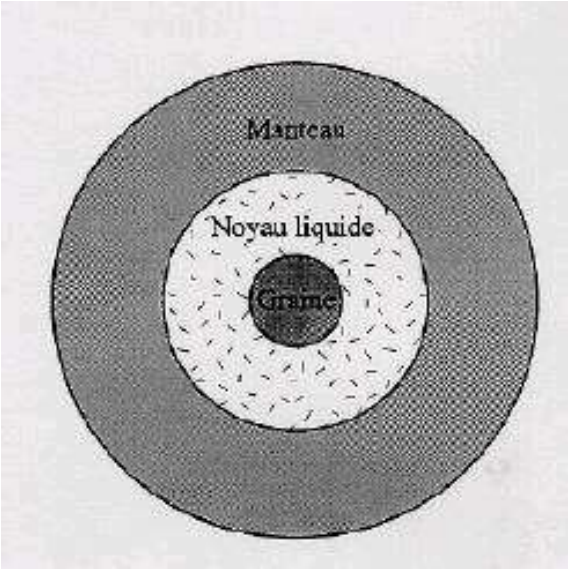






<u>Document 13.</u> La discontinuité noyau/manteau : discontinuité de Gutenberg





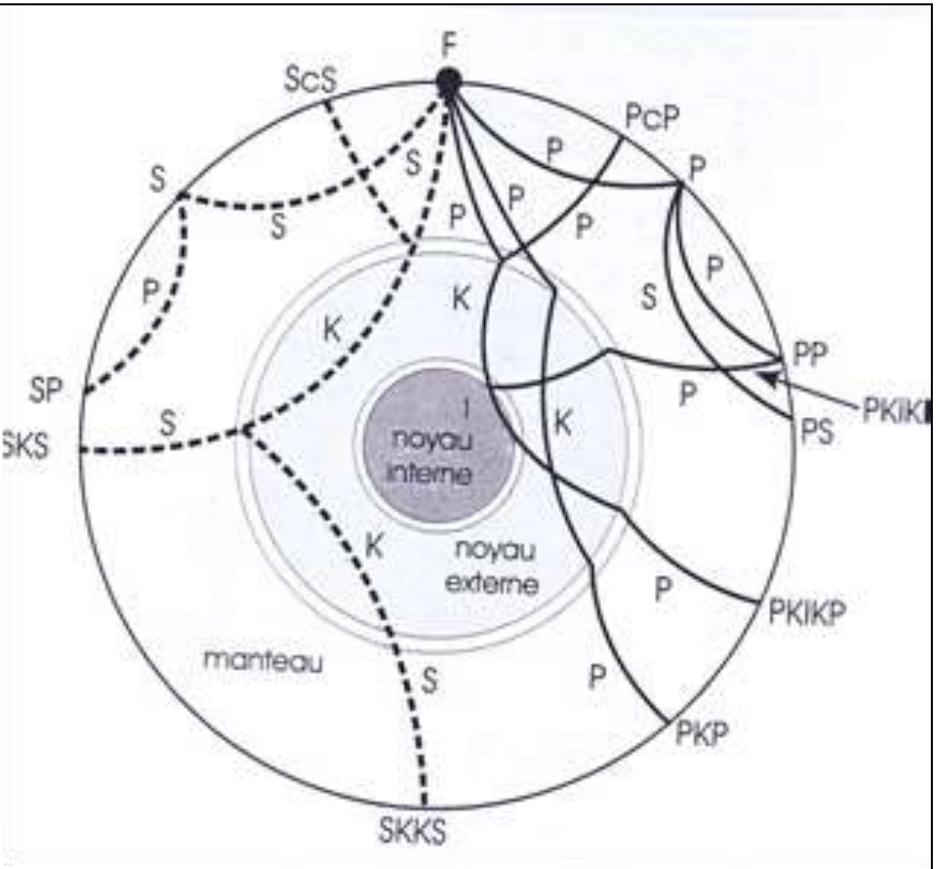
La discontinuité noyau externe/graine : discontinuité de Lehmann

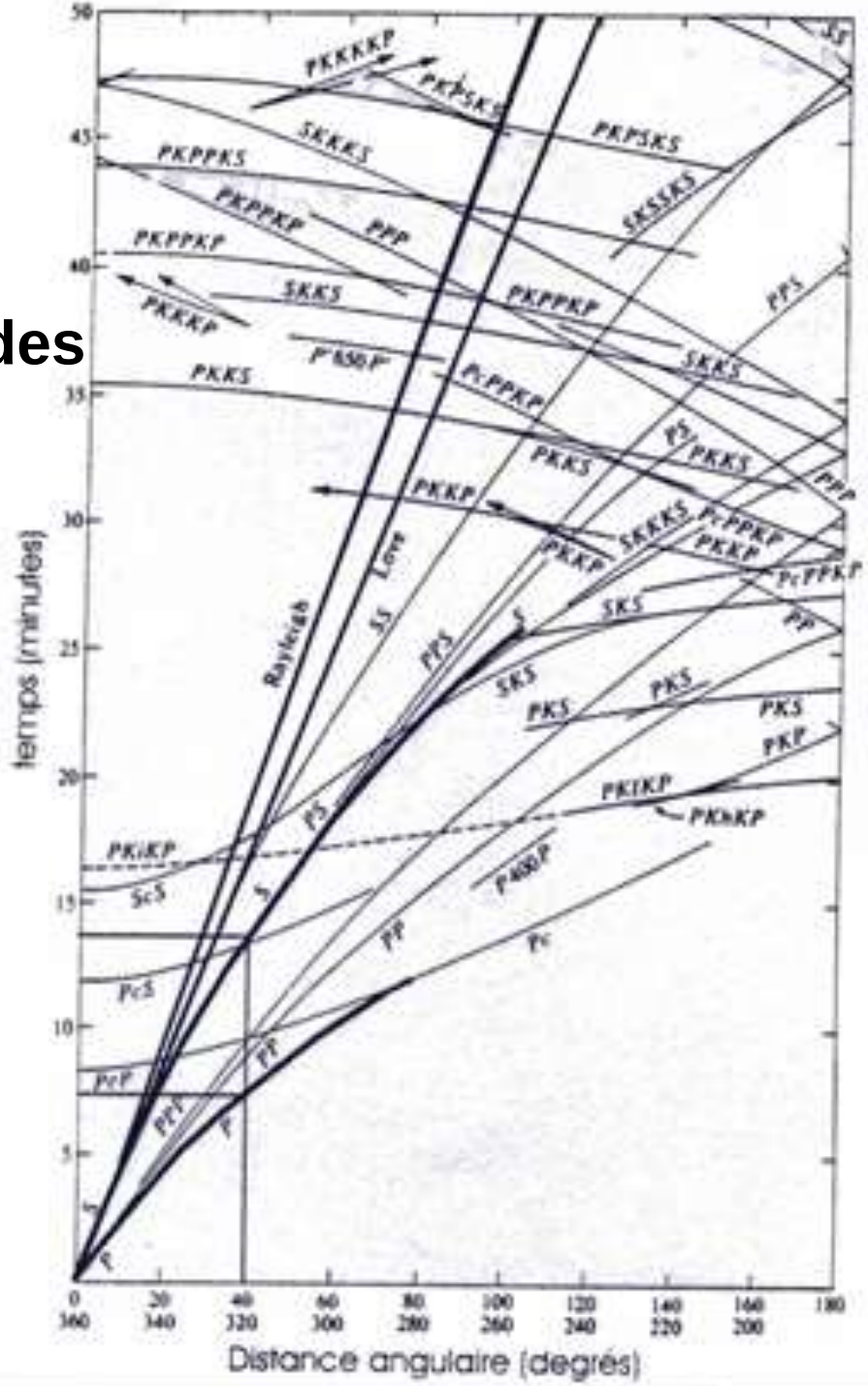
Les différentes hodochrones.

(d'après Laroque, Virieu – Physique de la Terre solide- GIB publisher)

<u>Document 14.</u> Trajectoire des ondes sismiques traversant la Terre.

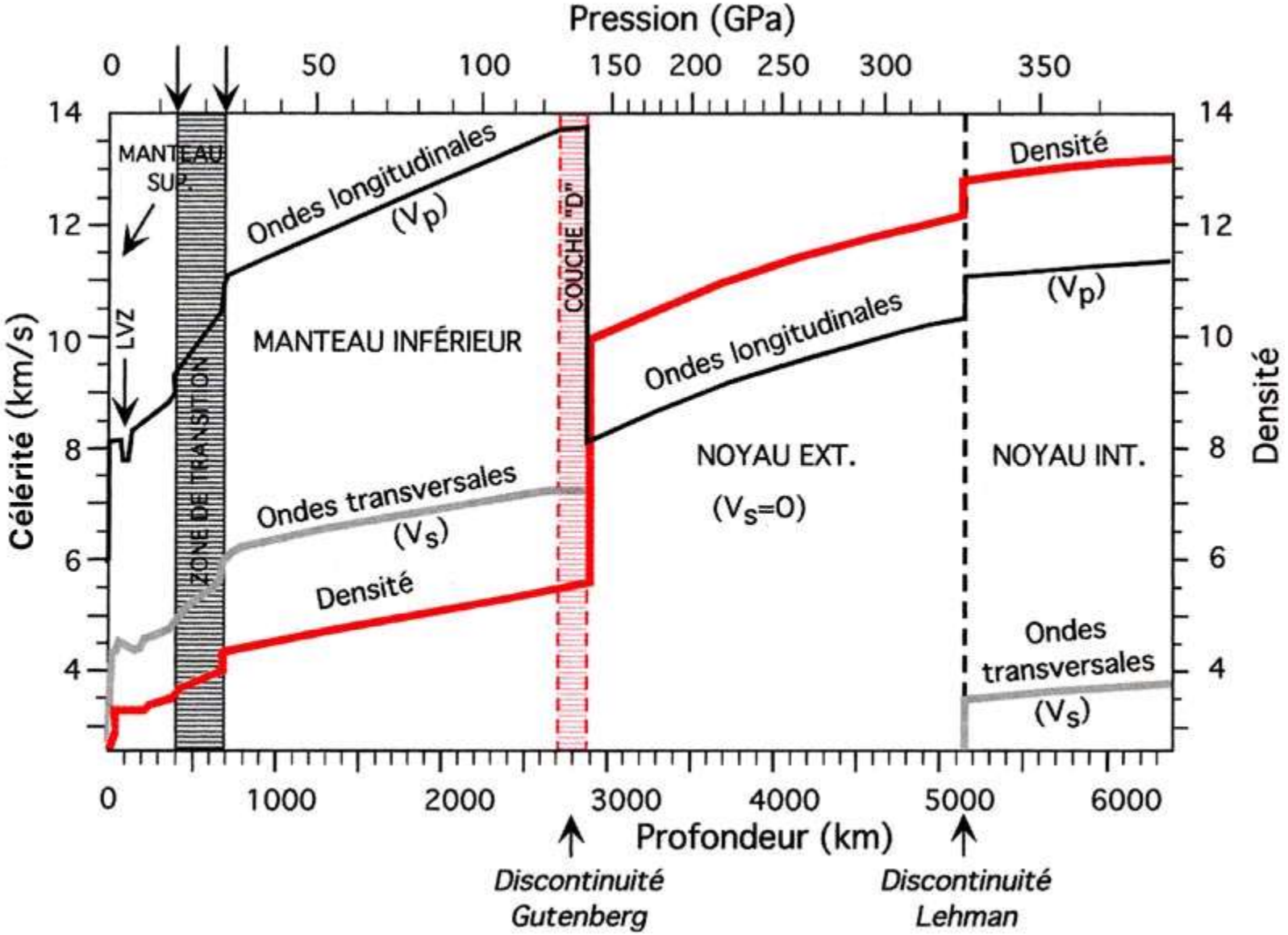
(d'après Laroque, Virieu – Physique de la Terre solide- GIB publisher)





z (km)	r (km)	V_P (km/s)	V_S (km/s)	ρ (g/cm³)	P (kbar)	K (kbar)	μ (kbar)	g (cm/s²)
80	6 291	8,1	4,5	3,37	25	1 303	674	986
150	6 221	8,0	4,4	3,37	48	1 287	665	988
220	6 151	8,6	4,6	3,44	71	1 529	741	991
400	5 971	8,9	4,8	3,54	134	1 735	806	997
400	5 971	9,1	4,9	3,72	134	1 899	906	997
500	5 871	9,7	5,2	3,85	171	2 181	1 051	999
600	5 771	10,2	5,5	3,98	210	2 489	1 210	1 000
670	5 701	10,3	5,6	3,99	238	2 556	1 239	1 001
670	5 701	10,8	5,9	4,38	238	2 999	1 548	1 001
771	5 600	11,1	6,2	4,44	283	3 133	1 730	1 000
1 071	5 300	11,6	6,4	4,62	419	3 638	1 918	996
1 571	4 800	12,3	6,7	4,90	655	4 448	2 215	993
2 071	4 300	12,9	7,0	5,16	906	5 246	2 502	1 002
2 571	3 800	13,5	7,2	5,41	1 173	6 095	2 794	1 030
2 891	3 480	13,7	7,3	5,57	1 358	6 556	2 938	1 068
2 891	3 480	8,1	0	9,90	1 358	6 441	0	1 068
3 071	3 300	8,4	0	10,18	1 547	7 116	0	1 028
3 571	2 800	9,1	0	10,85	2 056	8 889	0	904
4 071	2 300	9,6	0	11,39	2 521	10 451	0	767
4 571	1 800	10,0	0	11,81	2 922	11 775	0	617
5 150	1 221	10,4	0	12,17	3 289	13 047	0	440
5 150	1 221	11,0	3,5	12,76	3 288	13 434	1 567	440
5 571	800	11,2	3,6	12,95	3 487	13 898	1 676	291
6 071	300	11,2	3,7	13,07	3 617	14 203	1 749	110
6 371	0	11,3	3,7	13,09	3 639	14 253	1 761	0

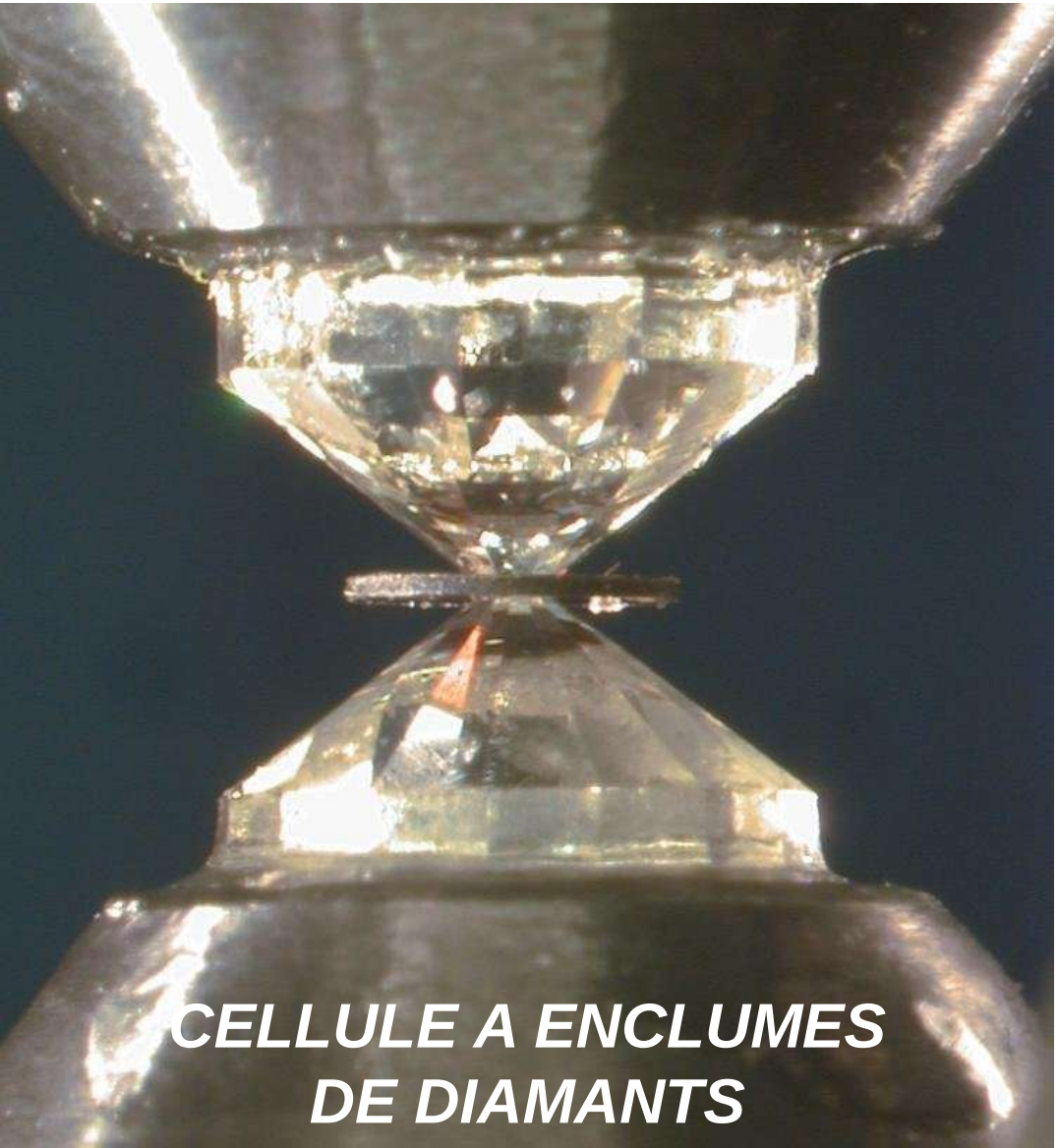
Modèle PREM

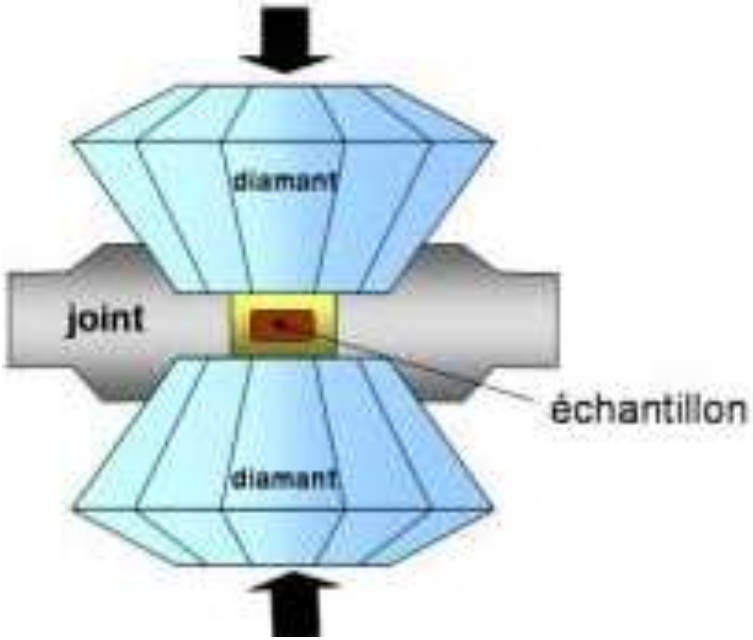


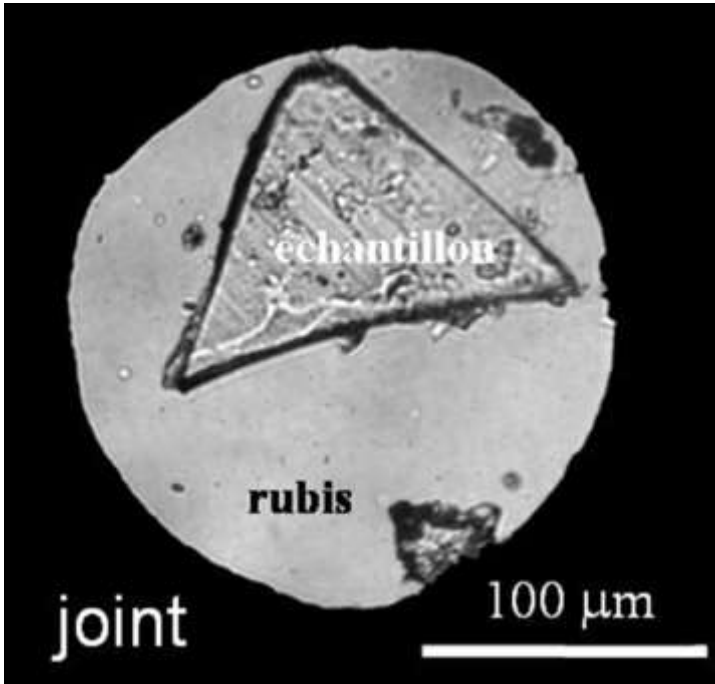
Document 15. Le modèle PREM (Preliminary Reference Earth Model).

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

Principe de la cellule à enclumes de diamant







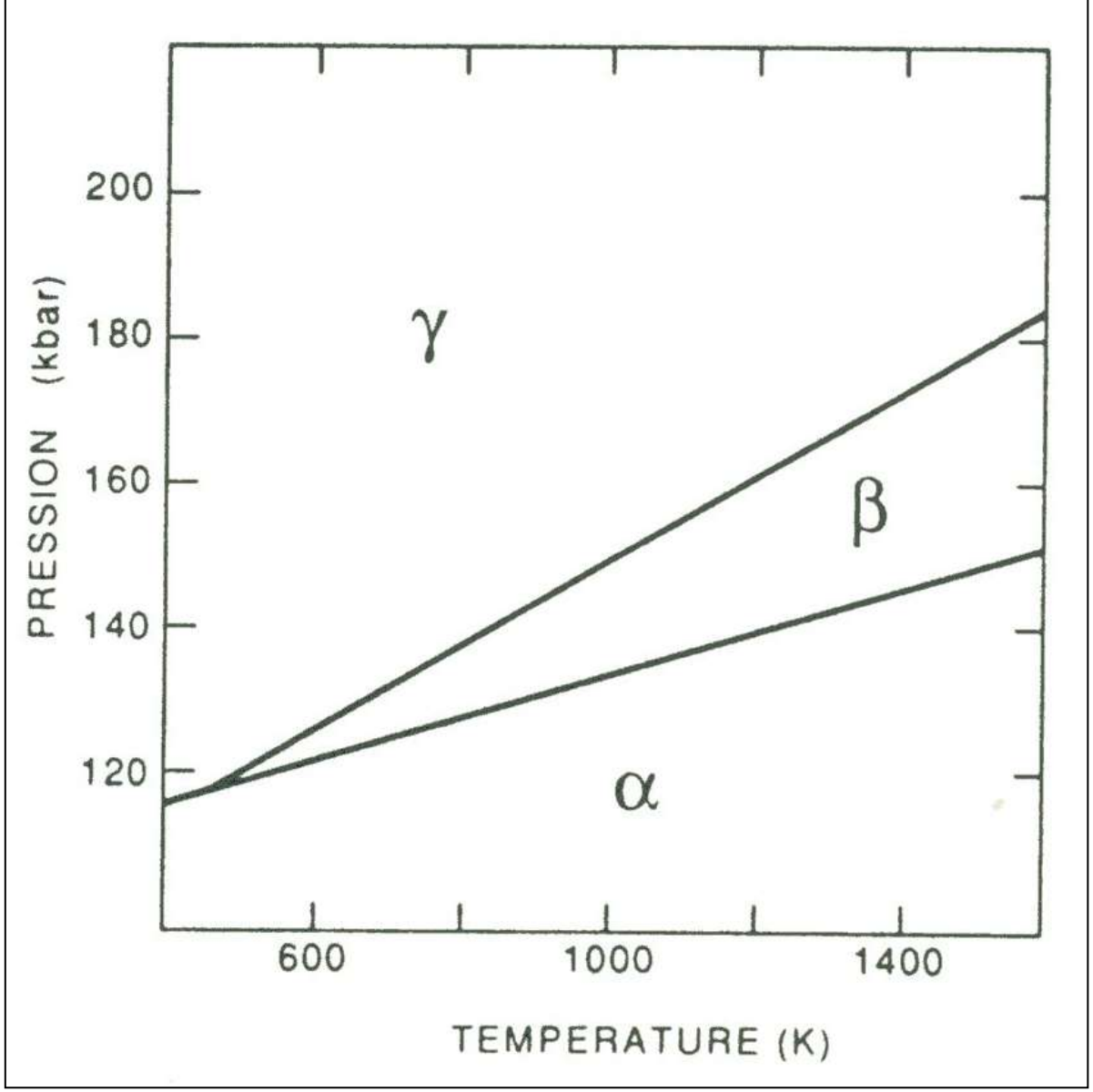
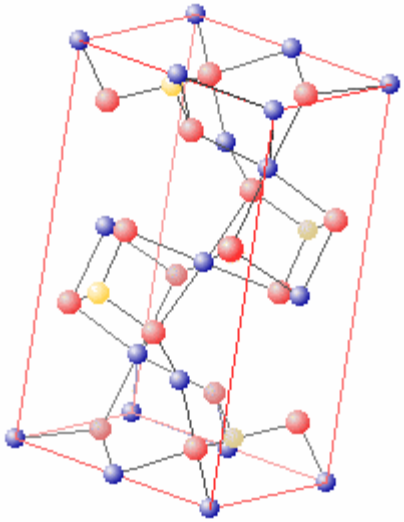


Diagramme pression – température des phases de l'olivine Mg_2SiO_4.

(Poirier J. « Les profondeurs de la Terre » ; Masson Ed.).



<u>Du Moho à 400 km :</u>
Olivine de phase α
$(Mg,Fe)_2SiO_4$
Système cristallographique : orthorhombique
Volume molaire: 43,67 cm^3/mol

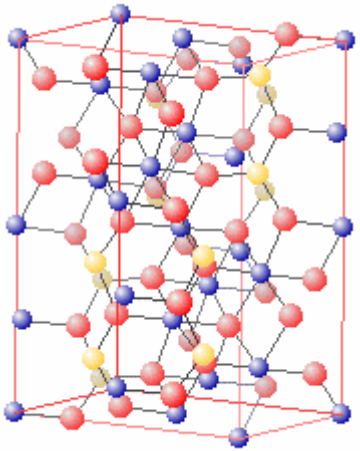
- atome d'oxygène O
- atome de fer Fe ou de magnésium Mg
- atome de silicium Si

<u>Les changements de phase de l'olivine</u>

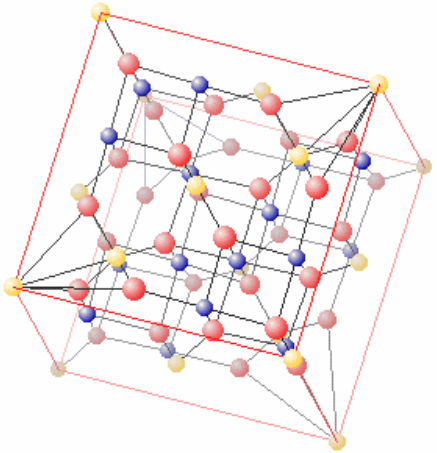
http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/mineraux-profonds.xml

<u>Manteau supérieur, de 400 à 670 km :</u>

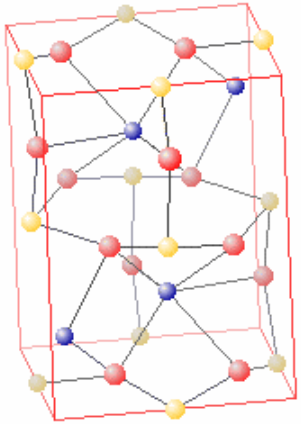
Olivine de phase β
(wadsleyite) $(Mg,Fe)_2SiO_4$
Système cristallographique : orthorhombique
Volume molaire: 40,54 cm^3/mol



Puis phase γ (ringwoodite)
$(Mg,Fe)_2SiO_4$
Système cristallographique : cubique
Volume molaire: 39,65 cm^3/mol



<u>Manteau inférieur, au-delà de 670 km :</u> « Perovskite »
$(Mg,Fe)\ SiO_3$
[+(Mg,Fe)O = magnésiowüstite]
Système cristallographique : orthorhombique
(sans structure tétraédrique)
Volume molaire: 24,5 cm^3/mol

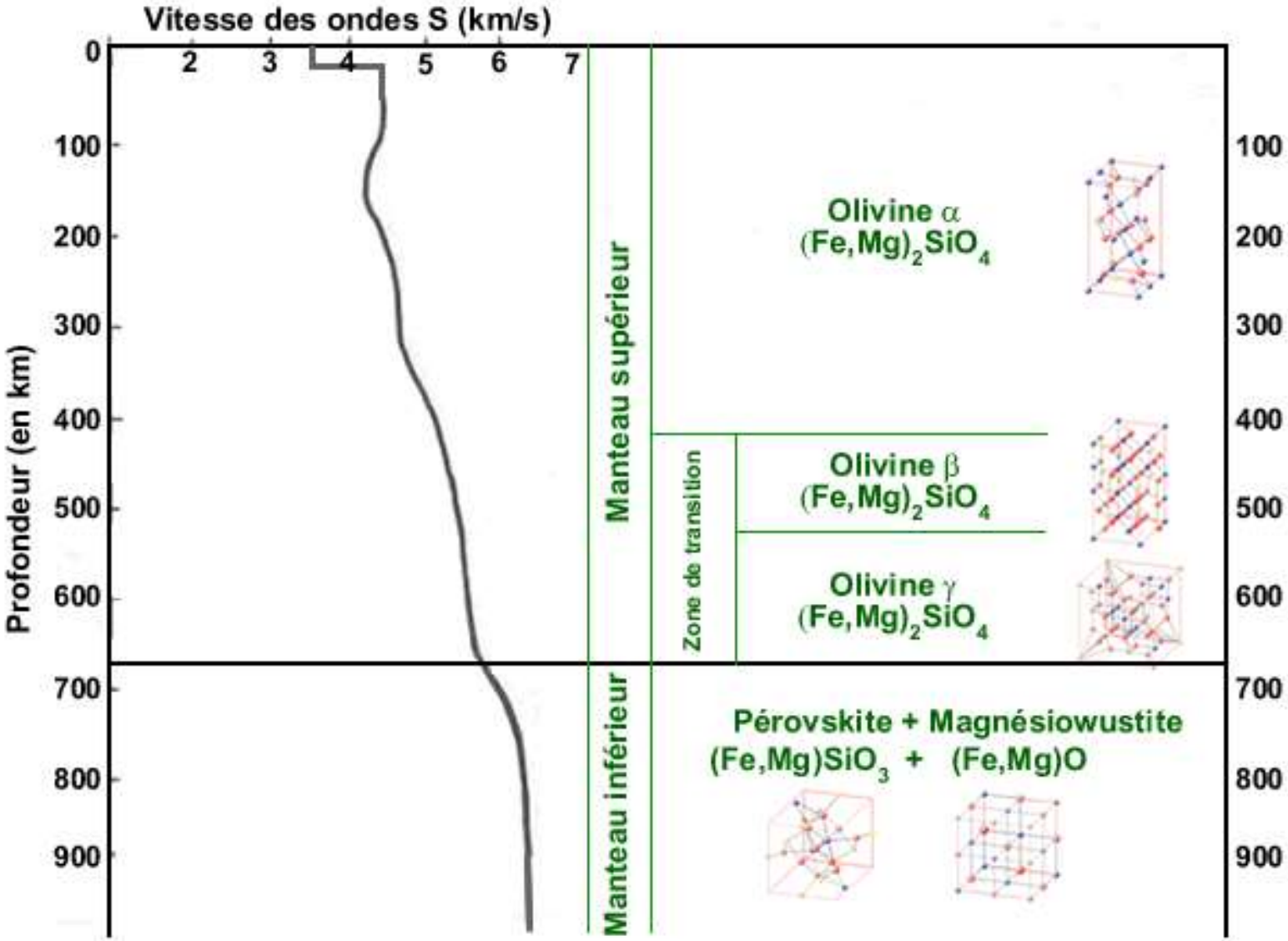


La « Perovskite » porte désormais un nom officiel : Bridgmanite

Veine de choc dans la météorite de Tenham, dans laquelle la bridgmanite a pu être décrite.

Depuis le 2 juin 2014, elle porte ce nom officiel en l'honneur du physicien américain Bridgman, prix Nobel de physique en 1946 pour ses travaux sur les systèmes permettant de reproduire de très hautes pressions en laboratoire.

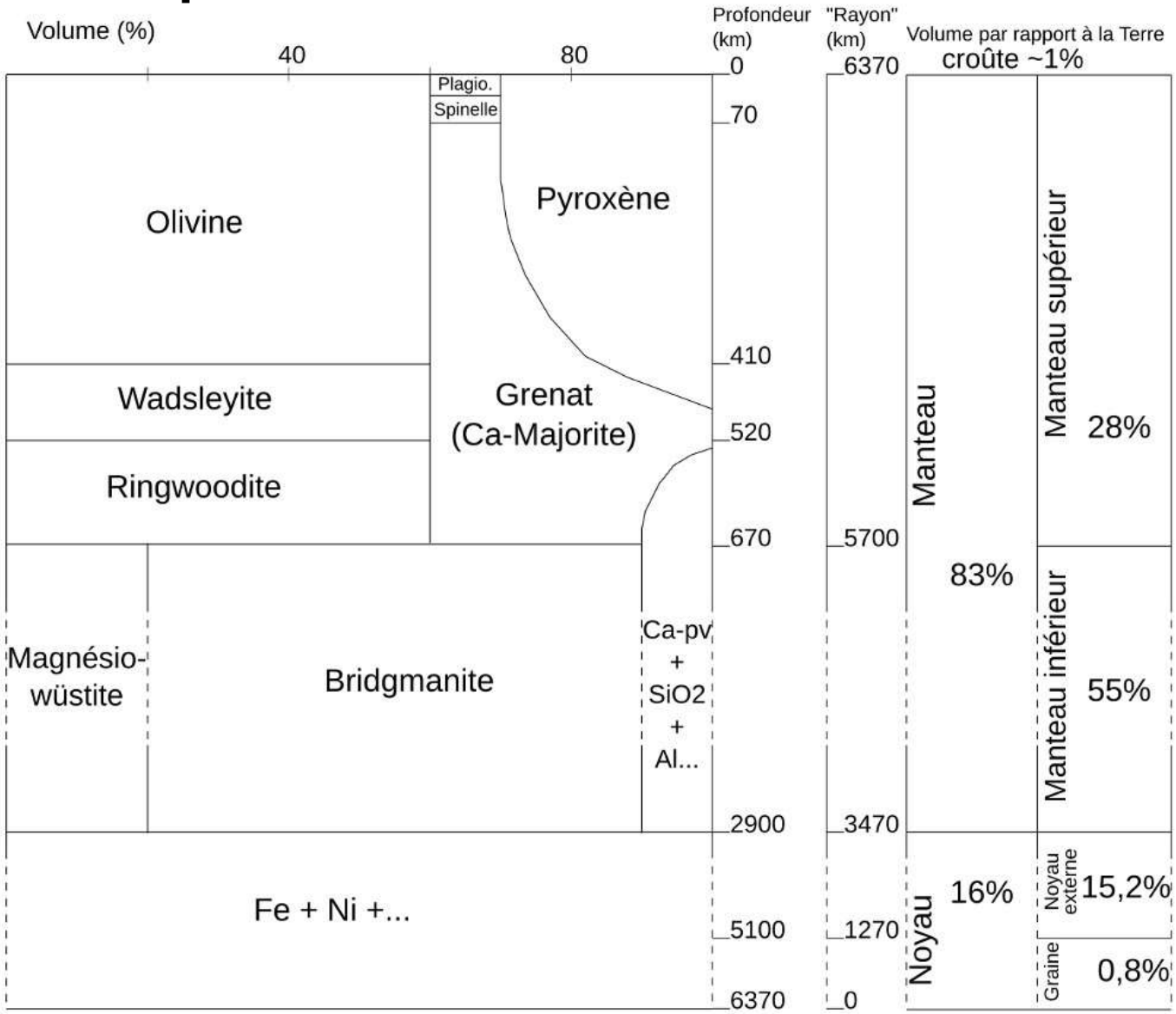
http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/bridgmanite-mineralogie-manteau.xml



Document 16. Discontinuités dans le manteau et transitions de phases de l'olivine.

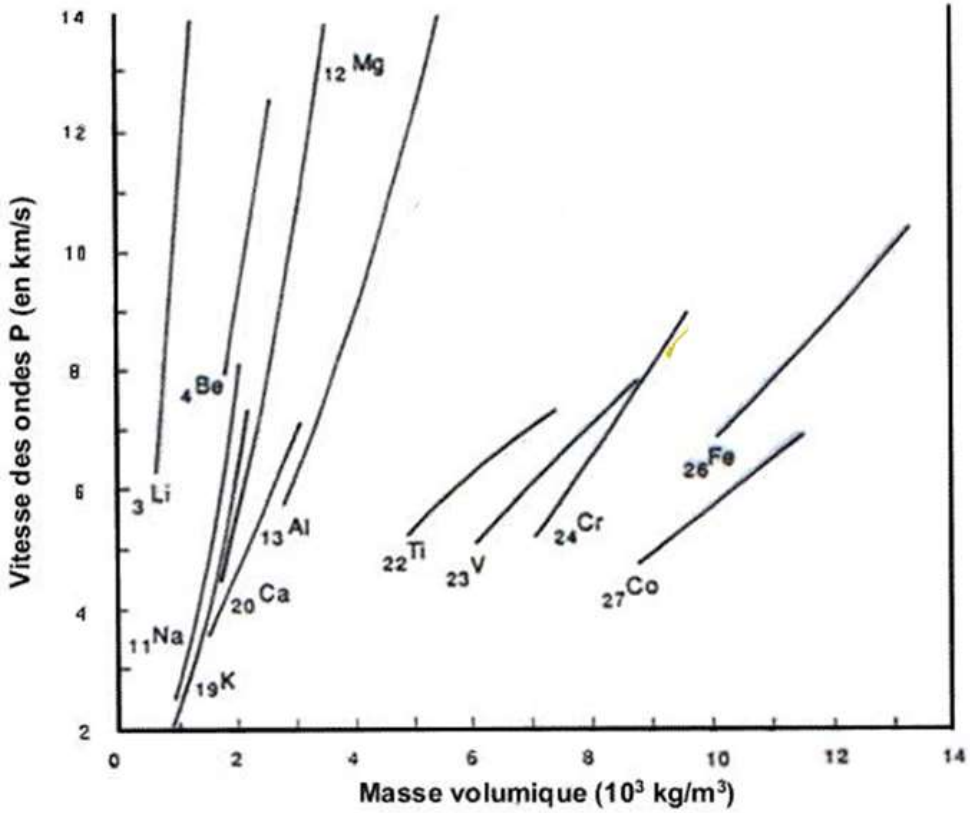
(http://www.ens-lyon.fr/Planet-Terre)

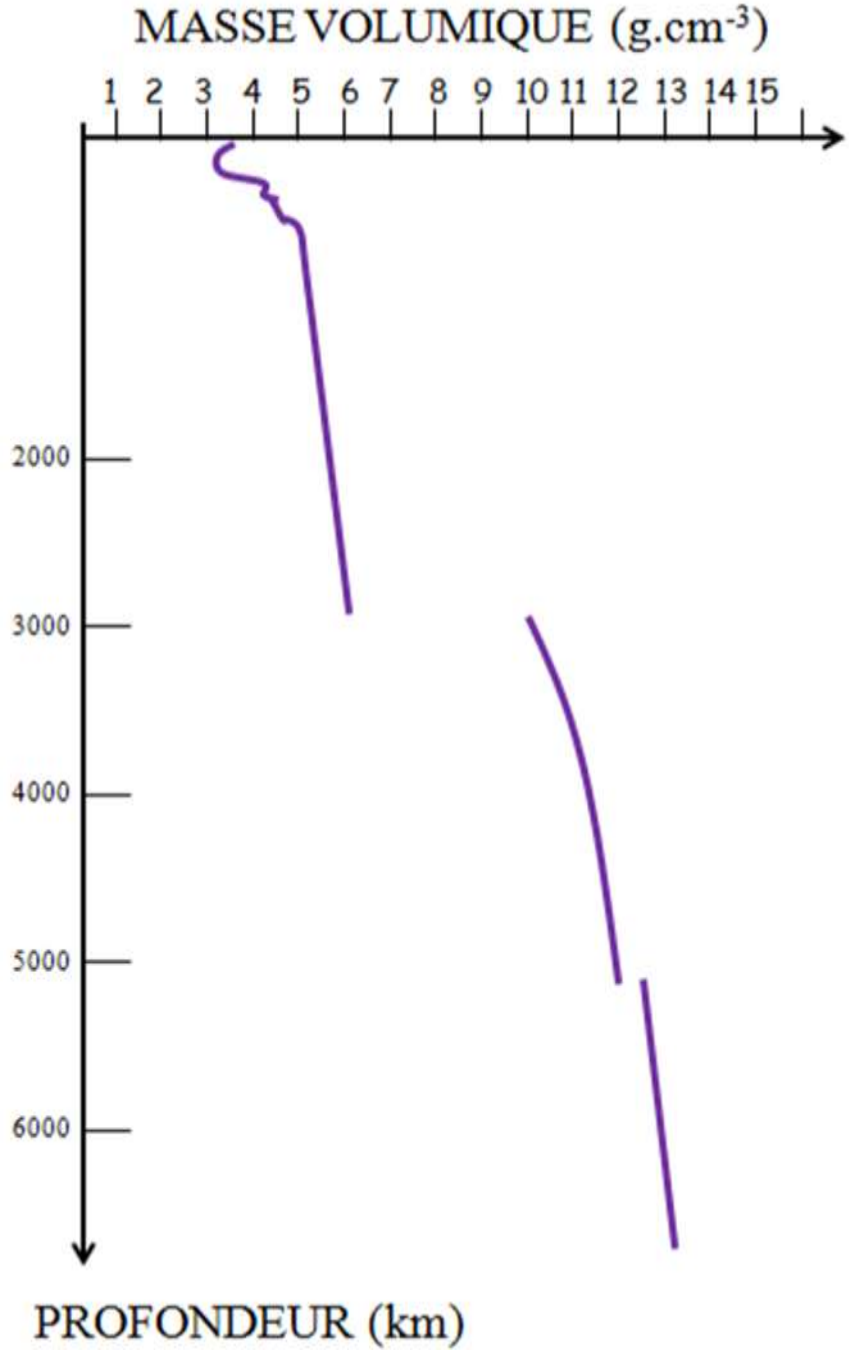
<u>Document 17</u>. Evolution minéralogique d'une péridotite en fonction de la profondeur.



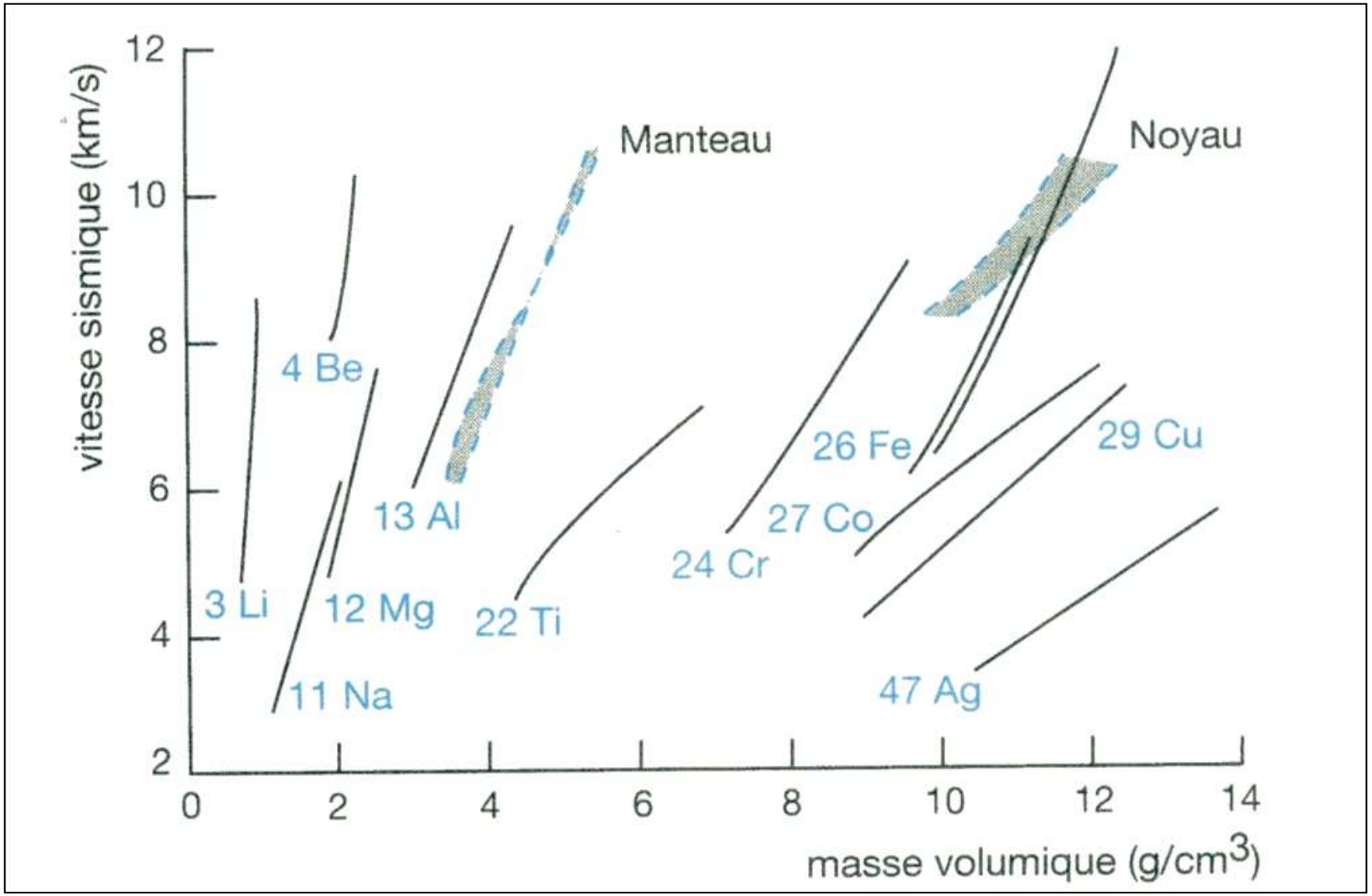
Ca-pv= $CaSiO_3$= Ca-pérovskite / SiO_2= silice de THP (stishovite)
Al...= phases alumineuse / Plagio.=plagioclase

http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/bridgmanite-mineralogie-manteau.xml





Travaux de Birch



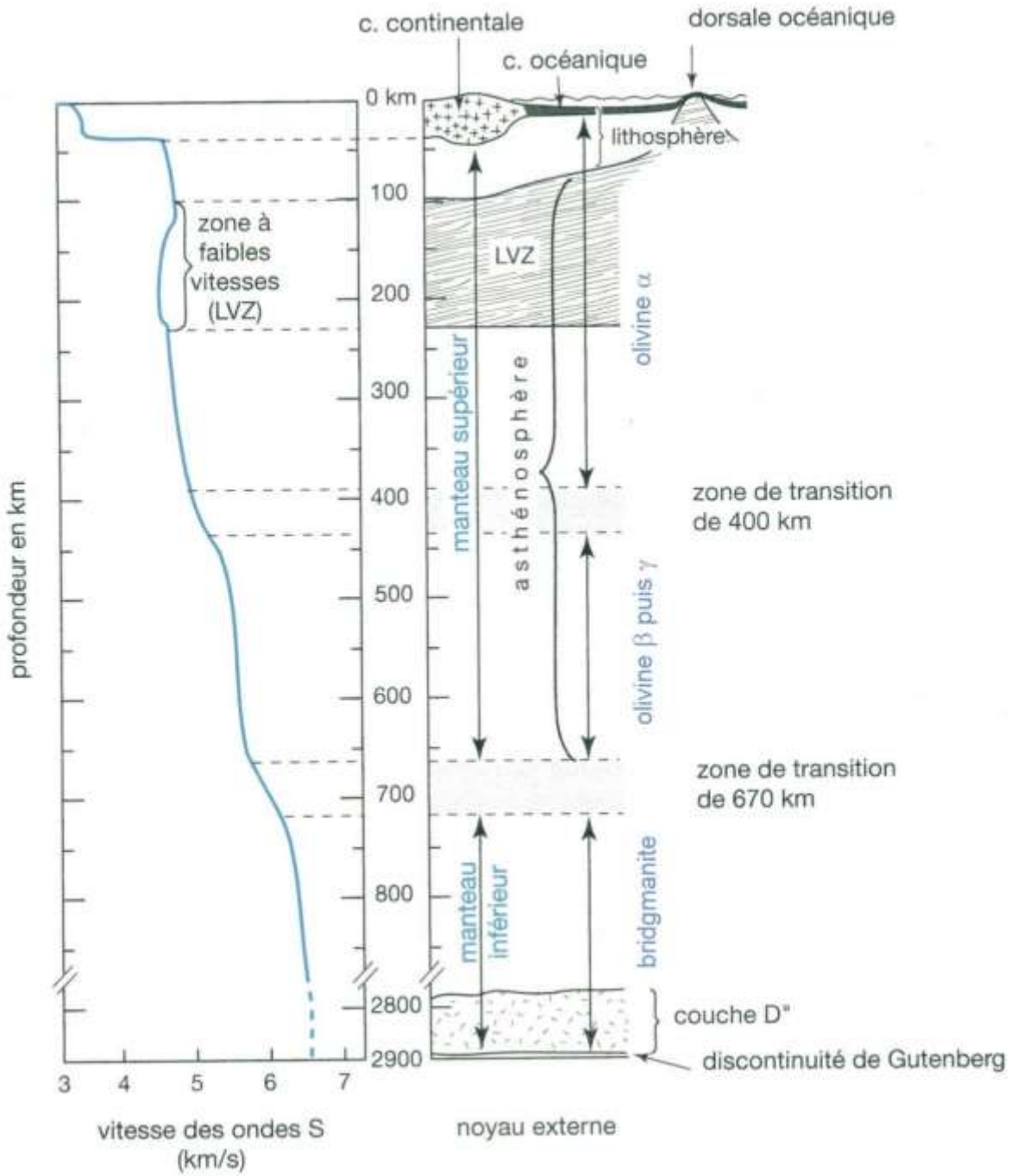
<u>Document 18.</u> Corrélation expérimentale entre la vitesse de propagation d'ondes de choc et la masse volumique de divers éléments.

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

Document 19.

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

(D'après Schaff A. et Coll. « Sciences de la Terre et de l'Univers », Vuibert Ed.).



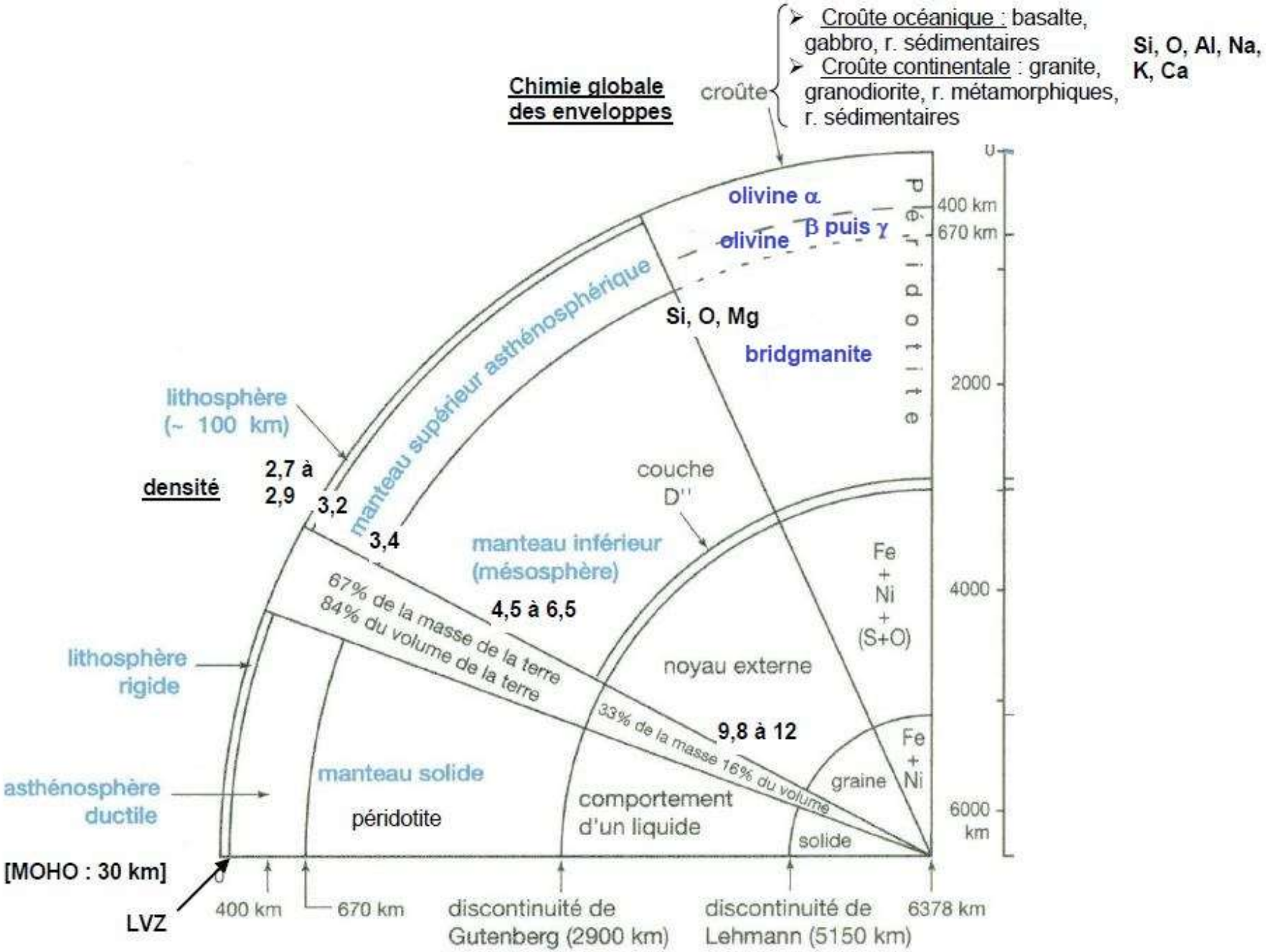


Schéma - bilan