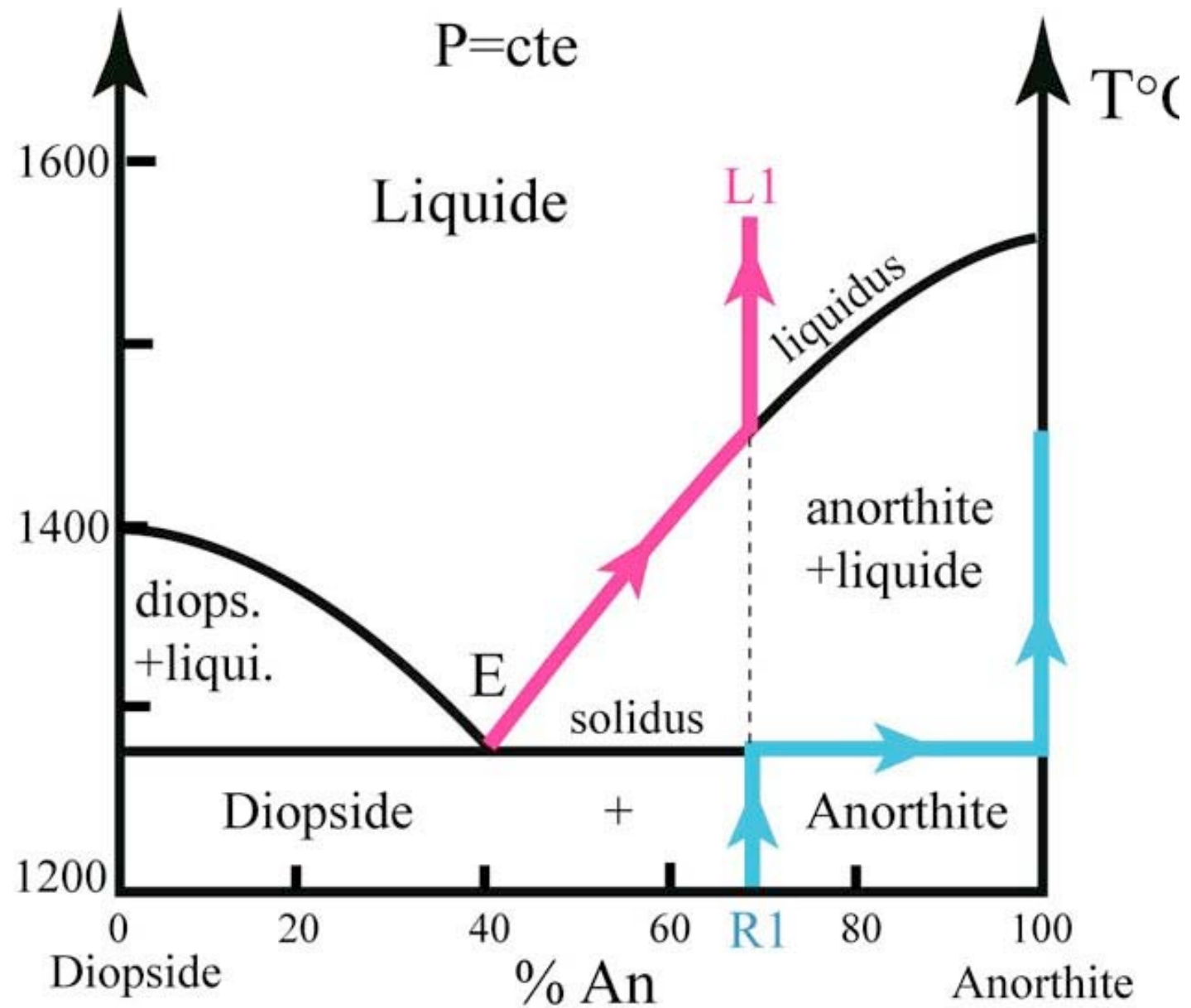
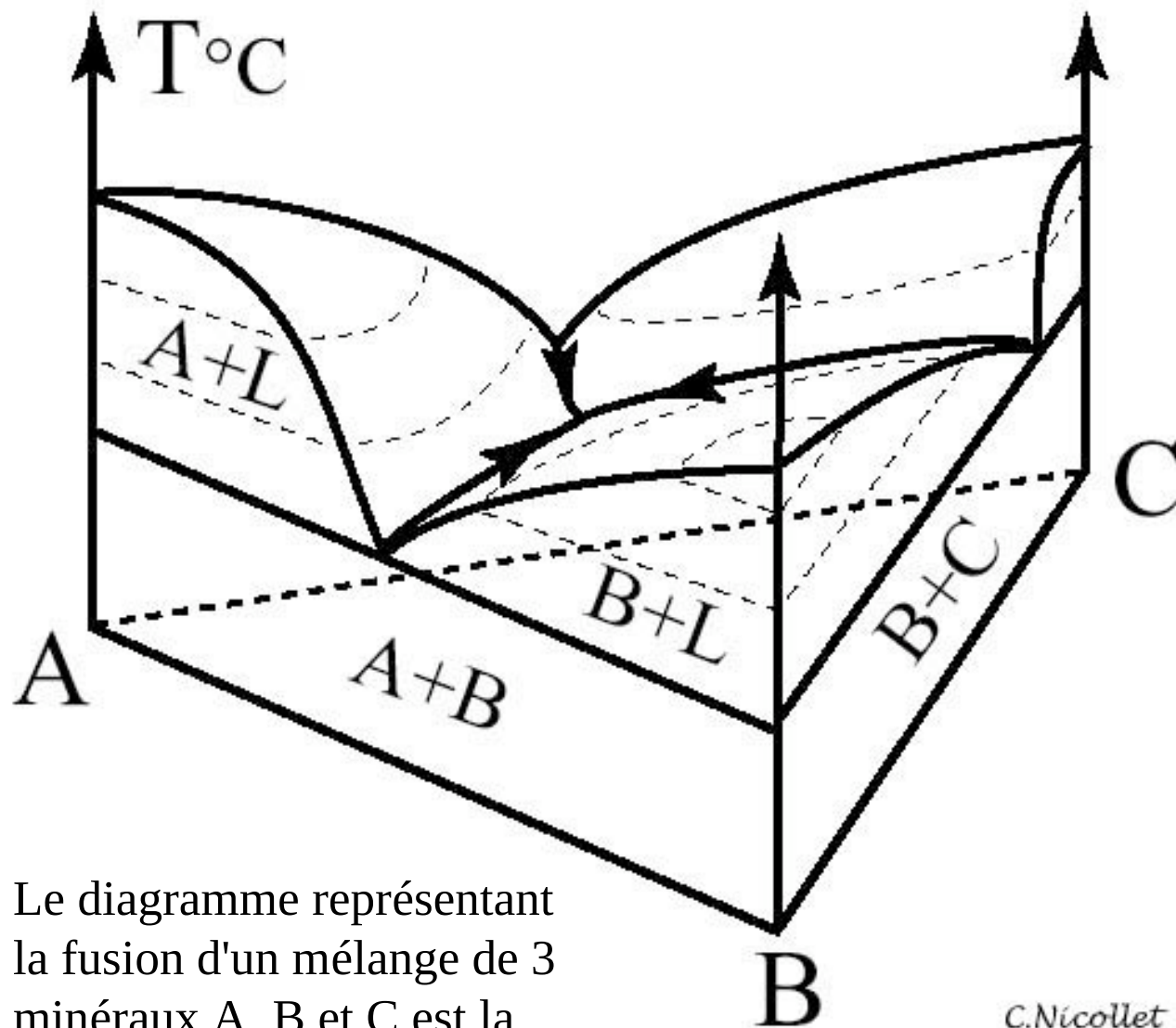


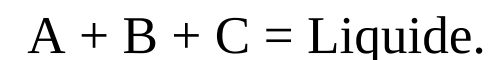
5: Fusion/cristallisation

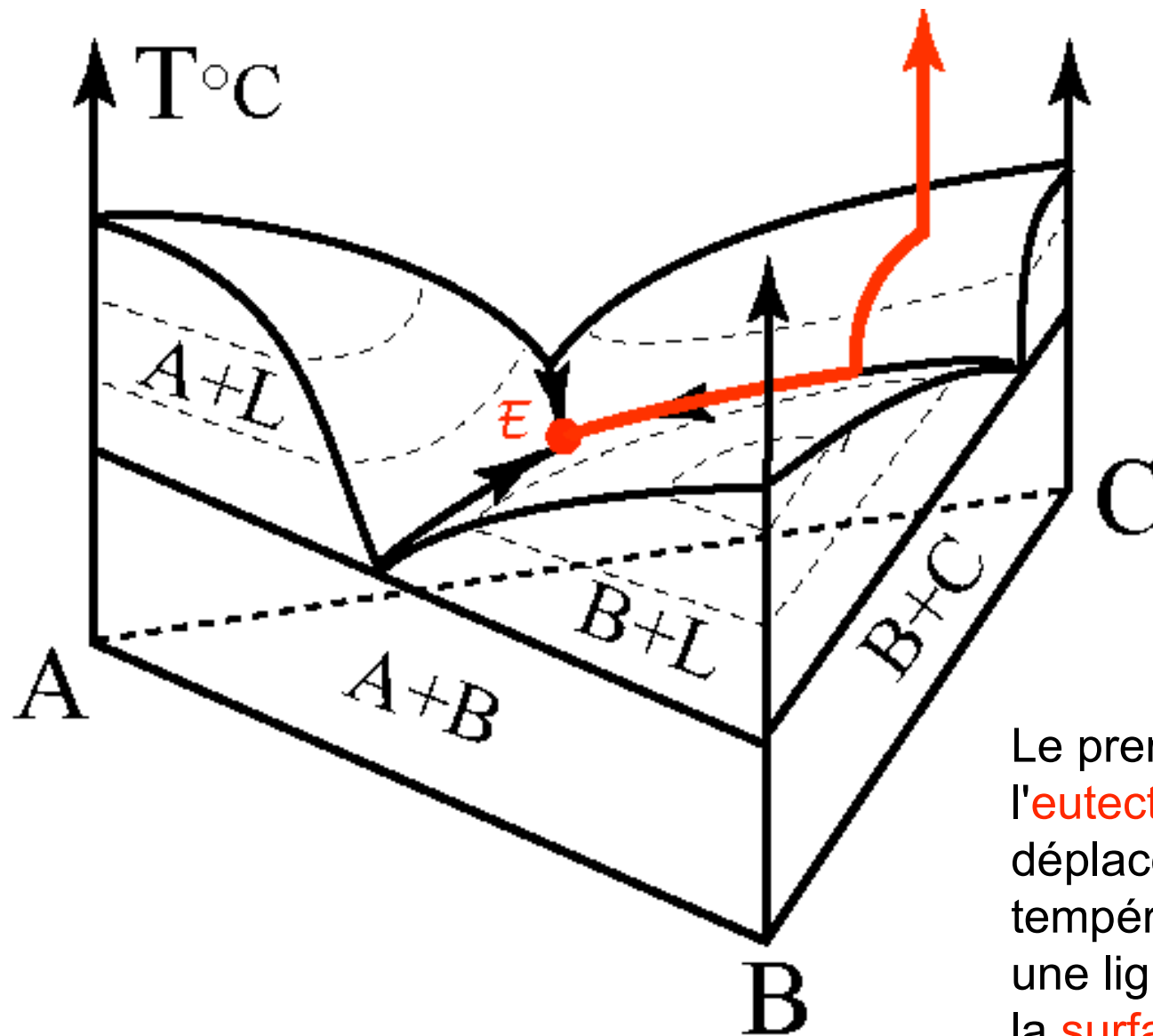




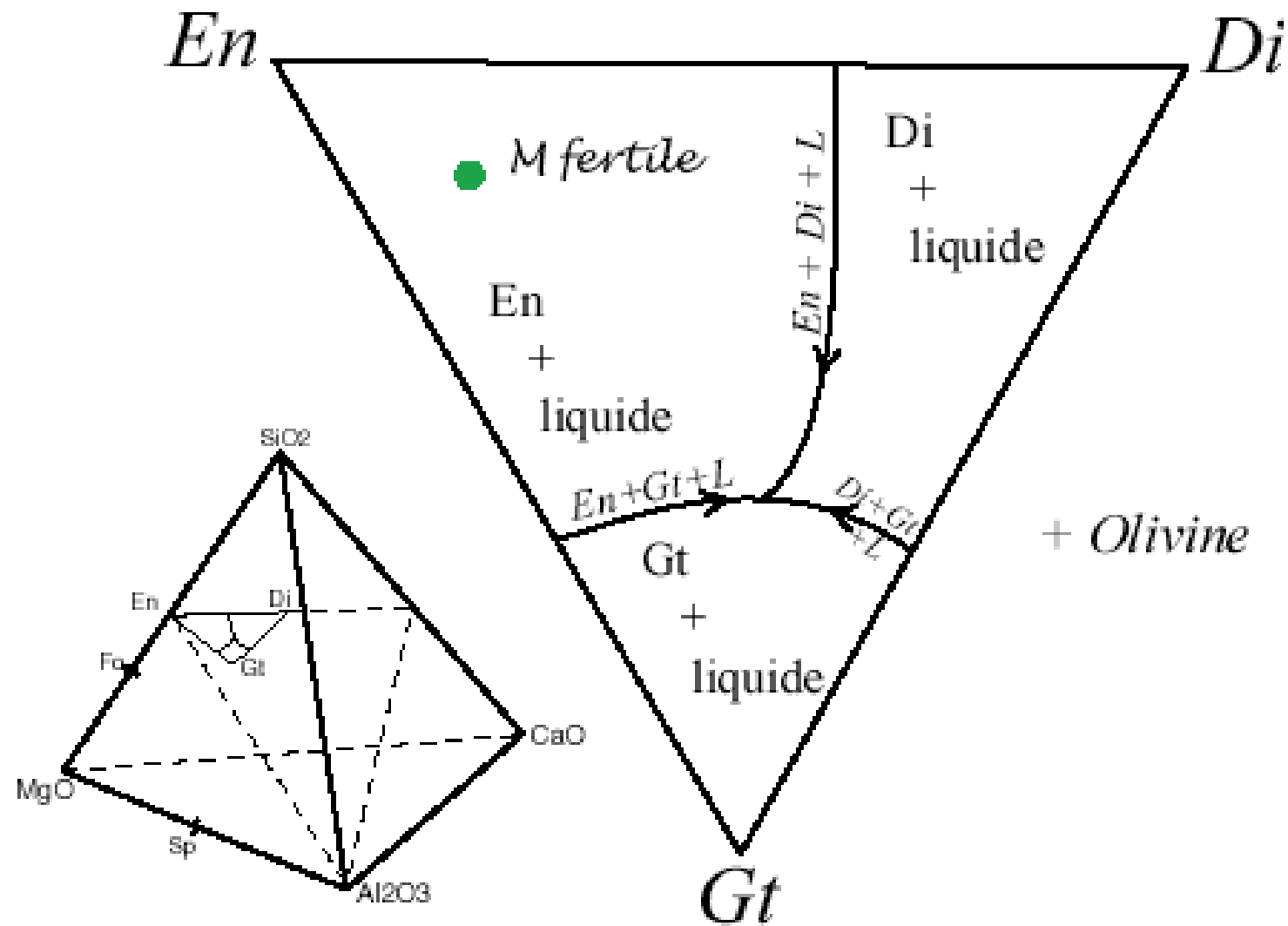
Le diagramme représentant la fusion d'un mélange de 3 minéraux A, B et C est la combinaison des 3 diagrammes binaires A-B, B-C et C-A.

Chacun montre un **eutectique binaire**, point le plus "froid" de la courbe liquidus. L'intervention du 3ème minéral transforme ces points eutectiques binaires en **lignes cotectiques**. Le long de ces lignes, la température diminue vers l'intérieur du triangle (dans le sens des flèches). Les 3 cotectiques se rejoignent au point le plus "bas" du diagramme, l'eutectique ternaire où intervient la réaction de fusion :

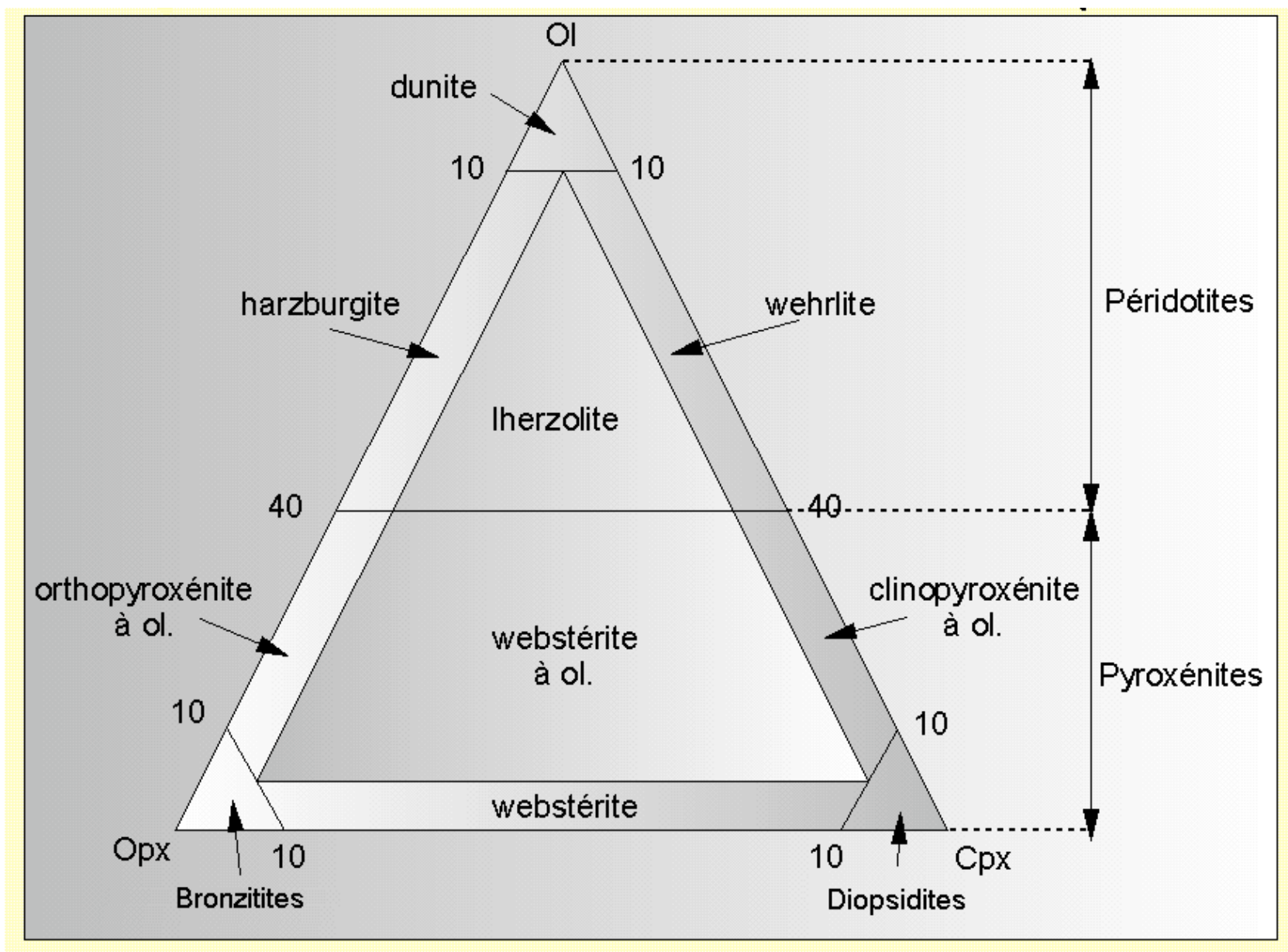


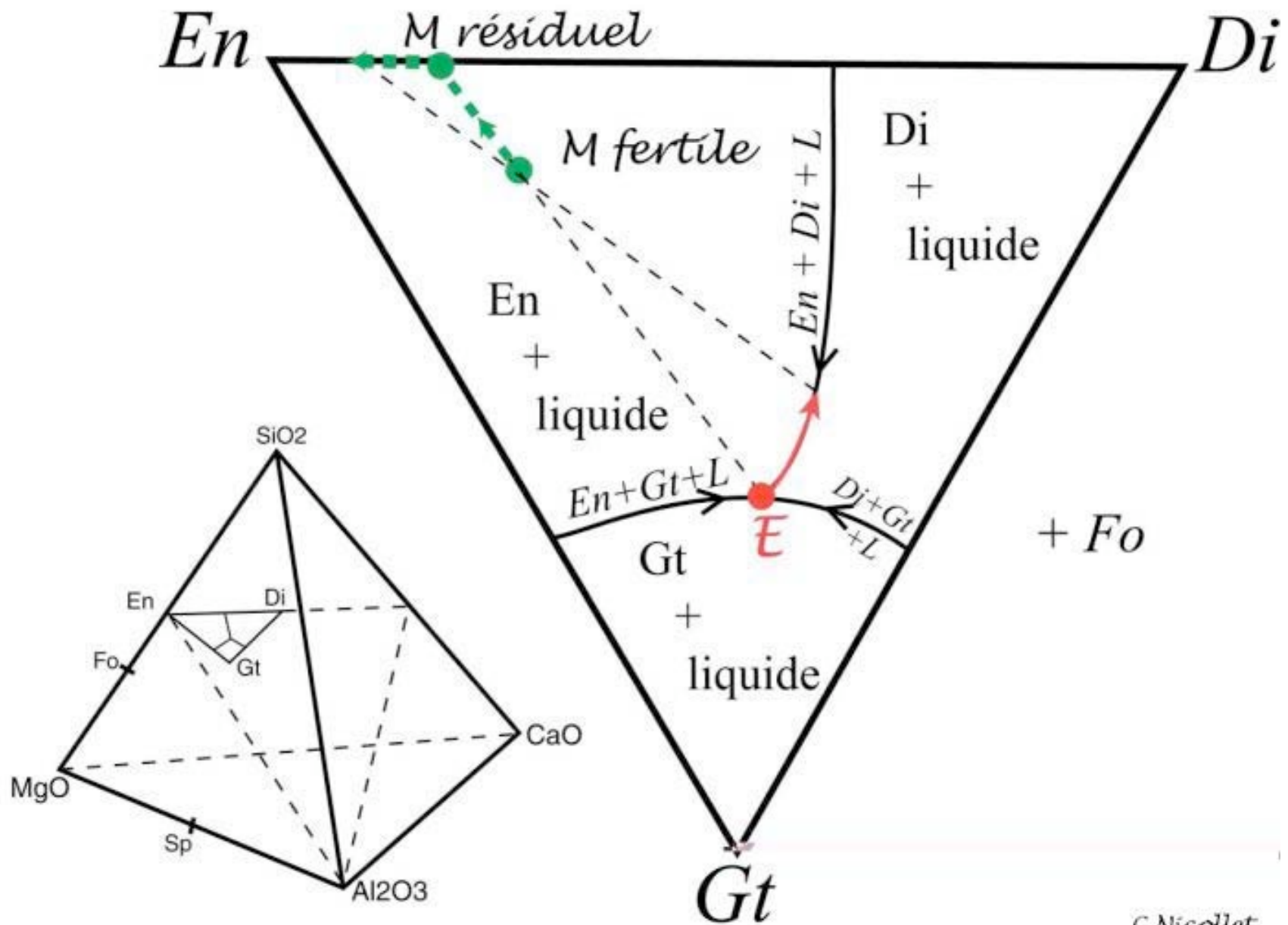


Le premier liquide apparaît à l'**eutectique** ternaire, se déplace ensuite, lorsque la température augmente, sur une ligne **cotectique**, puis sur la **surface Liquidus**. Lorsque la fusion est totale, le liquide quitte cette surface Liquidus.



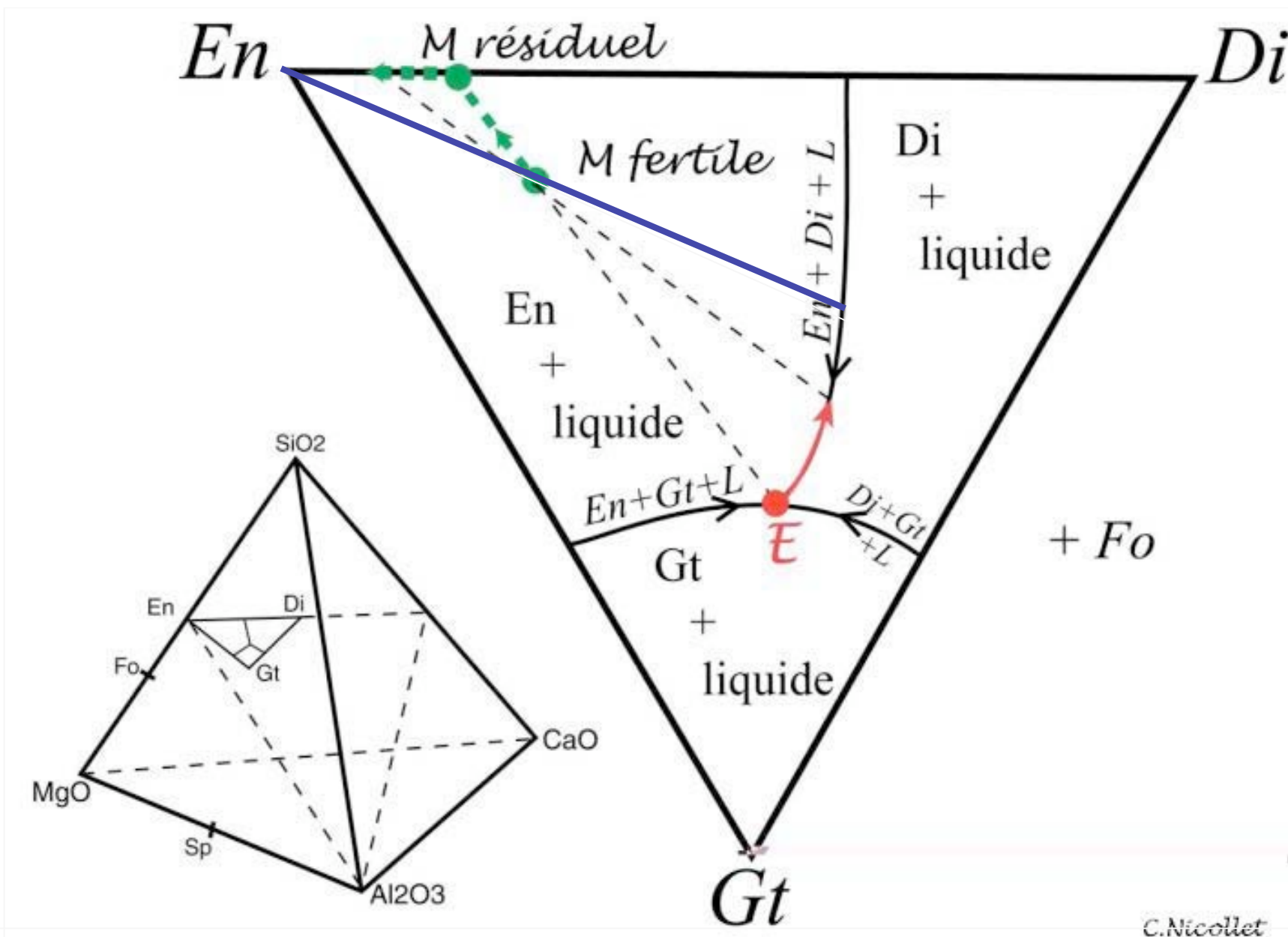
Fusion partielle des Lherzolites du Manteau fertile (Mf)





C. Nicollet

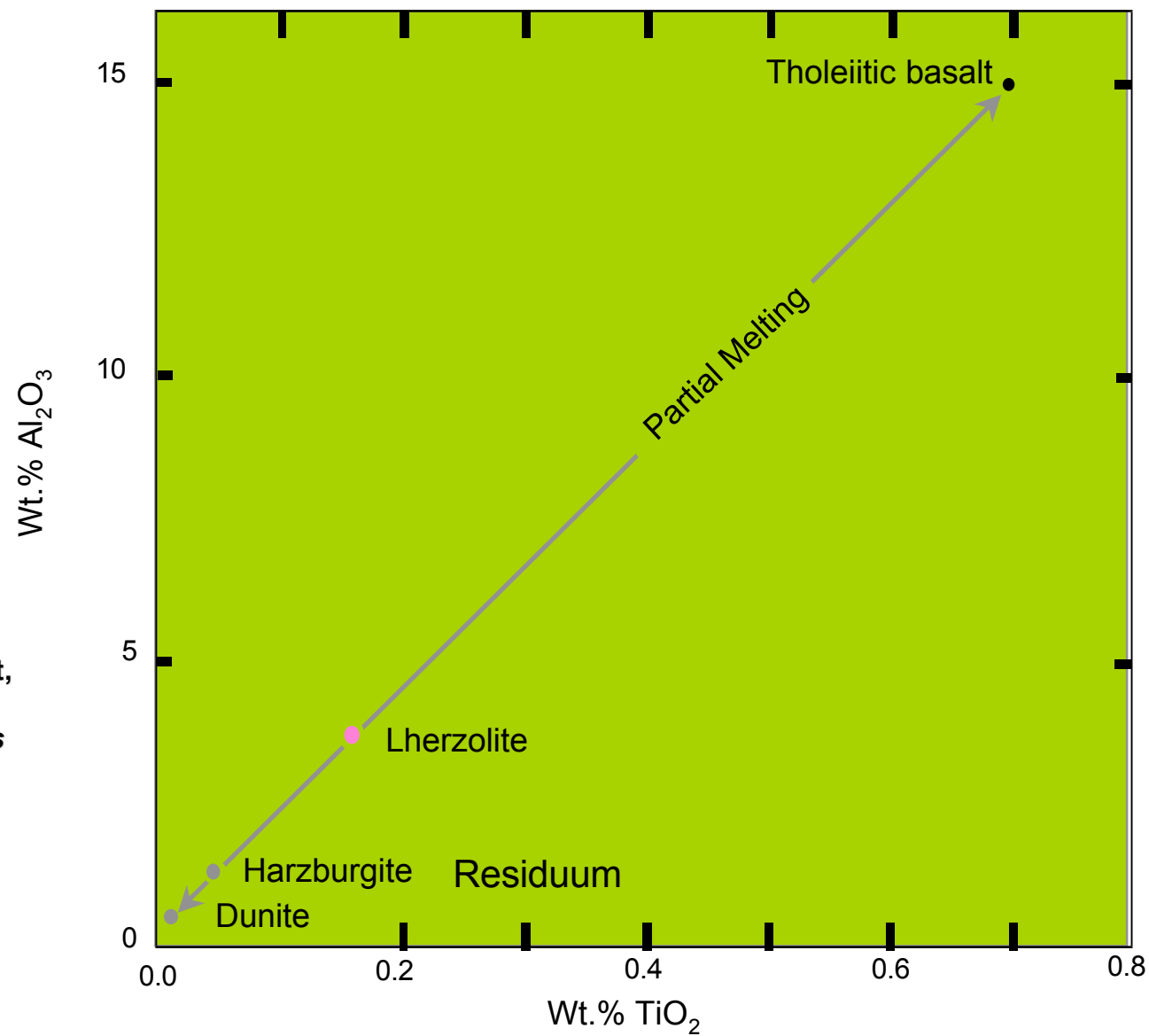
La composition du manteau évolue sur une ligne reliant E à Mf, au delà de Mf jusqu'à disparition du grenat (Mr sur la ligne En-Di). La réaction eutectique ne peut plus se poursuivre à cause de l'absence du grenat.

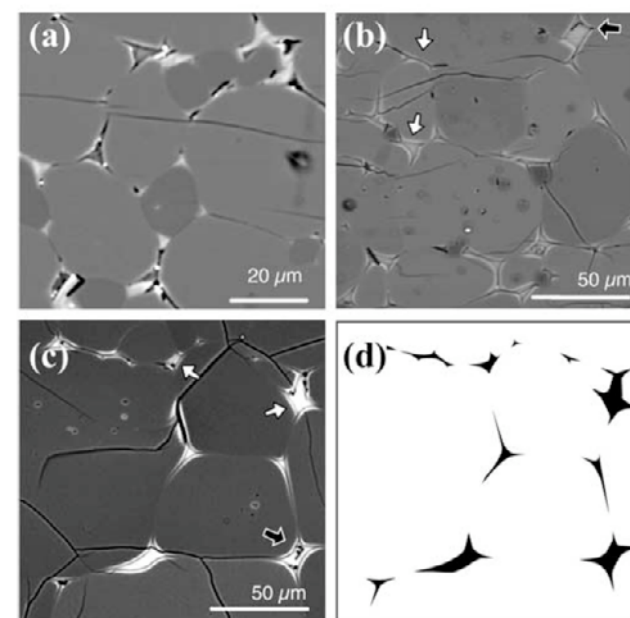
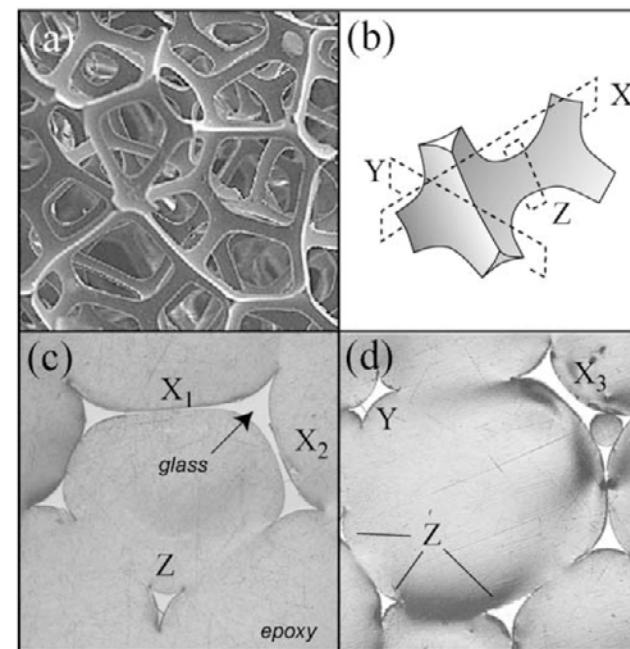
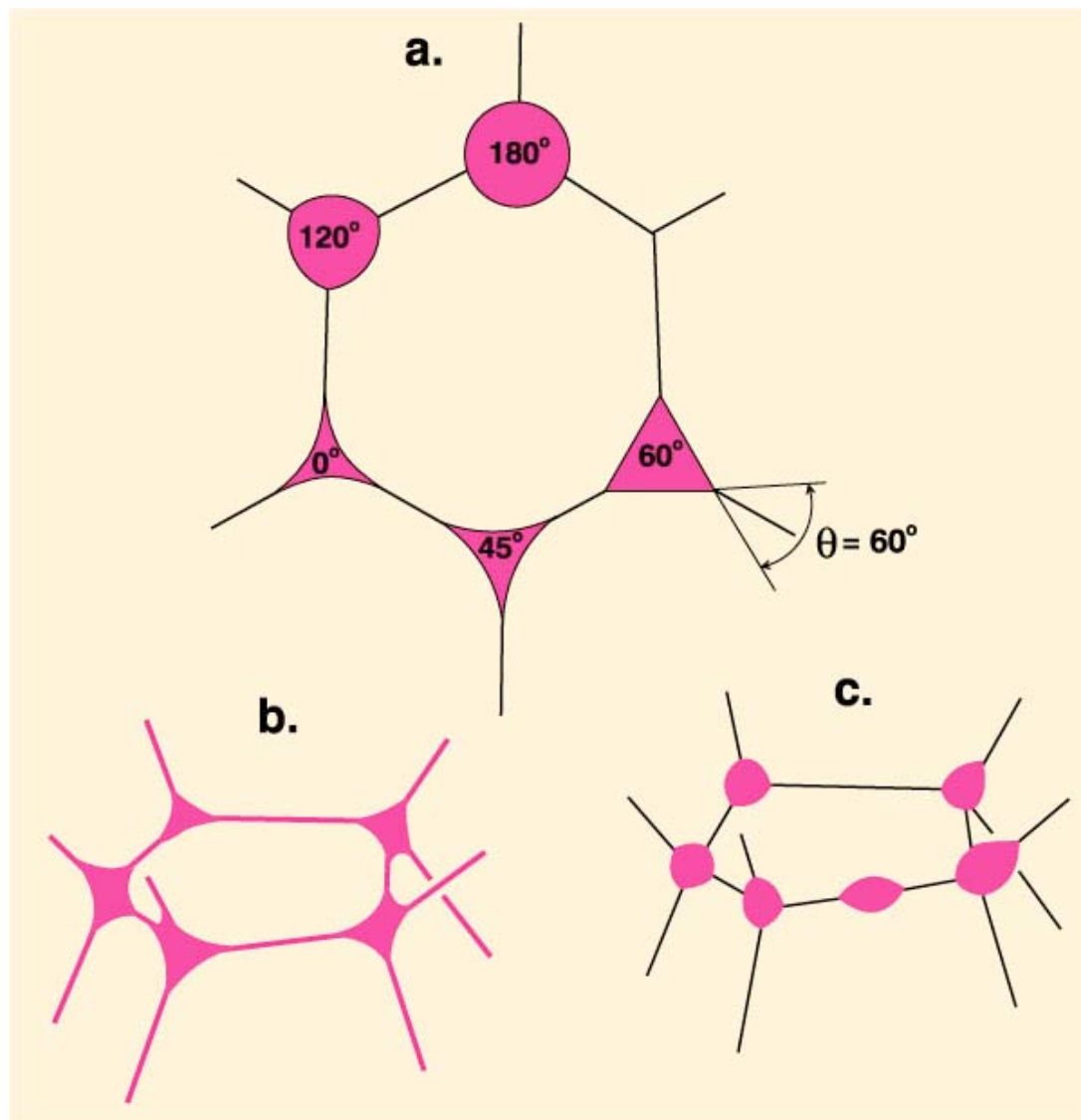


C. Nicollet

La composition du liquide se déplace alors sur la ligne cotectique $En+Di+L$ tandis que la composition du *Mr* se rapproche du pôle *En*, par disparition du diopside. Si la fusion se poursuit jusqu'à disparition totale du diopside, le *M résiduel* devient une harzburgite.

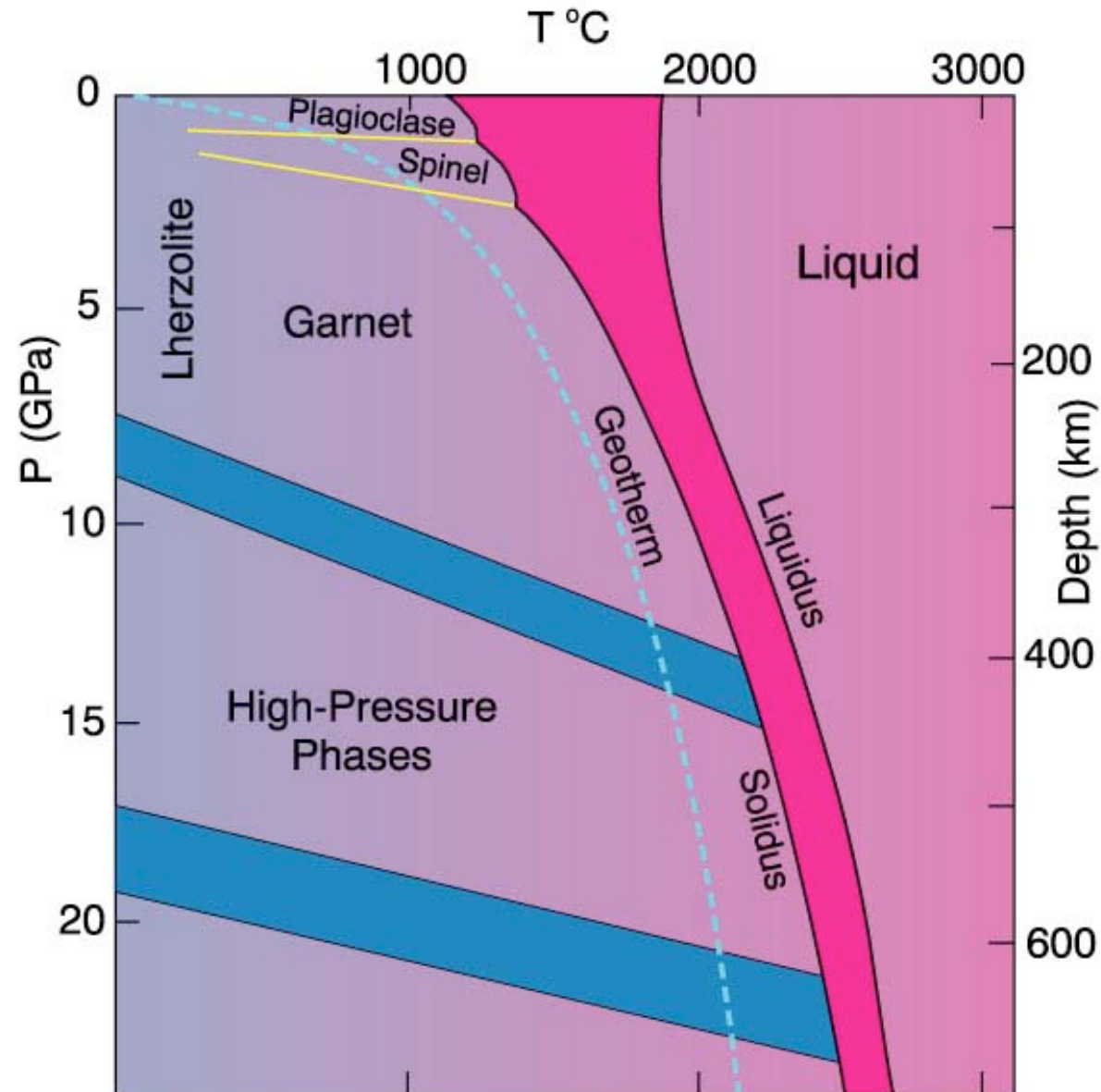
Figure 10-1 Brown and Mussett,
A. E. (1993), *The Inaccessible
Earth: An Integrated View of Its
Structure and Composition*.
Chapman & Hall/Kluwer.



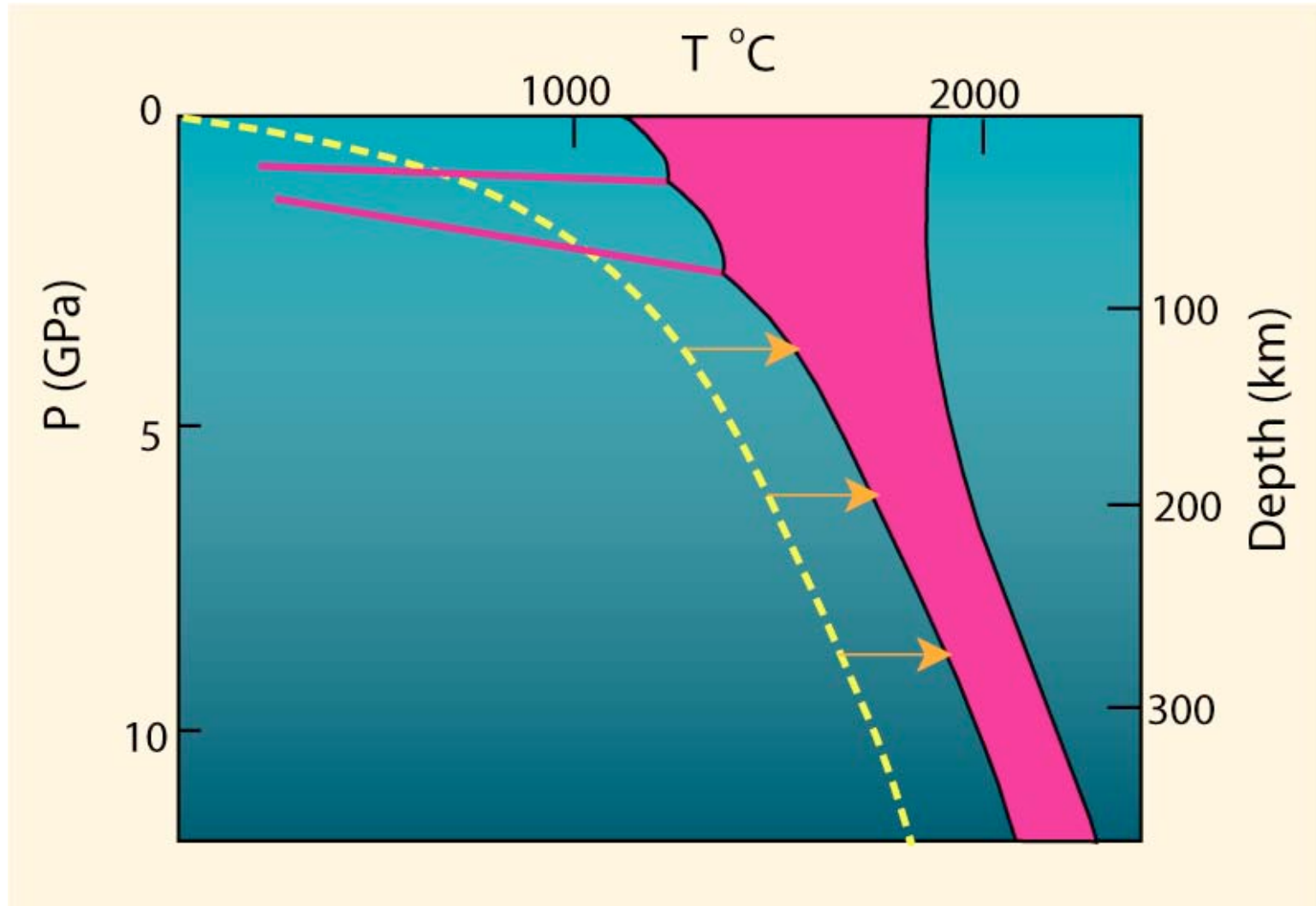


6 Applications géologiques

Comment faire fondre le manteau?



1) augmentation de température



2) Décompression adiabatique

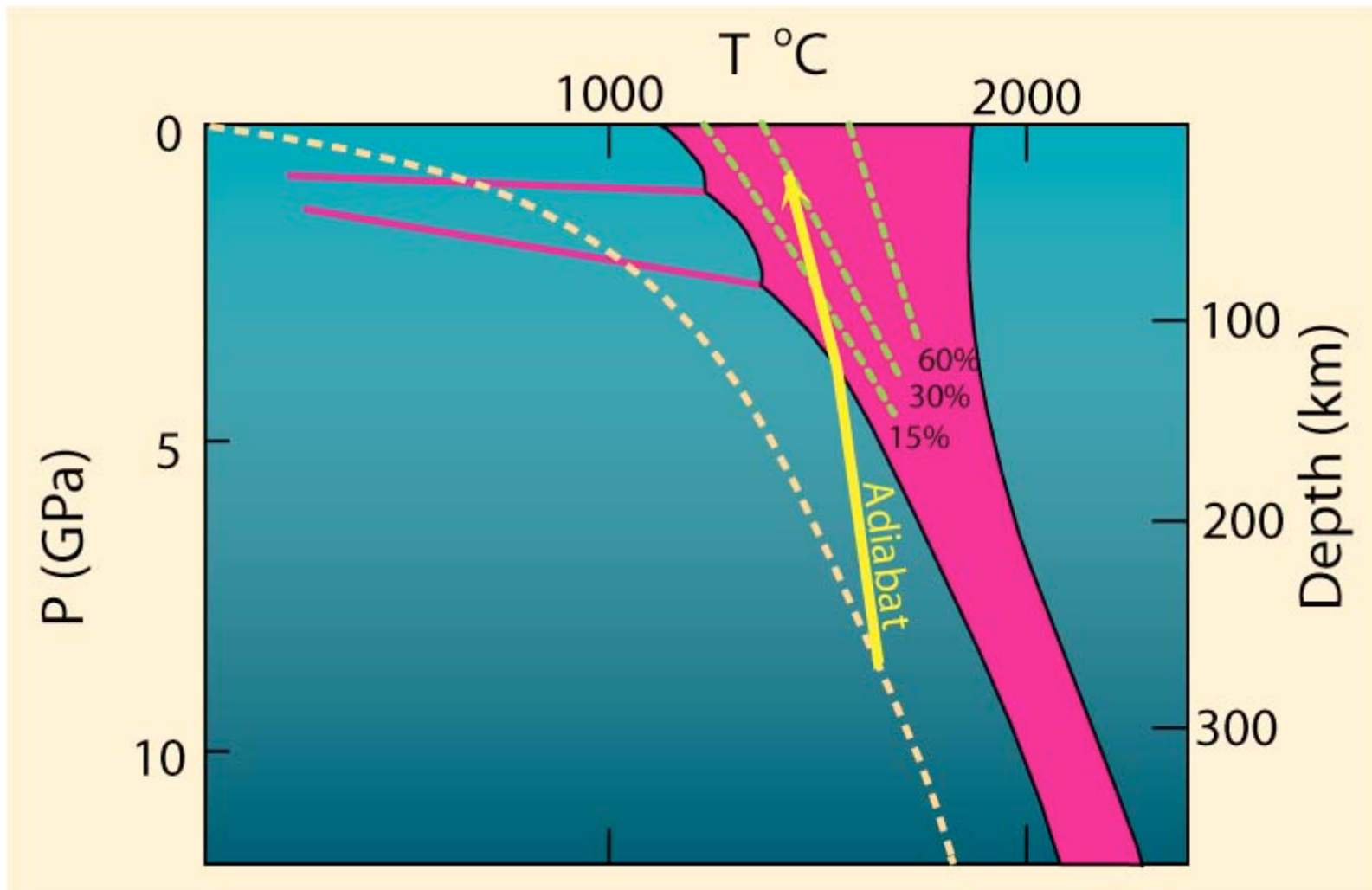


Figure 10-4. Melting by (adiabatic) pressure reduction. Melting begins when the adiabat crosses the solidus and traverses the shaded melting interval. Dashed lines represent approximate % melting.

3) Ajout d'une phase volatile (l'eau généralement)

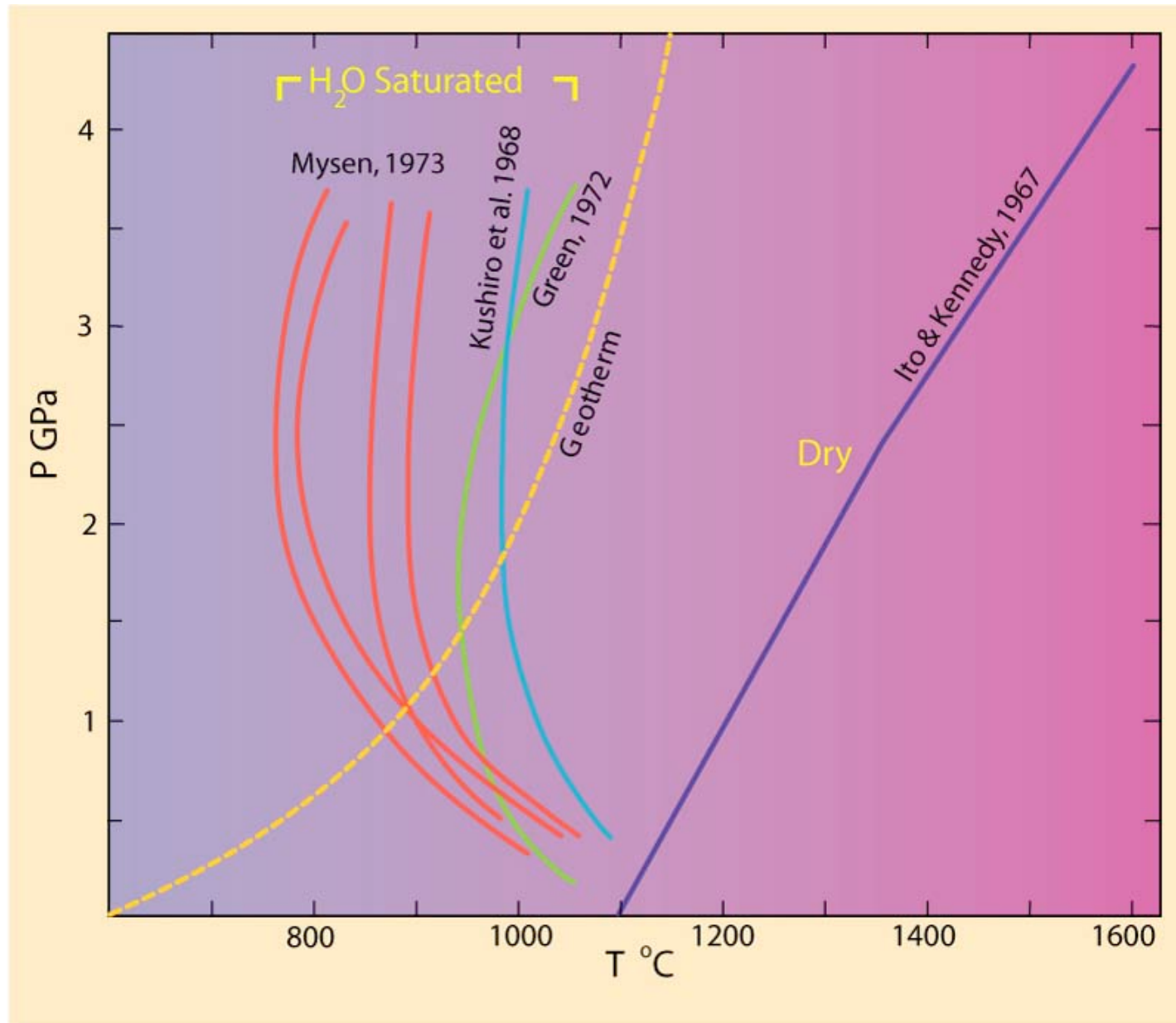


Figure 10-4. Dry peridotite solidus compared to several experiments on H₂O-saturated peridotites.

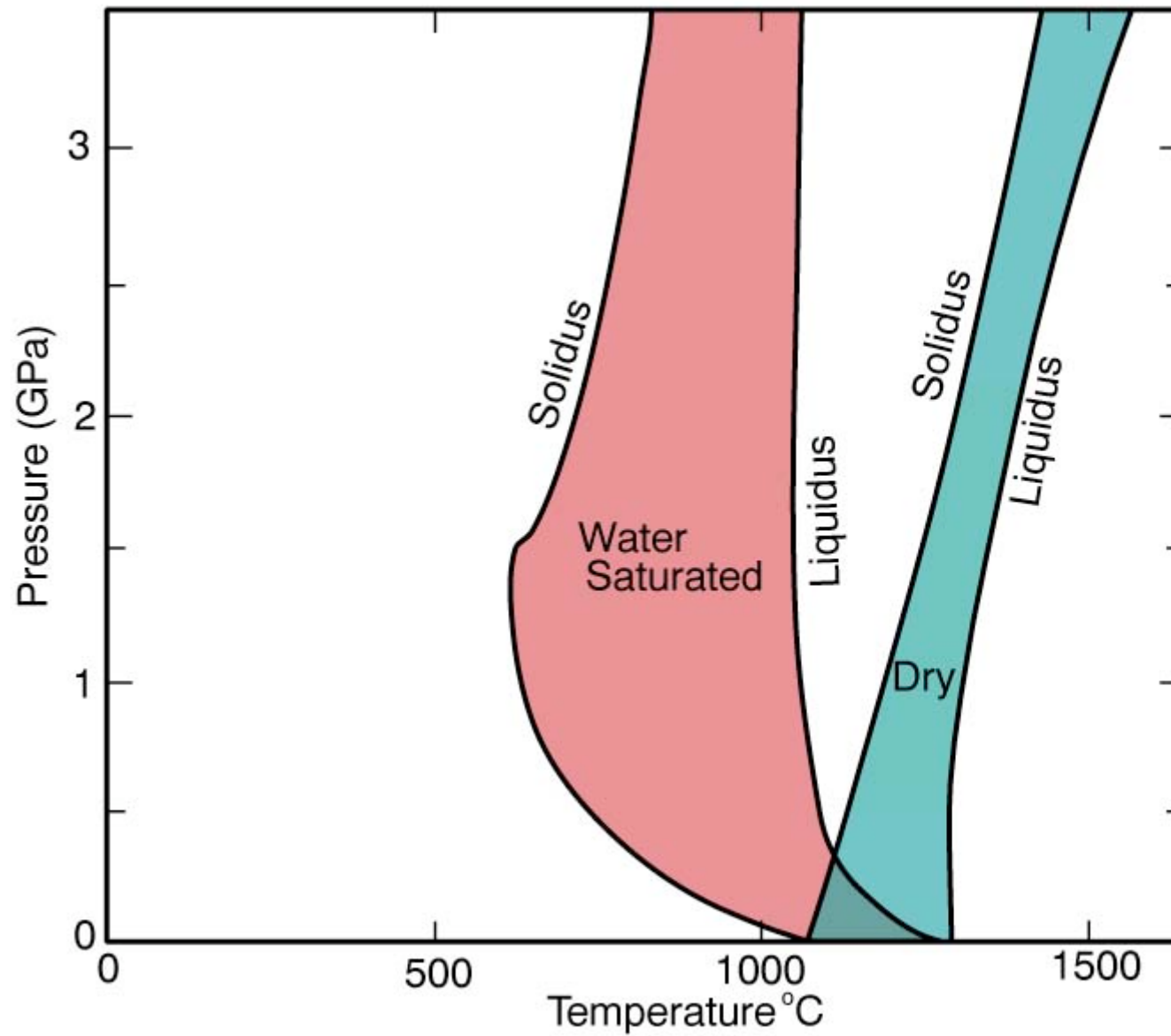
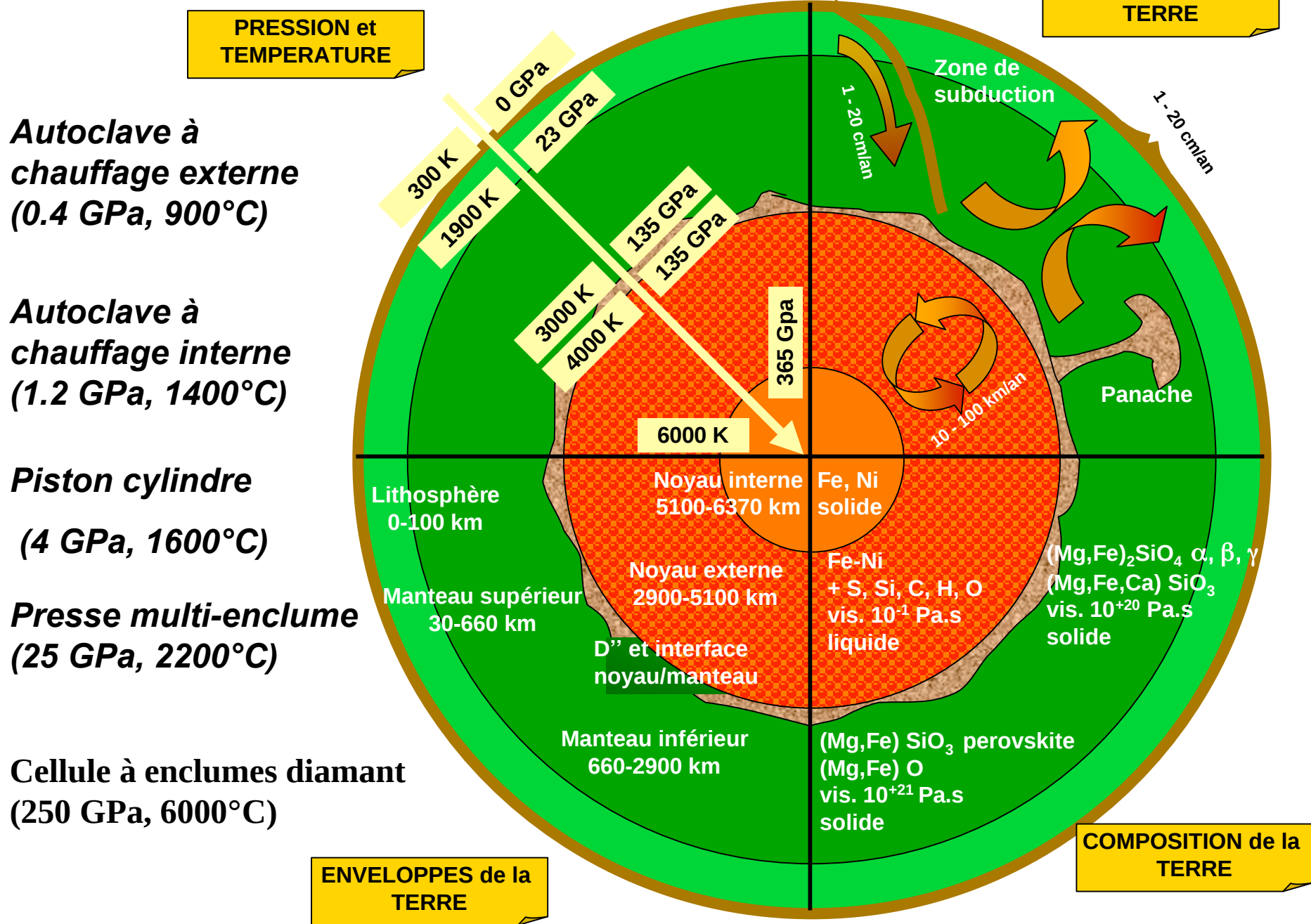
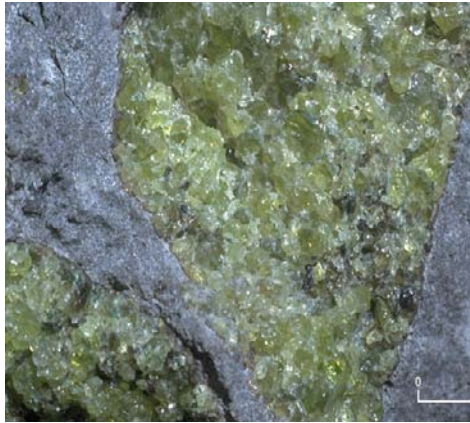


Figure 7-20. Experimentally determined melting intervals of gabbro under H₂O-free (“dry”), and H₂O-saturated conditions. After Lambert and Wyllie (1972). J. Geol., 80, 693-708.

7: Intérieur de la Terre: effet de la pression



7-1 Les échantillons



Enclaves dans basaltes

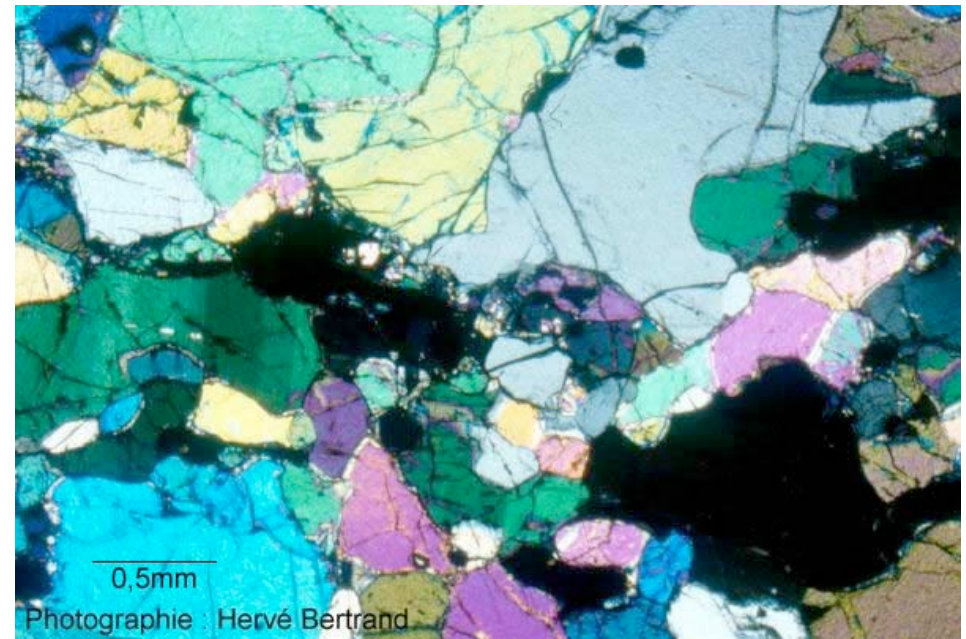
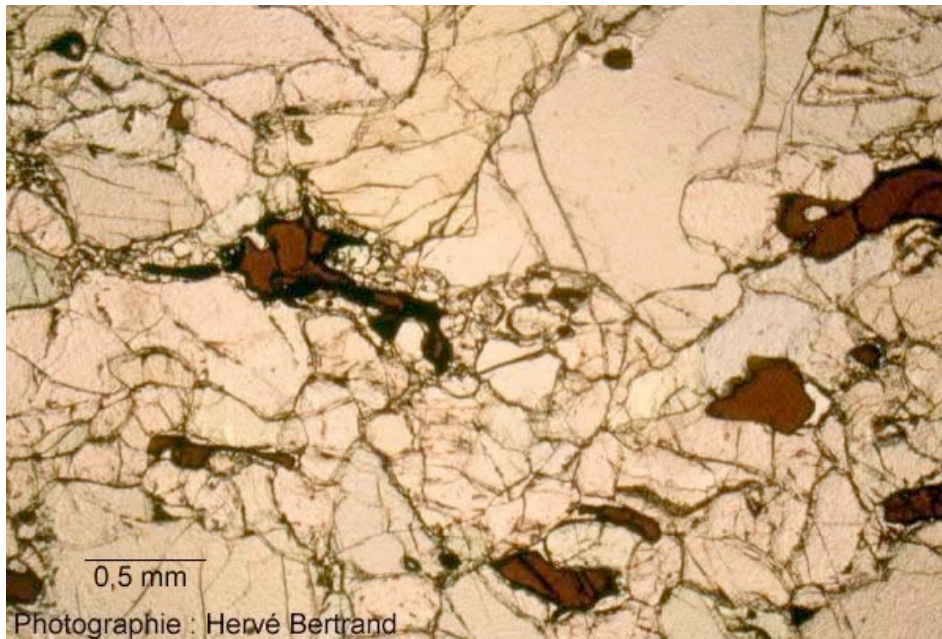
Photo: P. Thomas

Des roches: les péridotites

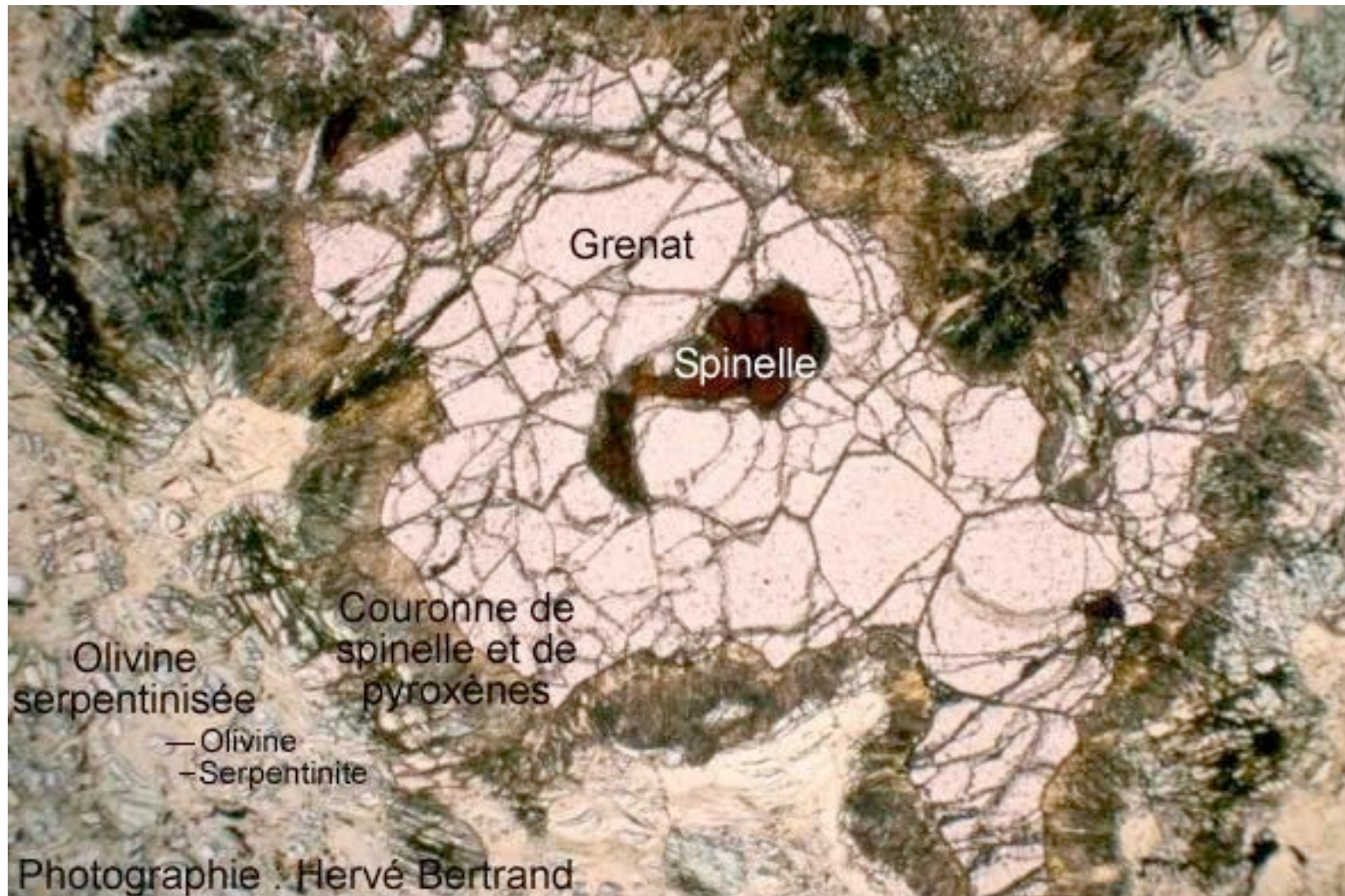


Section de manteau à la base des ophiolites d'Oman

Photo: B. Ildefonse

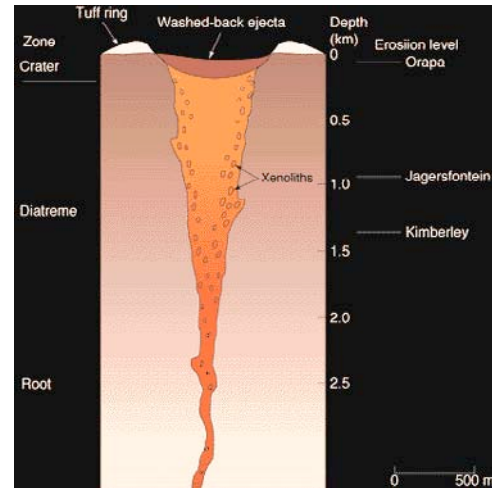


Jusqu'à 40 km : Olivine-Pyroxène (ortho et clino)-Plagioclase
De 40 à 70-80 km : Olivine-Pyroxène (ortho et clino)-Spinelle
De 70-80 à 200 km : Olivine-Pyroxène (ortho et clino)-Grenat

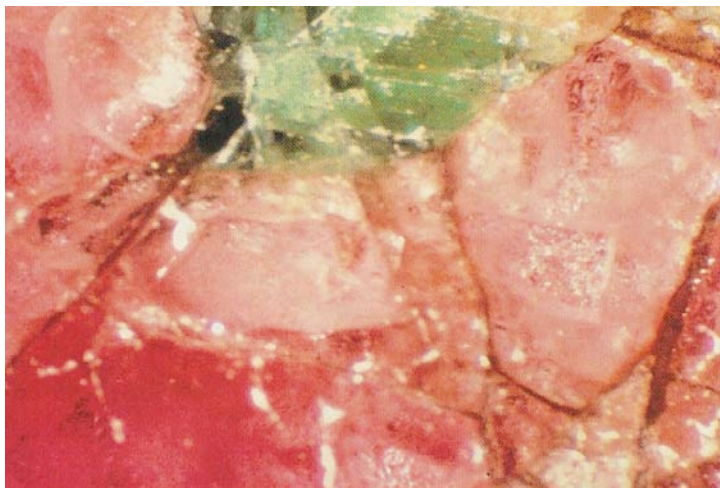


Couronne de kélyphite: pyroxènes + spinelle

Echantillons remontés par les kimberlites jusqu'à 700 km de profondeur ?



Des roches

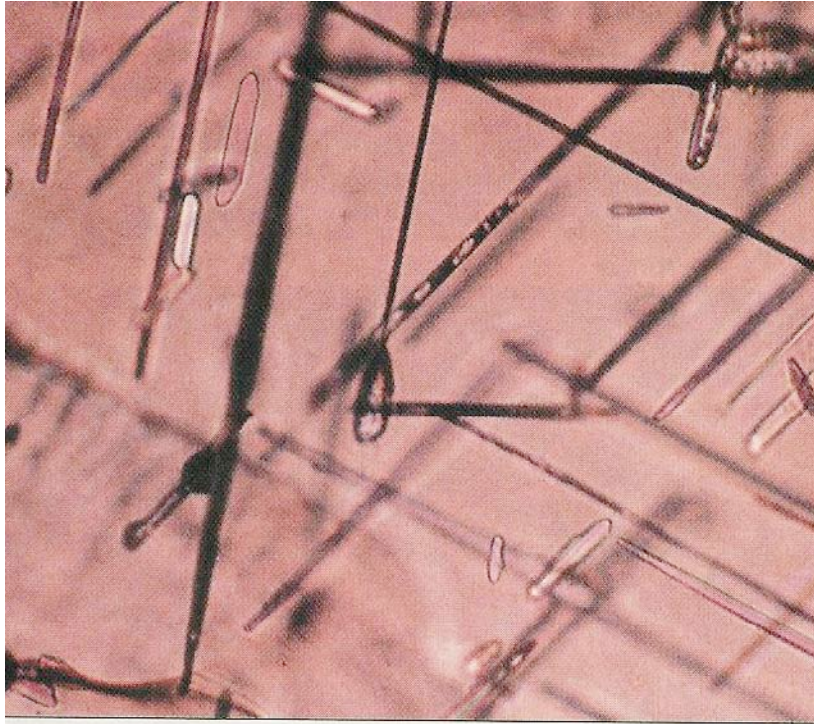


Des diamants et leurs inclusions



Les grenats $(\text{Mg,Fe,Ca})_3(\text{Al,Si})_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$

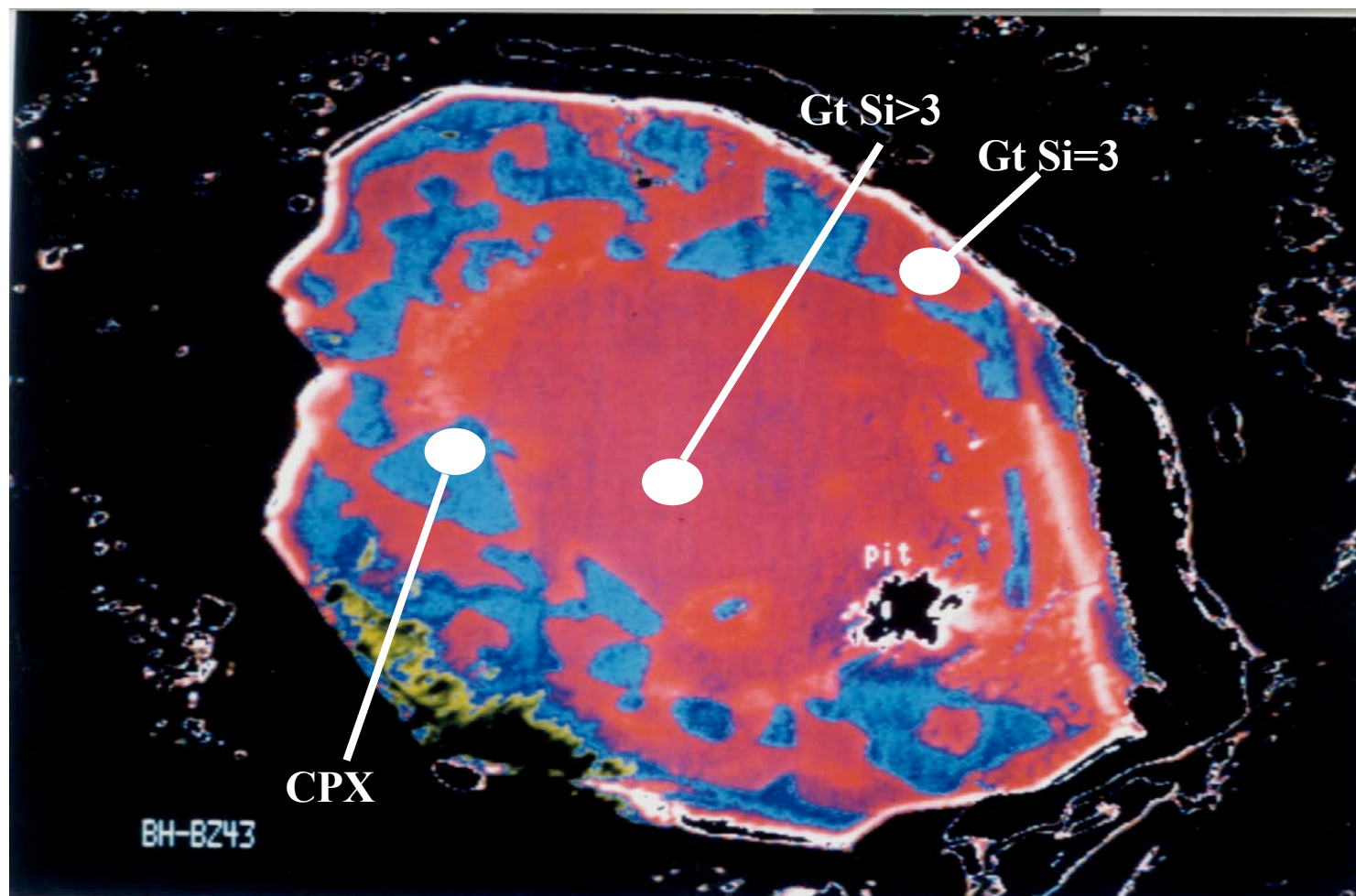
Des nodules ultra-profonds



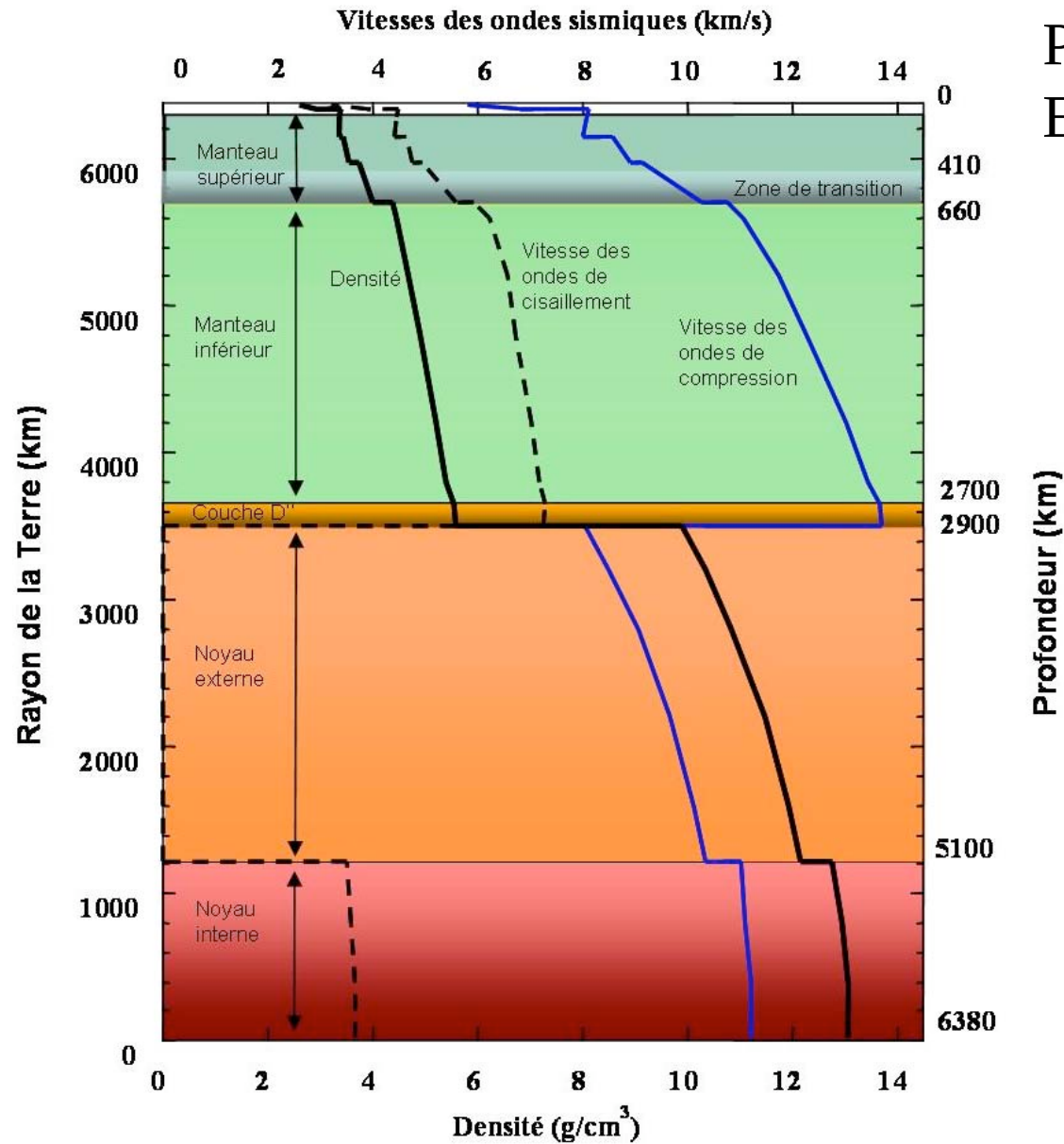
	Garnet Host	CPx Lamellae	Gt ₇₀ Px ₃₀
SiO ₂	42.23	54.08	45.50
TiO ₂	0.04	0.05	0.04
Al ₂ O ₃	23.54	2.42	17.72
Cr ₂ O ₃	1.54	1.20	1.44
FeO	7.70	1.76	6.07
MnO	0.48	0.02	0.36
MgO	20.38	15.40	19.01
CaO	4.56	22.39	9.48
Na ₂ O	0.06	2.33	0.68
K ₂ O	0.00	0.01	0.001
Sum	100.52	99.71	100.31
Si for 12 O	2.979	3.94	3.24

Exsolution de pyroxène dans les grenats

Des grenats de haute pression : les majorites



Preliminary Reference Earth Model: PREM



$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

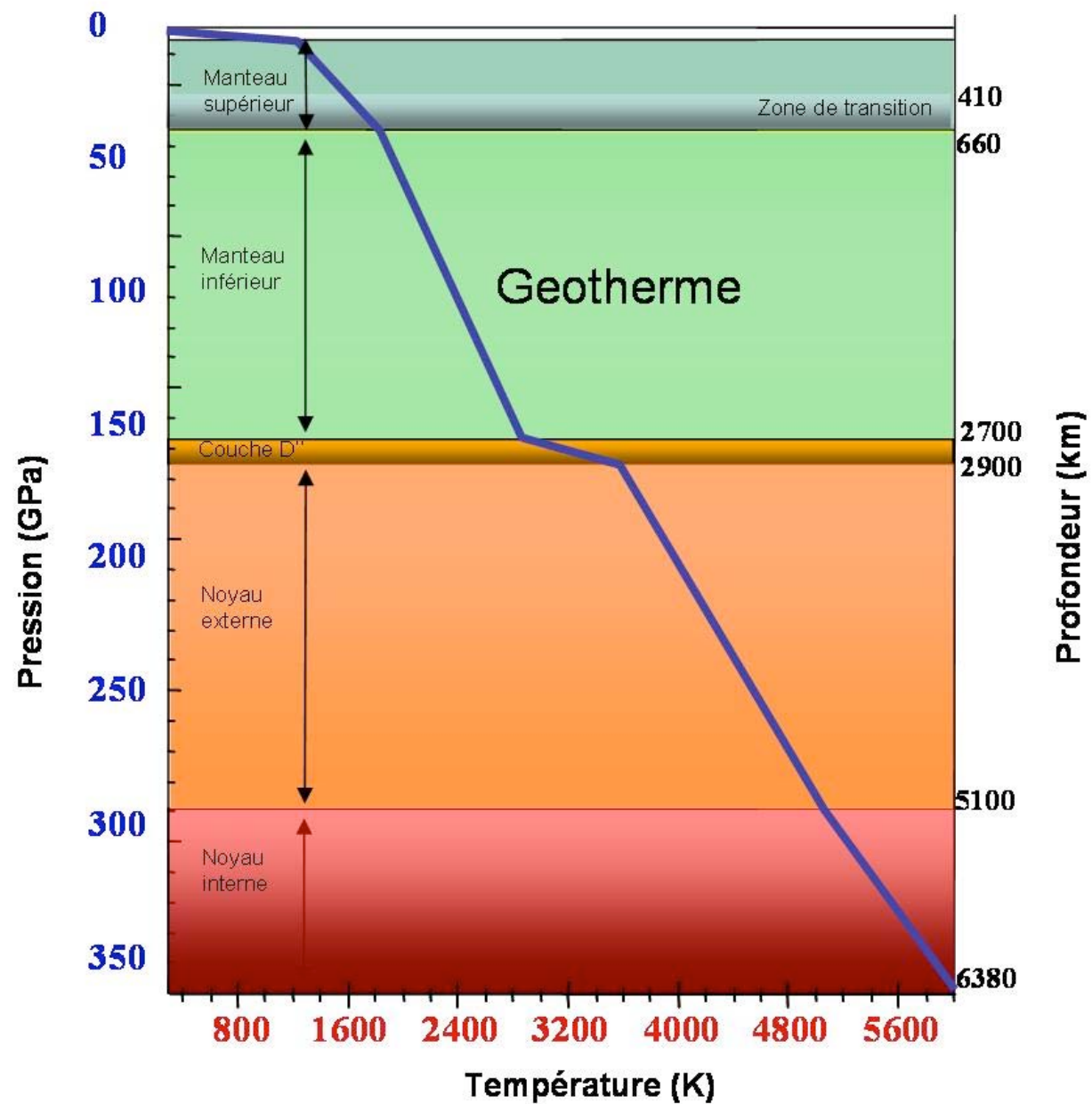
$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}$$

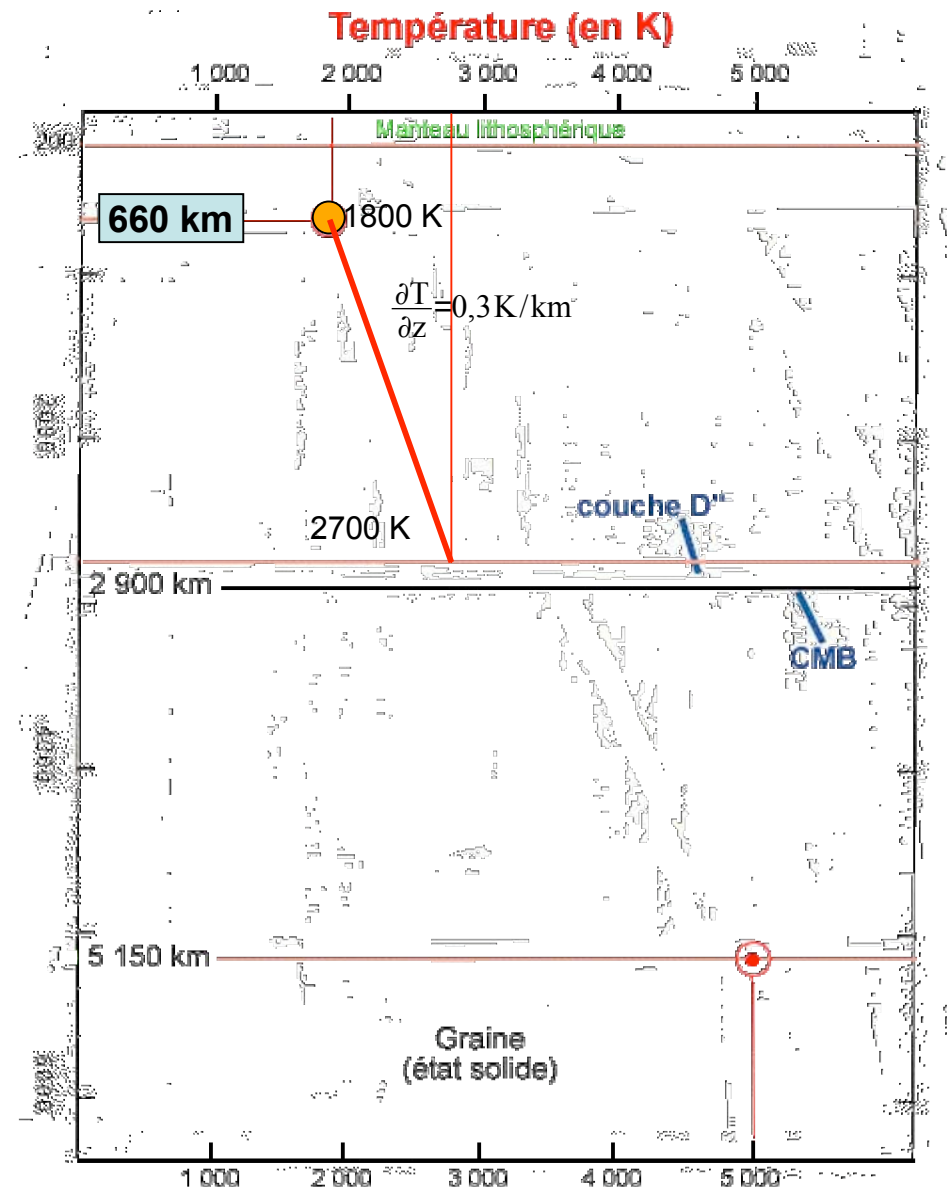
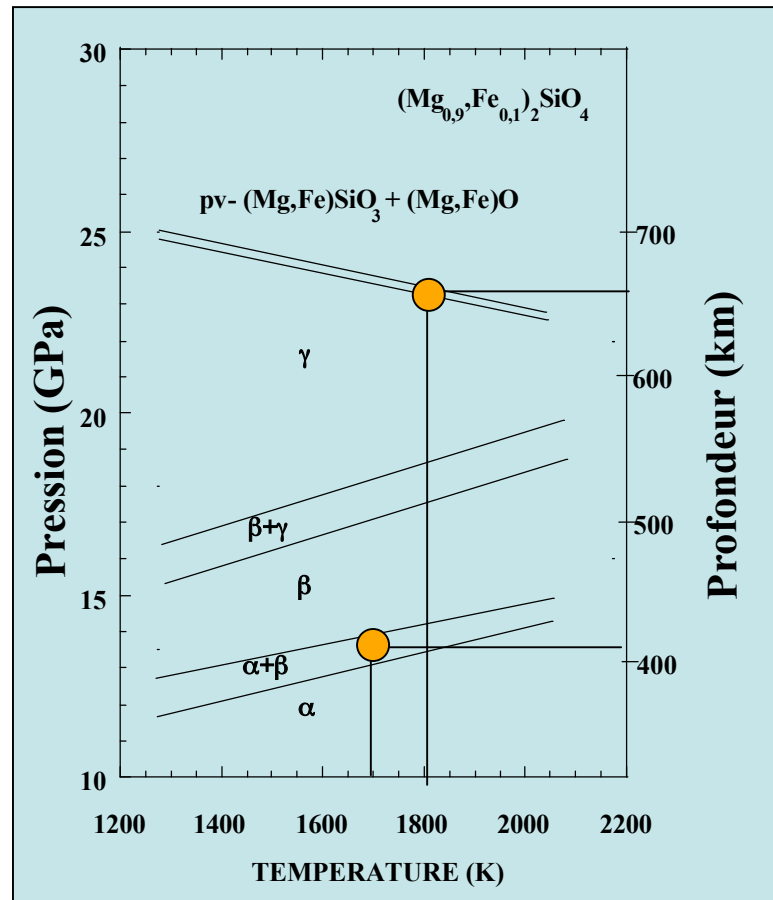
μ : module de cisaillement

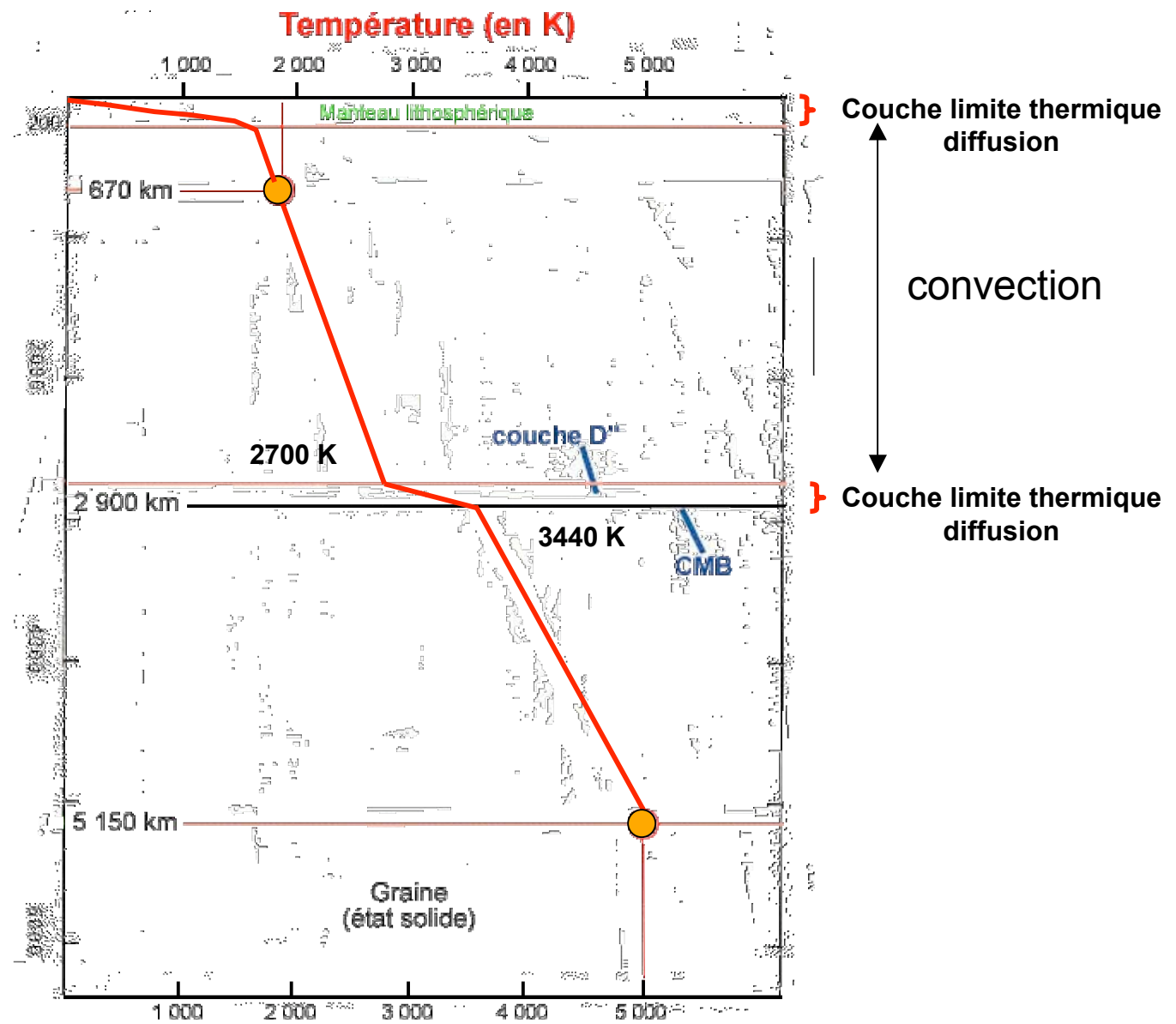
ρ : densité

K : module

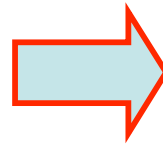
d'incompressibilité







Chondrites

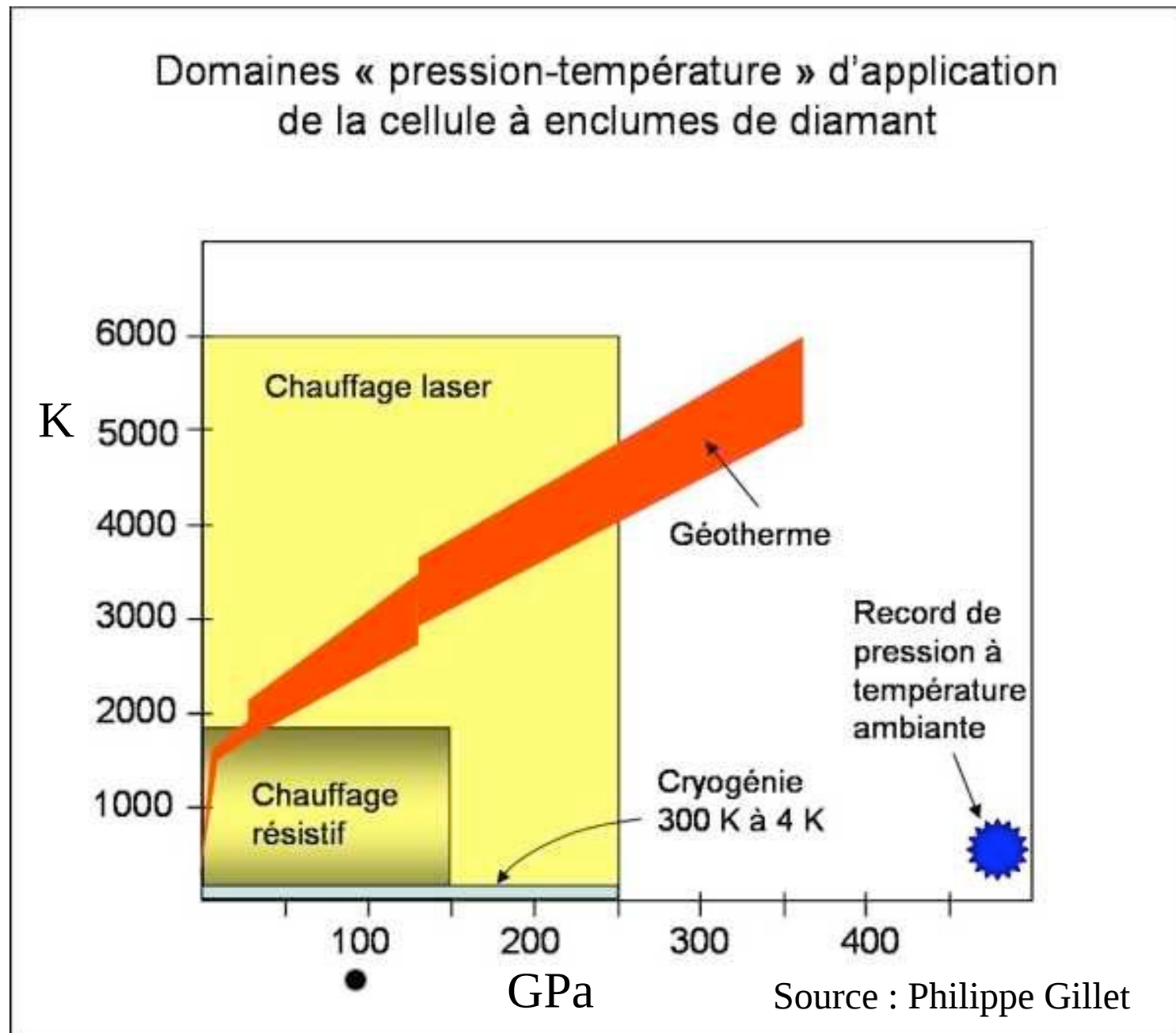


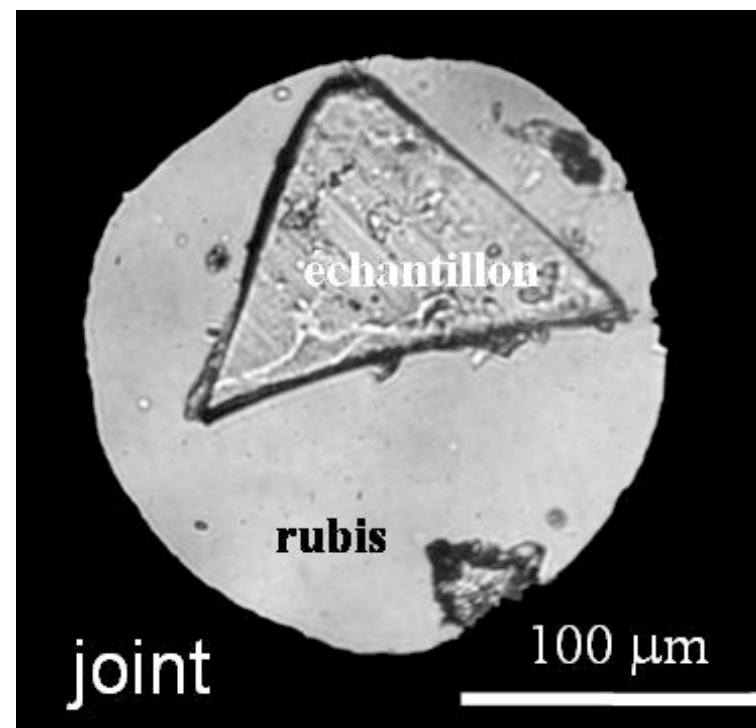
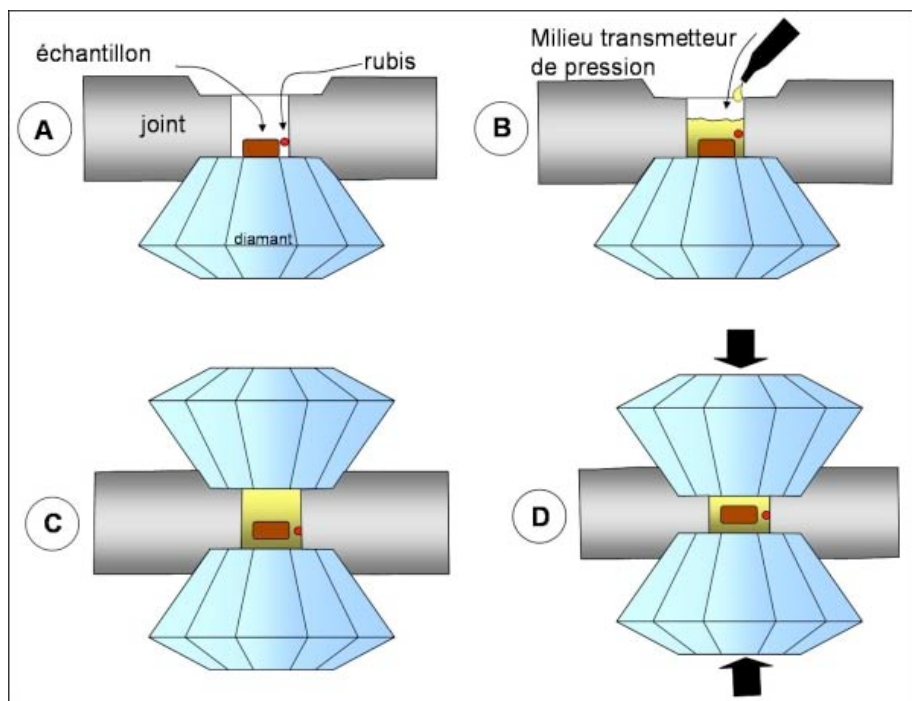
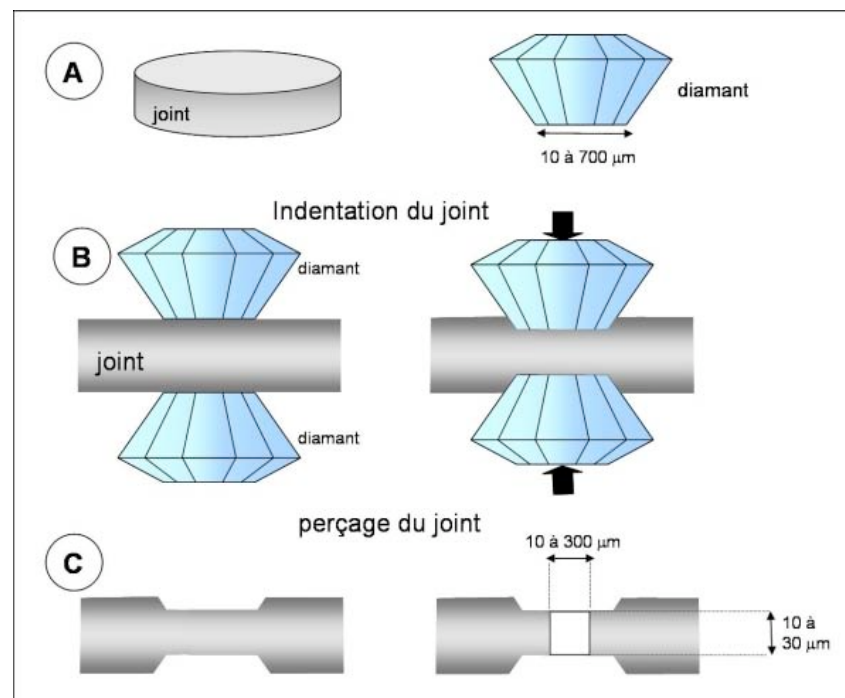
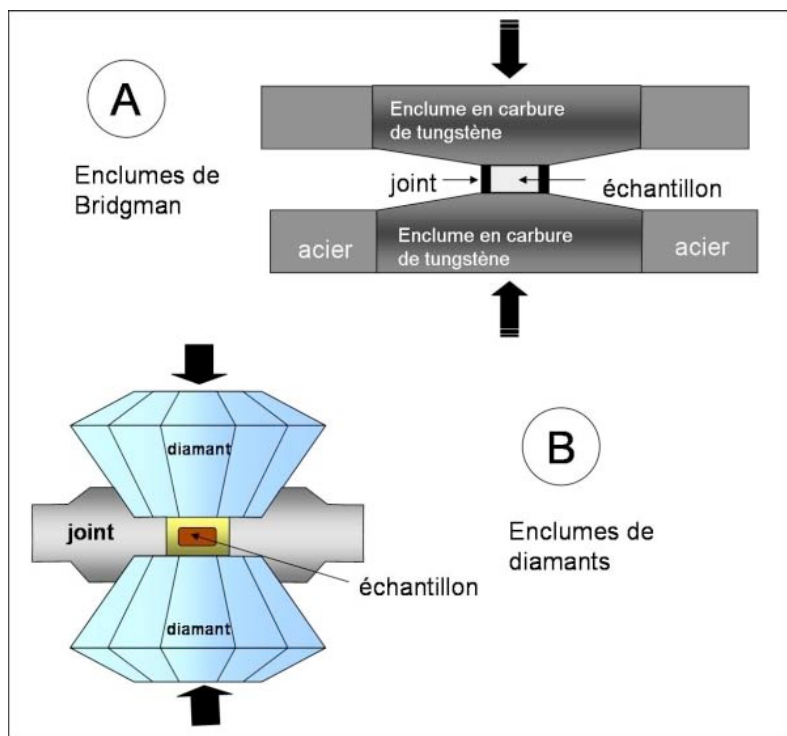
Terre

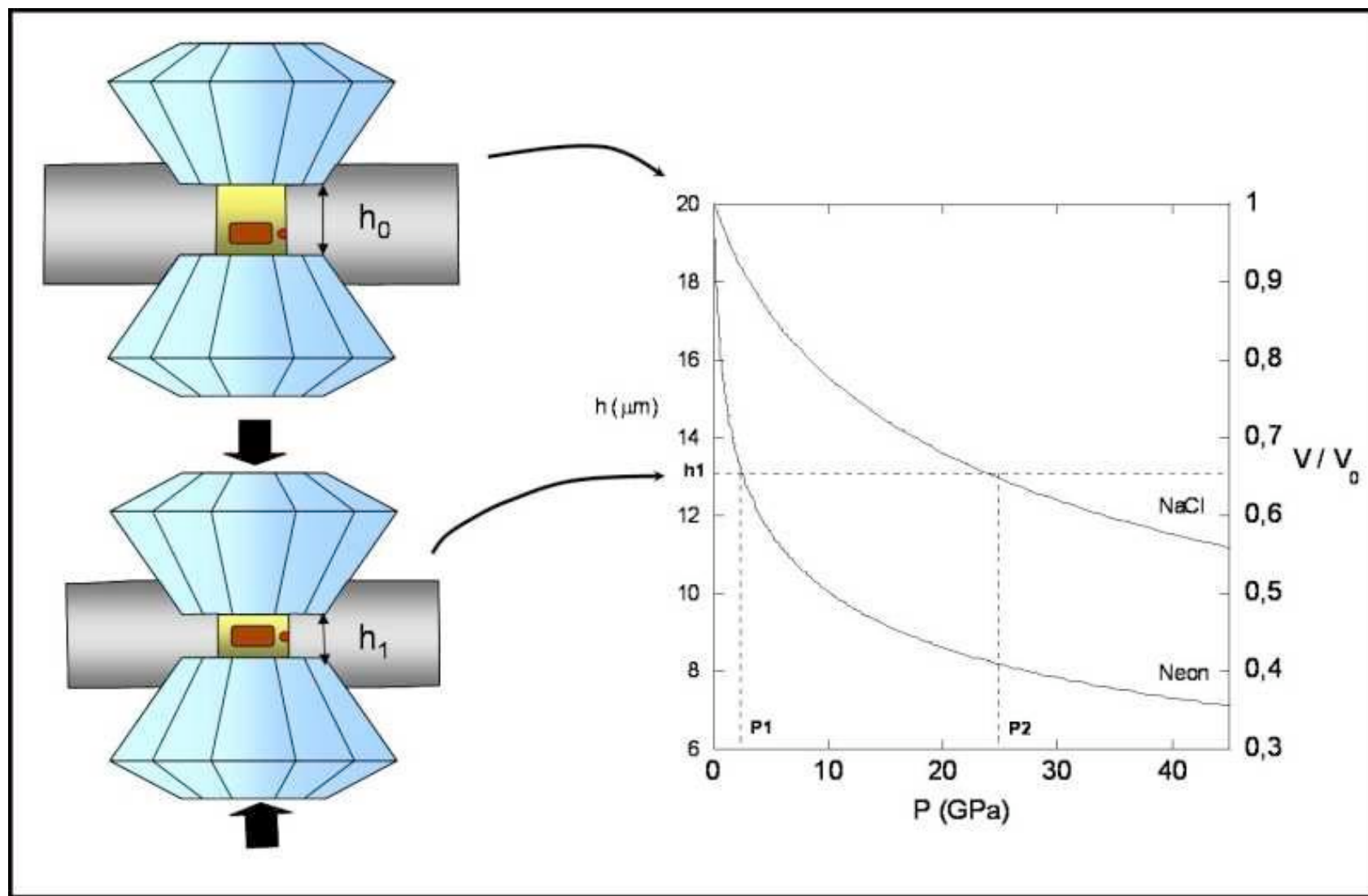


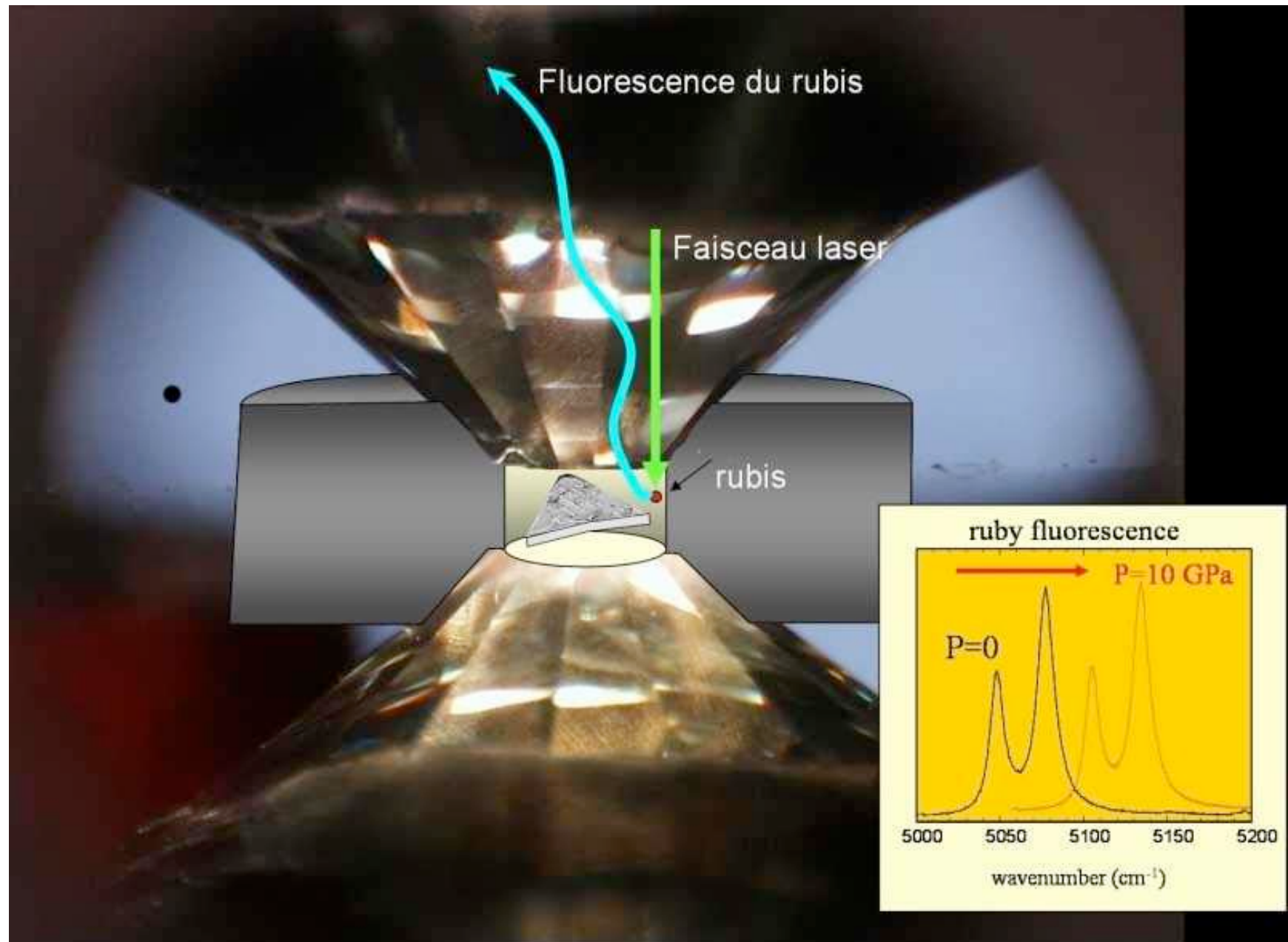
Manteau { Olivine
Pyroxènes
Grenat

7-2 Les résultats expérimentaux











Olivine (phase α) -->

wadsleyite (phase β) vers 410 km -->

ringwoodite (phase γ) vers 520 km -->

« perovskite » (Mg, Fe)SiO₃ + périclase (MgO) vers 660 km

"olivine-spinelle" correspond à
wadsleyite + ringwoodite

Perovskite: CaTiO₃

Spinelle: MgAl₂O₄

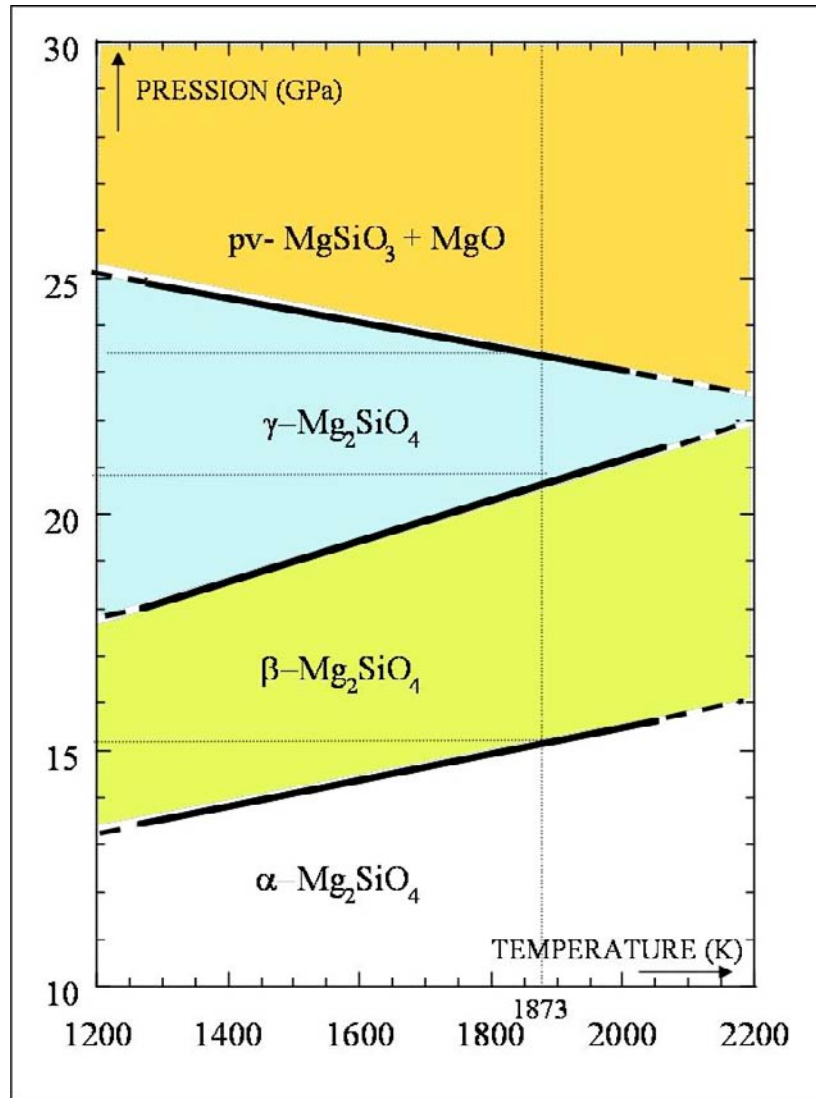


Diagramme de phase de Mg_2SiO_4

Avec la pression la forstérite, Mg_2SiO_4 ($\alpha\text{-Mg}_2\text{SiO}_4$), se transforme successivement :
 en phase $\beta\text{-Mg}_2\text{SiO}_4$ (de structure spinelle modifié)
 puis en $\gamma\text{-Mg}_2\text{SiO}_4$ (de structure spinelle)
 puis en un assemblage de pv-MgSiO_3 (de structure perovskite) + MgO (périclase)



Magnésio-wustite: (Mg, Fe)O

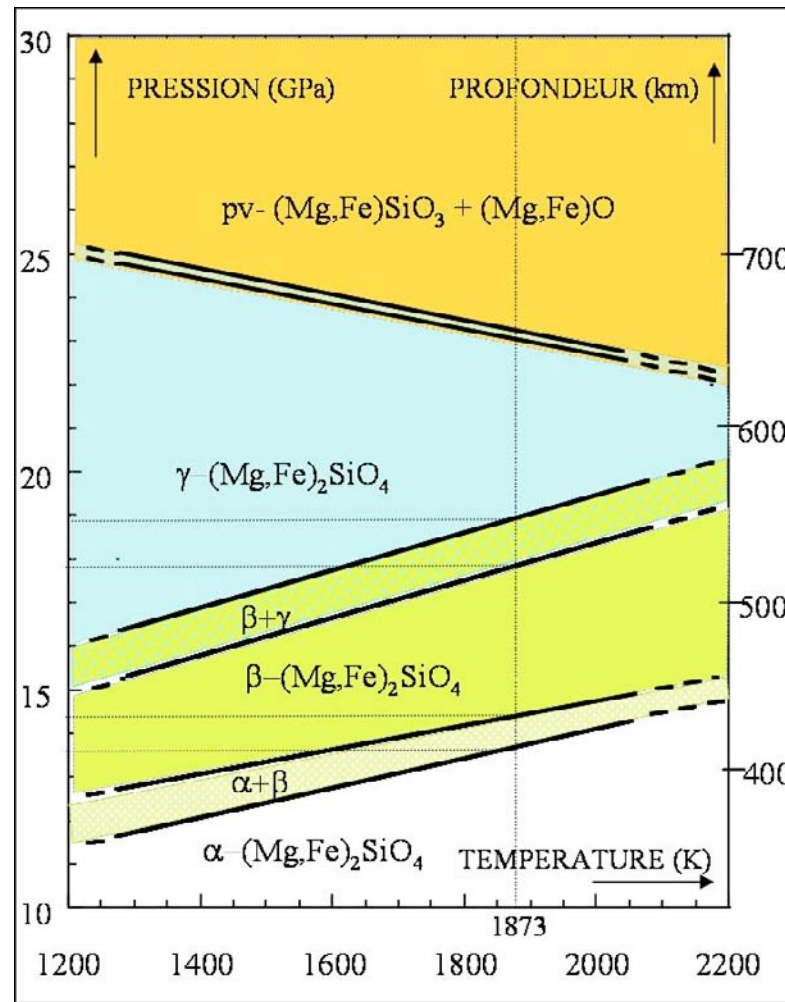
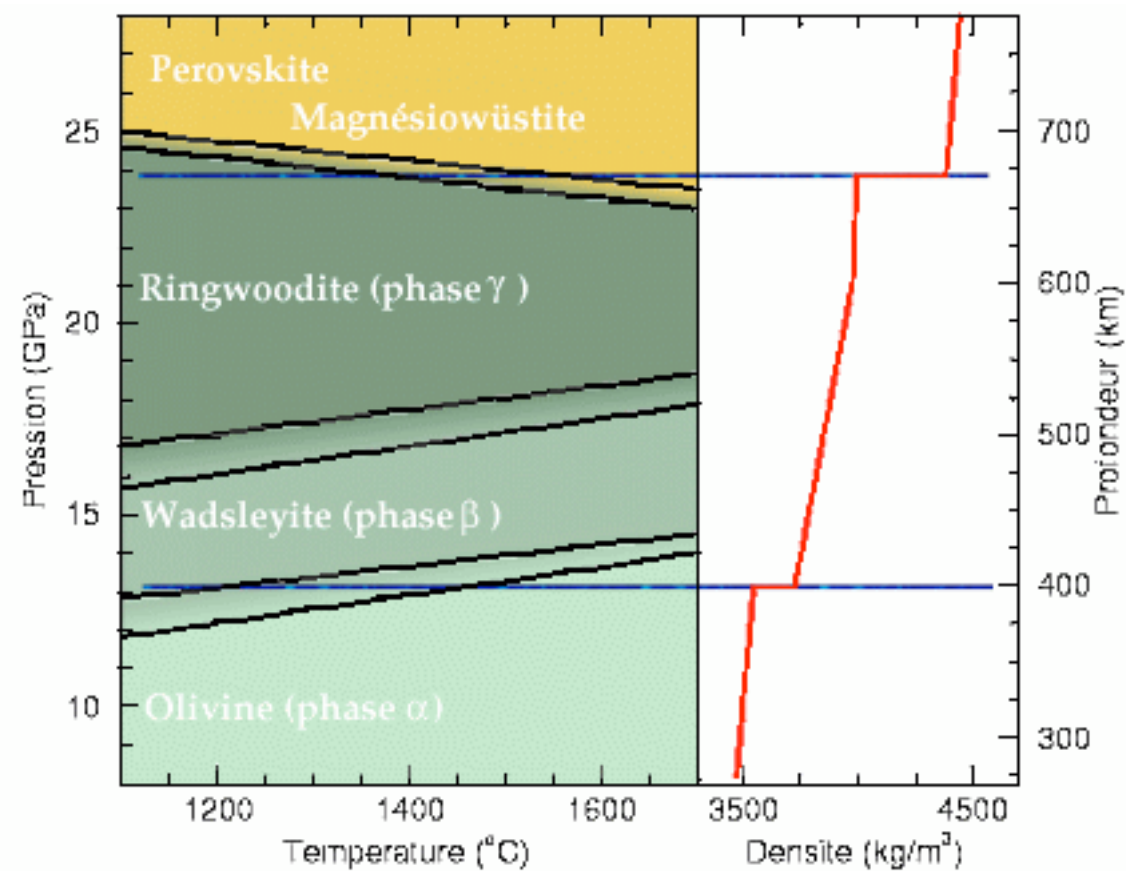
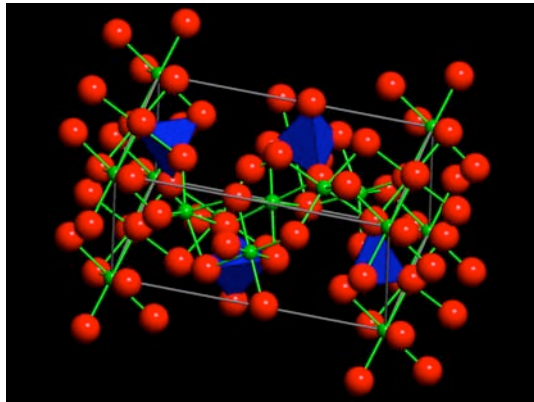


Diagramme de phase de $(\text{Mg}_{0.9}\text{Fe}_{0.1})_2\text{SiO}_4$.

La présence de fer conduit, non plus à des limites franches entre les différentes phases, mais à des domaines de coexistence sur des intervalles plus ou moins larges de pression et température.

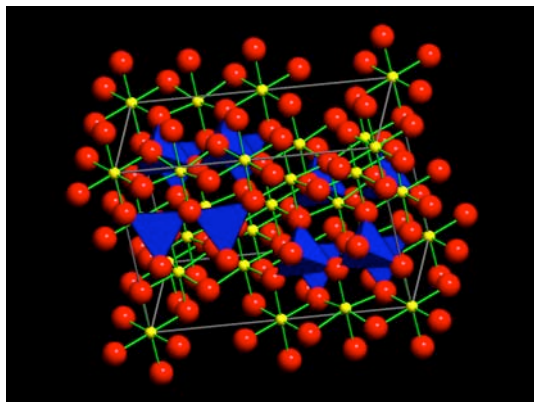




Structure de l'olivine

Les atomes de Si sont au centre de tétraèdres SiO_4 isolés (en bleu). Les atomes de Mg et de Fe en vert occupent le centre d'octaèdres MgO_6 FeO_6 (en vert) ayant en commun des arêtes.

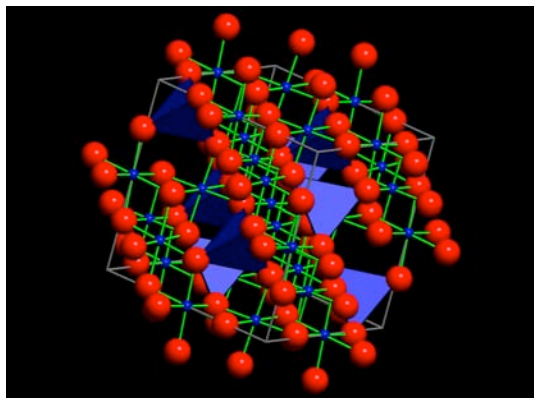
Maille élémentaire de $\alpha\text{-Mg}_2\text{SiO}_4$: orthorhombique
 $a=4.75 \text{ \AA}$; $b=10.20 \text{ \AA}$; $c=5.98 \text{ \AA}$, $\alpha=90^\circ$, $\beta=90^\circ$, $\gamma=90^\circ$



Structure de la phase β : wadsleyite

Les atomes de Si sont au centre de tétraèdres SiO_4 (en bleu). Les tétraèdres sont regroupés par deux en partageant un sommet pour former des groupements Si_2O_7 . Les atomes de Mg et de Fe en jaune occupent le centre d'octaèdres MgO_6 FeO_6 (en vert)

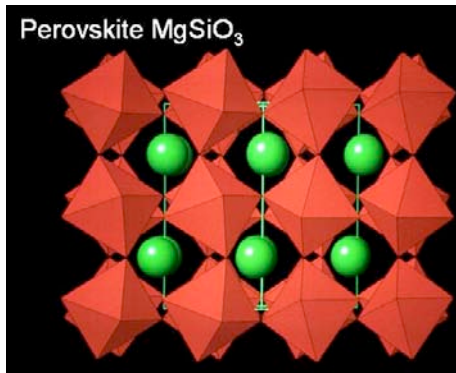
Maille élémentaire de $\beta\text{-Mg}_2\text{SiO}_4$: orthorhombique
 $a=5.6921 \text{ \AA}$; $b=11.460 \text{ \AA}$; $c=8.253 \text{ \AA}$, $\alpha=90^\circ$, $\beta=90^\circ$, $\gamma=90^\circ$



Structure de la phase γ : ringwoodite

Les atomes de Si sont au centre de tétraèdres SiO_4 isolés (en bleu). Les atomes de Mg et de Fe en bleu occupent le centre d'octaèdres MgO_6 ou FeO_6 (en vert).

Maille élémentaire de $\gamma\text{-Mg}_2\text{SiO}_4$: cubique
 $a=8.0709 \text{ \AA}$, $\alpha=90^\circ$, $\beta=90^\circ$, $\gamma=90^\circ$

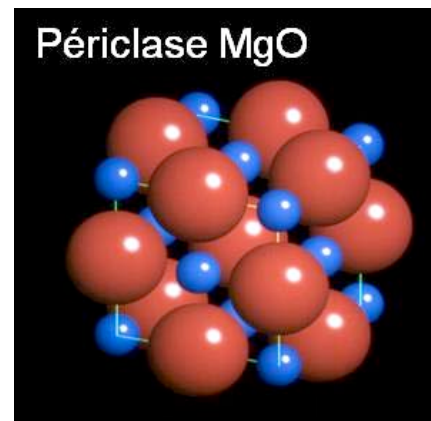


Structure de la perovskite

Les atomes de Si sont au centre d'octaèdres SiO_6 (en rouge), le Si est hexacoordonné contrairement aux autres phases où il est tétracoordonné. Les atomes de Mg et de Fe en vert occupent le centre d'octaèdres MgO_6 et FeO_6 .

Maille élémentaire de pv- MgSiO_3 : orthorhombique

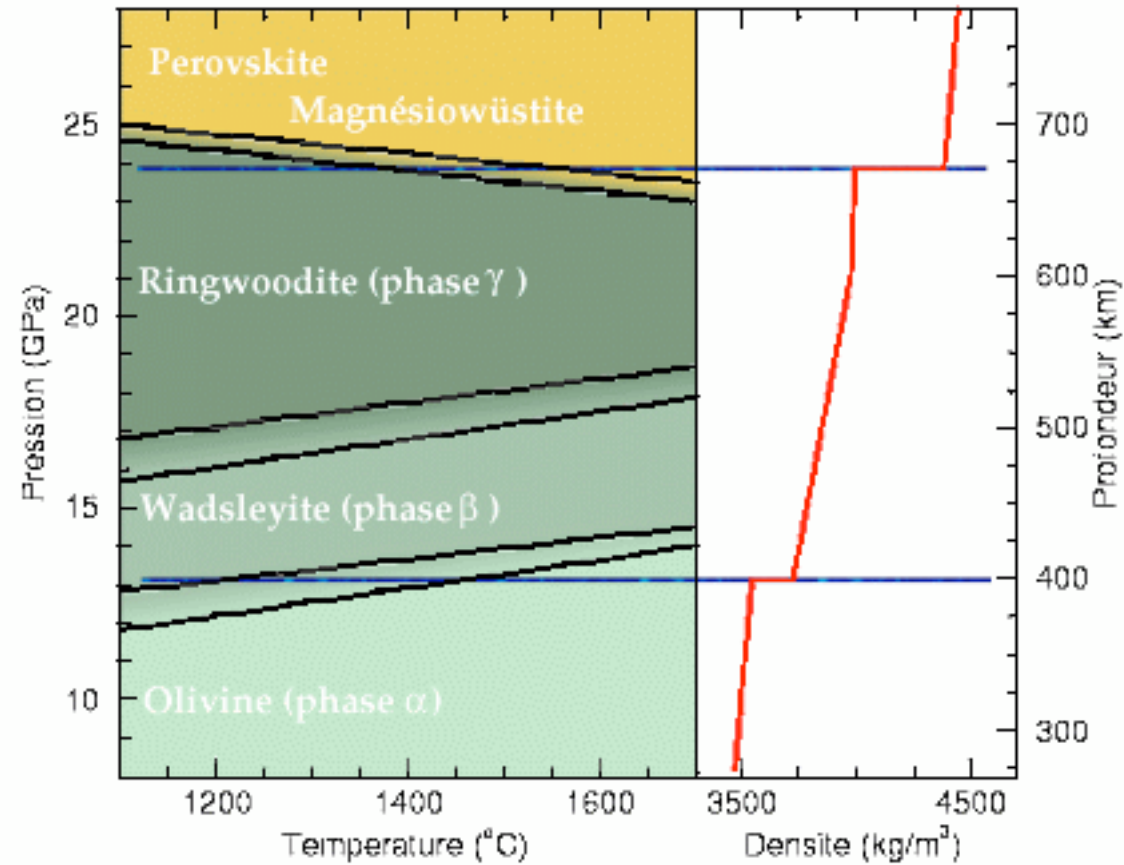
$a=4.7754 \text{ \AA}$; $b=4.9292 \text{ \AA}$; $c=6.8969 \text{ \AA}$, $\alpha=90^\circ$, $\beta=90^\circ$, $\gamma=90^\circ$



Structure du périclase (MgO) et de la magnésio-wüstite (Mg,FeO)

La structure est celle de NaCl .

Maille élémentaire de MgO : cubique



Minéral	V_{molaire} (cm ³ /mol)
α -Mg ₂ SiO ₄	43.67
β -Mg ₂ SiO ₄	40.54
γ -Mg ₂ SiO ₄	39.65
MgSiO ₃ perovskite	24.42
MgO	11.25

Pyroxène: MgSiO_3

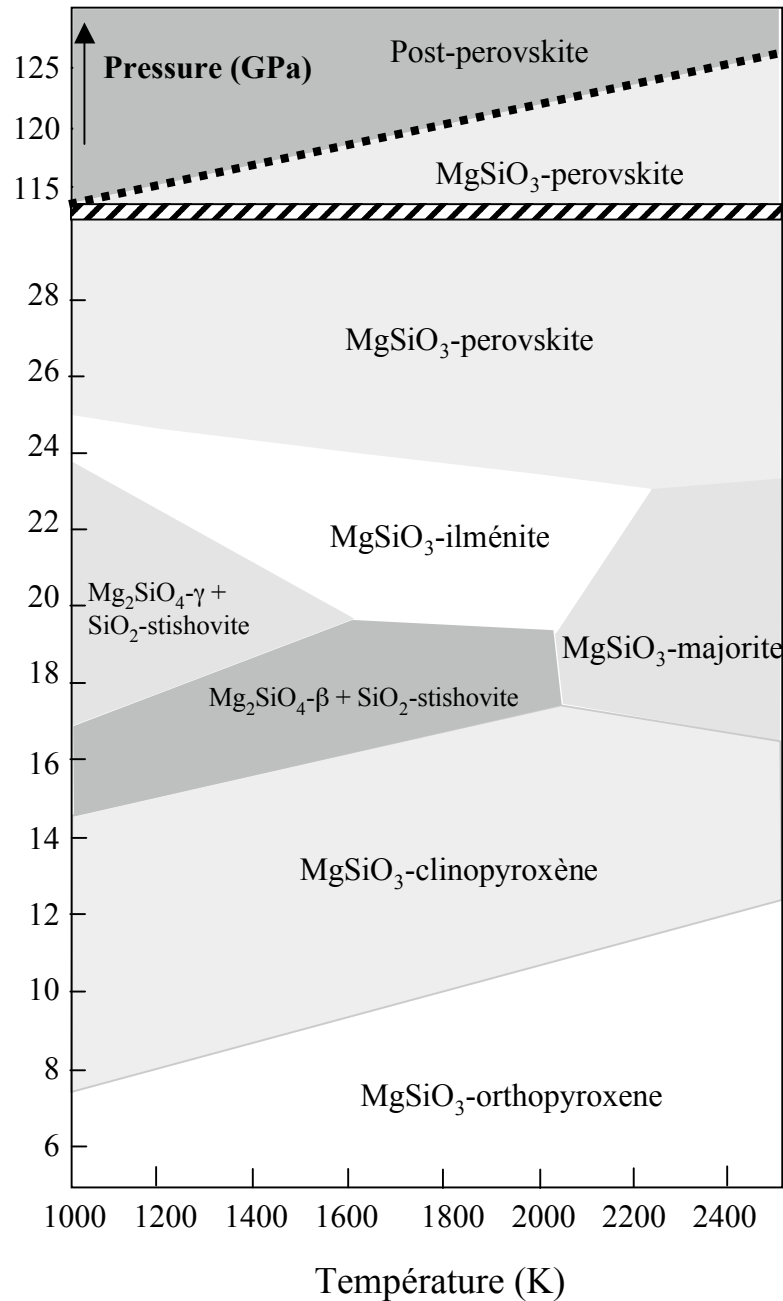
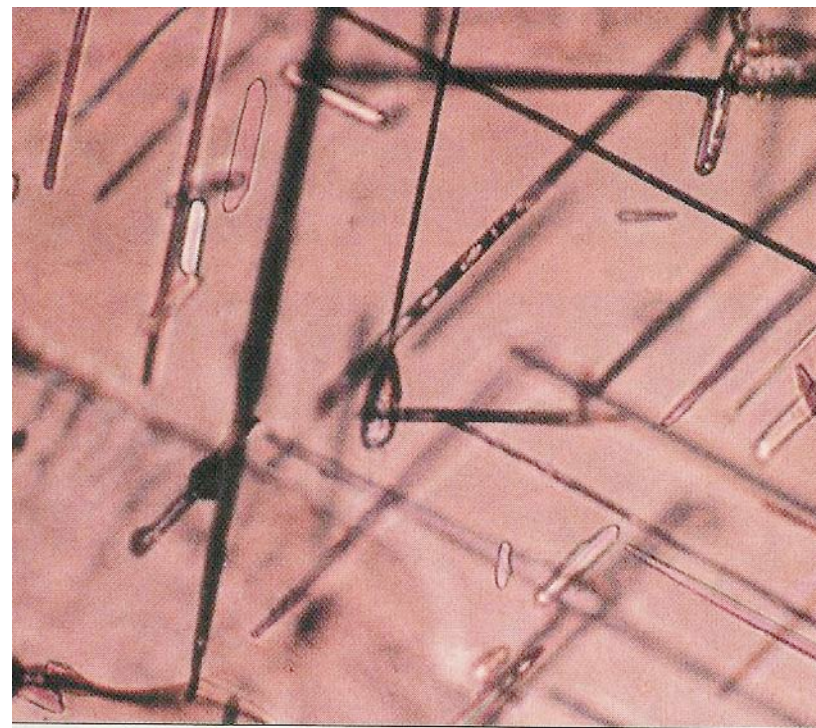
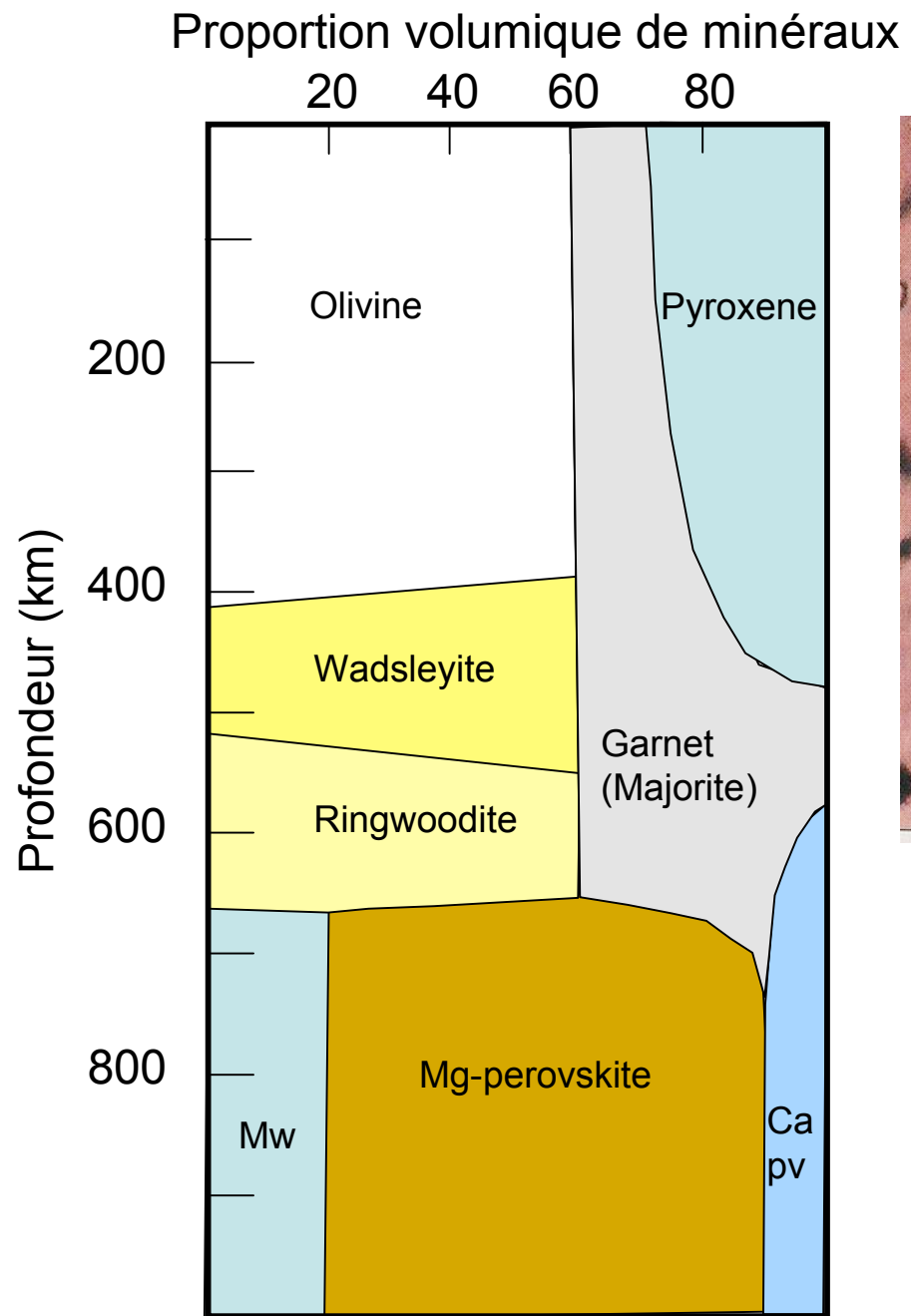
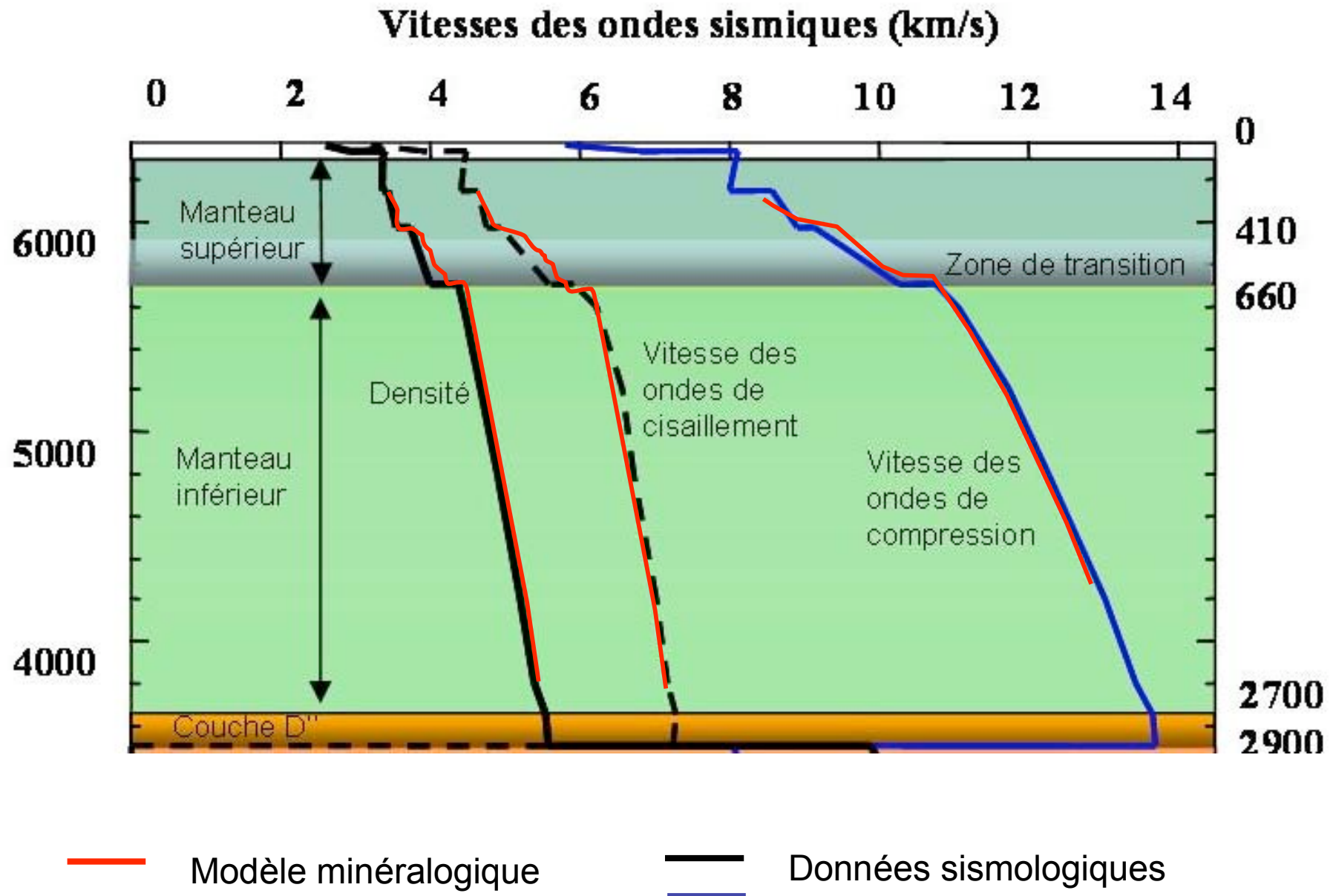


Diagramme de phase de MgSiO_3
En fonction de la pression et de la température
on observe les minéraux suivants :

- MgSiO_3 de structure orthopyroxène
- MgSiO_3 de structure clinopyroxène
- MgSiO_3 de structure ilménite
- MgSiO_3 de structure majorite
- MgSiO_3 de structure perovskite
- MgSiO_3 de structure post-perovskite

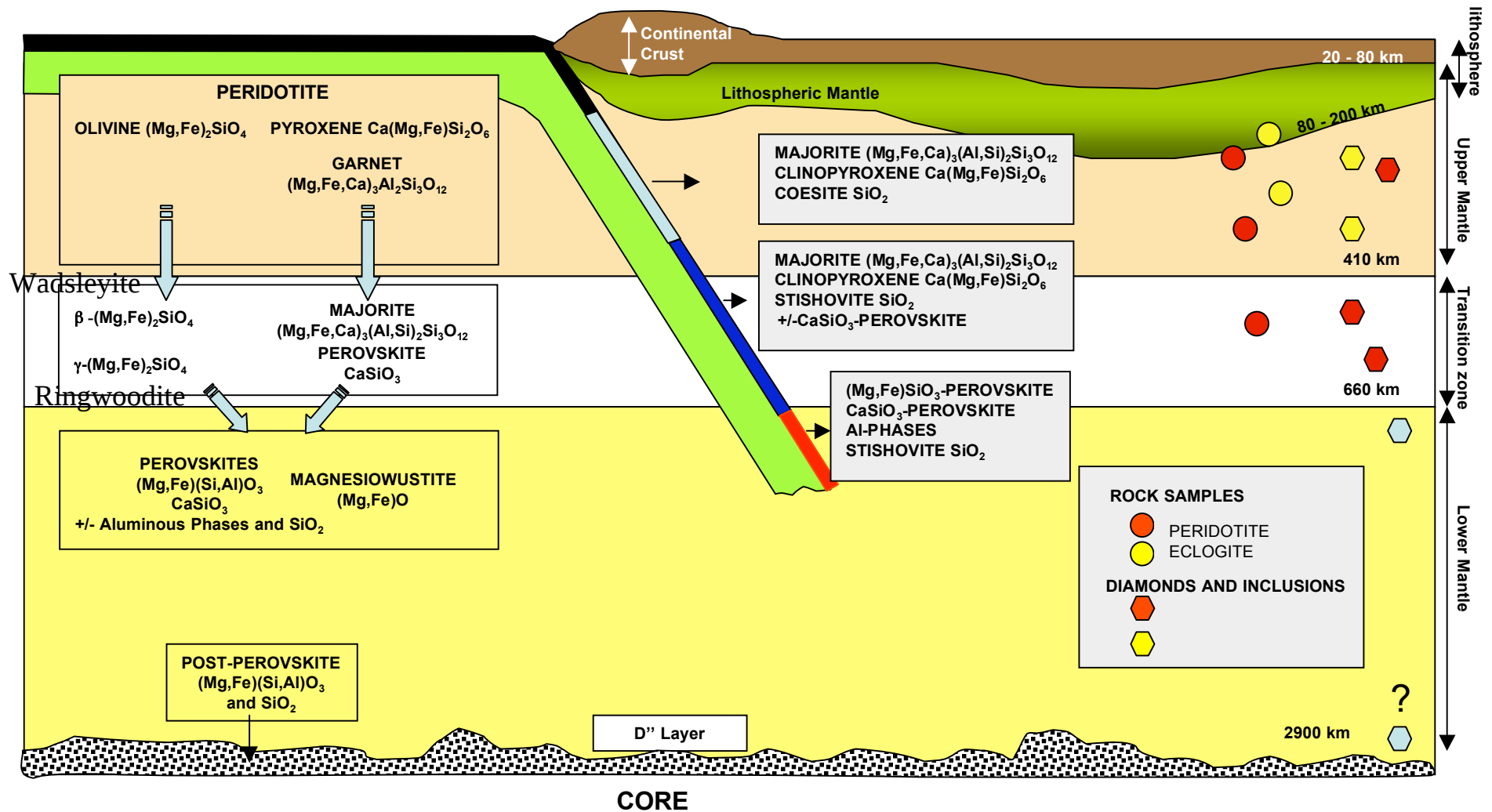


Comparaison entre expériences de haute pression et sismologie

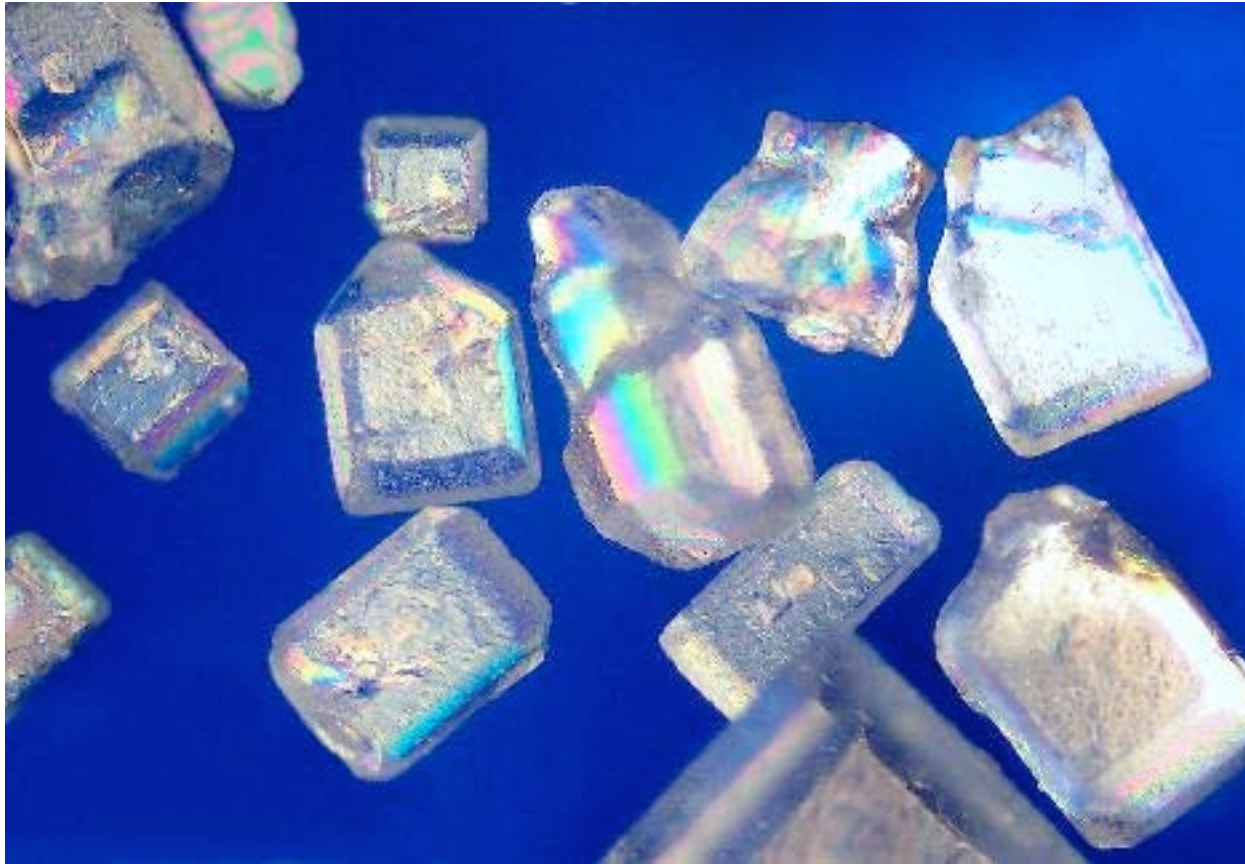


Experiments

Natural sampling

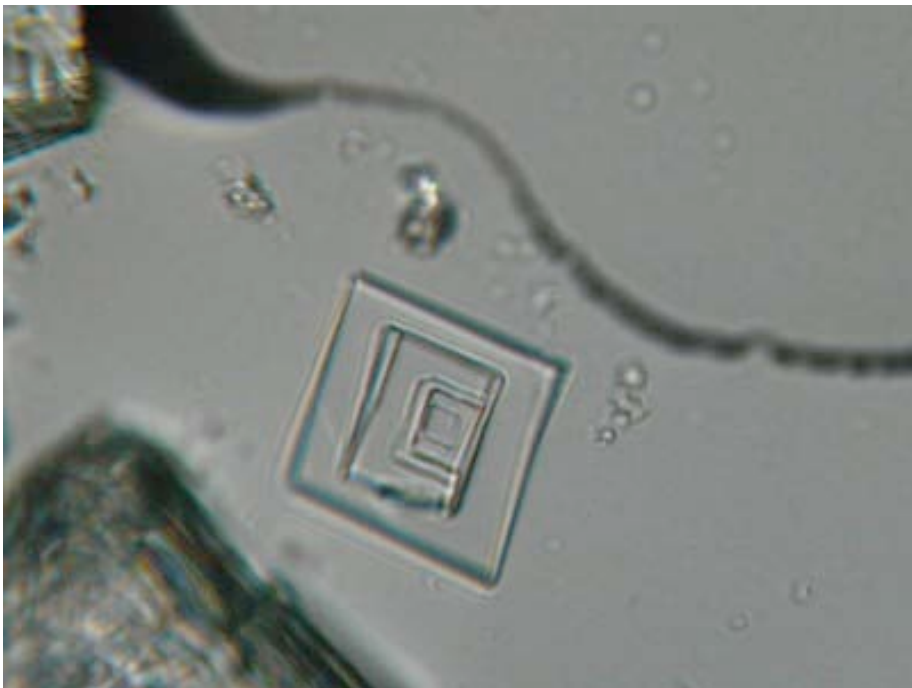
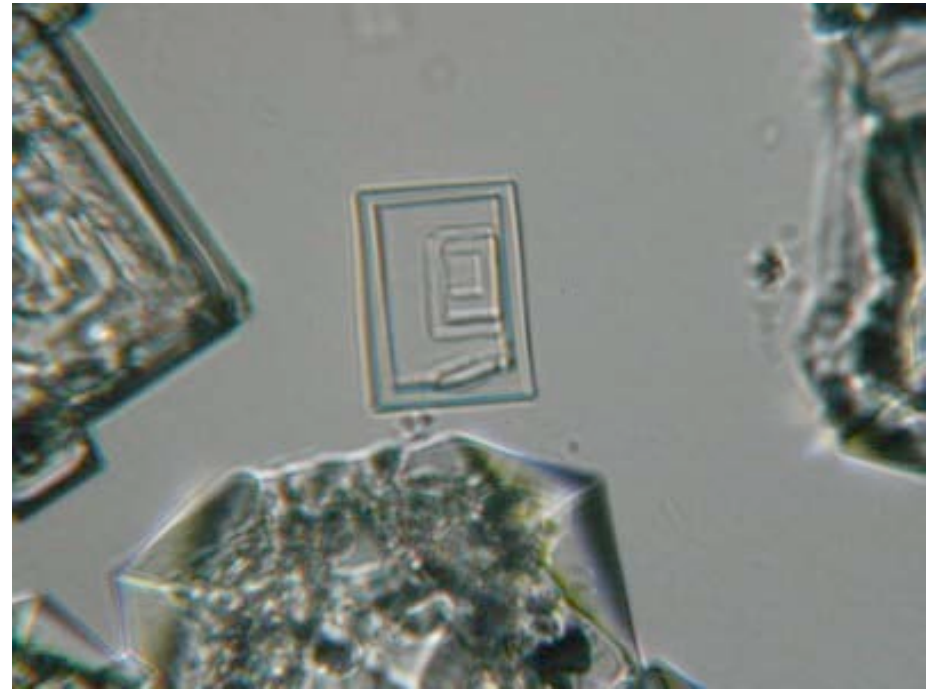
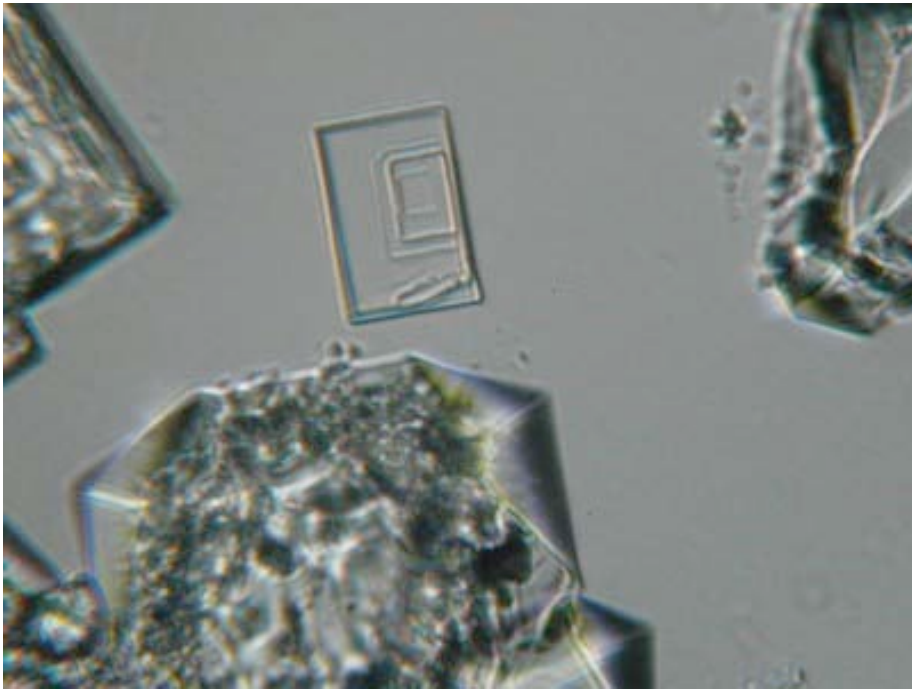


8: Applications



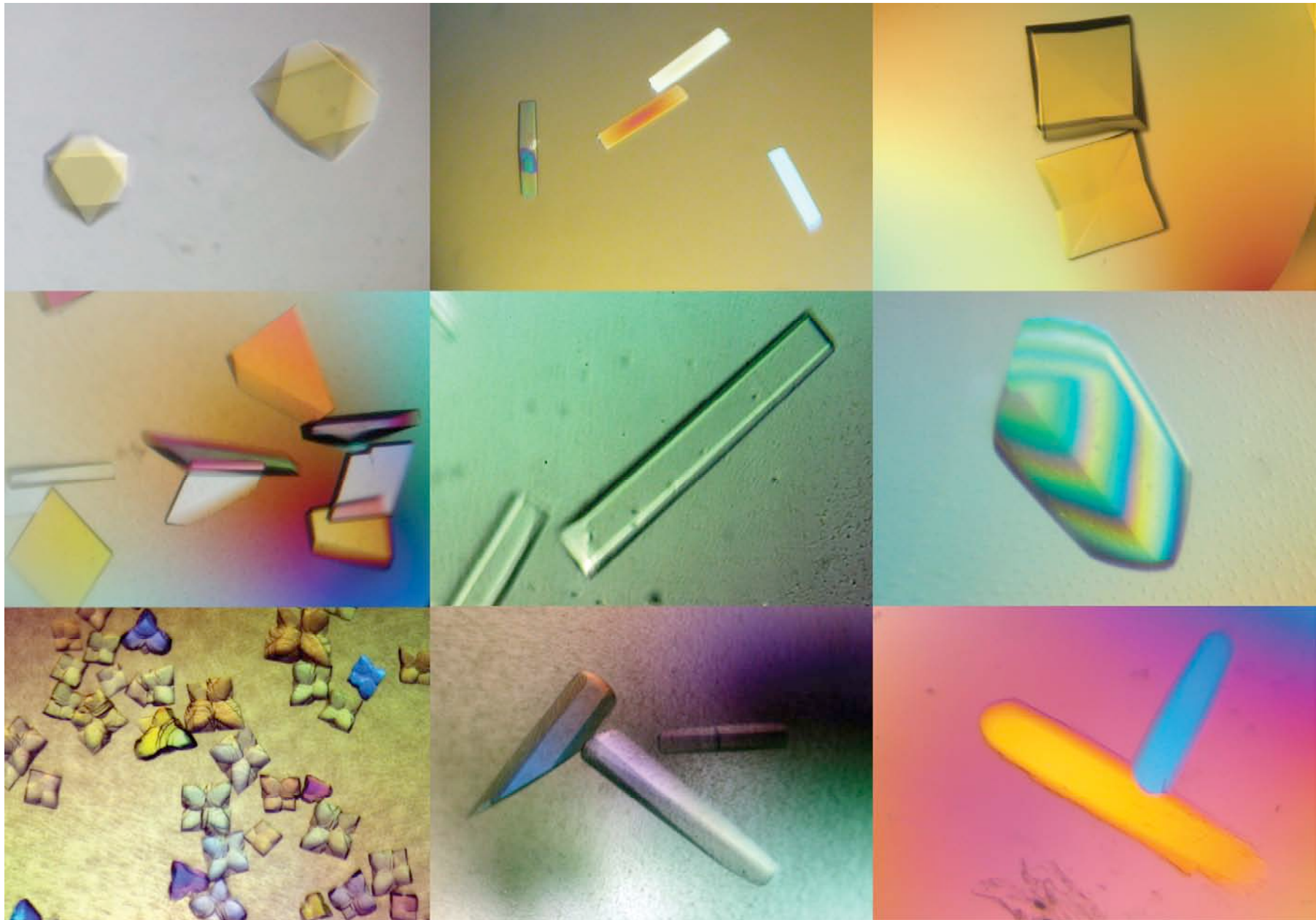
Cristaux de saccharose ou sucre de table, le plus familier des glucides.

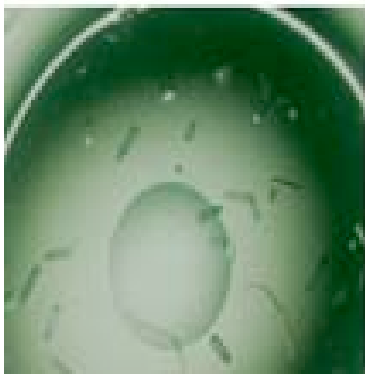
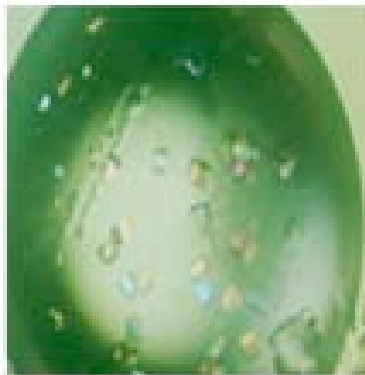
(Crédit : Jan Homann)



Cristaux de sel de cuisine

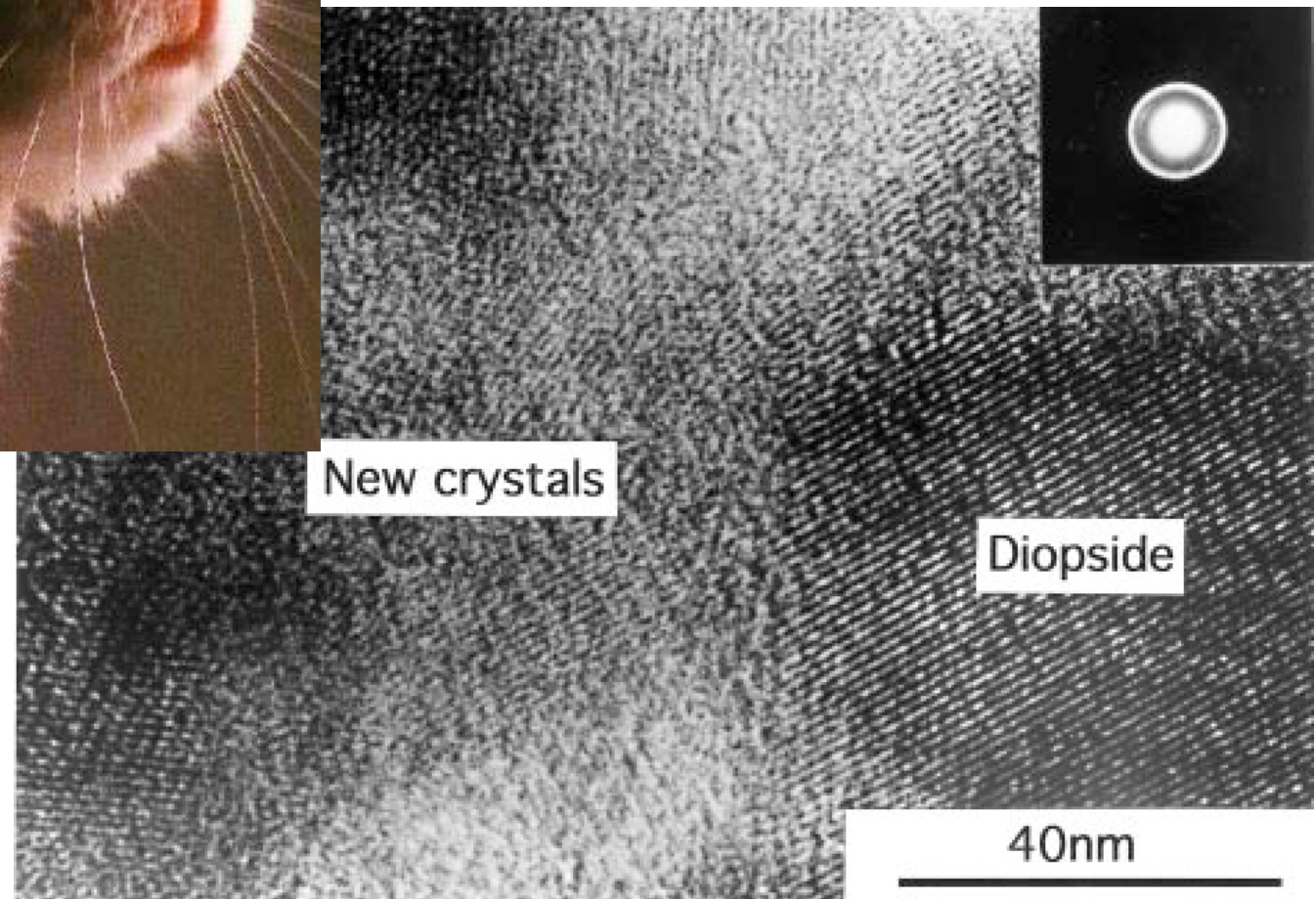
Cristaux de protéine



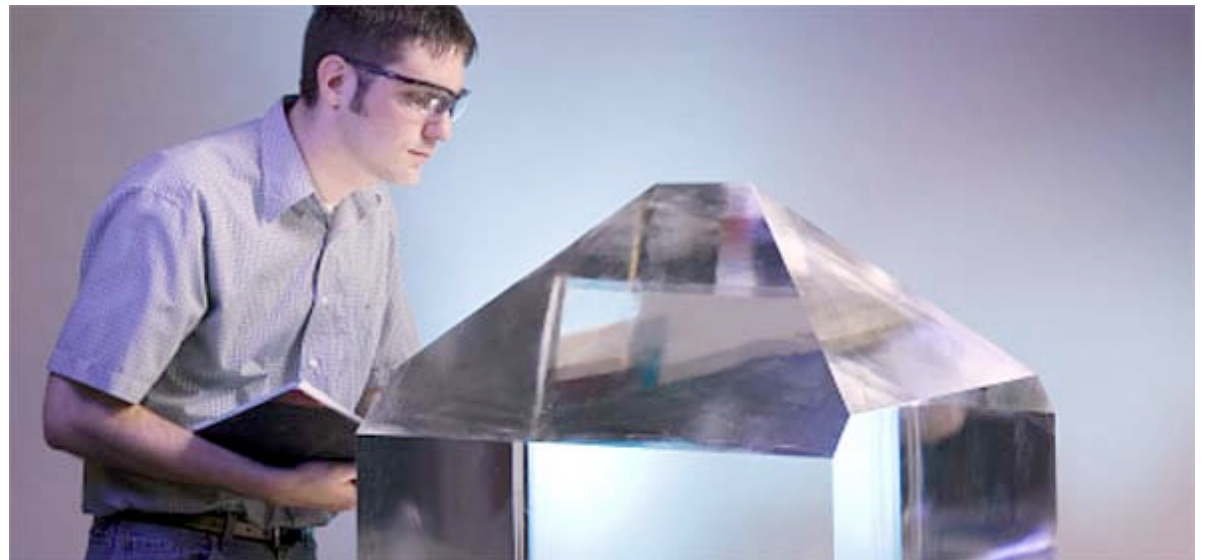


Quelques
cristaux de
protéines à
fonction
inconnue
obtenus dans le
cadre du projet
de génomique
structurale des
mycobactéries.

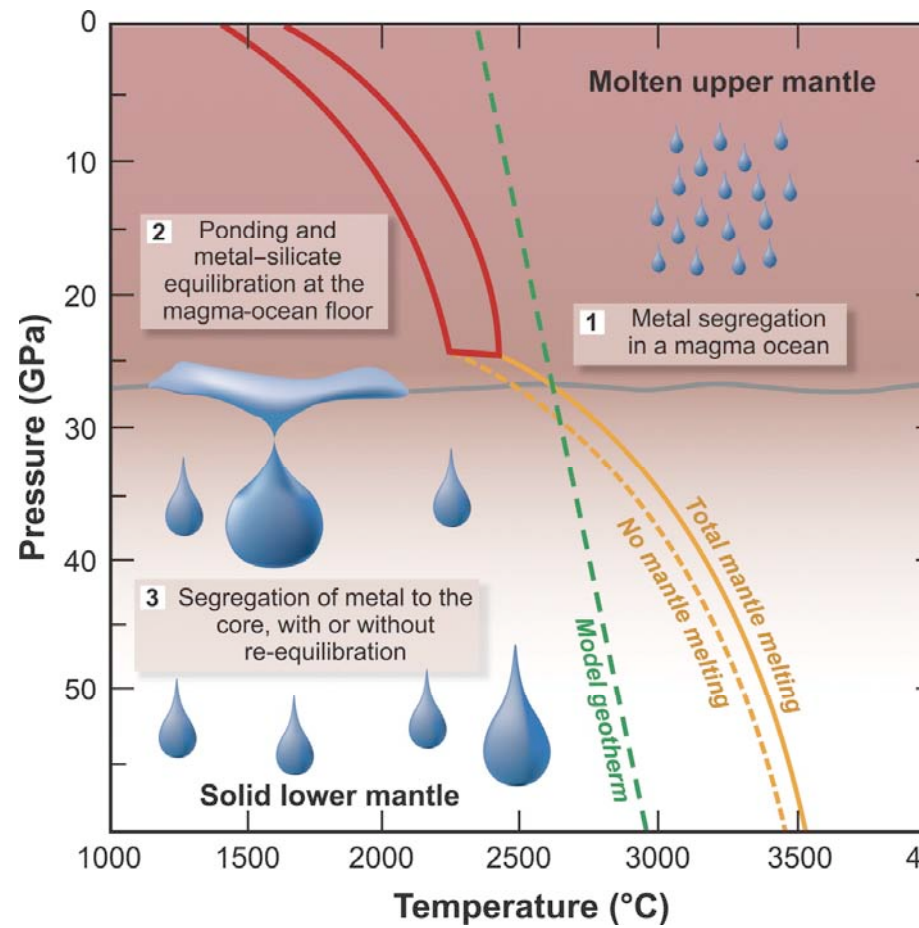
Le lapin magmatique



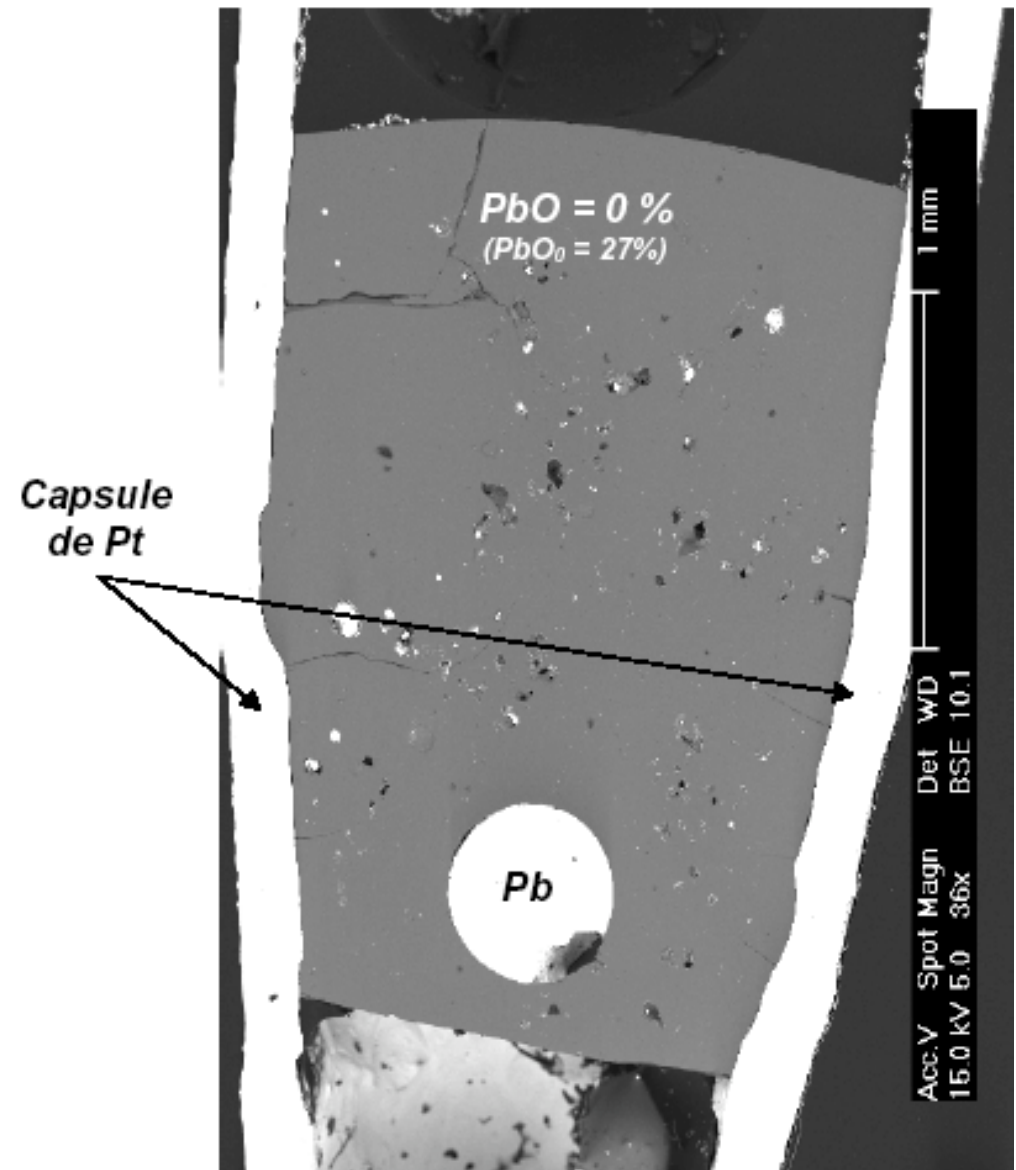
Cristaux géants



Expériences de soutirage du plomb du cristal



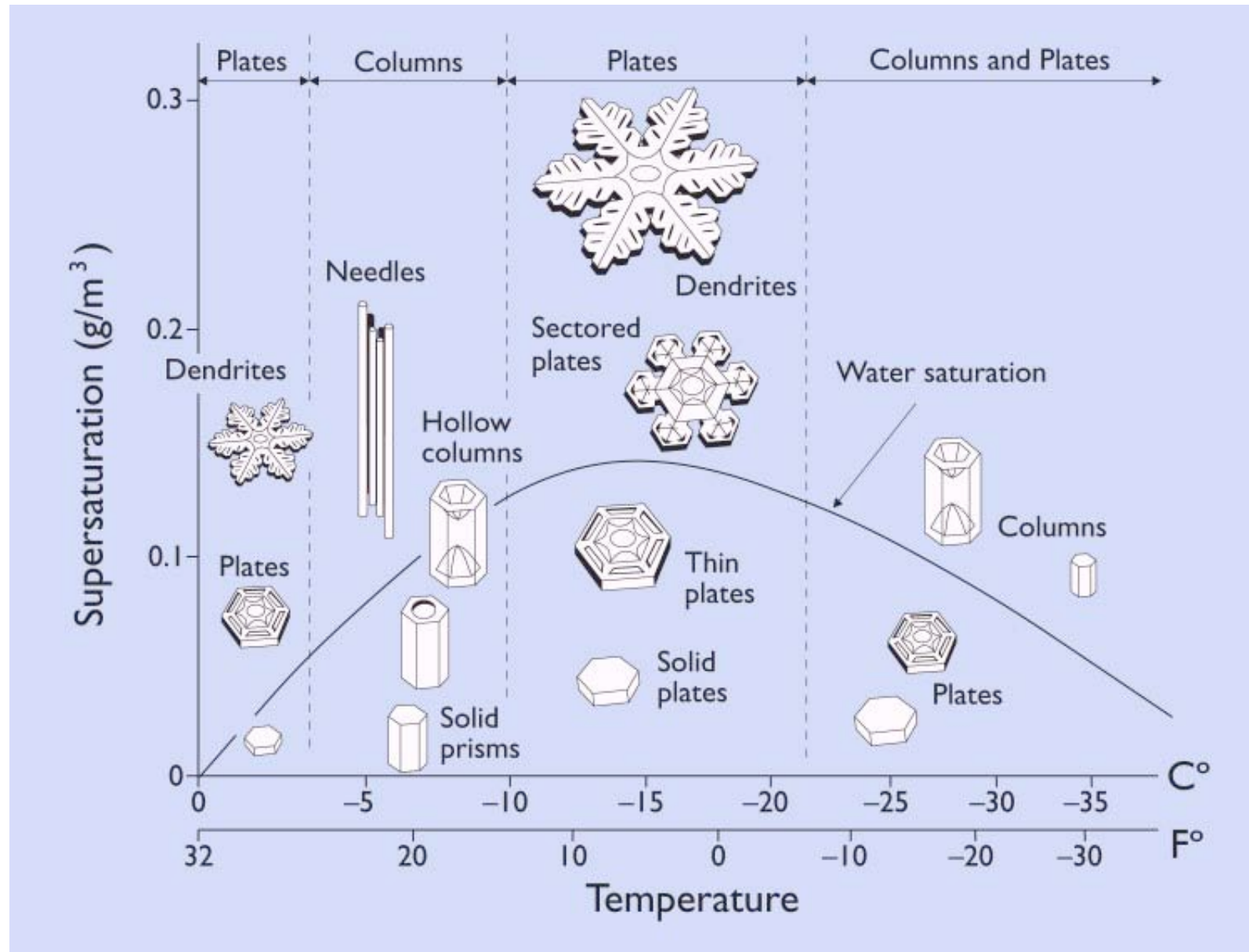
WALTER (1999)



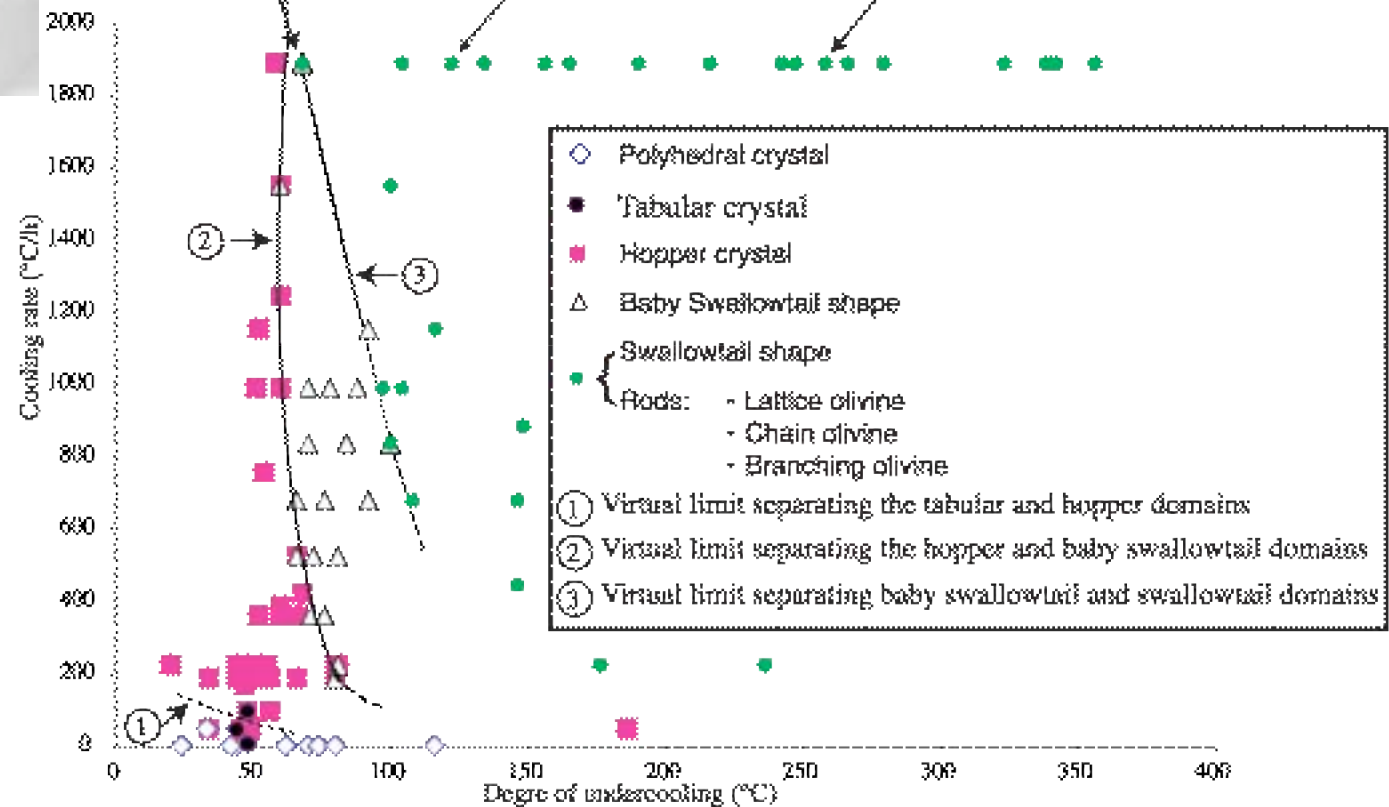
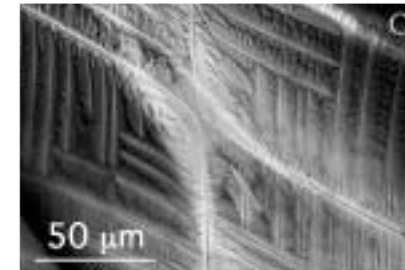
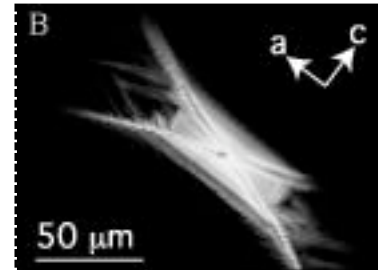
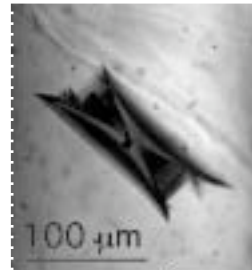
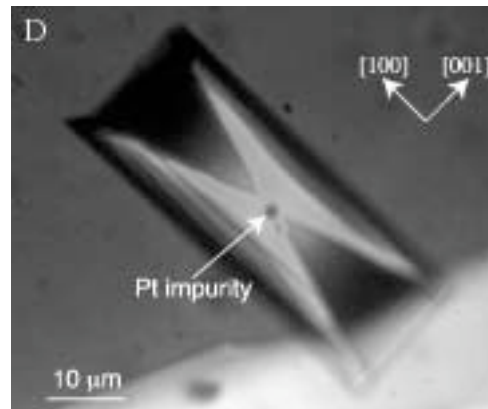
Cristaux de neige



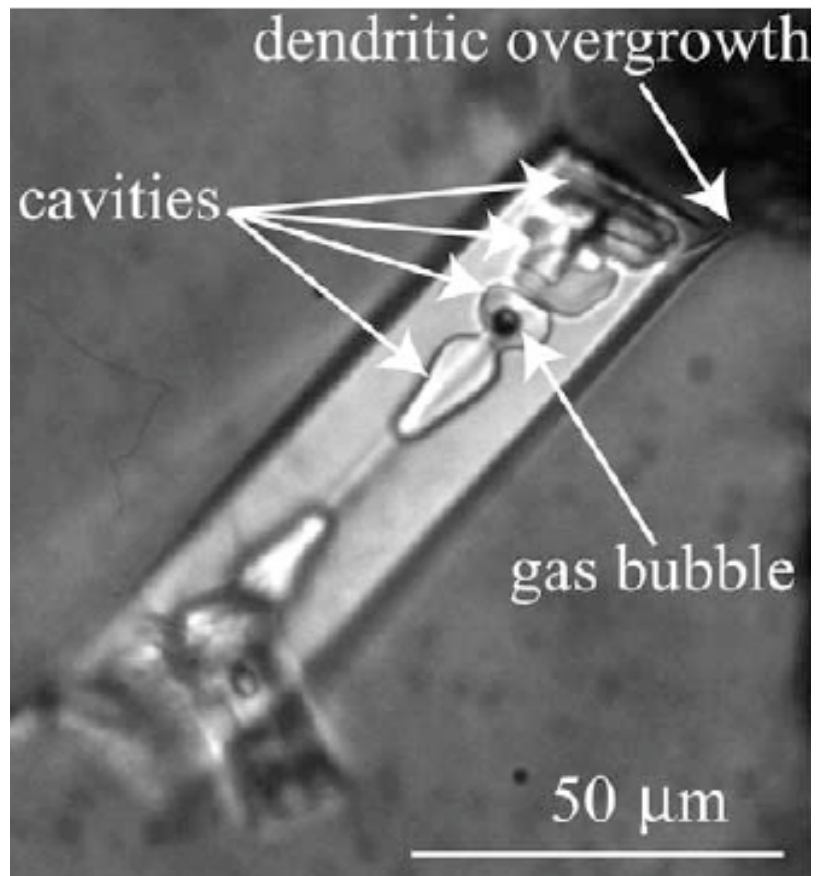
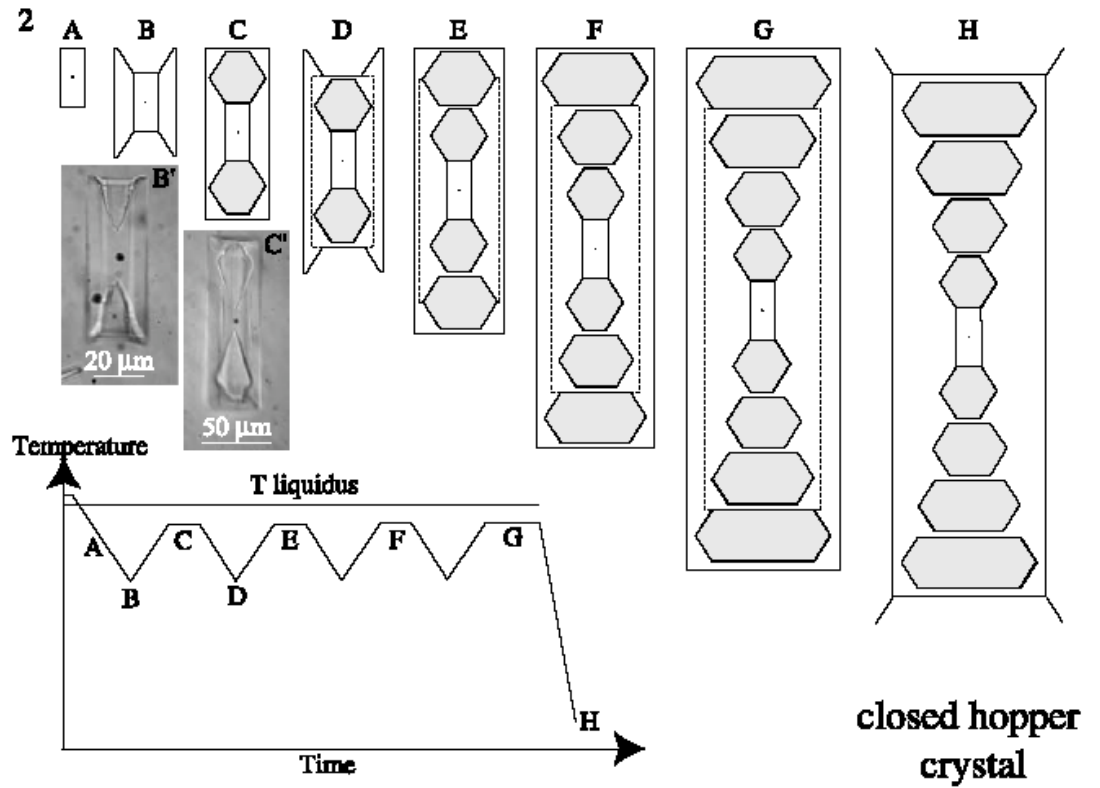
Cristaux de neige

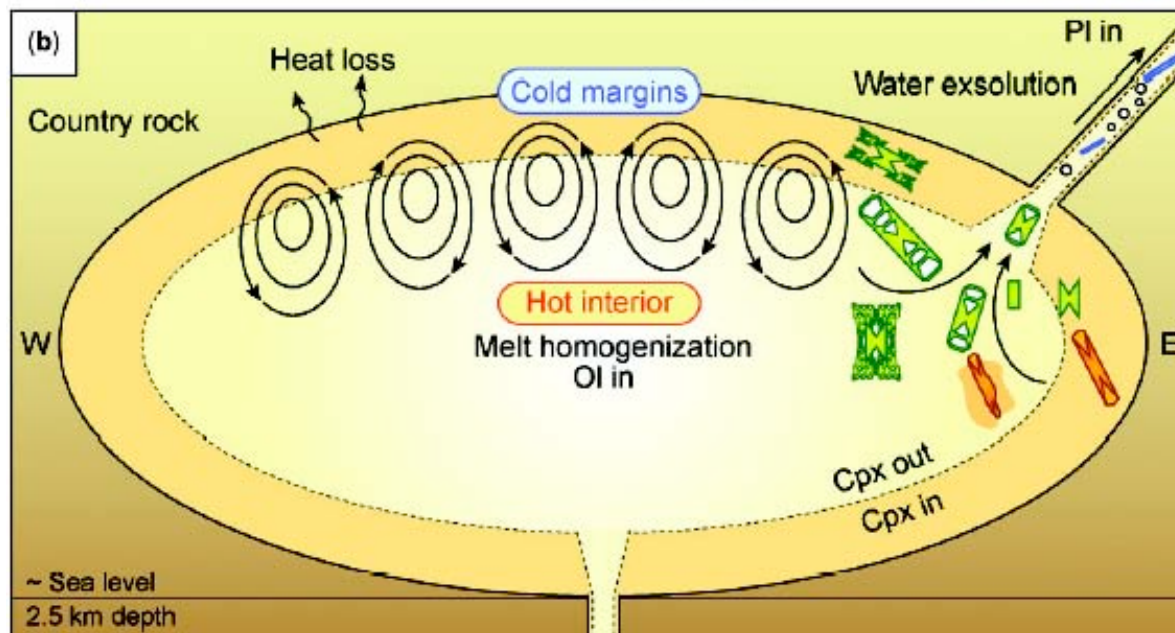
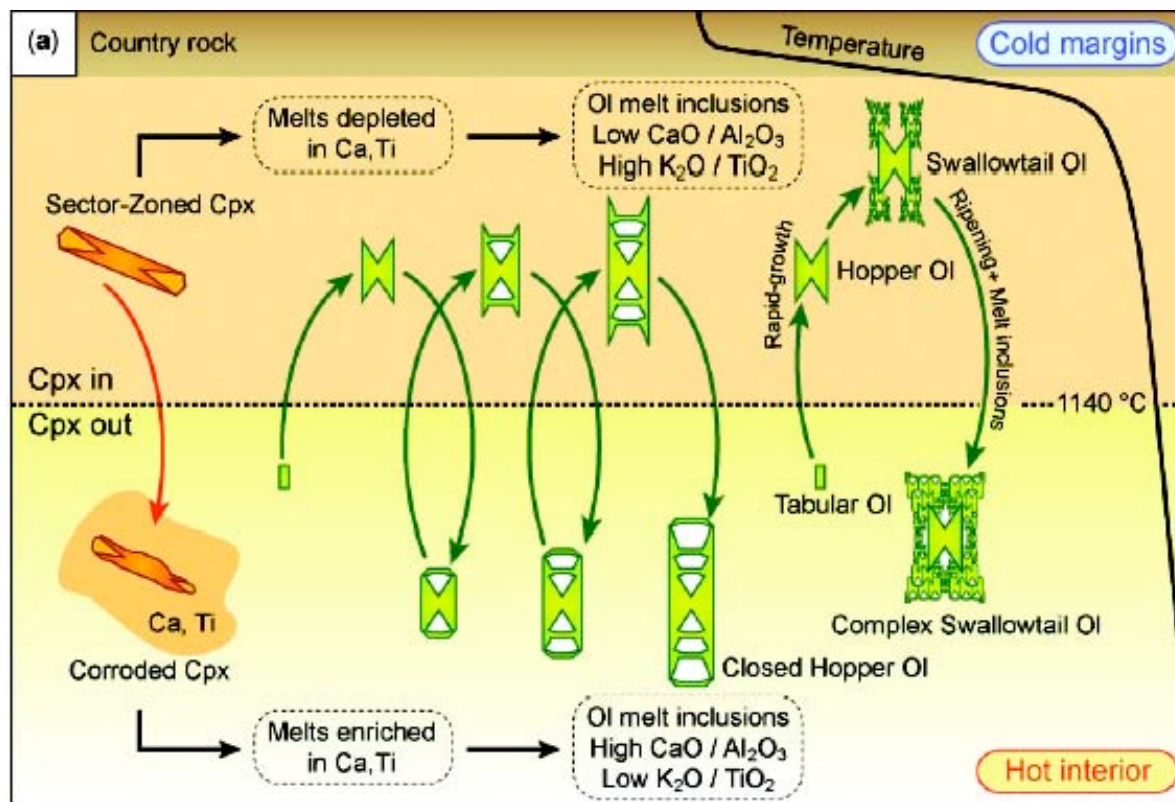


Exemple des olivines



Olivine





Modèle de fonctionnement de la chambre magmatique sous le Piton de la Fournaise.

(Welsch et al., 2009)

