

Chapitre 1

La structure de la planète Terre

code des diapositives

★ très important, à savoir avec précision

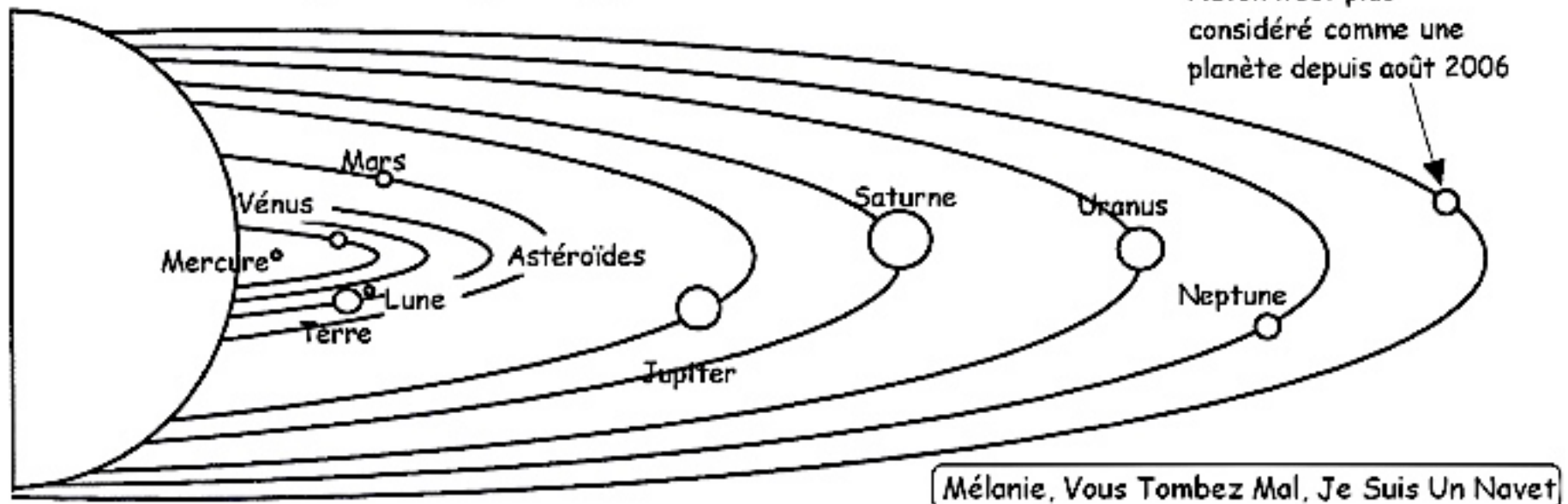
✿ important pour comprendre

✂ pour approfondir, sinon à couper

La Terre dans le système solaire



Position des planètes par rapport au soleil



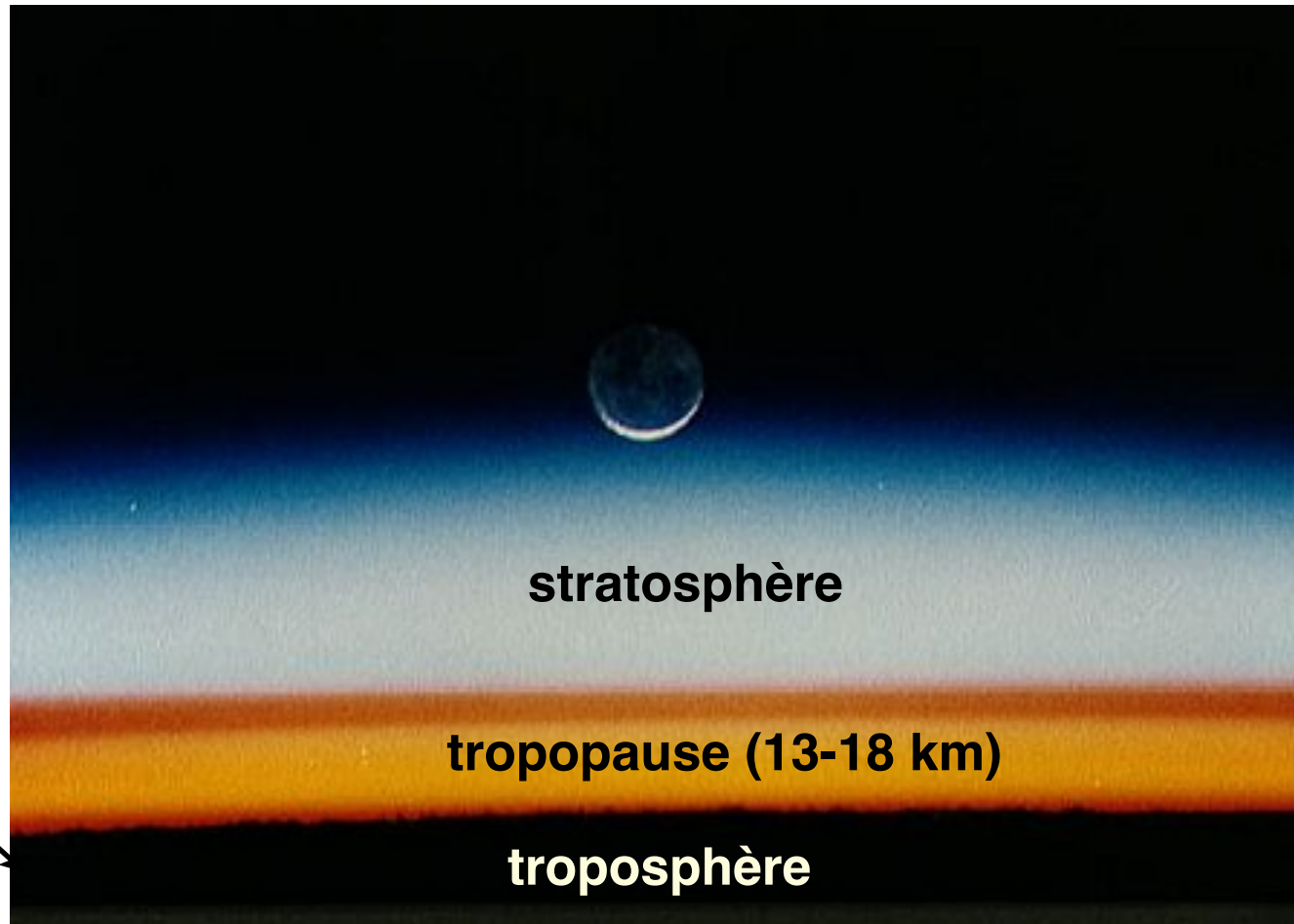
1. Les enveloppes externes fluides

Composition de l'atmosphère



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 ₂ O)	0 à 7
Dioxyde de soufre (SO ₂)	0 à 10 ⁻⁴
Ozone (O ₃)	0 à 10 ⁻⁵

L'atmosphère en strates



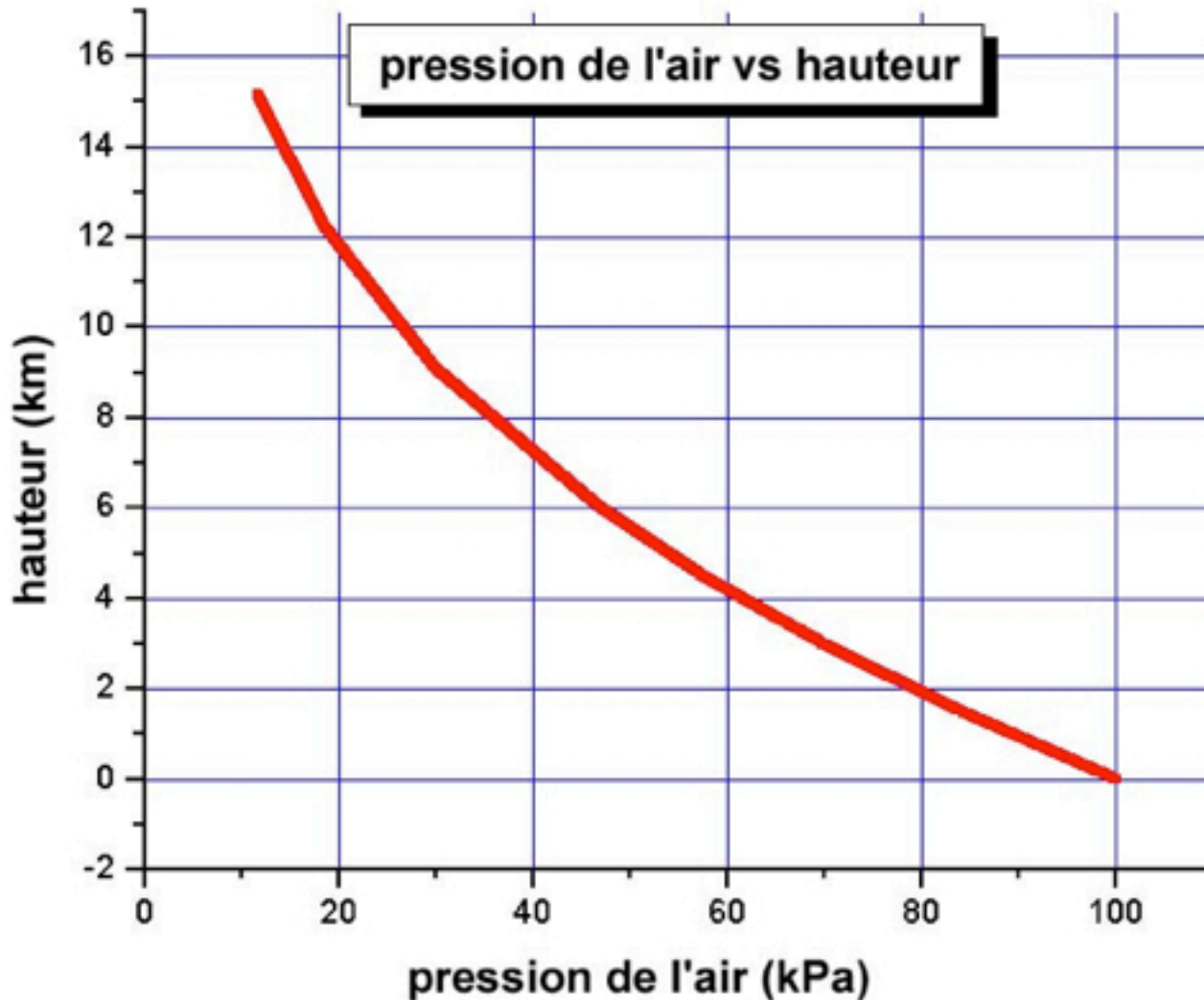
Photographie prise par la navette spatiale américaine le 11/01/92 au matin (5.5S, 29.5E), le Soleil n'ayant pas encore surgi à l'horizon.

Structuration verticale de l'atmosphère



Structuration liée à la pression

1 bar = 10^5 Pa



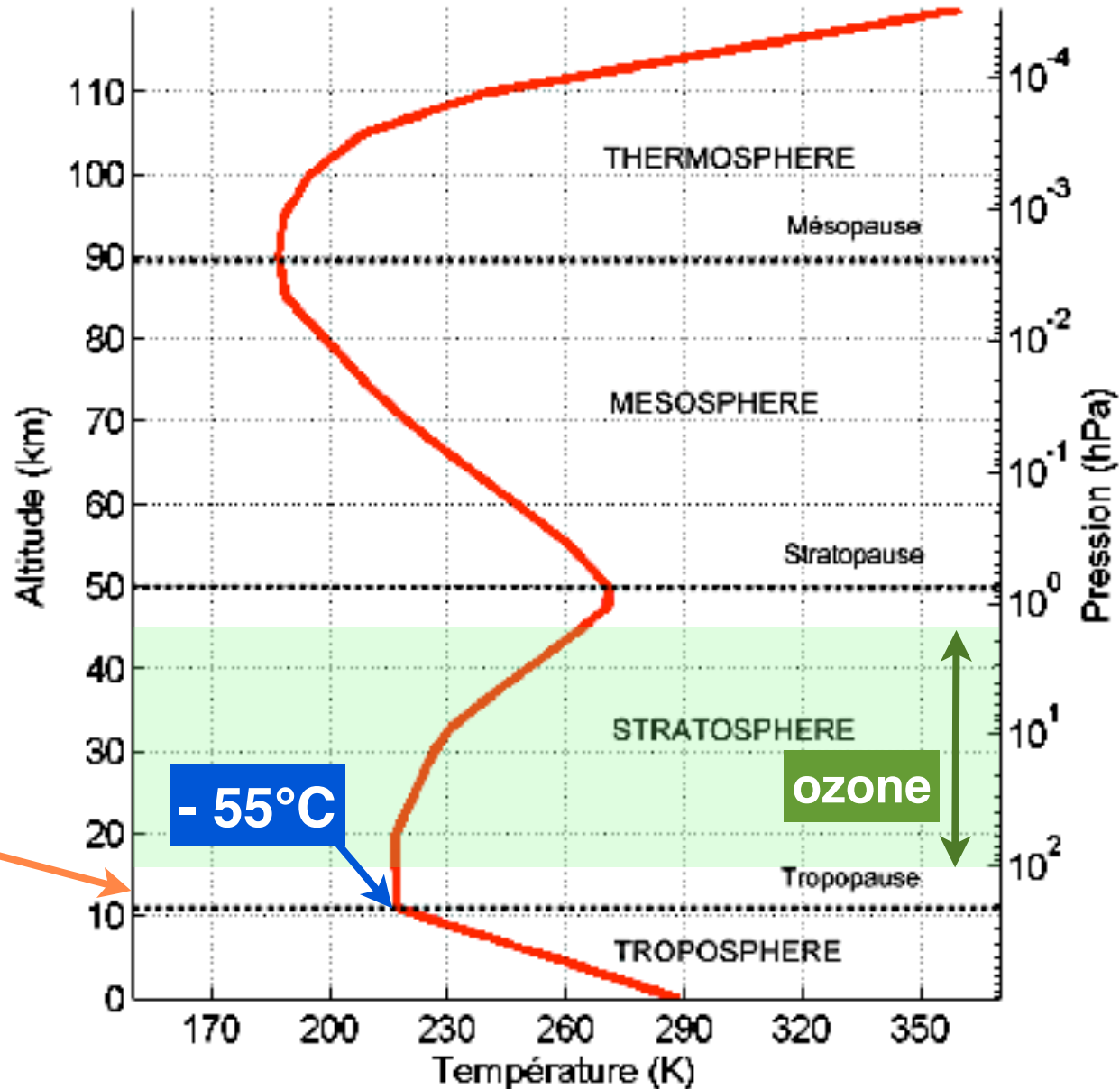
Pression au sol
 $P = 1013$ hPa

99,9 % de la masse de l'atmosphère est contenue dans les 50 premiers km

Structuration verticale de l'atmosphère



Structuration liée à la température

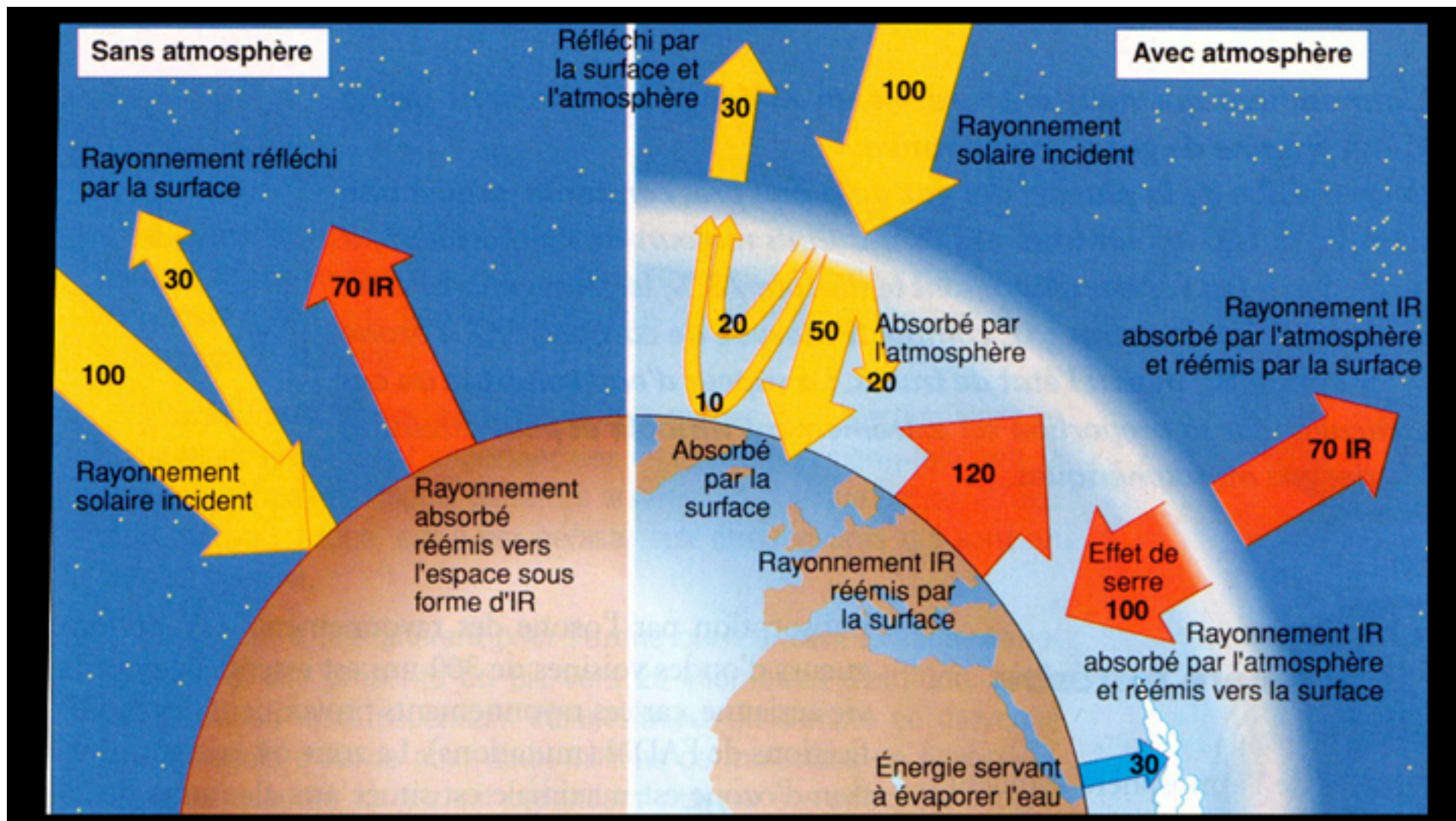


altitude des
jet-streams

- 55°C

ozone

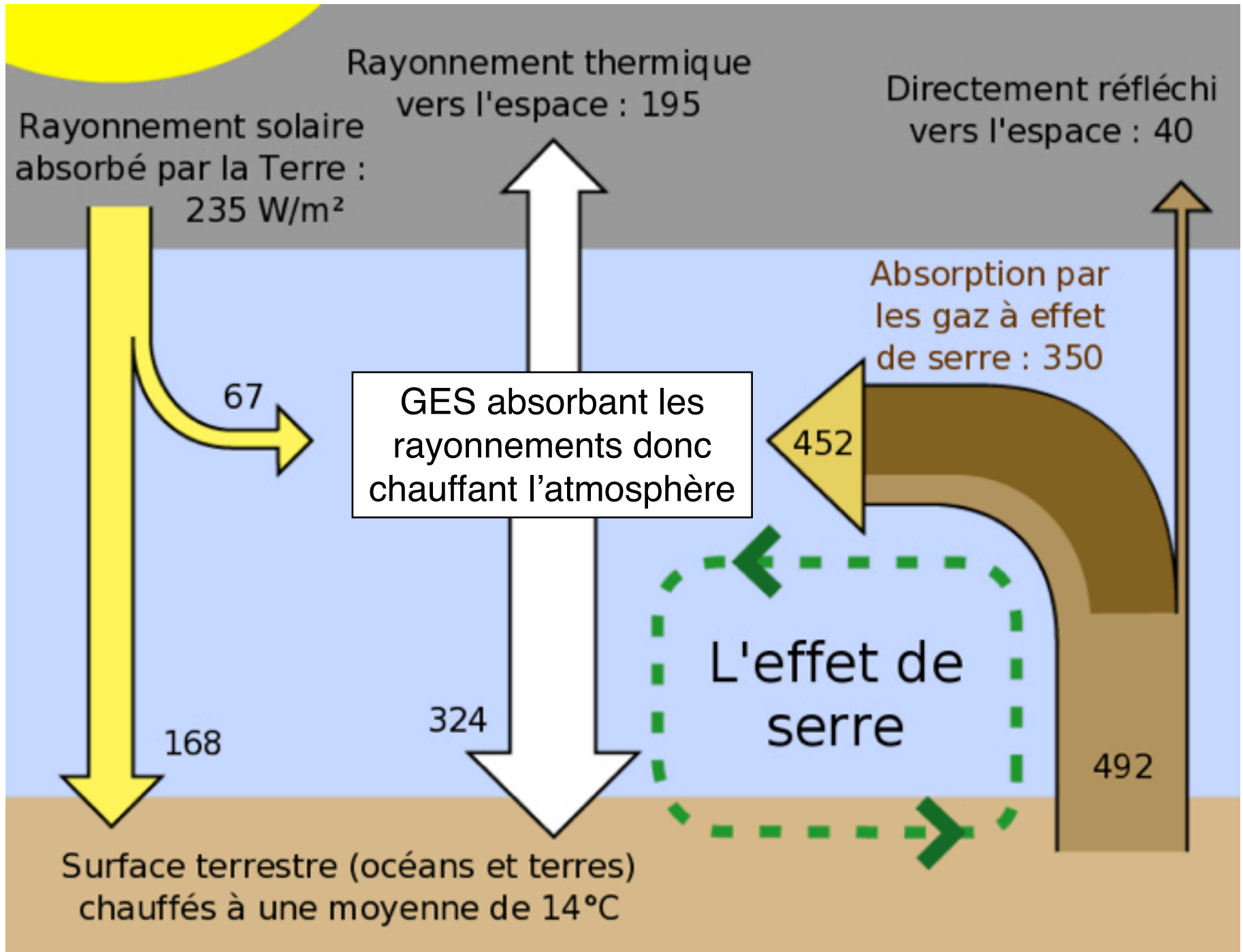
L'effet de serre



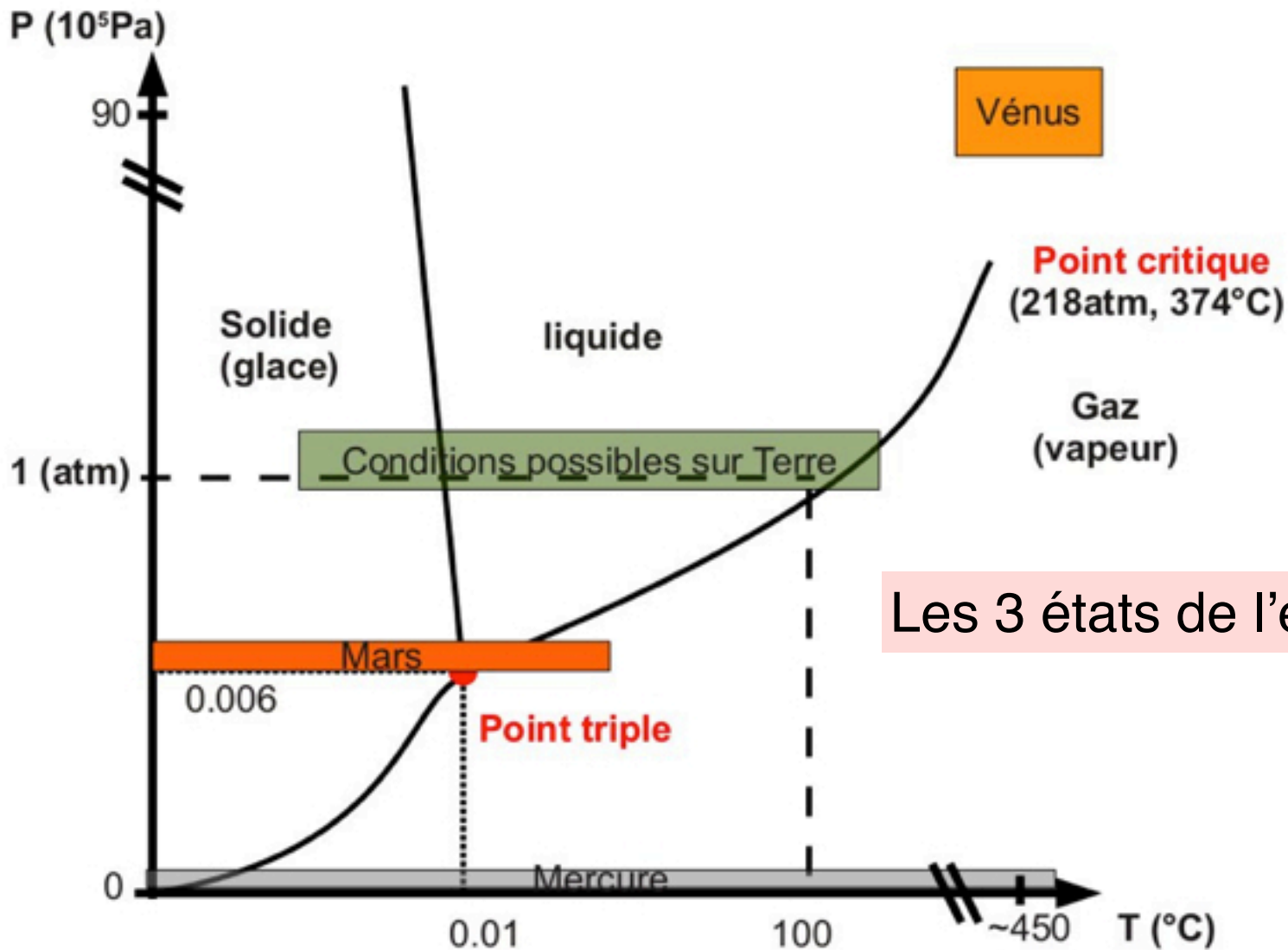
T = -18°C

T = +14°C

chiffres en % des radiations solaires reçues



L'eau sur Terre



Les 3 états de l'eau coexistent

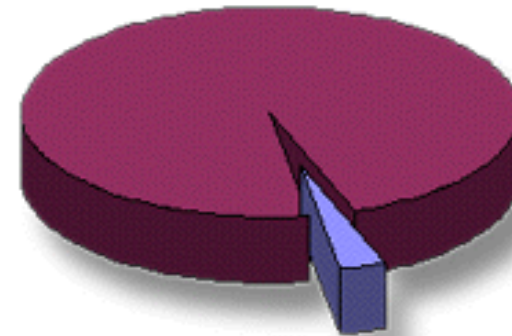
Les réservoirs d'eau sur Terre



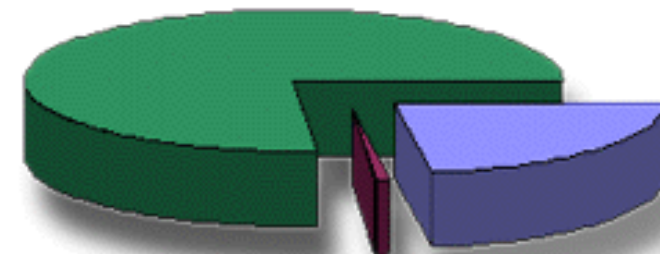
Les réservoirs	Les stocks
Océans	1 350 000 000
Eaux continentales	35 976 700
Glaciers	27 500 000
Eaux souterraines	8 200 000
Mers intérieures	105 000
Lacs d'eau douce	100 000
Humidité des sols	70 000
Rivières	1 700
Atmosphère (humidité de l'air)	13 000
Biosphère (cellules vivantes)	1 100

Données en km³

■ eaux salées
■ eaux douces

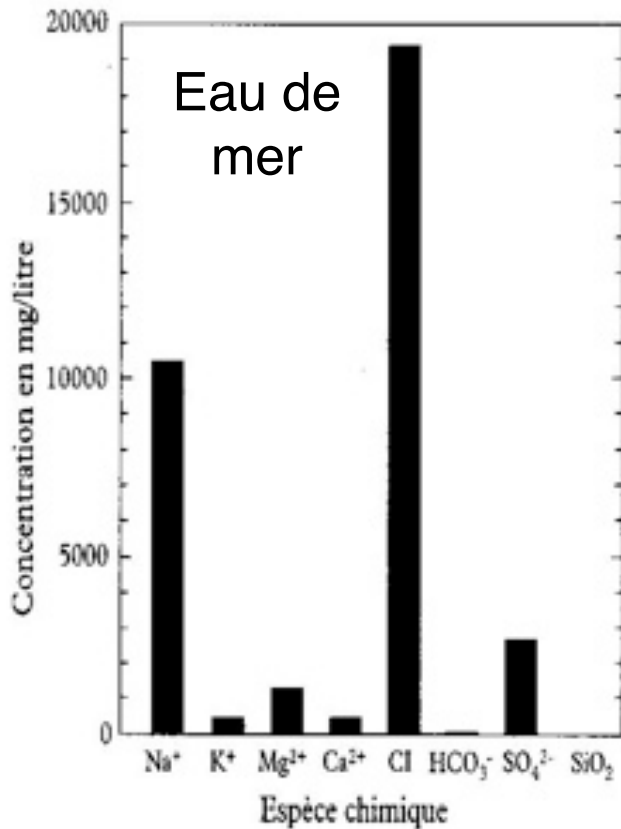


■ eaux souterraines
■ eaux superficielles
■ glaces polaires

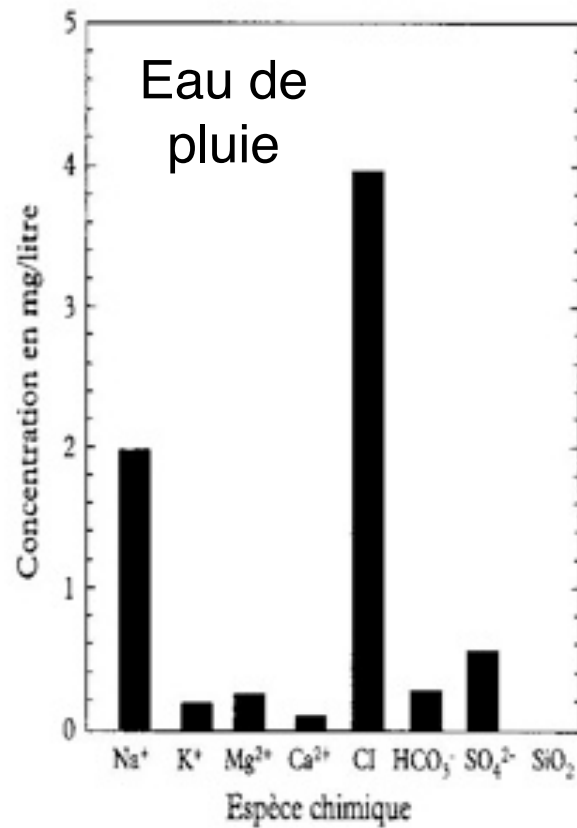


(Caron et coll. «Comprendre et enseigner la Planète Terre», Ophrys Ed.).

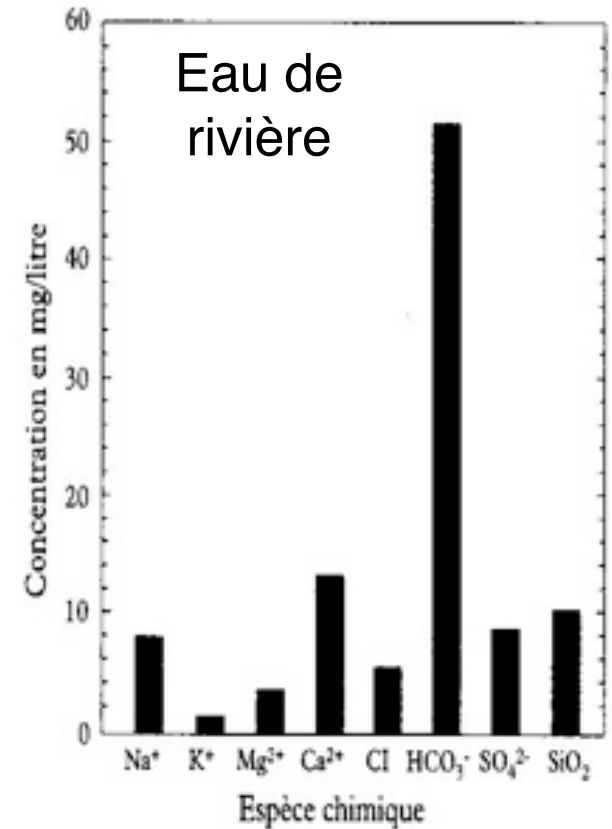
Composition de l'eau des réservoirs superficiels



NaCl = 35 g.L⁻¹

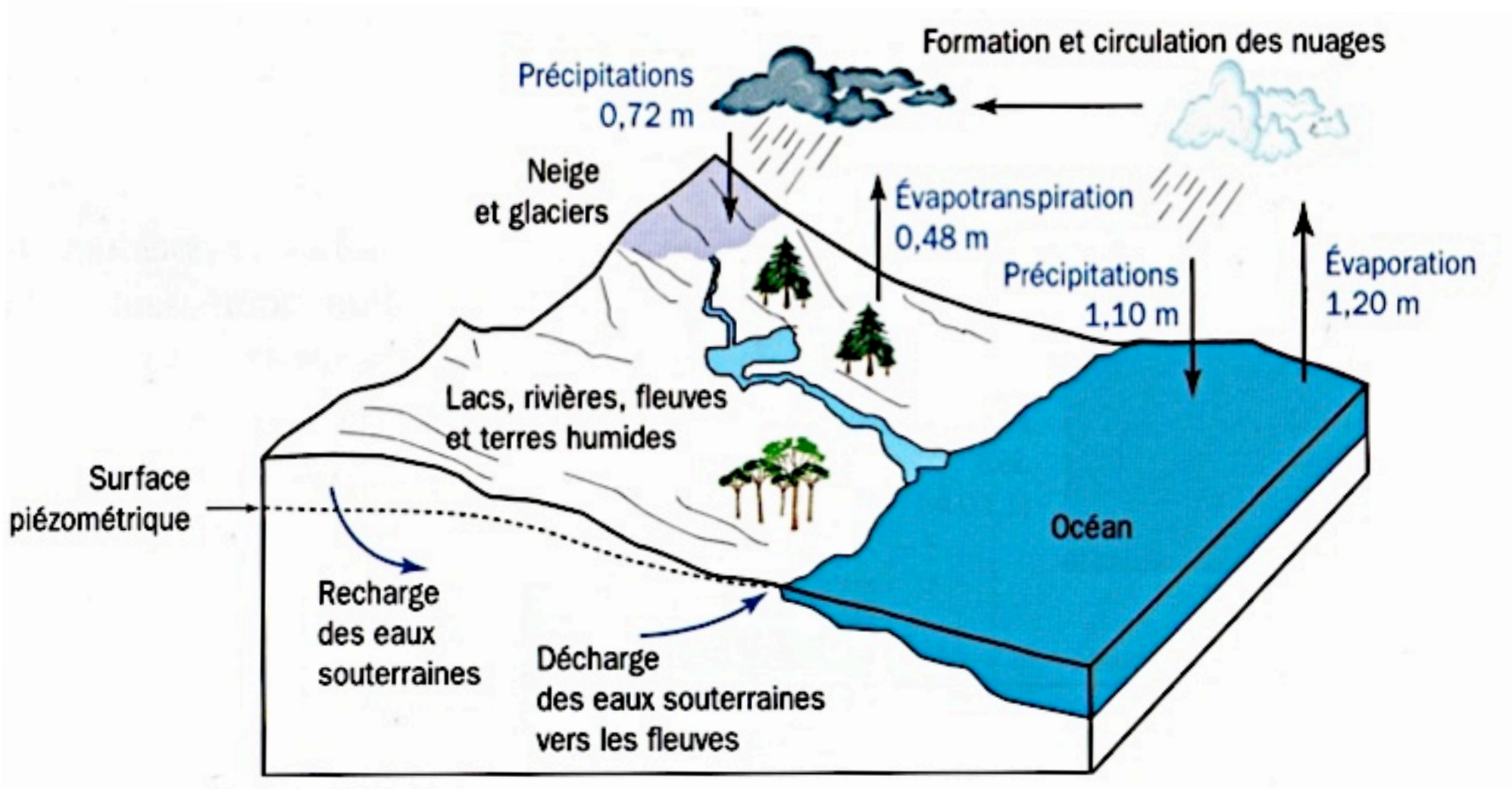


NaCl = 0,006 g.L⁻¹

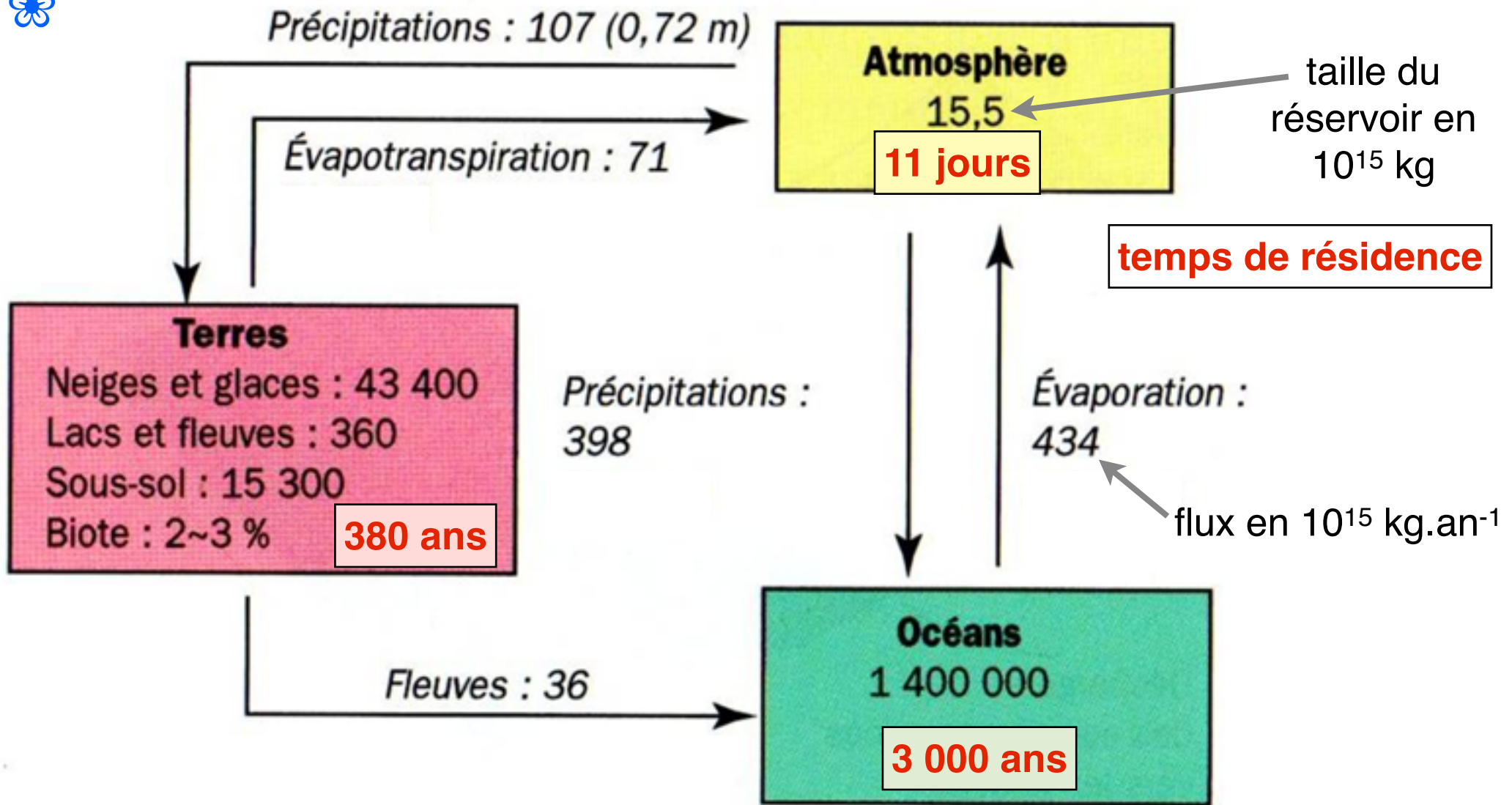


NaCl = 0,01 g.L⁻¹
HCO₃⁻ = 0,05 g.L⁻¹
Ca²⁺, SiO₂, SO₄²⁻ ...

Le cycle de l'eau

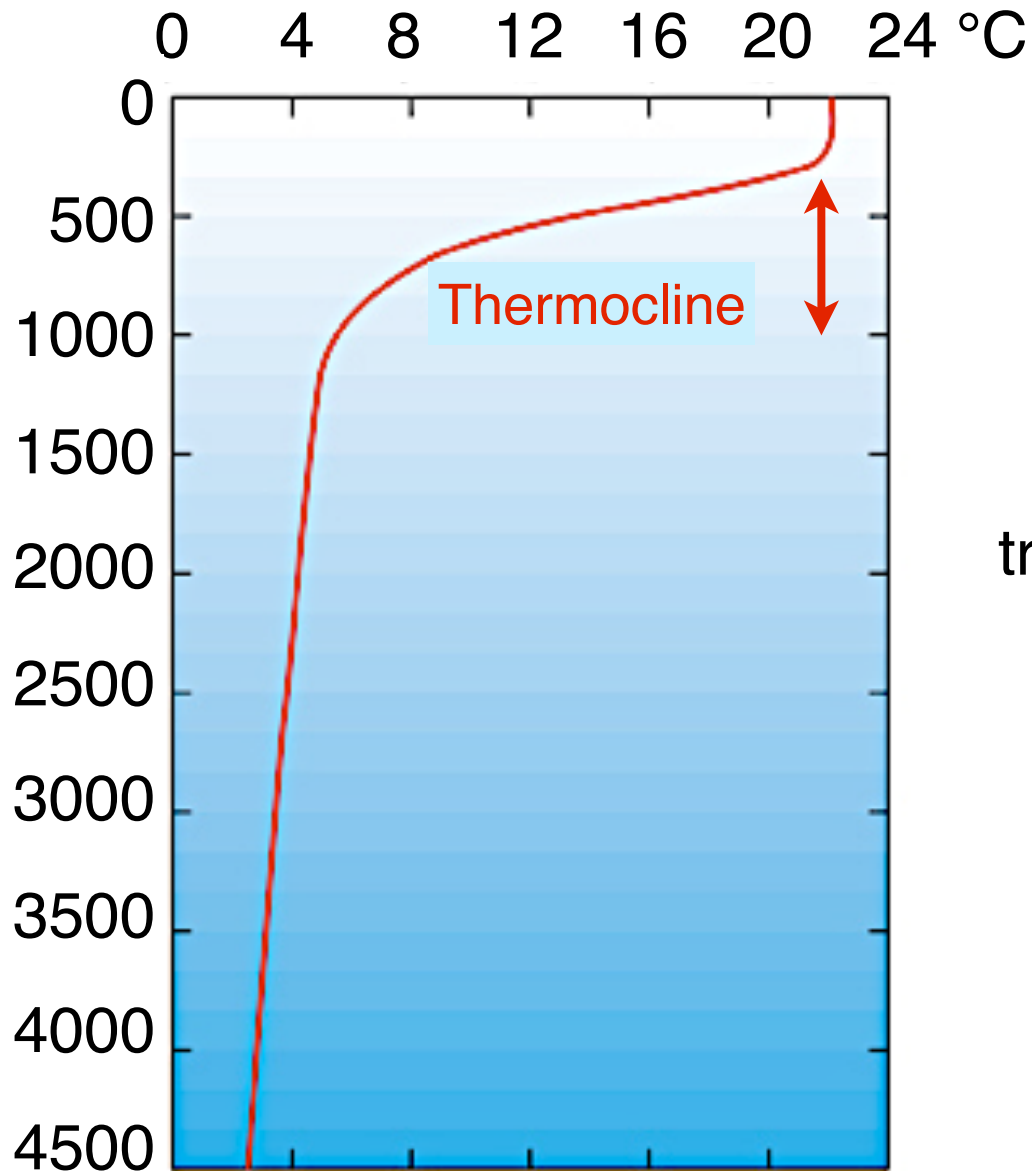


Echanges entre réservoirs



Flux et temps de résidence entre les principaux réservoirs

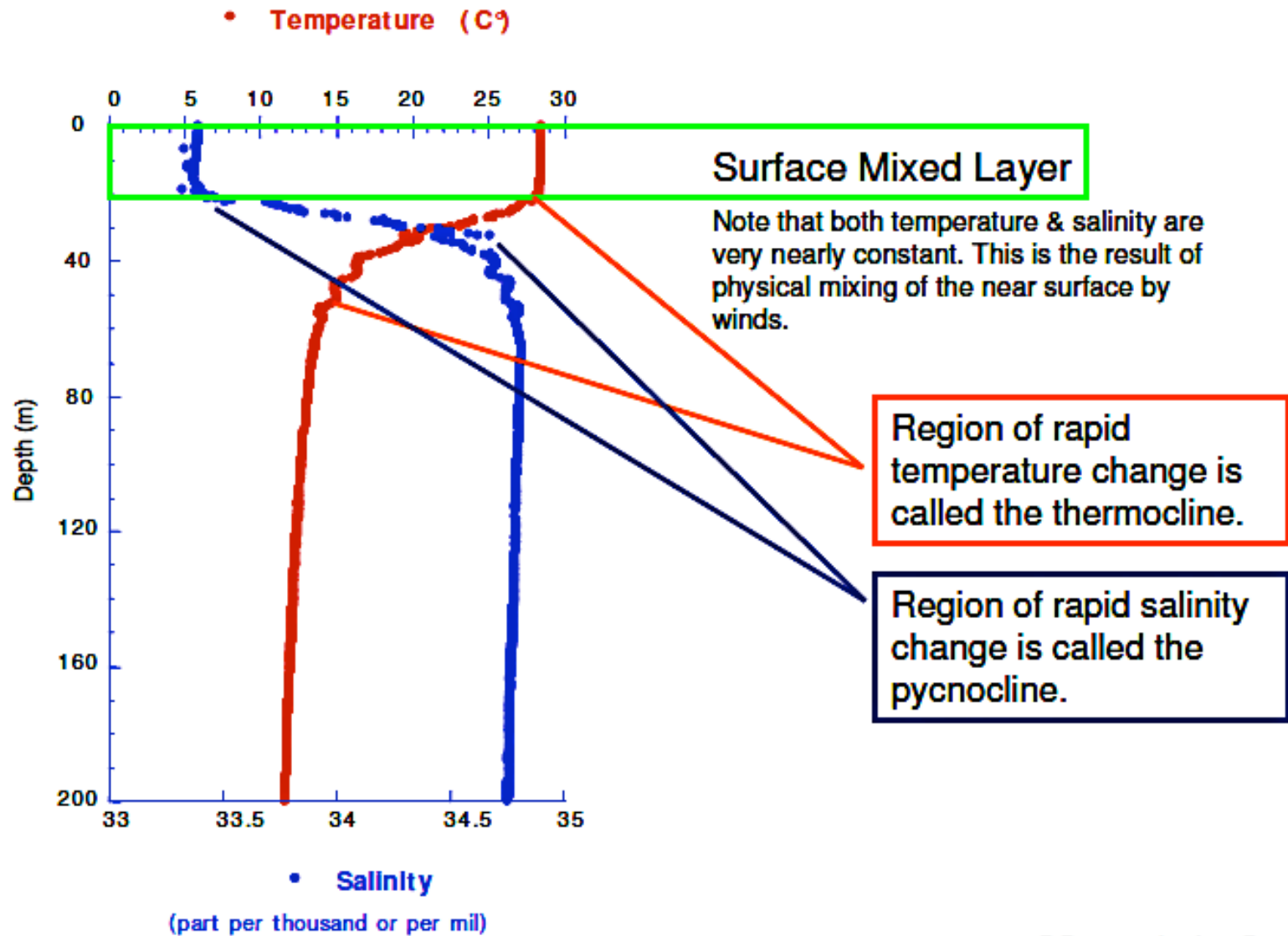
Thermocline



Thermocline = couche de transition entre l'eau chaude de surface et les eaux profondes

profondeur en m

Température et salinité varient selon la profondeur

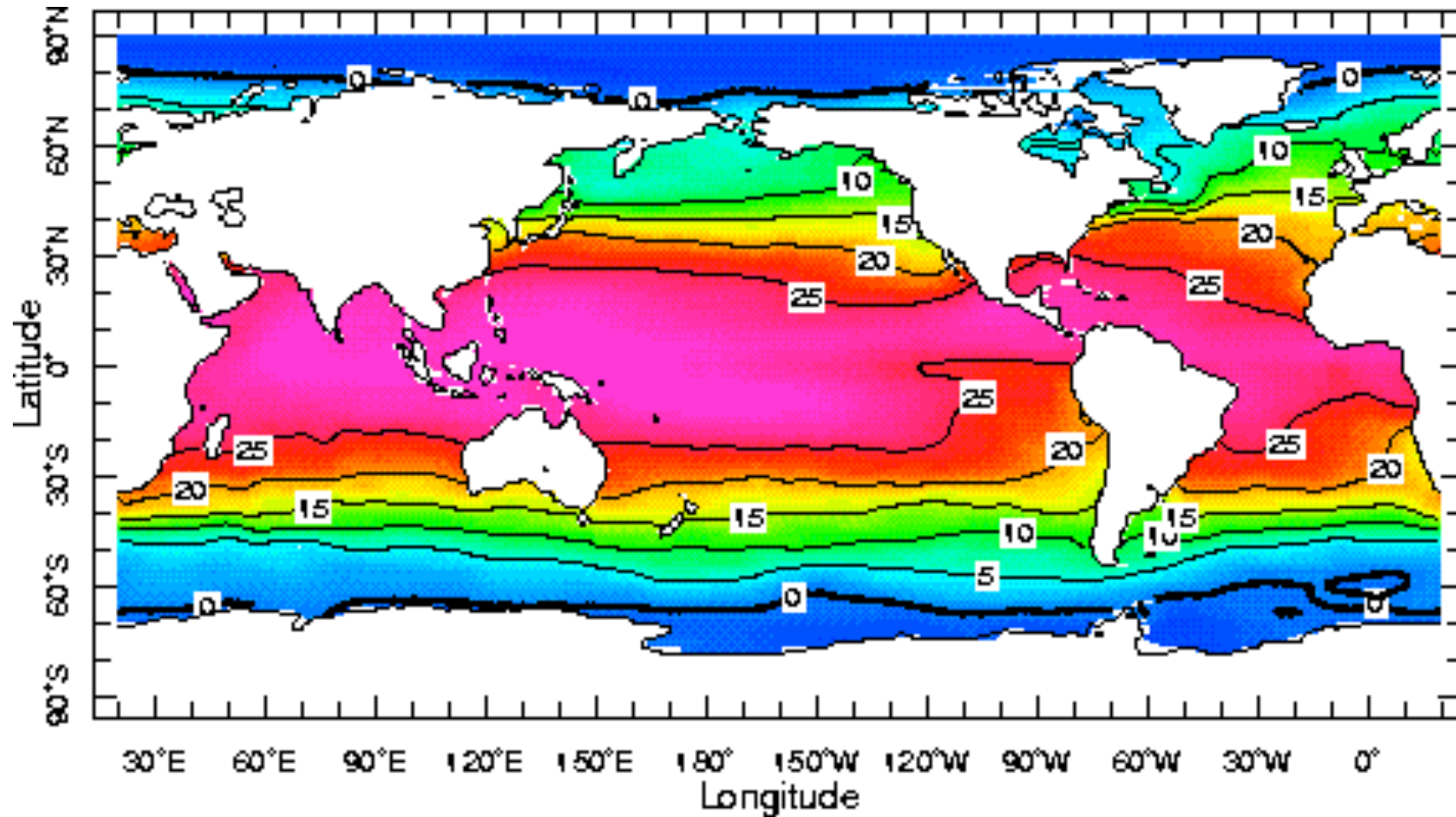


Salinité : 35 g.l⁻¹ en moyenne



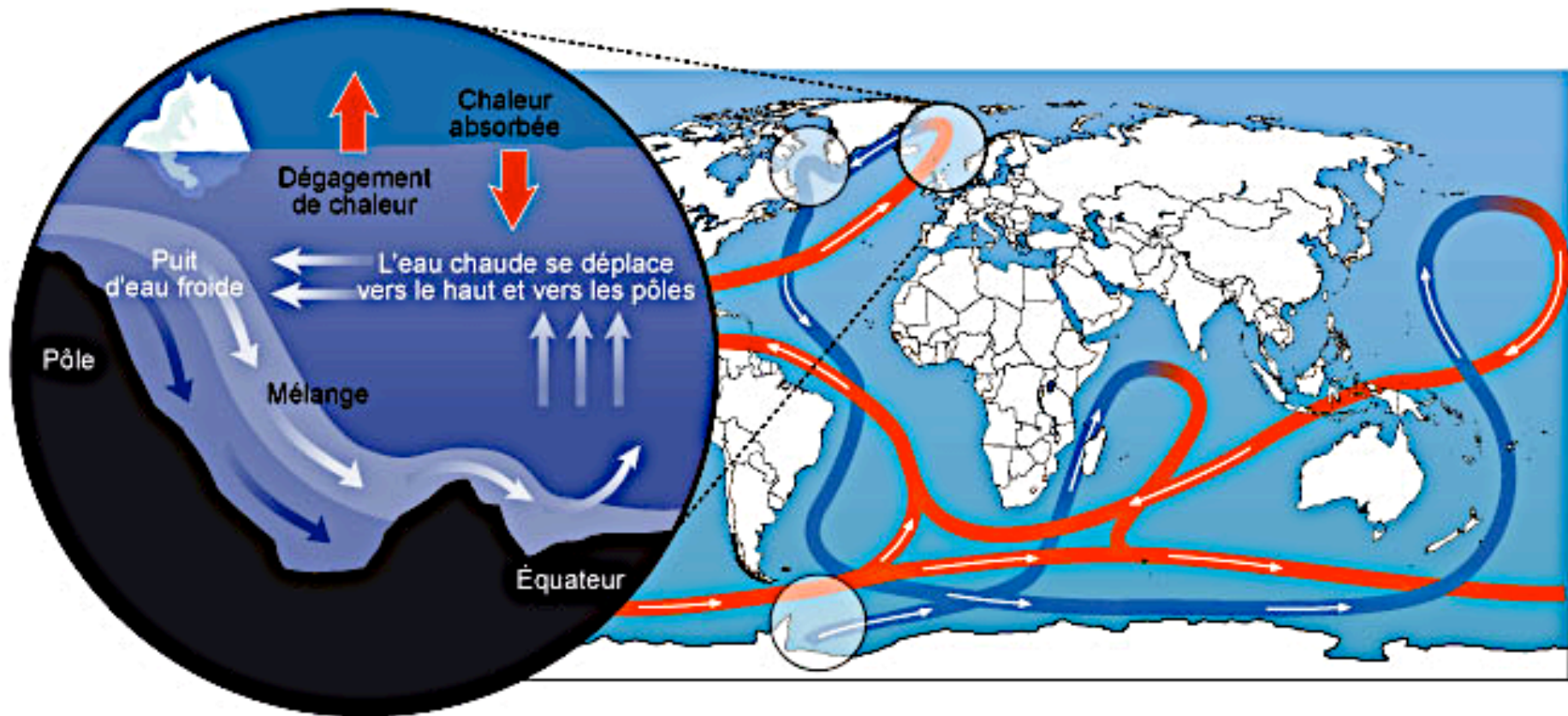
NOM	SALINITE G/L
Mer Baltique	07,00
Océan Antarctique	34,70
Océan Pacifique	35,00
Océan Indien	36,50
Océan Atlantique	36,50
Mer Méditerranée	38,50
Mer Rouge	39

La température des océans



**Moyennes annuelles des
températures de surface**

Stratification de l'eau dans les océans



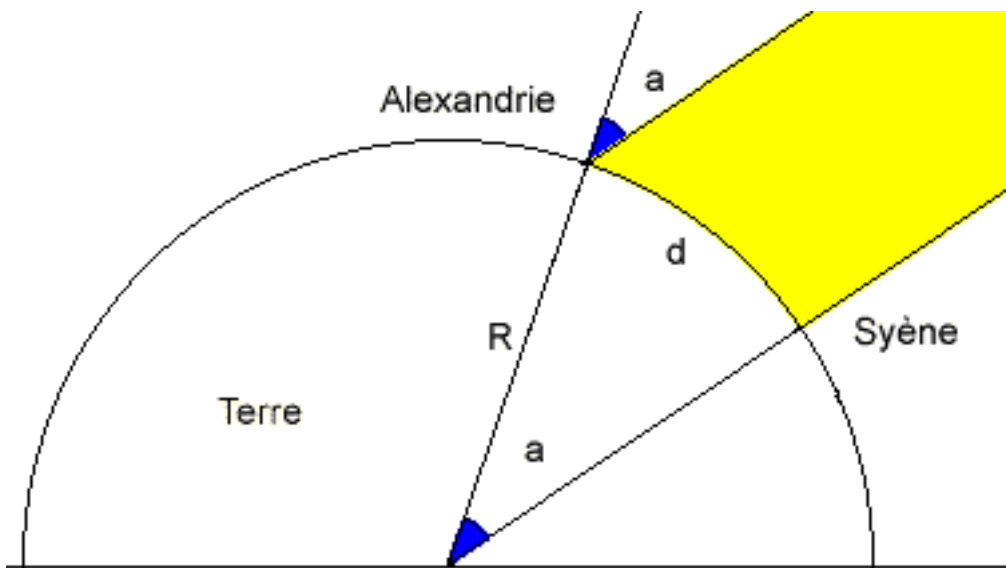
**L'eau chaude monte. L'eau froide et salée plonge.
Il y a donc une stratification de l'eau.**

2. Les enveloppes internes

Masse et densité de la Terre

1. Le rayon de la Terre peut être déduit de l'étude des ombres. Ainsi Eratosthène (vers 200 av JC) a comparé l'ombre à midi au solstice d'été entre Syène et Alexandrie (distants de 800 km). La différence est de 7° soit $7 \times 3,14 / 180 = 0,122$ radians.

$$\text{Rayon de la Terre } R = \frac{d}{a}$$



$$\text{Rayon de la Terre } R = \frac{800}{0,122}$$

Rayon de la Terre
6 550 km

Le rayon de la Terre est en fait de 6 378 km en moyenne

Masse et densité de la Terre



2. La masse de la Terre peut être déduite de la valeur de g mesuré. Une autre méthode consiste à utiliser la période de rotation (loi de Képler).

$$\text{Masse de la Terre} = \frac{g \cdot (\text{Rayon de la Terre})^2}{G}$$

$$g = 9,806\ 65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$$

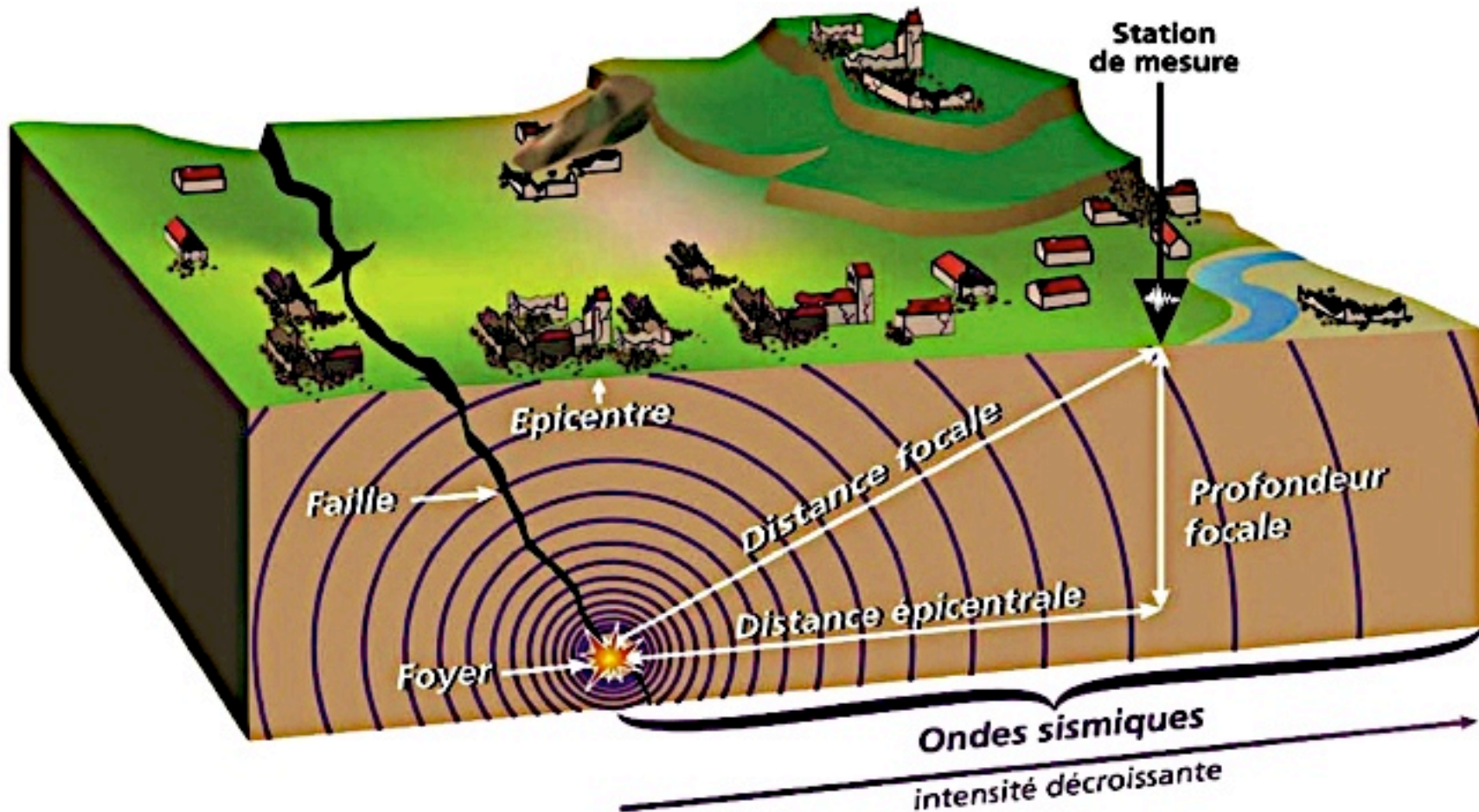
$$\text{Rayon de la Terre} = 6370 \text{ km} = 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$$

Masse de la Terre

$5,96 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

=> densité moyenne de la Terre = 5,517

Rappel : séismes et ondes sismiques



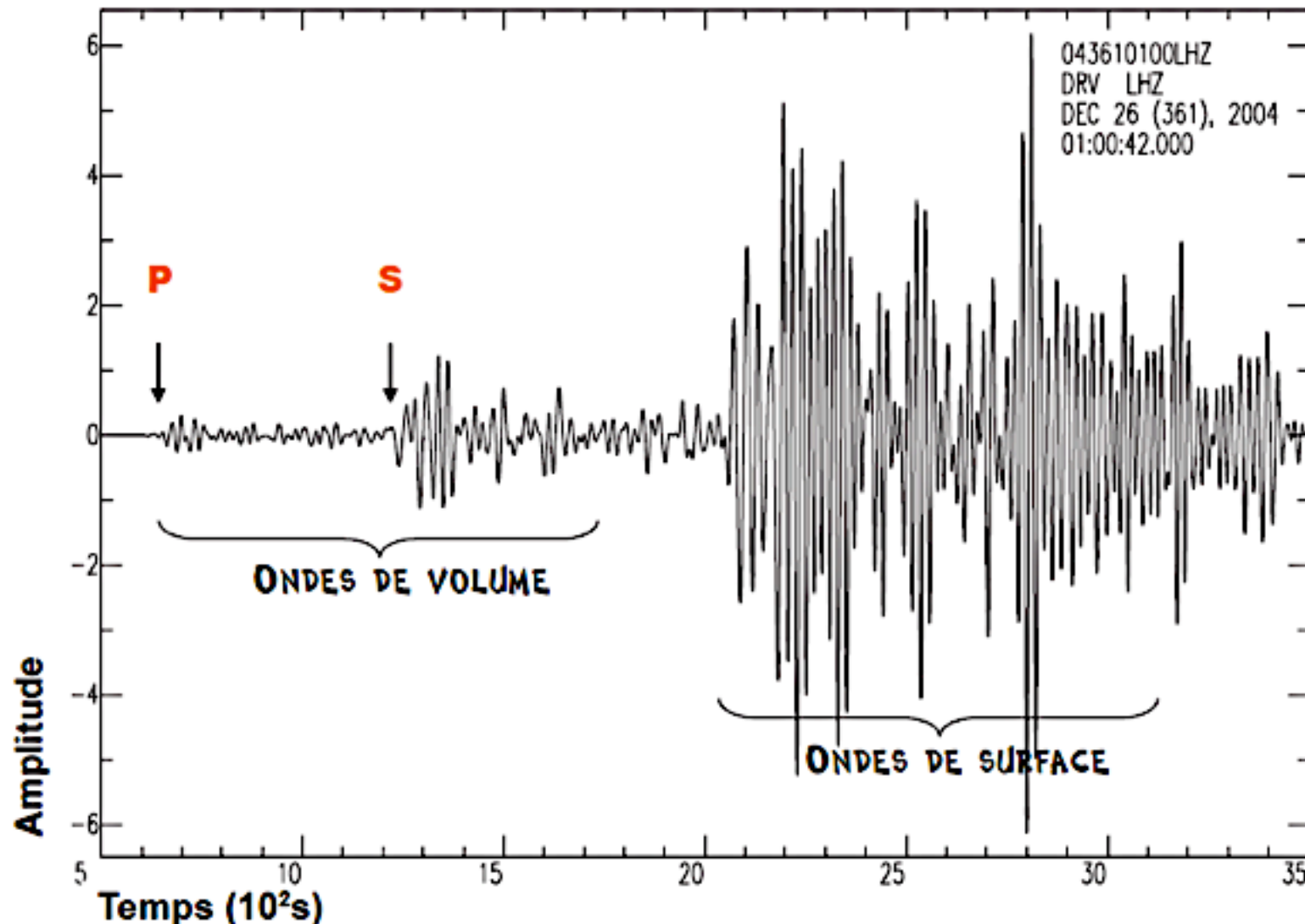
onde sismique = vibration propagée dans les 3 directions de l'espace

Les différentes ondes sismiques

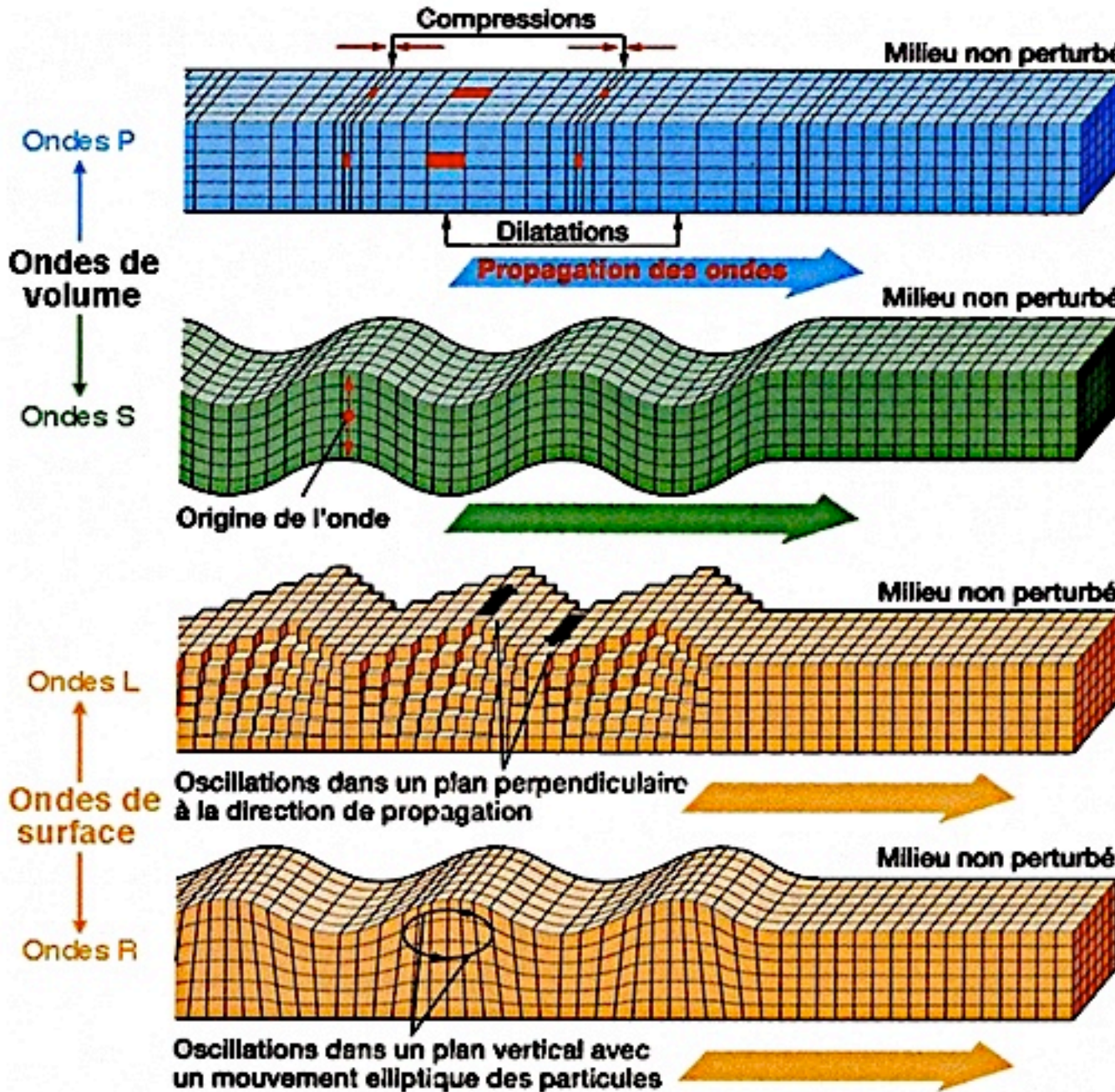


Enregistrement à la station de Dumont d'Urville (Terre Adélie)
du séisme du 26 décembre 2004 au large de SUMATRA

Magnitude 9.3



Les différentes ondes sismiques



compression

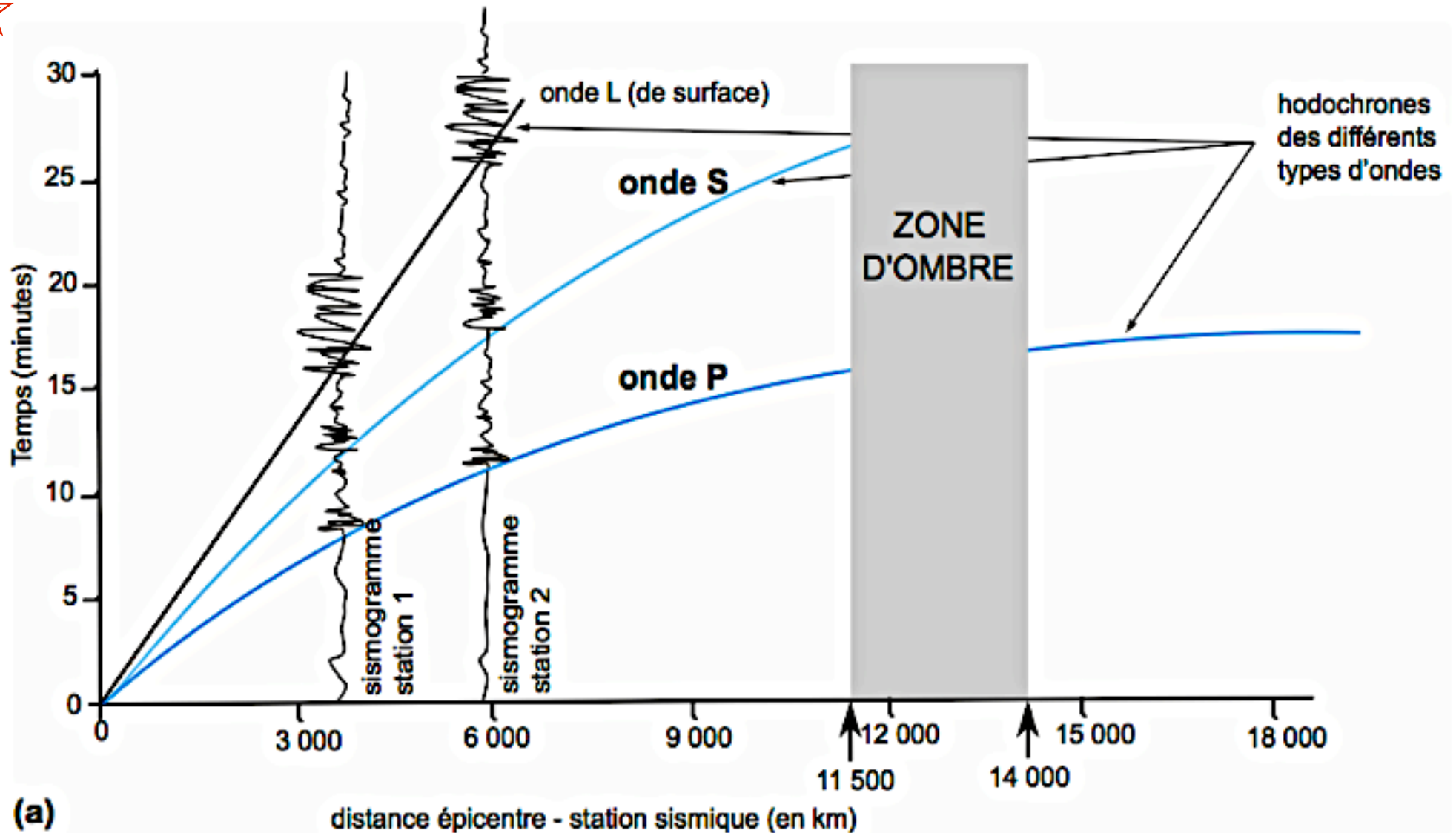
cisaillement

Vitesse des ondes P et matériel traversé



Roche	Densité	Vitesse des ondes P en km.s ⁻¹
eau	1	1,45
grès	2,48	6
calcaire	2,39	6
basalte	2,9	6,75
granite	2,65	6,25
péridotite	> 3,3	> 8

Profils de vitesse des ondes sismiques

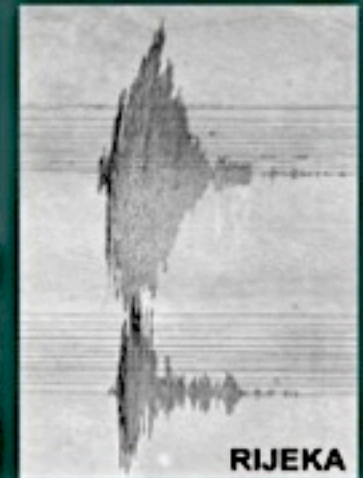
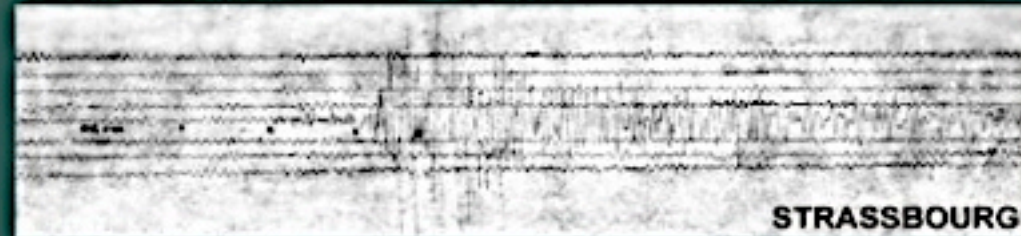
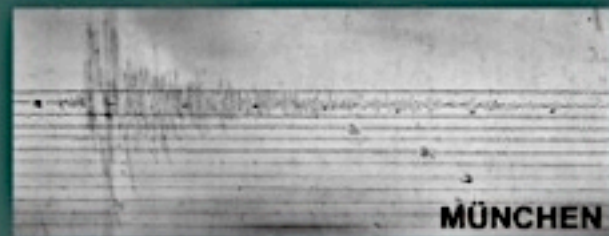
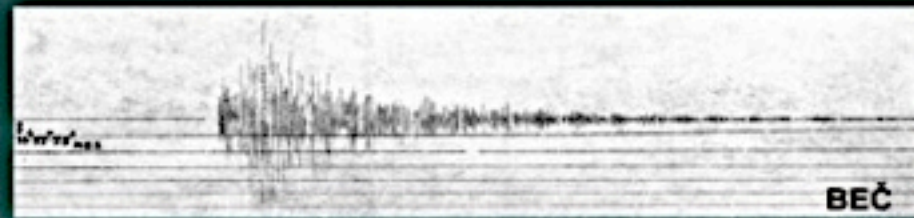
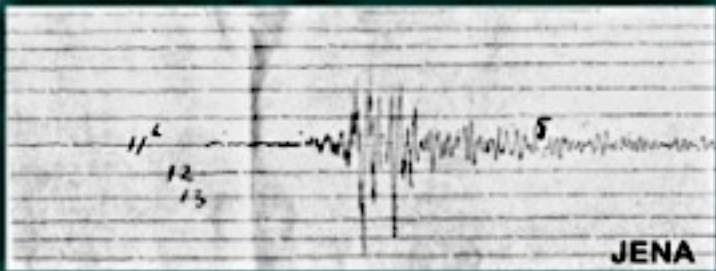
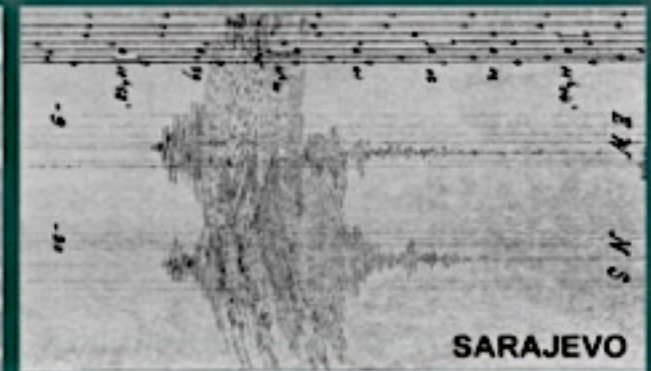
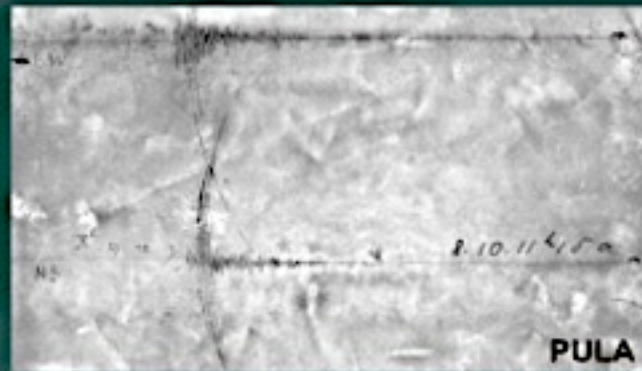
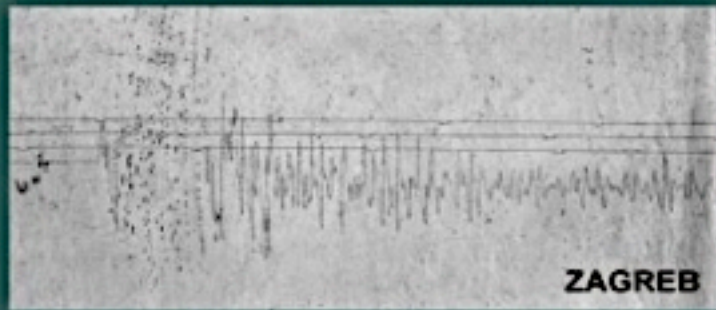


Les données sont les sismogrammes : elles permettent de construire des profils de vitesse

Le travail de Mohorovicic

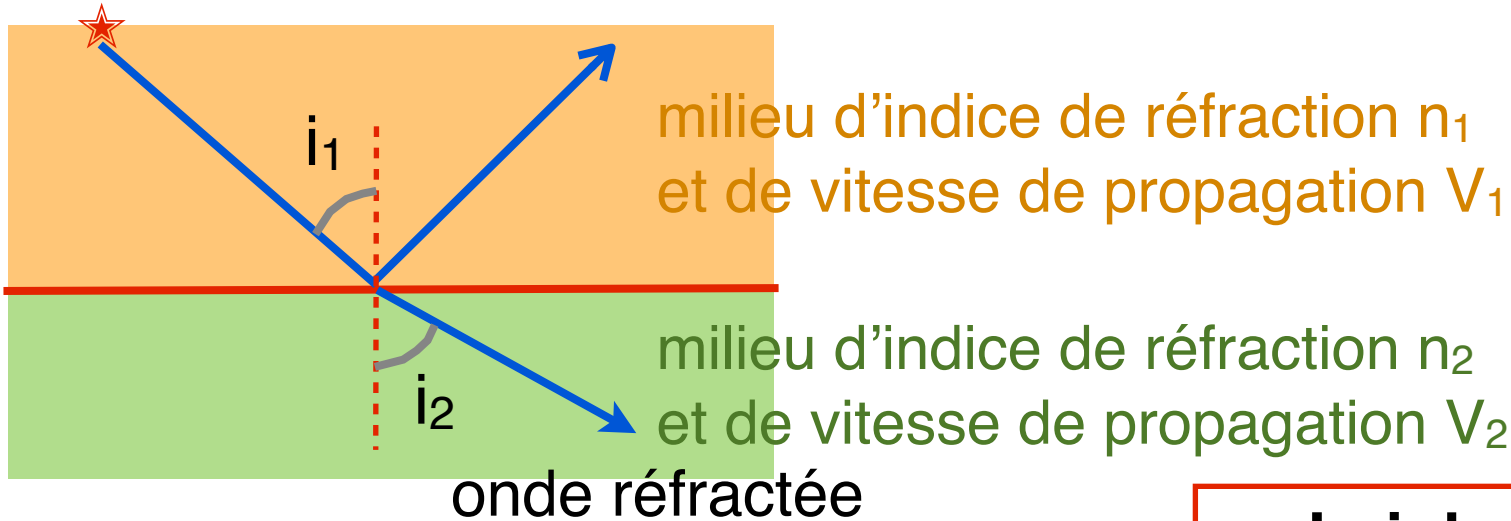


Enregistrements du séisme de Zagreb
(08/10/1909) analysé par Andrija Mohorovicic



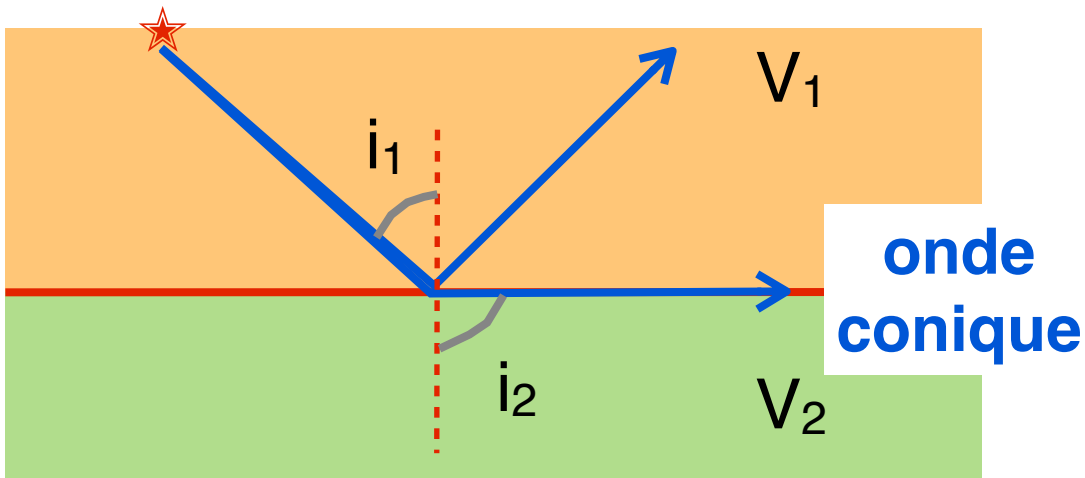
La propagation des ondes sismiques

onde réfléchi



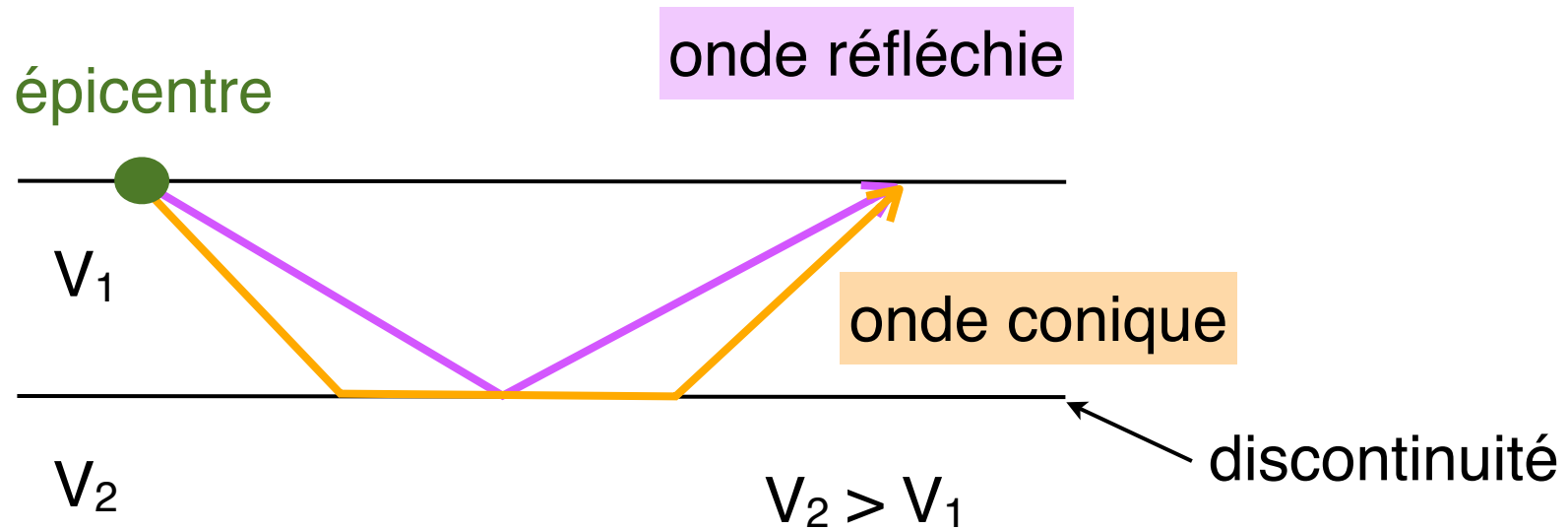
onde réfractée

Loi de Descartes
 $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$
ou $\sin i_1 / V_1 = \sin i_2 / V_2$



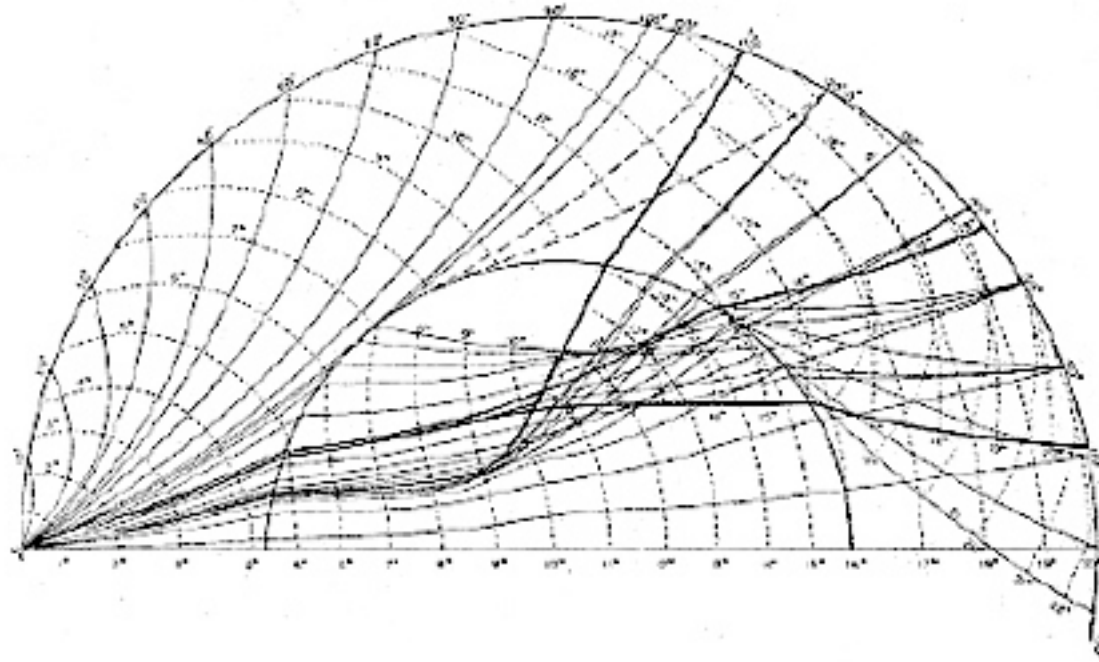
onde conique lorsque $i_2 = 90^\circ$
donc $i_1 = \arcsin (V_1/V_2)$

La discontinuité de Mohorovicic



L'onde conique arrive avant l'onde réfléchie

Trajet des ondes



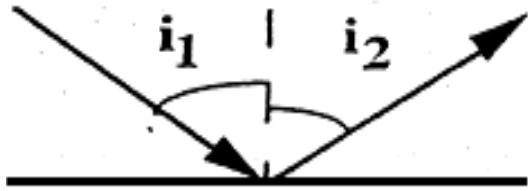
Les ondes sismiques ont une trajectoire incurvée : pourquoi ?

<http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/modeles-interieur-terre.xml>

La courbure des rais sismiques expliquée

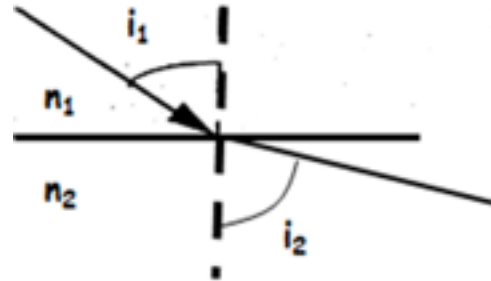


Réflexion



$$i_1 = i_2$$

Réfraction



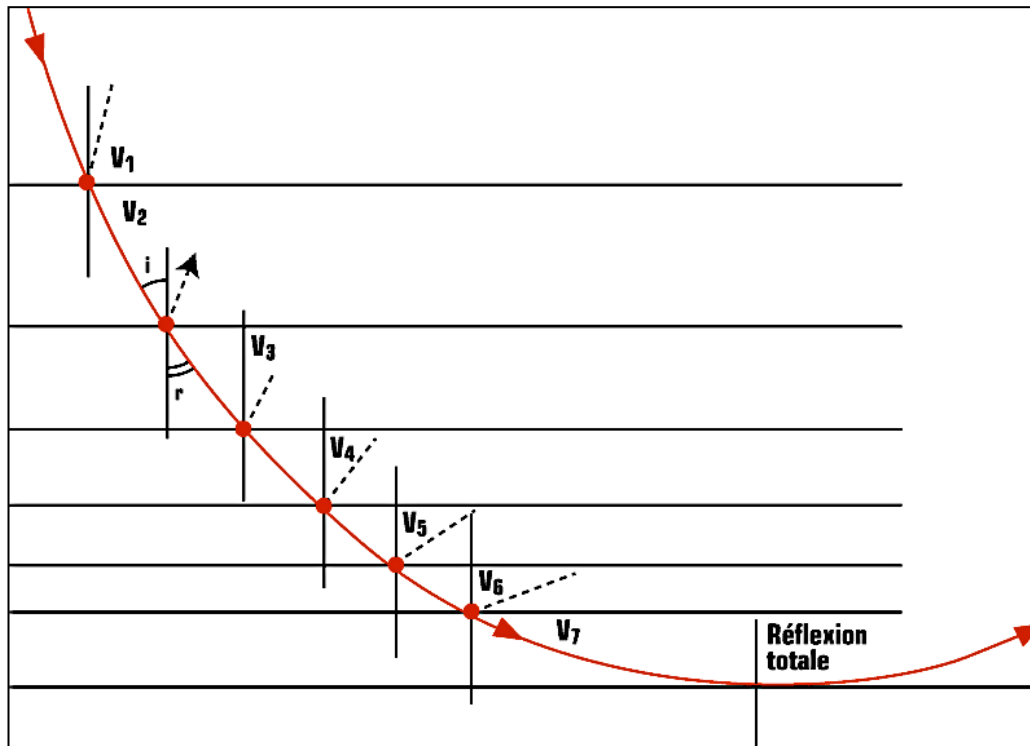
$$n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \cdot \sin i_2$$

OR

$$v = 1/n$$

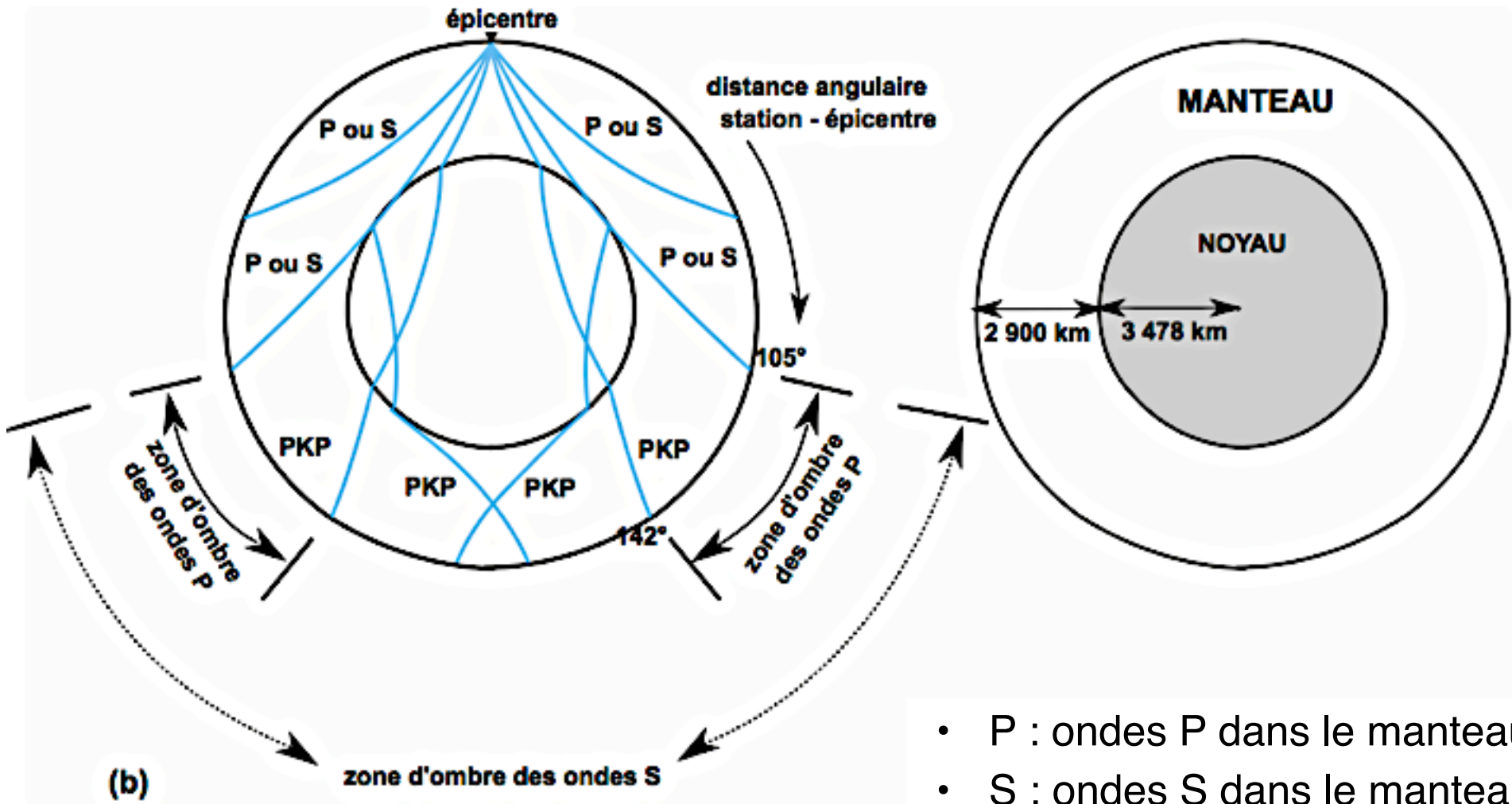
donc

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



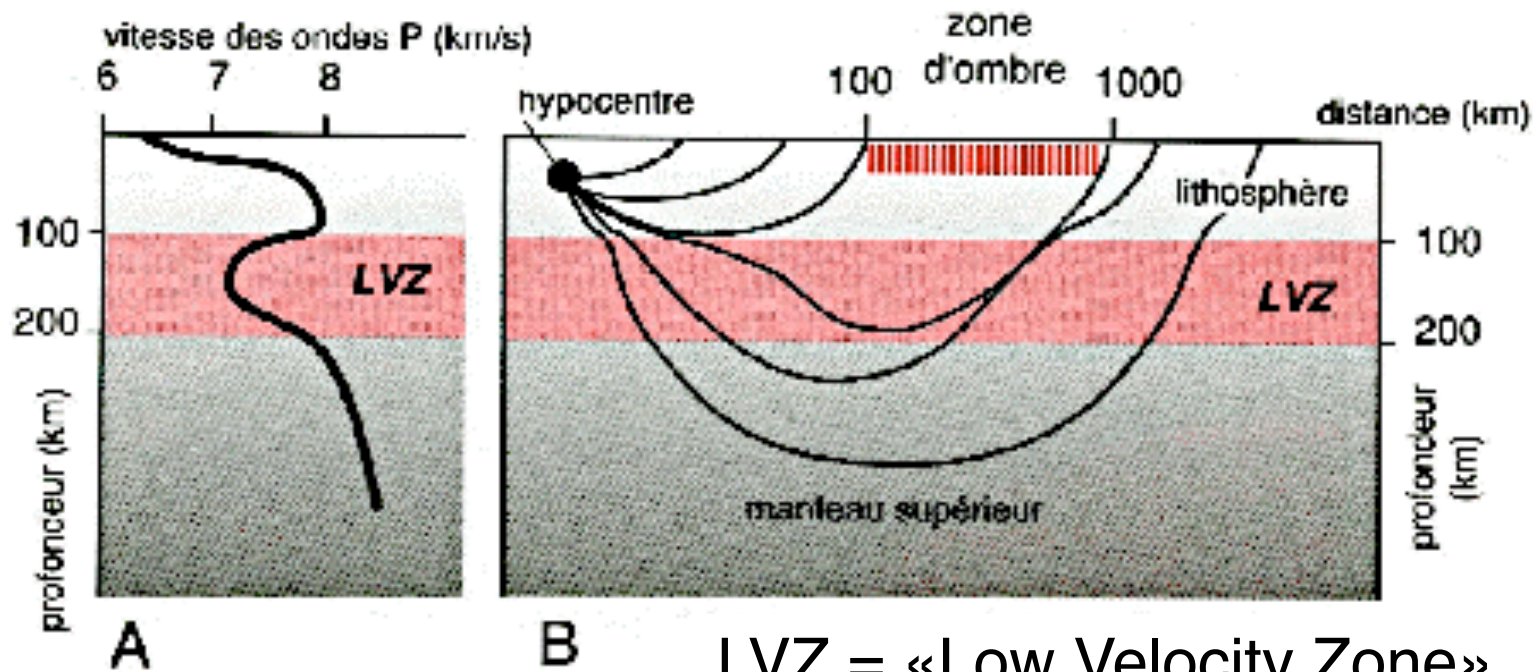
À chaque limite, l'onde arrive dans un milieu plus dense (avec un indice n plus élevé) donc l'angle par rapport à la verticale est toujours plus grand.

Géométrie des ondes sismiques dans la Terre



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

Une zone d'ombre plus étroite



LVZ = «Low Velocity Zone»

Une zone d'ombre moins marquée

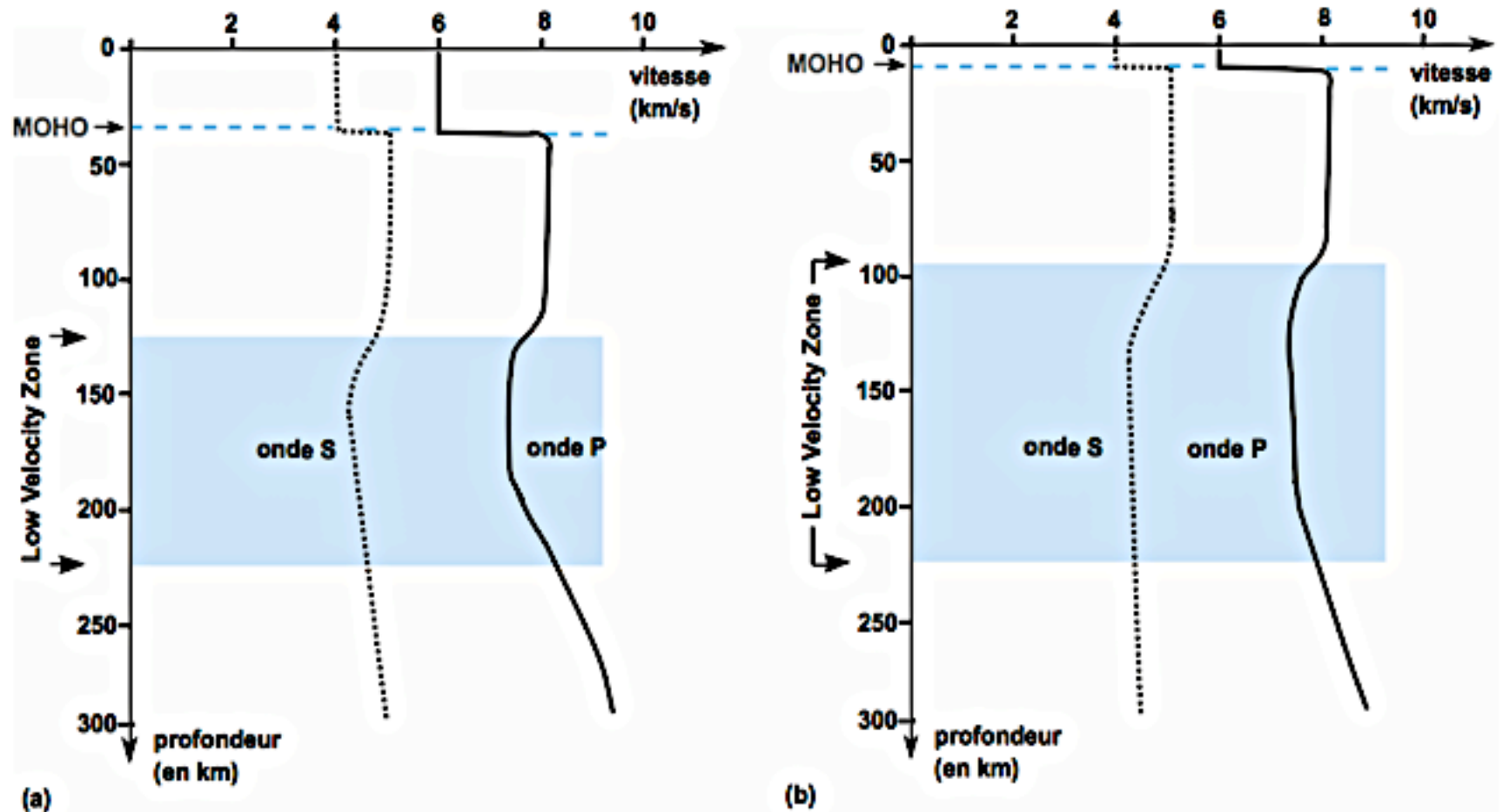


Figure 2.4 Variation de la vitesse de propagation des ondes P et S sous les continents (a) et sous les océans (b).

Le modèle PREM

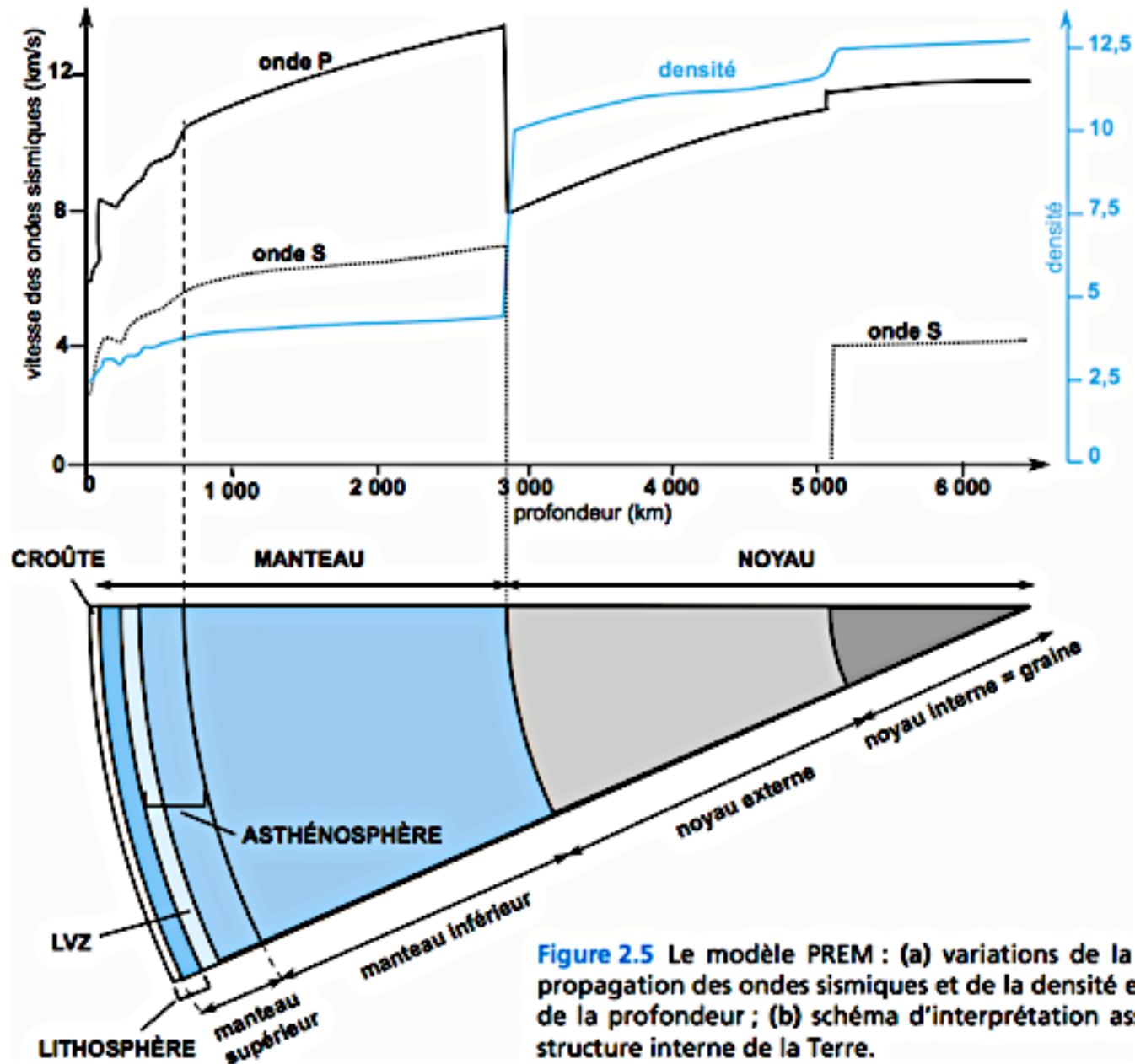


Figure 2.5 Le modèle PREM : (a) variations de la vitesse de propagation des ondes sismiques et de la densité en fonction de la profondeur ; (b) schéma d'interprétation associé de la structure interne de la Terre.

La viscosité des enveloppes



Matériau	Viscosité dynamique en poises (1 poise = 0,1 Pa.s ⁻¹)
Croûte continentale supérieure (granite)	$10^{23} - 10^{24}$
Base de croûte continentale (croûte ductile)	$10^{18} - 10^{20}$
Lithosphère (moyenne)	$10^{23} - 10^{24}$
Manteau asthénosphérique	$10^{20} - 10^{22}$
Manteau inférieur	$10^{22} - 10^{23}$
Noyau externe	$10^{-2} - 1$

La viscosité de l'eau liquide est de 10^{-2} poises
et celle de la glace de 10^{14} poises

La composition de la croûte terrestre



Eléments		Milieux (en %)			Etres vivants (en %)	
		Croûte Terrestre	Hydrosphère	Atmosphère Sèche (en %)	Plant de blé (en %)	Homme
Hydrogène	H	0,22	66		8,5	9,00
Oxygène	O	47	33	21	64	62,43
Carbone	C	0,19	0,001	0,03	24,2	21,15
Azote	N			78,3	0,8	3,10
Calcium	Ca	3,5	0,006		0,13	1,90
Potassium	K	2,5	0,006		0,51	0,23
Silicium	Si	28			0,65	0,001
Magnésium	Mg	2,2	0,034		0,10	0,027
Phosphore	P	0,08			0,11	0,95
Soufre	S	0,04	0,017		0,09	0,16
Aluminium	Al	7,9			-	-
Sodium	Na	2,5	0,28		?	0,08
Fer	Fe	4,5			0,04	0,005
Titane	Ti	0,46			-	-
Chlorure	Cl		0,33		0,08	0,08

Si, O et Al dominant

Les grandes familles de roches



Roches
magmatiques

Roches
métamorphiques

Roches
sédimentaires

Roches
plutoniques

Roches
volcaniques

Roches
silicatées

Roches
salines

Roches
carbonatées

Roches
carbonées

Les roches de la croûte continentale



Roches sédimentaires



photo C. ESCUYER

*Plateau et falaise calcaires
(Vallée de la Jonte, Cévennes)*

Granite



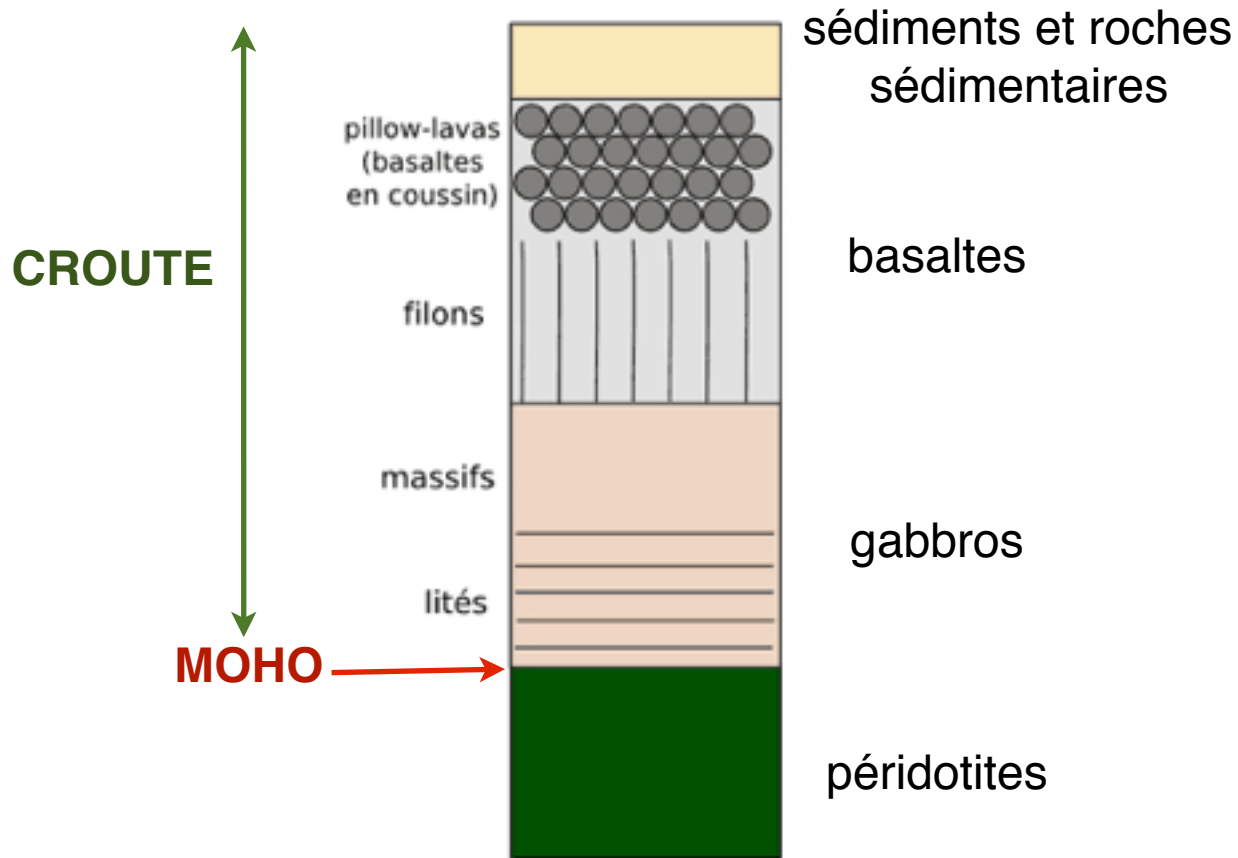
photo C. ESCUYER

(Cévennes, Florac)

Gneiss



Les roches de la croûte océanique



Les roches de la croûte océanique



*Empilement de pillows lava
(Marcia Marina, île d'Elbe)*

gabbro (Cervières)



photo C. Escuyer

Photo : S. CAMILLO

La péridotite, roche du manteau



enclaves de péridotite
dans un basalte

minéraux :
olivine + pyroxène



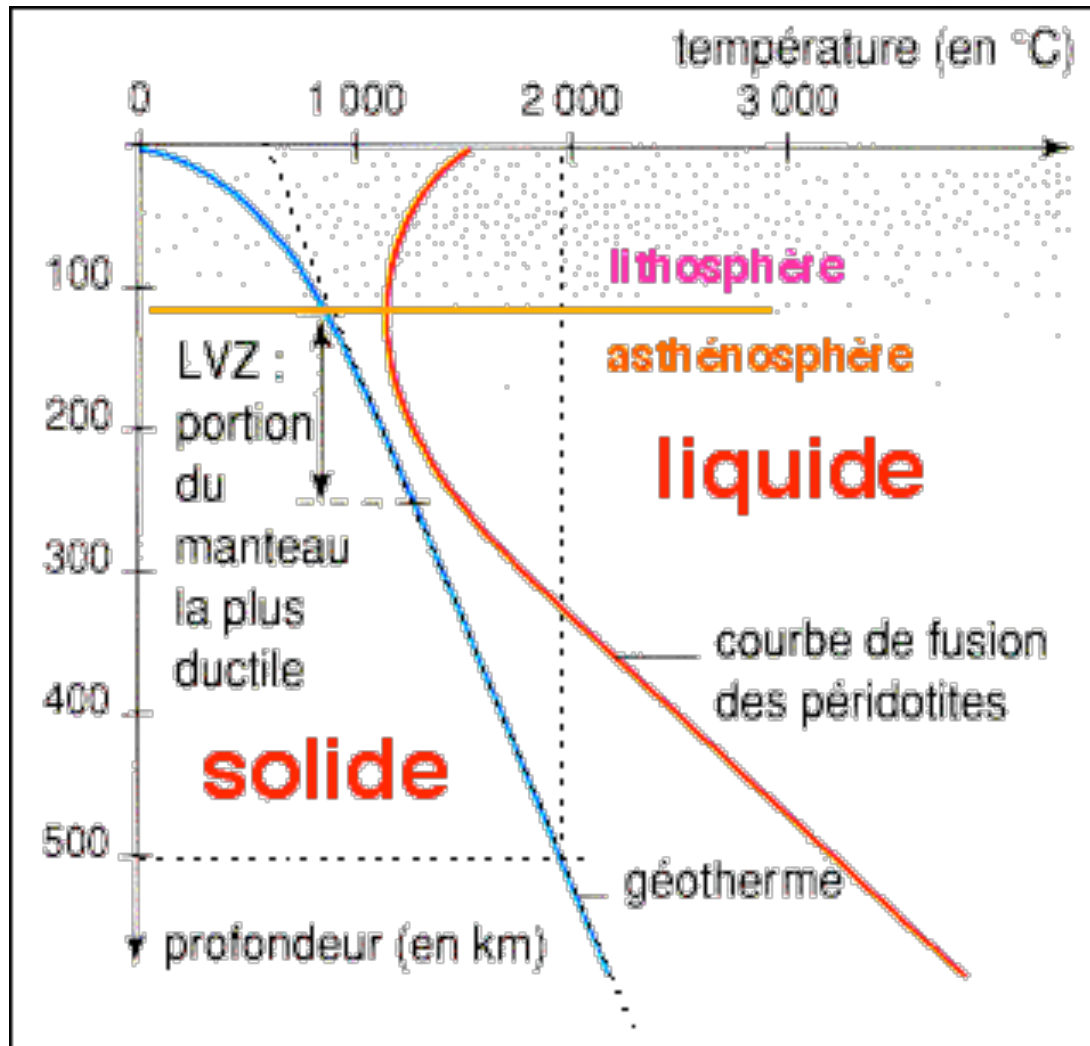
serpentine (Queyras, Pic de Caramantran)



composition

SiO₂ : 43,5% **MgO : 41,5 %** **FeO : 8,2 %** **Al₂O₃ : 3,6 %** **et CaO : 3,2 %**

Comportement rhéologique du manteau



Entre 100 et 200 km, le manteau est plus **ductile**

Principaux types de péridotites

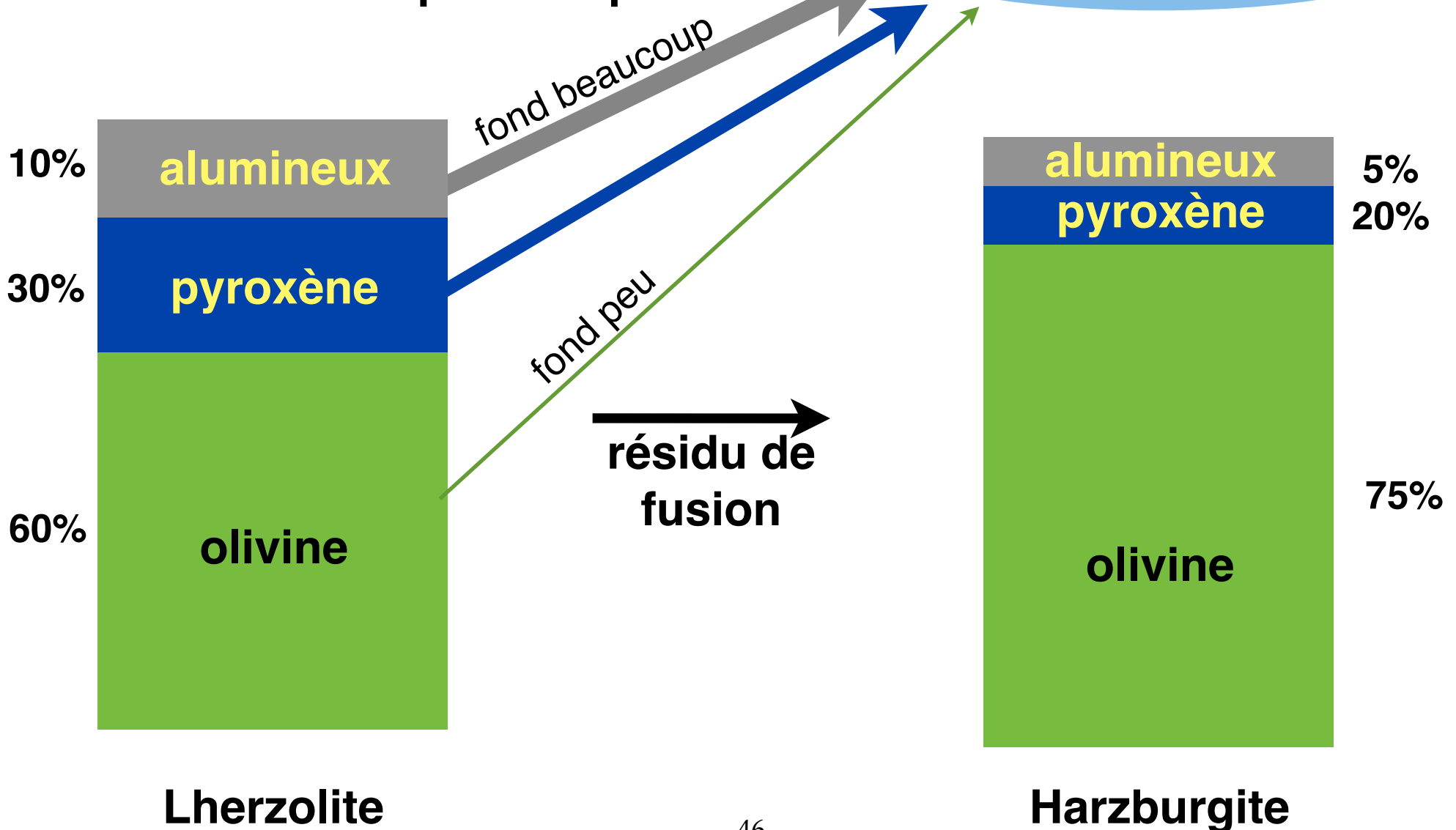


Type de péridotite	Lherzolite	Harzburgite	Dunite
Minéralogie	Olivine : 60-70 % pyroxène : 25-30 % Alumineux : 5-10 %	Olivine : 70-80 % pyroxène : 20 % Alumineux : 5 %	Olivine > 95 % pyroxène : résidus
Localisation océanique	manteau de lithosphère océanique type Atlantique	manteau de lithosphère océanique type Pacifique	-
Gisements ophiolitiques	Alpes, Corse	Oman	Oman

Des minéraux qui fondent +/-

Fusion et migration
de la phase liquide

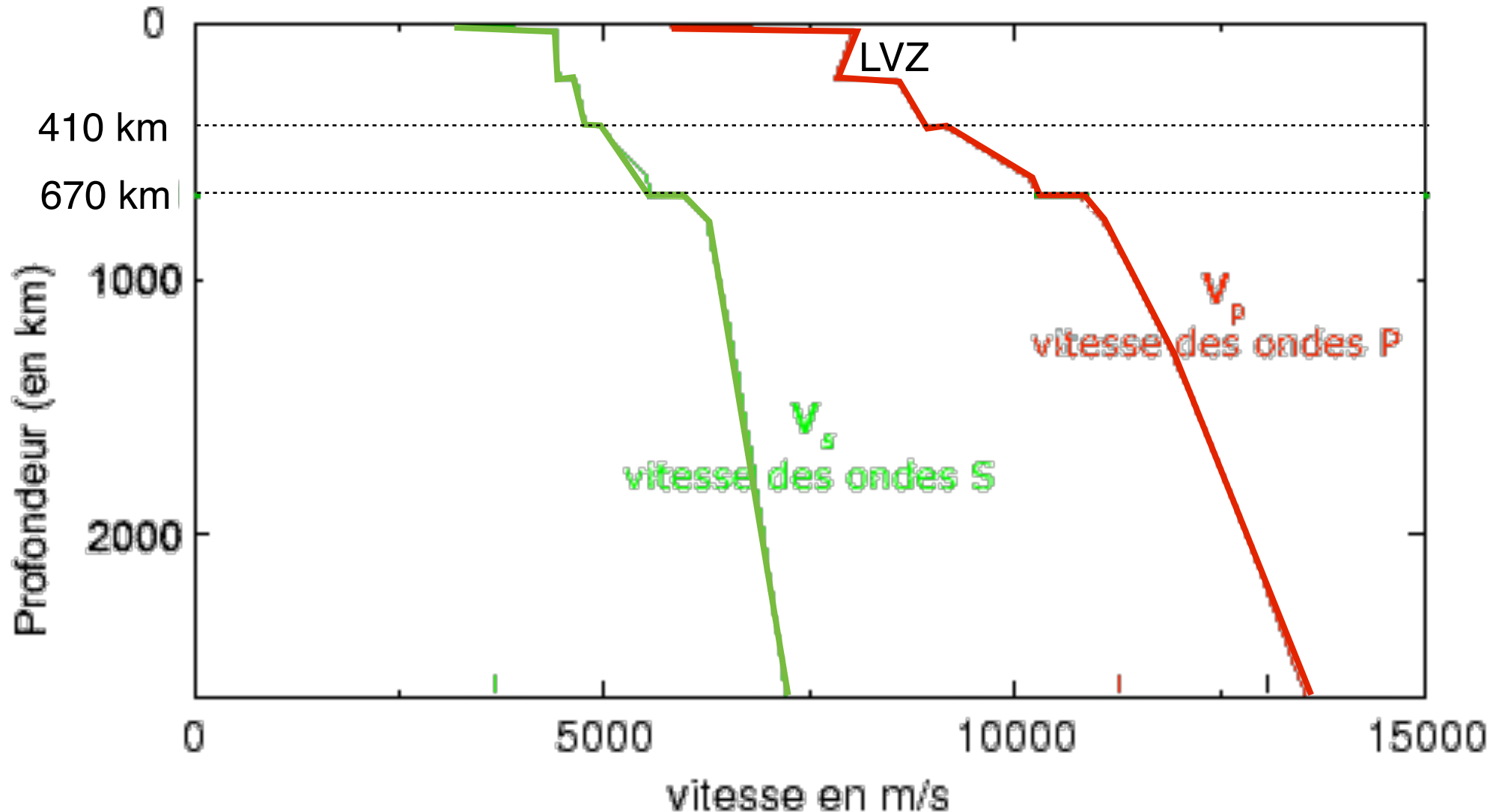
roches magmatiques



Vitesse des ondes sismiques dans le manteau supérieur

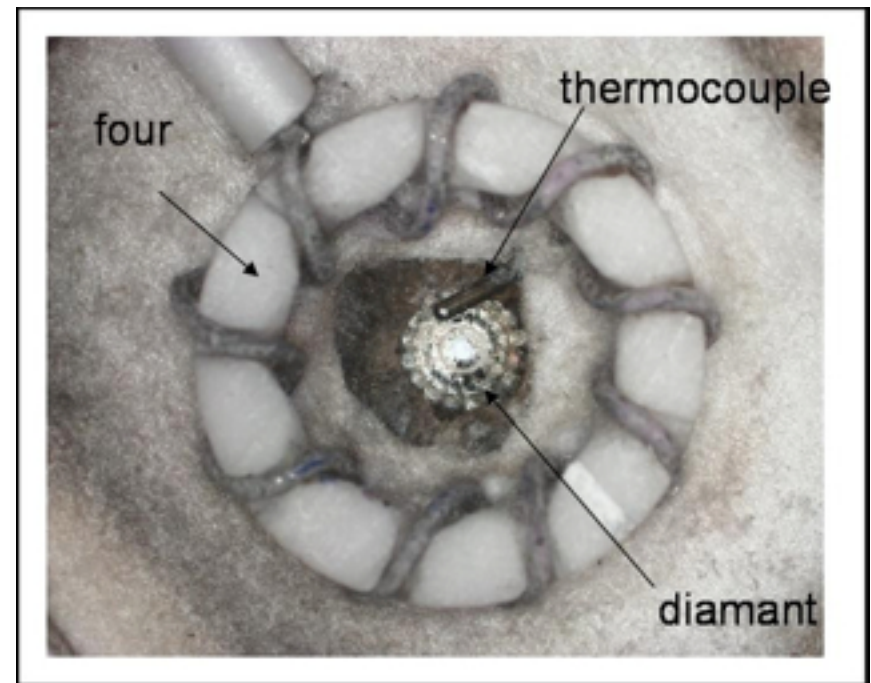
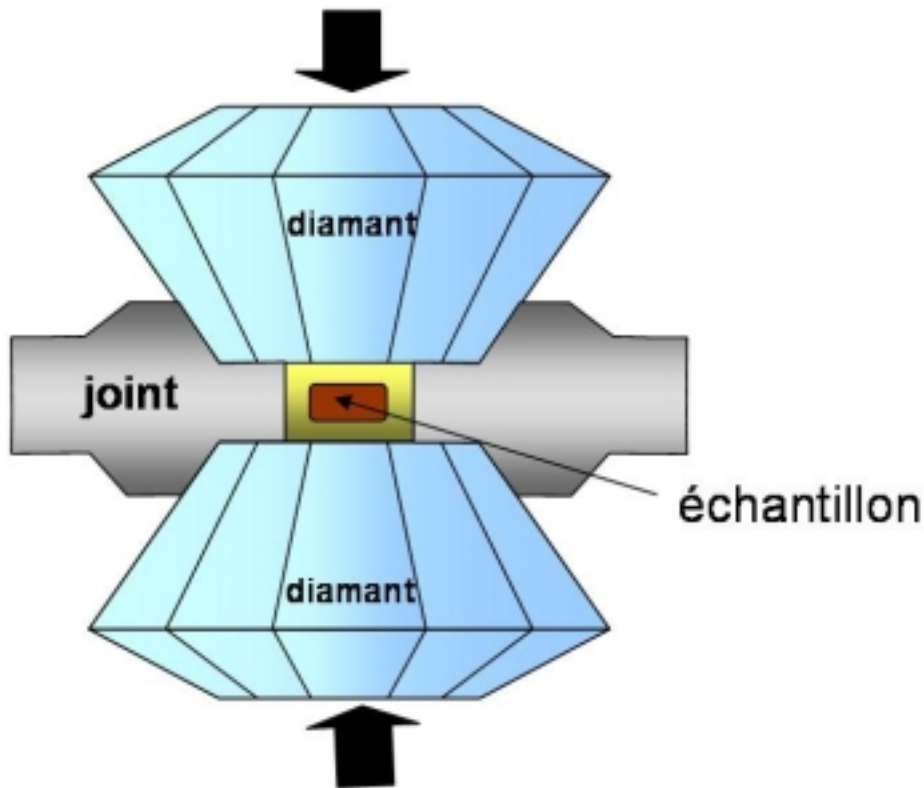


Deux sauts de vitesse entre 200 et 700 km de profondeur.



Les cellules à enclume de diamant

- ✿ L'échantillon est comprimé dans une presse, par écrasement entre deux diamants. La pression atteint 500 GPa soit 5 millions de fois l'atmosphère.

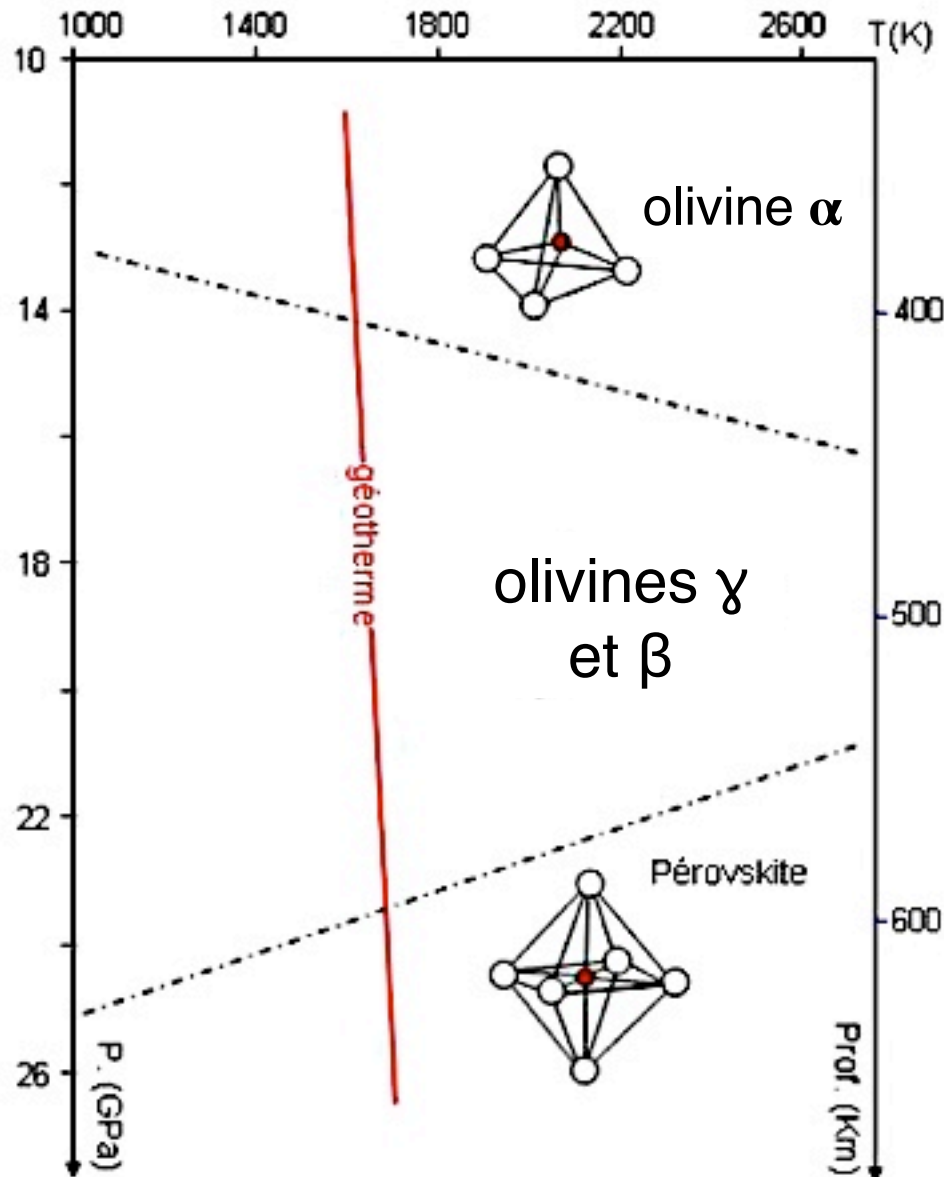


L'échantillon à étudier est placé dans un trou (de 50 à 300 μm de diamètre) percé dans une feuille d'acier (le joint) de quelques dixièmes de millimètres d'épaisseur que l'on serre entre deux diamants. On peut chauffer l'enceinte grâce à un micro-four jusqu'à 2000 K.

Les transitions de phase de l'olivine



structures de l'olivine en fonction de la profondeur (étude de laboratoire)



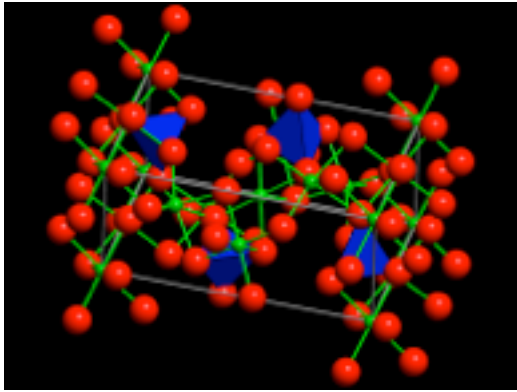
olivines γ aussi appelées à structure spinelle mais c'est un abus de langage

Conséquence : hausse de densité



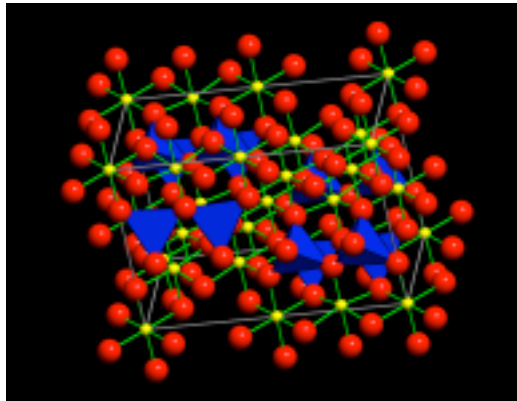
olivine α

olivine



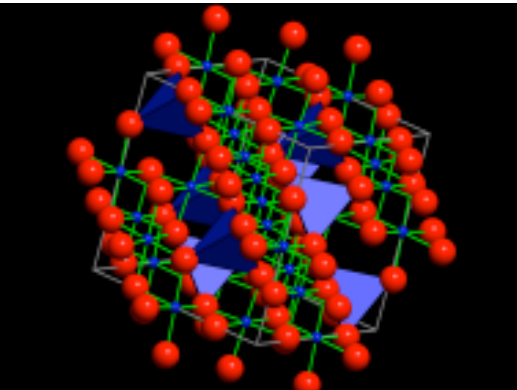
olivine β

wadsleyite



olivine γ

ringwoodite

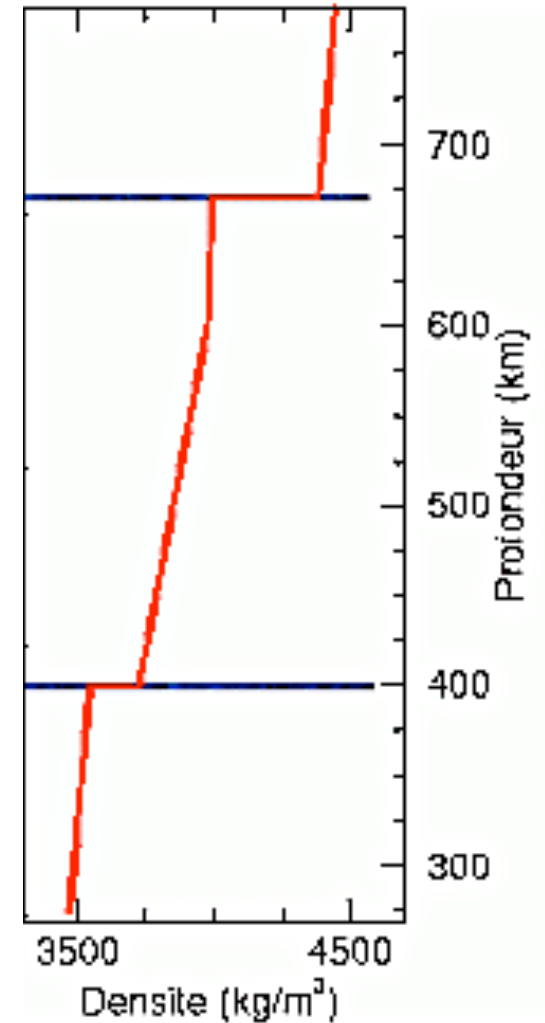


compaction

phase

minéral

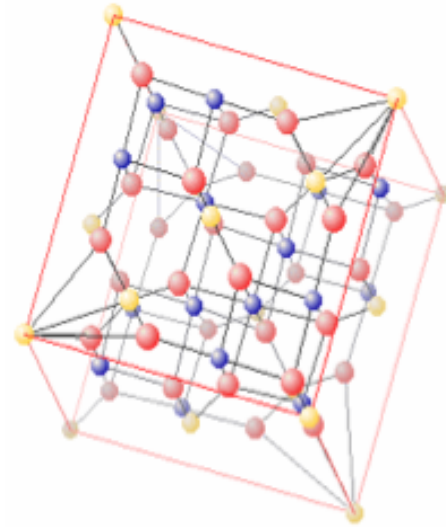
<http://planet-terre.ens-lyon.fr/>



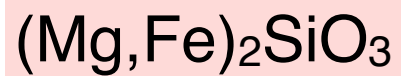
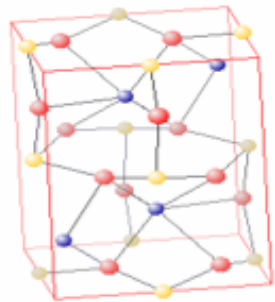
Hausse de densité
avec la pression

formes cristallines de l'olivine $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$

Dissociation de l'olivine à 670 km

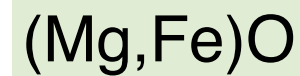


olivine de phase γ
 $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$

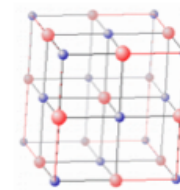


phase = pérovskite
minéral = bridgmanite

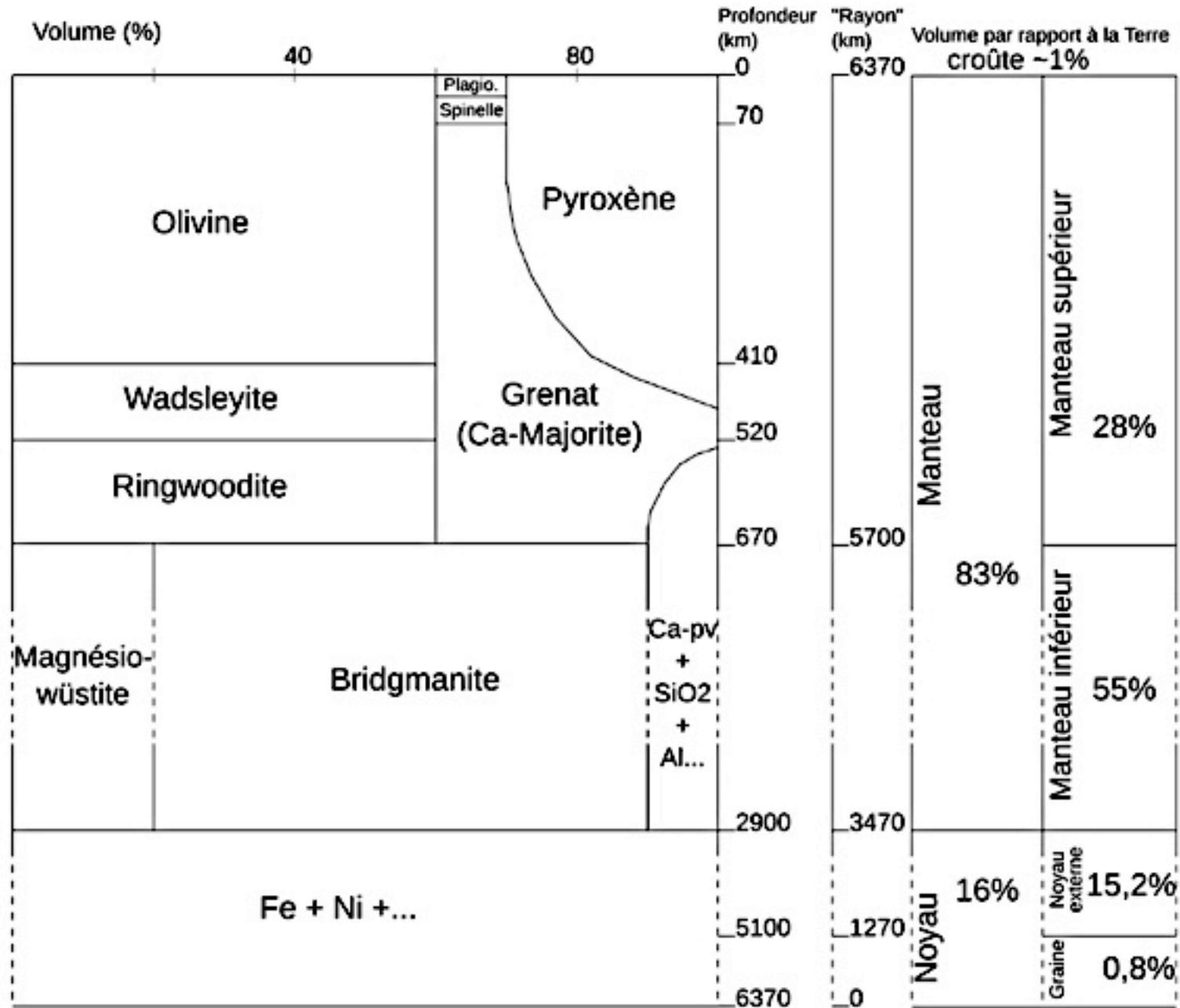
+



minéral = magnésiwüstite

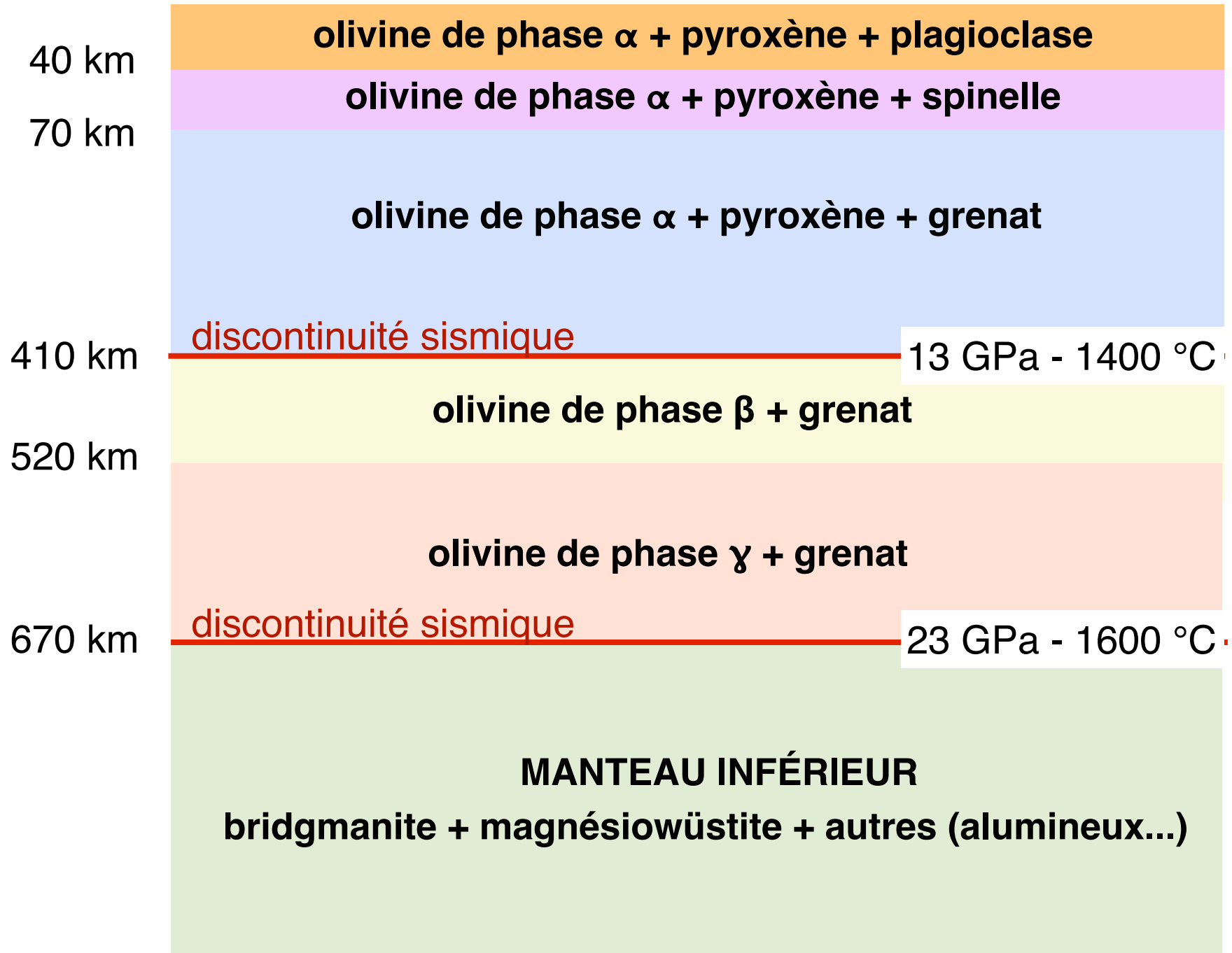


Variations du manteau



Ca-pv= CaSiO₃= Ca-pérovskite / SiO₂= silice de THP (stishovite)
 Al...= phases alumineuse / Plagio.=plagioclase

Le manteau possède différents faciès



Bilan : le manteau



**Composition minérale homogène
mais structure et comportement liés à la profondeur**

manteau lithosphérique jusqu'à 100 km

asthénosphère de 100 à 670 km
(incluant la LVZ entre 100 et 200 km)

manteau inférieur sous 670 km



Manteau supérieur

La composition chimique de la Terre



<http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/composition-terre.xml>

Éléments chimiques (% en masse)

O = 32,4 % Fe = 28,2 % Si = 17,2 % Mg = 15,9 %

Ca = 1,6 % Al = 1,5 % Ni = 1,6 % Mn, Cr, Na, Ti, K <1 %

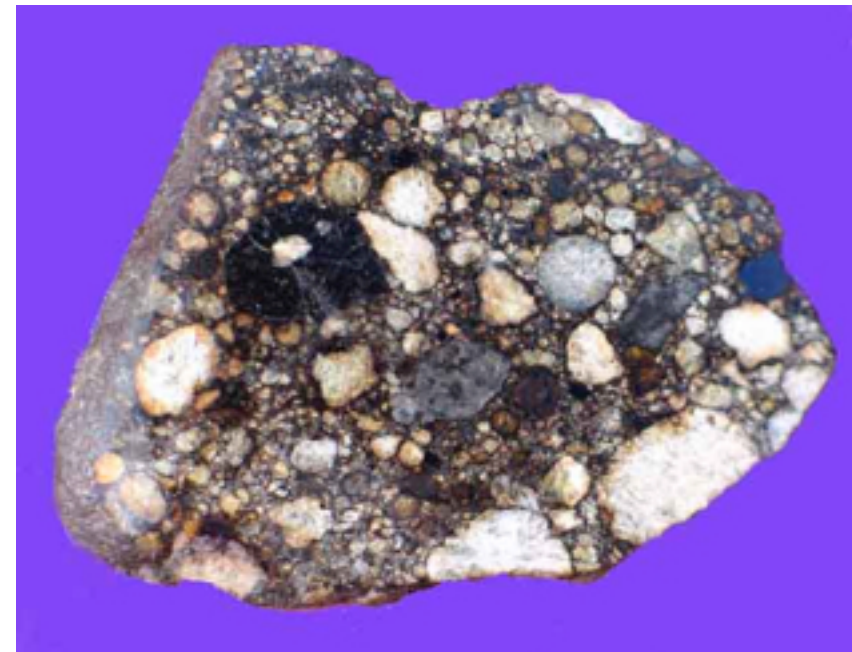
Oxydes (% en masse)

SiO₂ = 34,6 % FeO = 34,3 % MgO = 25,1 %

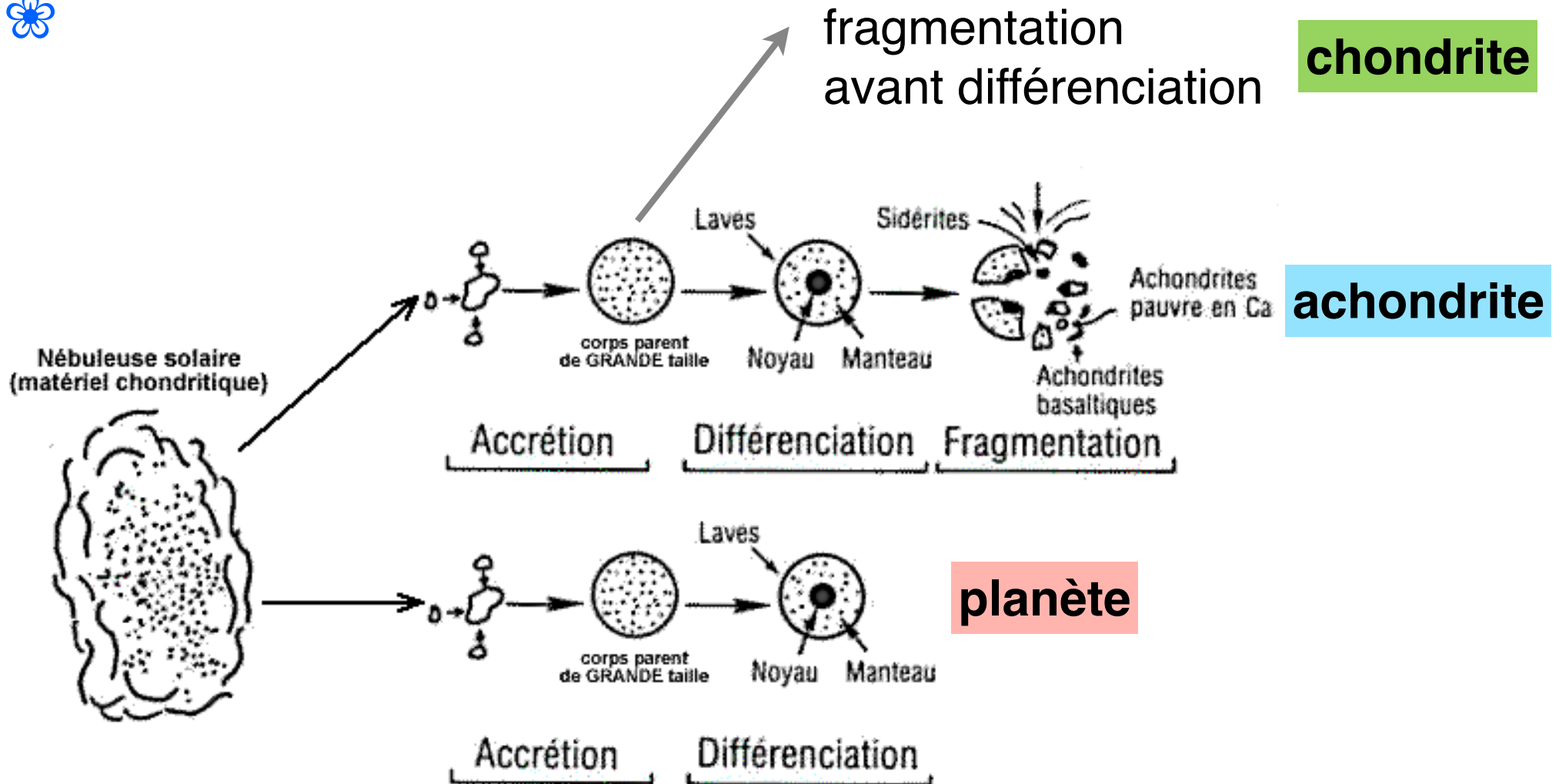
Al₂O₃ = 5,1 % CaO = 2,1 %

Météorite chondrite

globules silicatés incluant olivines, pyroxènes,
plagioclases
noyés dans une matrice de fer, nickel et soufre.
Parfois présence de Ca, Al, Ti ou C.

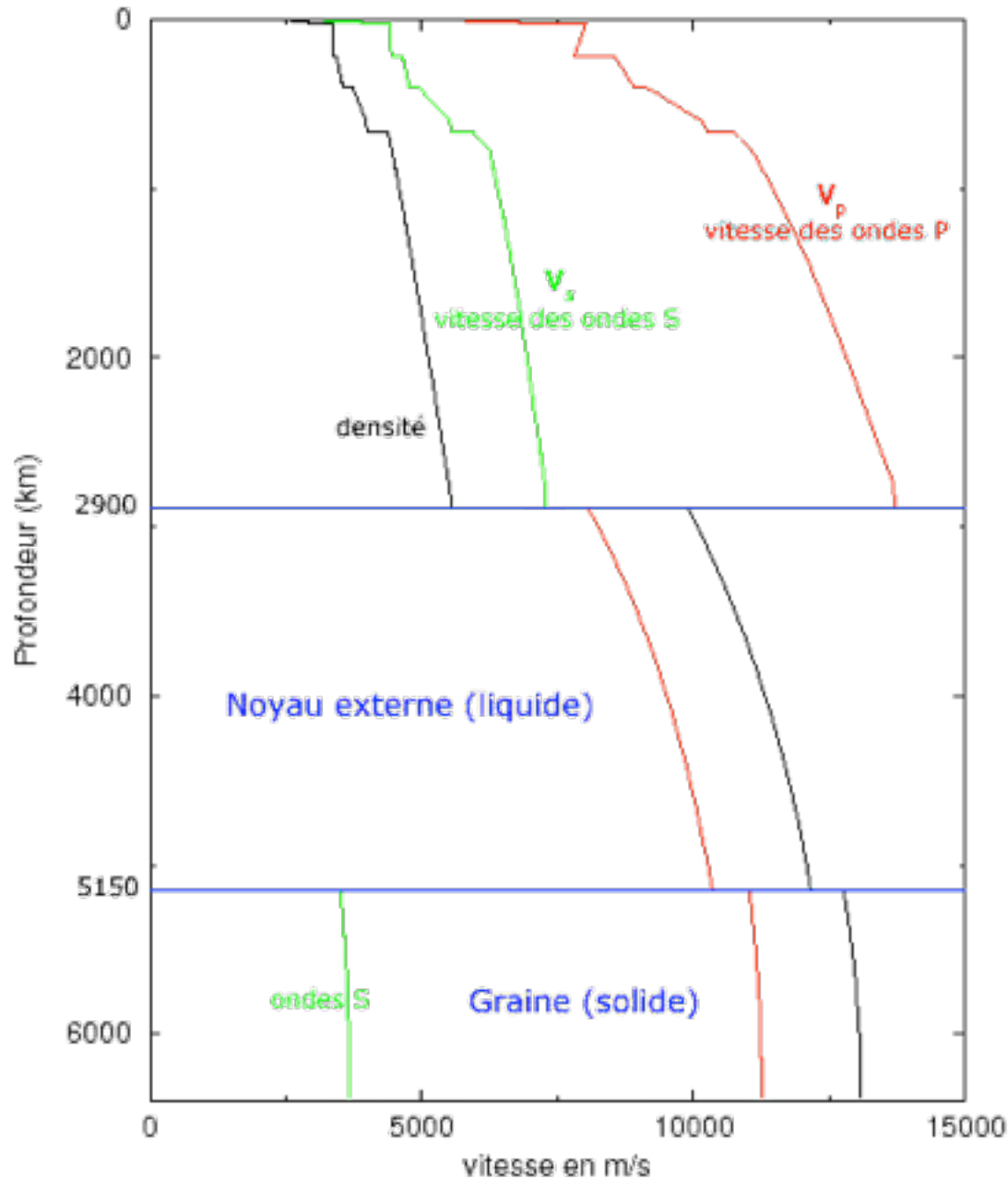


Origine des météorites

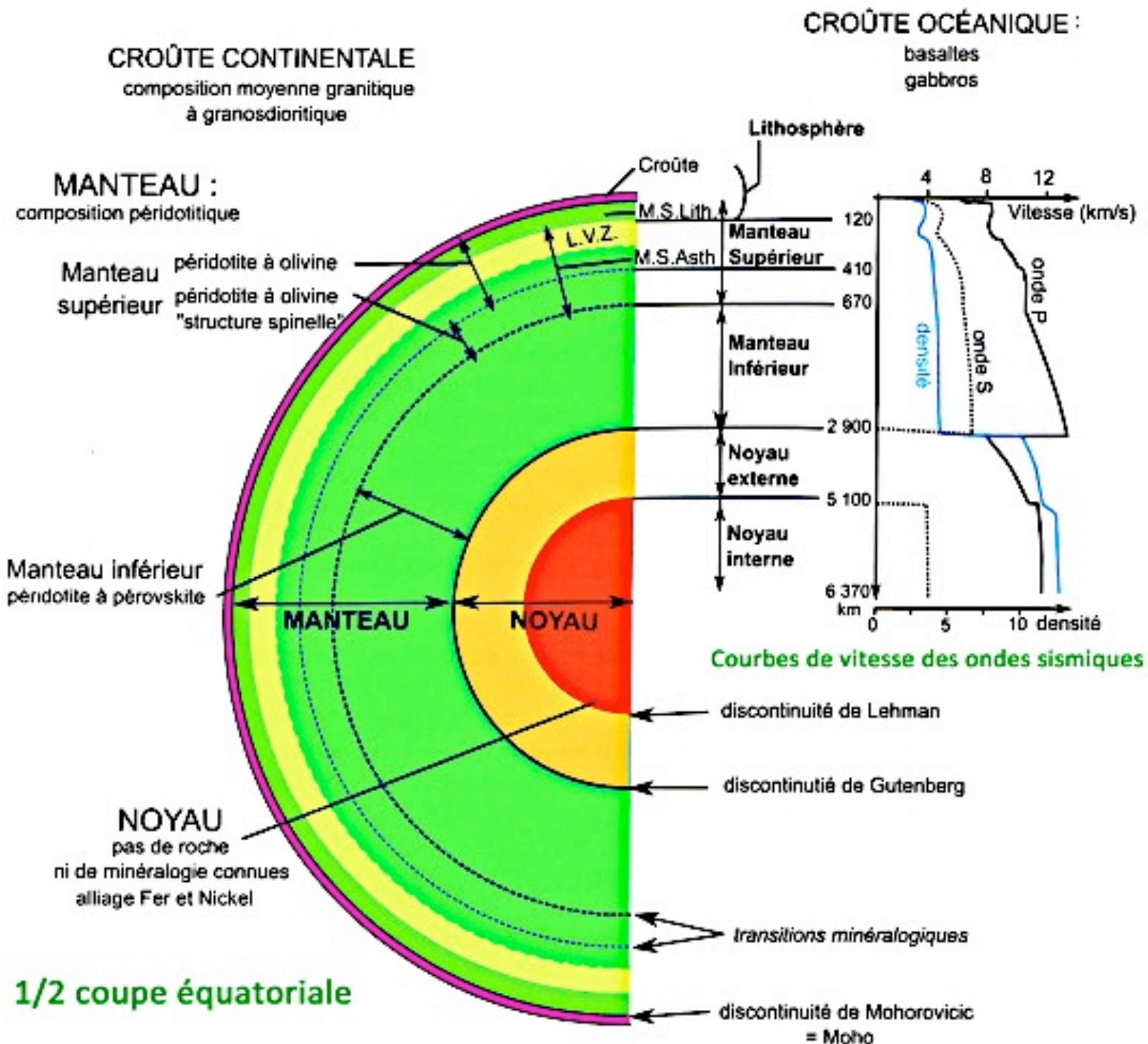


âge des chondrites = âge de la Terre 4,55 GA
âge des achondrites plus récent : 4,3 GA

Le noyau à deux couches



disparition des ondes S
=> milieu fluide



Structure interne et composition de la Terre