



Association des Amis de la Collection de minéraux de la Sorbonne

Conférence
18 novembre 2017

Serpentines

Catherine Mével

Directrice de Recherche CNRS émérite
Institut de Physique du Globe de Paris
CNRS UMR 7154

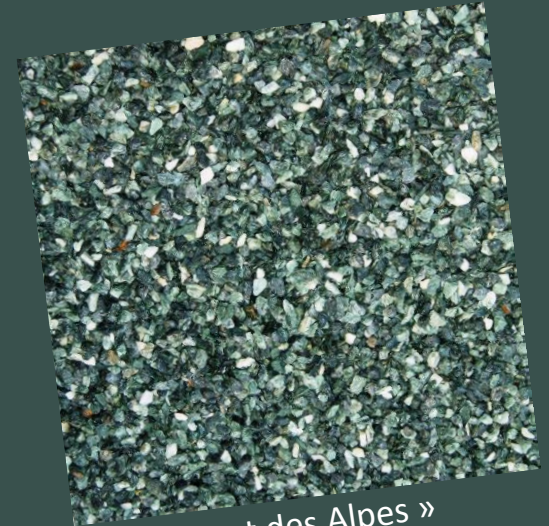




bijouterie à Modène



gare de Nantes



« vert des Alpes »
425 €/t



tribune de l'ONU



sculpture Y. Beaudoin



sculpture Inuit



Tombeau de Napoléon (conférence J. Touret)



Carrière de serpentine en Nouvelle Calédonie
photo Pierre Gautier, Géosciences Rennes

1 - Qu'est ce que la serpentine ?

2 - Conditions de formation de la serpentine

3 - La serpentinisation aux dorsales océaniques et ses conséquences géodynamiques

4 - Les champs hydrothermaux, témoins de la serpentinisation active

5 - Les serpentines et l'apparition de la vie

1 - Qu'est-ce que la serpentine ?



serpentine ou serpentinite ?

La **serpentine** est un **minéral**, solide inorganique homogène de composition chimique définie et de structure cristallographique particulière



La **serpentinite** est une **roche**, formée d'un assemblage de minéraux. La serpentine domine largement, mais d'autres minéraux peuvent également être présents : talc, magnetite, brucite, calcite, etc...



Le minéral serpentine

Famille de minéraux
appartenant au groupe des **phyllosilicates**

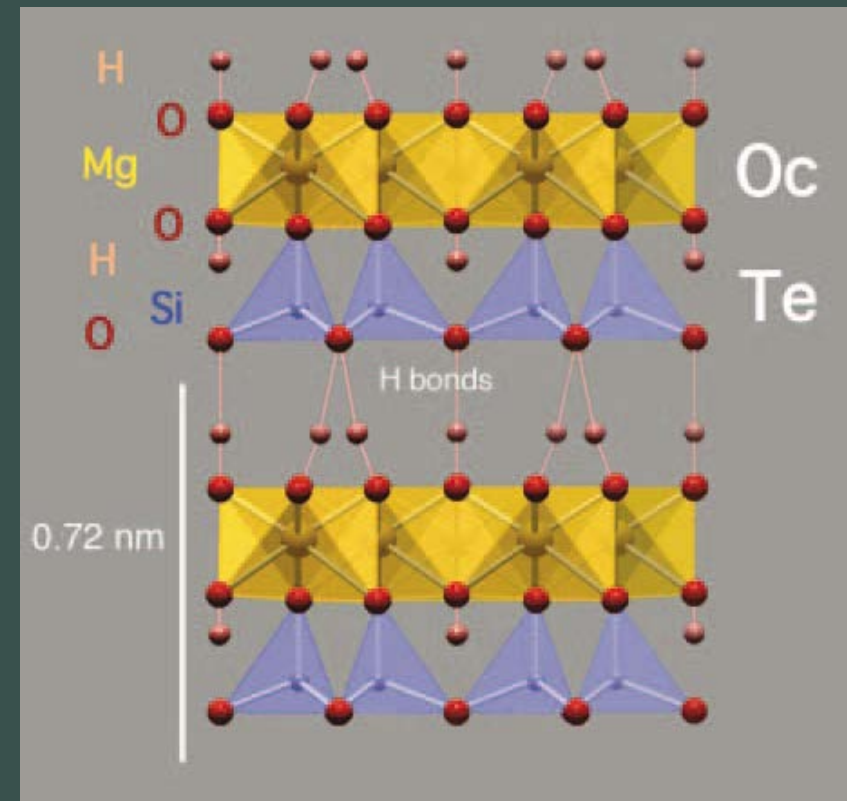
1 nanomètre = 10^{-9} mètre

Phyllosilicate de magnésium hydraté
Formule chimique :

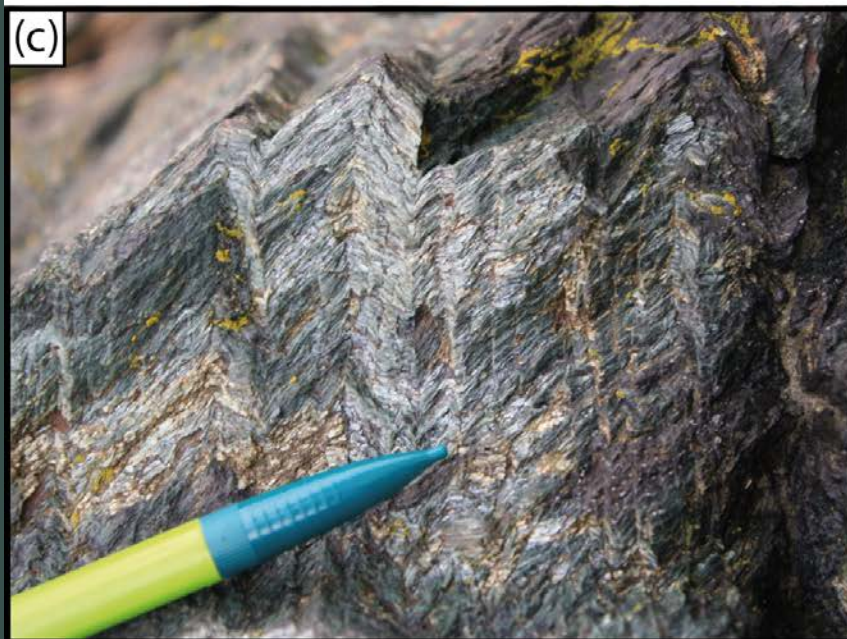


Principales substitutions

- Si : Al, Fe^{3+}
- Mg : Fe^{2+} , Mn, Ni



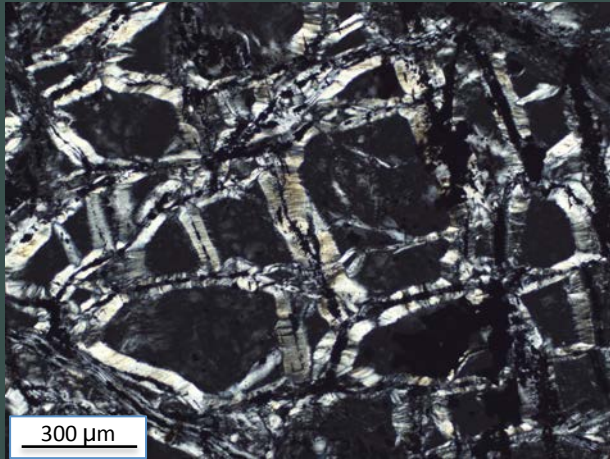
À l'affleurement, la serpentine peut présenter des aspects très différents



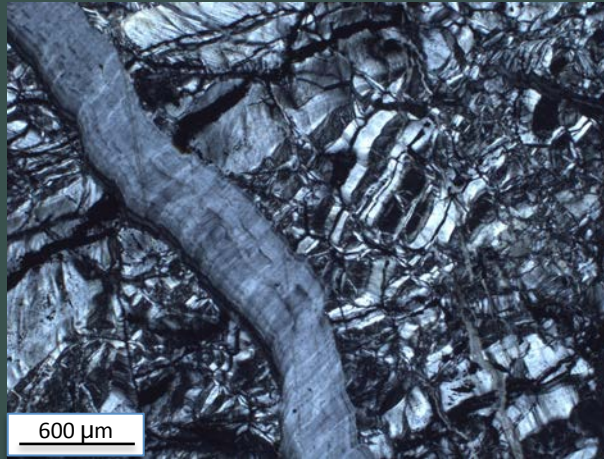
a : texture maillée (Pic marcel, Queyras)
b : veine fibreuse (Pic Marcel, Queyras)
c : serpentine schisteuse (Lanzo, Alpes
Piémontaises)

Photos Baptiste Debret

Microphotographies en lumière polarisée (nicols croisés)



Texture maillée



Veine fibreuse

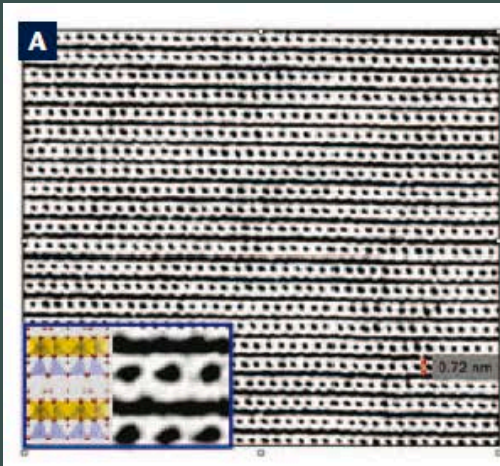


Texture schisteuse

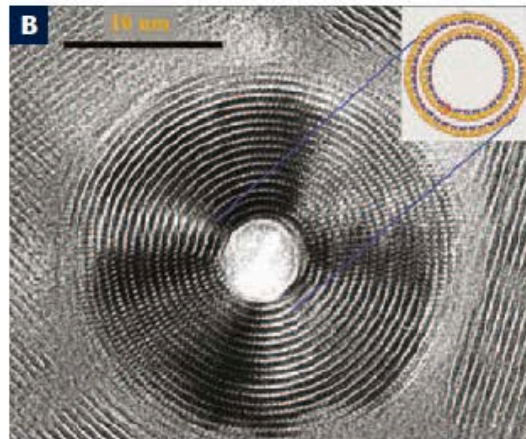
Ces trois variétés de textures correspondent à des variétés différentes de serpentine

Les trois principales variétés
sont caractérisées par une structure cristallographique particulière

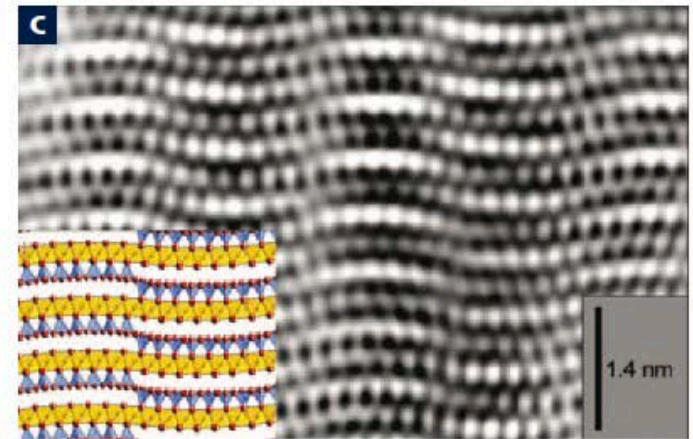
lizardite



chrysotile

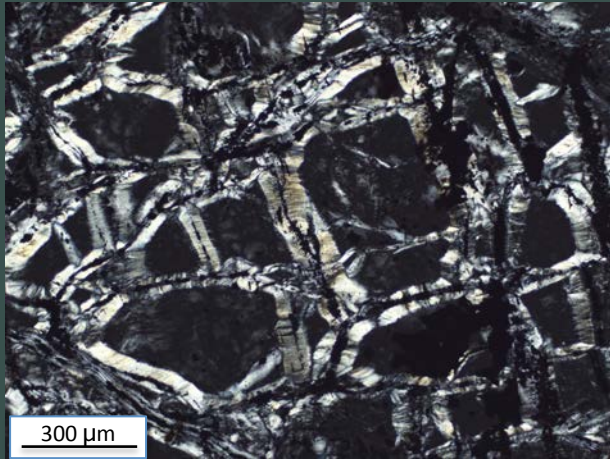


antigorite

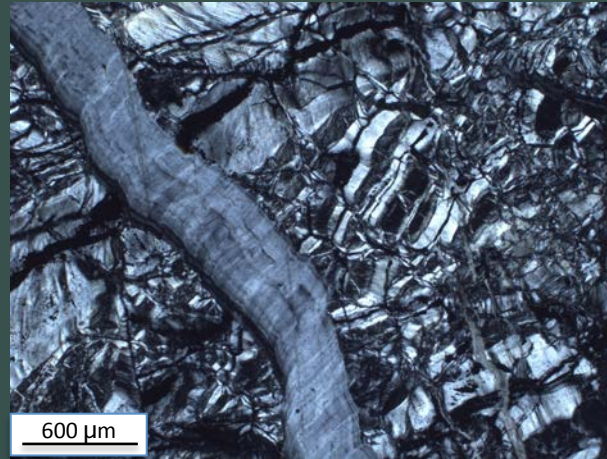


*Microscope électronique à transmission
Evans B.W., Hattori K. et Baronnet A., 2013*

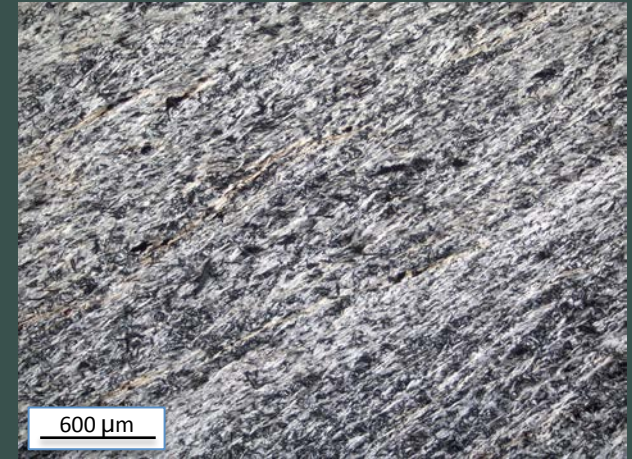
Ces trois variétés correspondent à peu près aux trois différentes textures



Texture maillée
Lizardite



Veine fibreuse
chrysotile



Texture schisteuse
antigorite

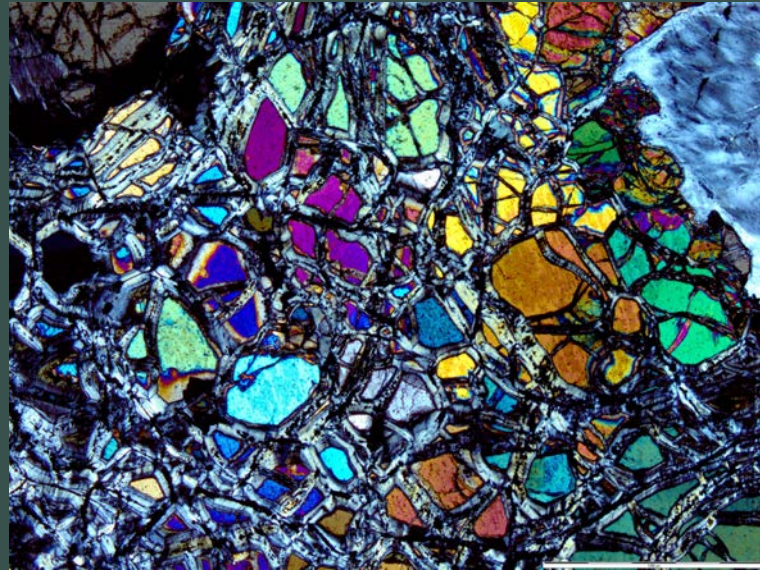
Microphotographies en lumière polarisée (nicols croisés)

Le chrysotile peut former des fibres continues à l'échelle macroscopique



Variété d'amiante

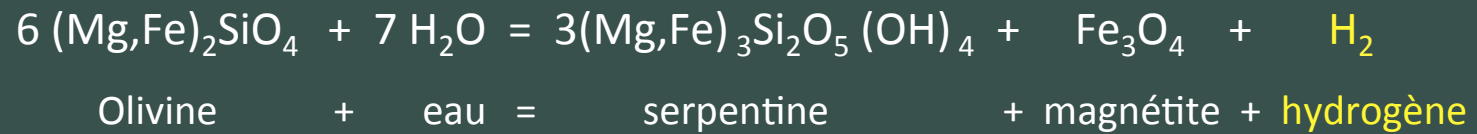
2 - Conditions de formation de la serpentine



La serpentine se forme par hydratation de minéraux préexistants, principalement l'olivine (et les pyroxènes) = silicate riche en magnésium anhydre

Réaction de serpentinisation

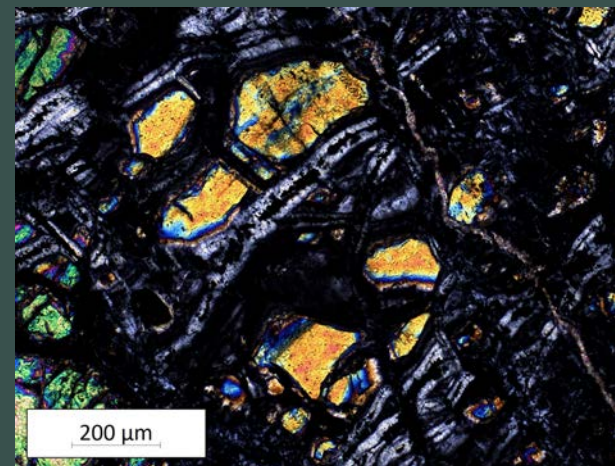
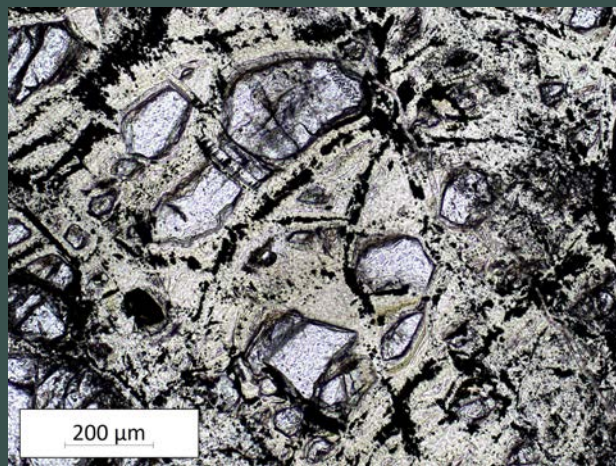
Réaction la plus courante



Olivine : ~0% eau



Serpentine : 15% eau



Dans quelles conditions se fait cette réaction ?

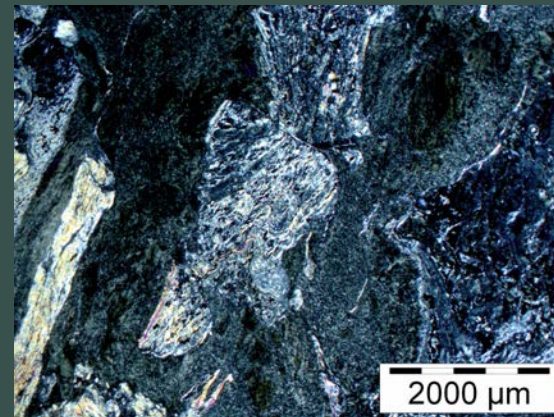
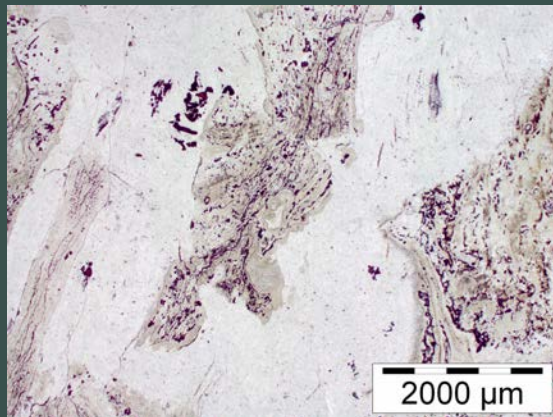
Réaction d'hydratation, donc nécessité de la présence d'un fluide hydraté qui percole dans une roche riche en olivine

On a une idée de la température grâce aux autres phases associées à la serpentine dans les serpentinites : « paragenèse minérale »

Chlorite, talc, amphiboles (trémolite-actinolite)

Minéraux qui sont stables dans une gamme de température de ~ 200 à 500°C

« facies schiste vert »



Minéralogie expérimentale au laboratoire



olivine

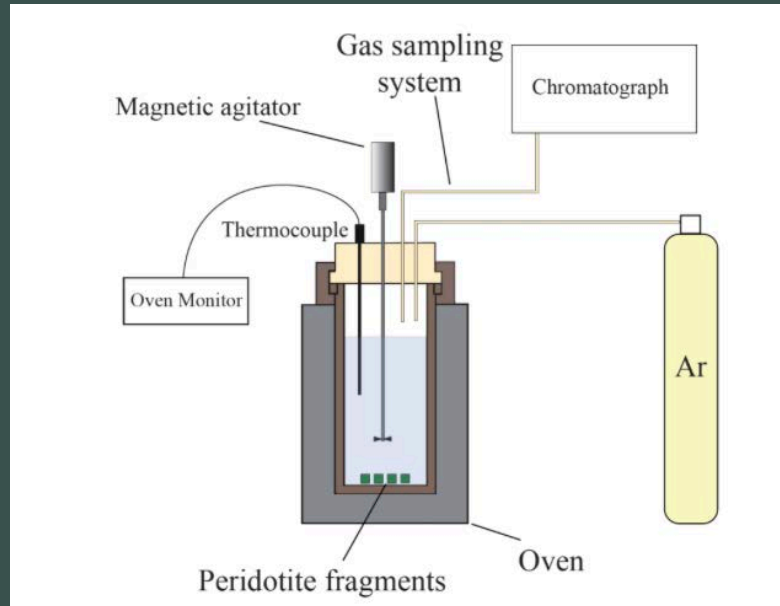
+



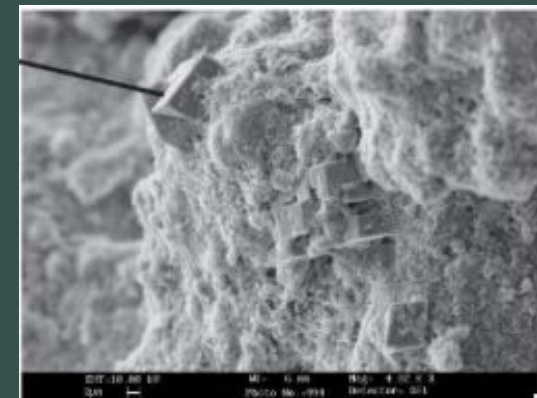
eau

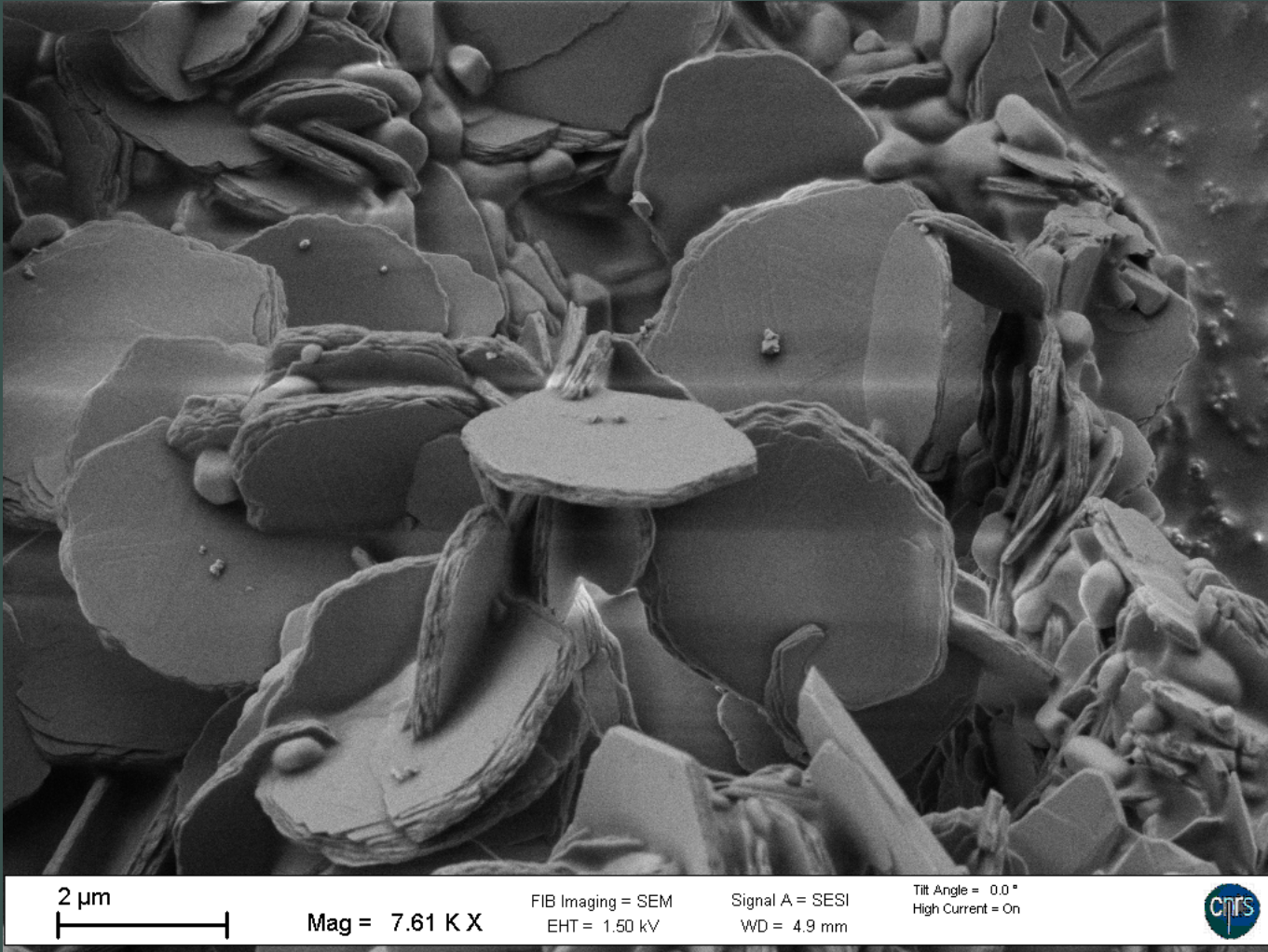
= serpentine

autoclave



*Thèse Clément Marcaillou, 2011
Université de Grenoble*





Andreani et al., 2013

La stabilité de la serpentine est surtout fonction de la température.

La serpentine est stable entre $\sim 200^\circ$ et 500°C

- Le chrysotile et la lizardite sont les variétés de basse température, pic vers $250\text{-}300^\circ$
- L'antigorite est stable à plus haute température, jusqu'à 500°C . elle est aussi favorisée par la pression

La serpentinisation des olivines des roches conduit à la formation des **serpentinites**

Roches riches en olivine : roche ultrabasiques (roches silicatées à faible teneur en silice)

- **Péridotites du manteau supérieur**
- Komatiites : laves ultrabasiques très riches en olivine qui se sont formées à l'archéen

Ponctuellement, olivines dans des roches magmatiques (basaltes, gabbros)

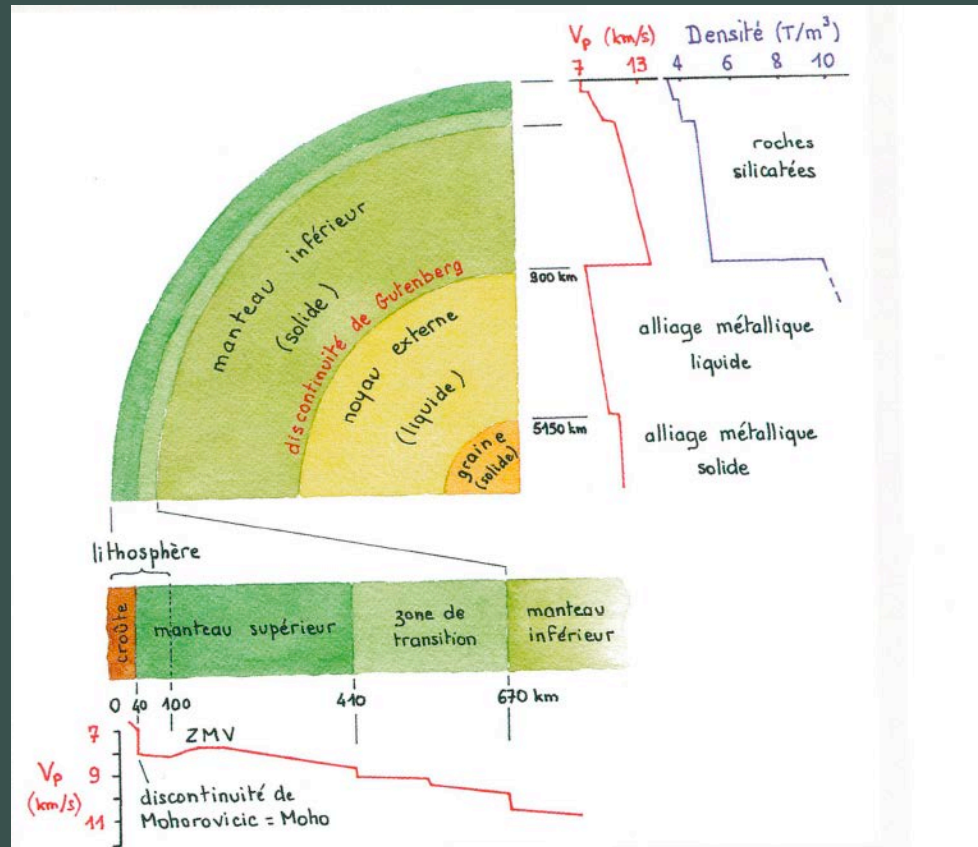


Ces roches riches en olivine interagissent avec un fluide hydraté dans des conditions moyennes de température de 300°C

La serpentinisation doit donc avoir lieu à une certaine profondeur (gradient géothermique) ou sous l'action de fluides chauds (fluides hydrothermaux)

Où se forment la serpentine.... et les serpentinites ?

Les péridotites du manteau supérieur sont la principale source de formation des serpentinites



Coupe du globe terrestre

La serpentinisation a lieu quand ces péridotites interagissent avec un fluide hydraté.

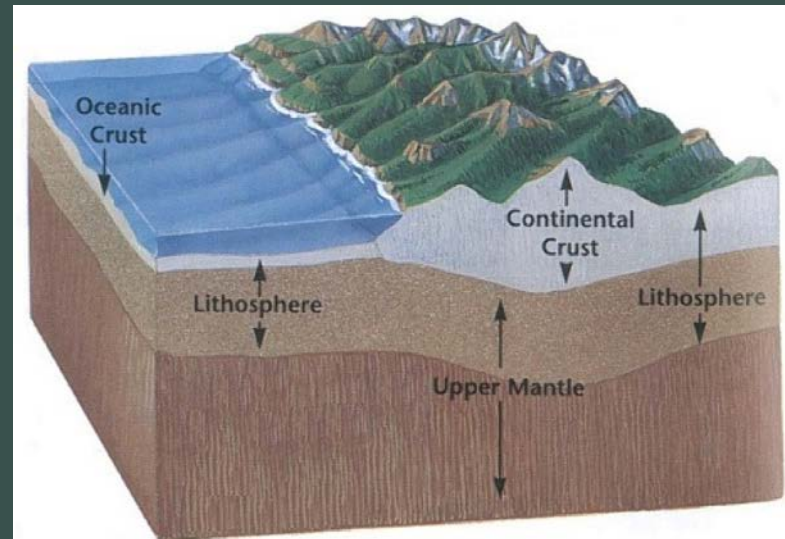
Pour que le fluide hydraté puisse pénétrer, il faut que le milieu soit « cassant », susceptible de se fracturer

Lithosphère = couche externe du globe terrestre cassante, température $< \sim 750^\circ\text{C}$

Zone dans laquelle se produisent les séismes

La croûte océanique est beaucoup plus mince (~6 km) que la croûte continentale (30 à 70 km).
Le manteau lithosphérique est plus proche de la surface en contexte océanique

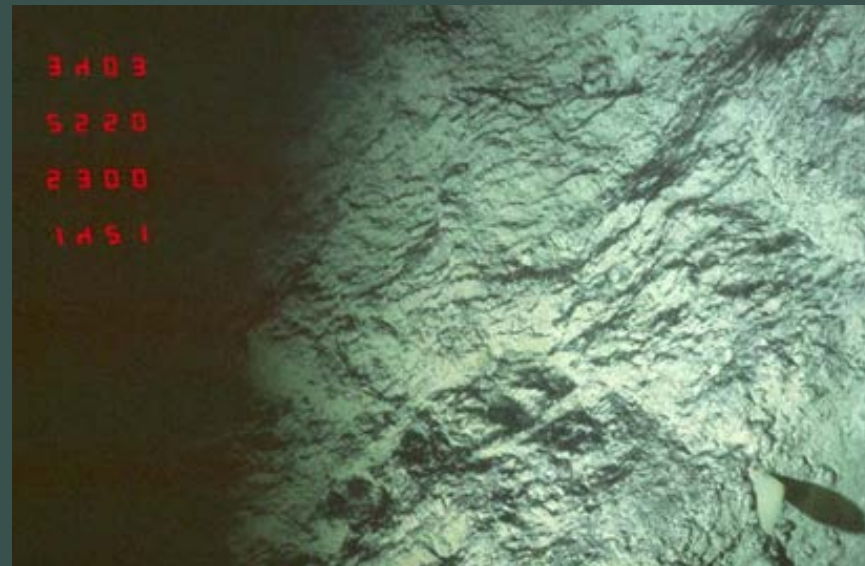
La lithosphère océanique est recouverte d'eau de mer



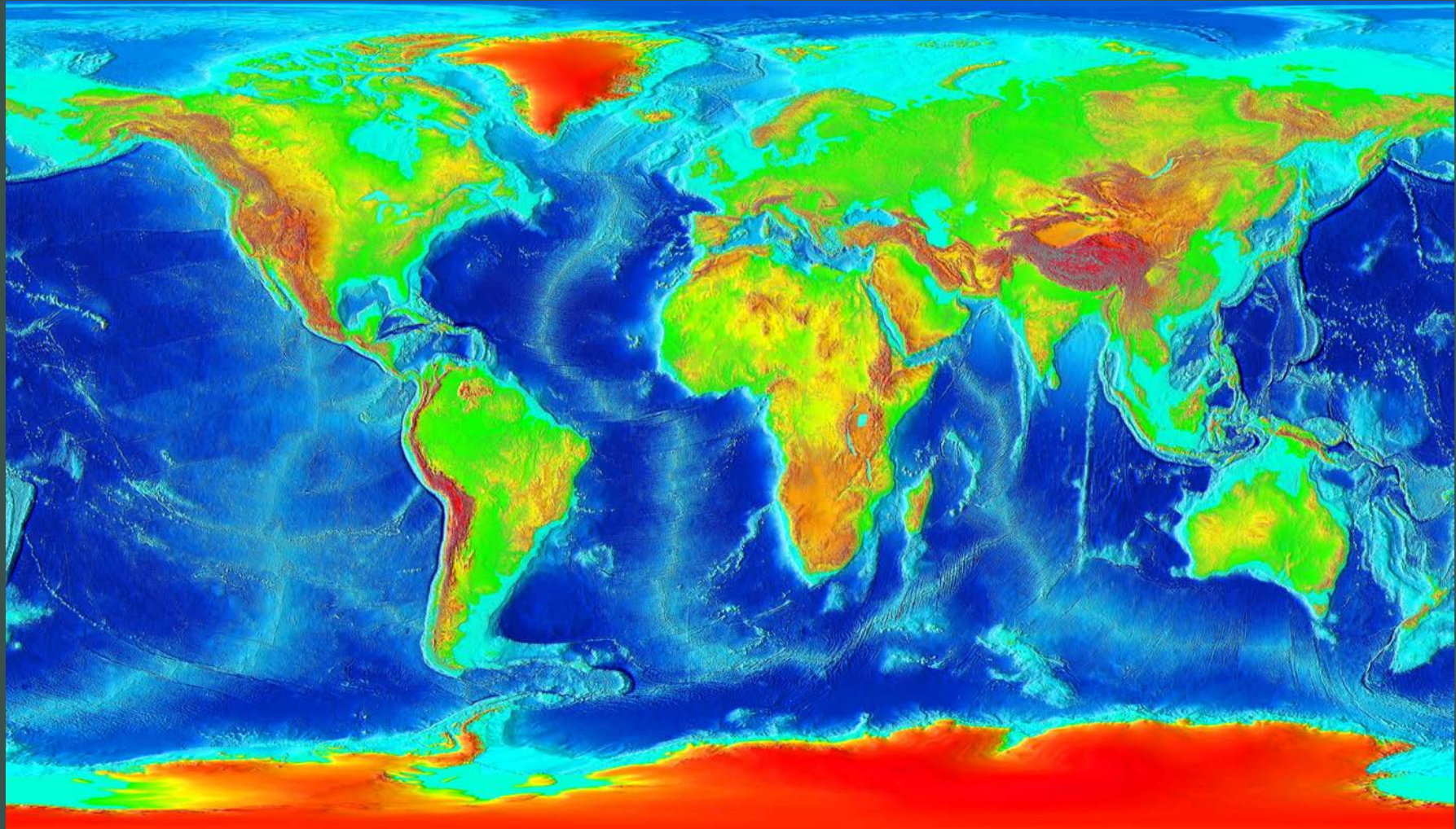
Il est donc beaucoup plus facile de serpentiniser les péridotites océaniques

La plupart des serpentinites qu' on observe à la surface du globe résultent de la serpentinisation du manteau océanique

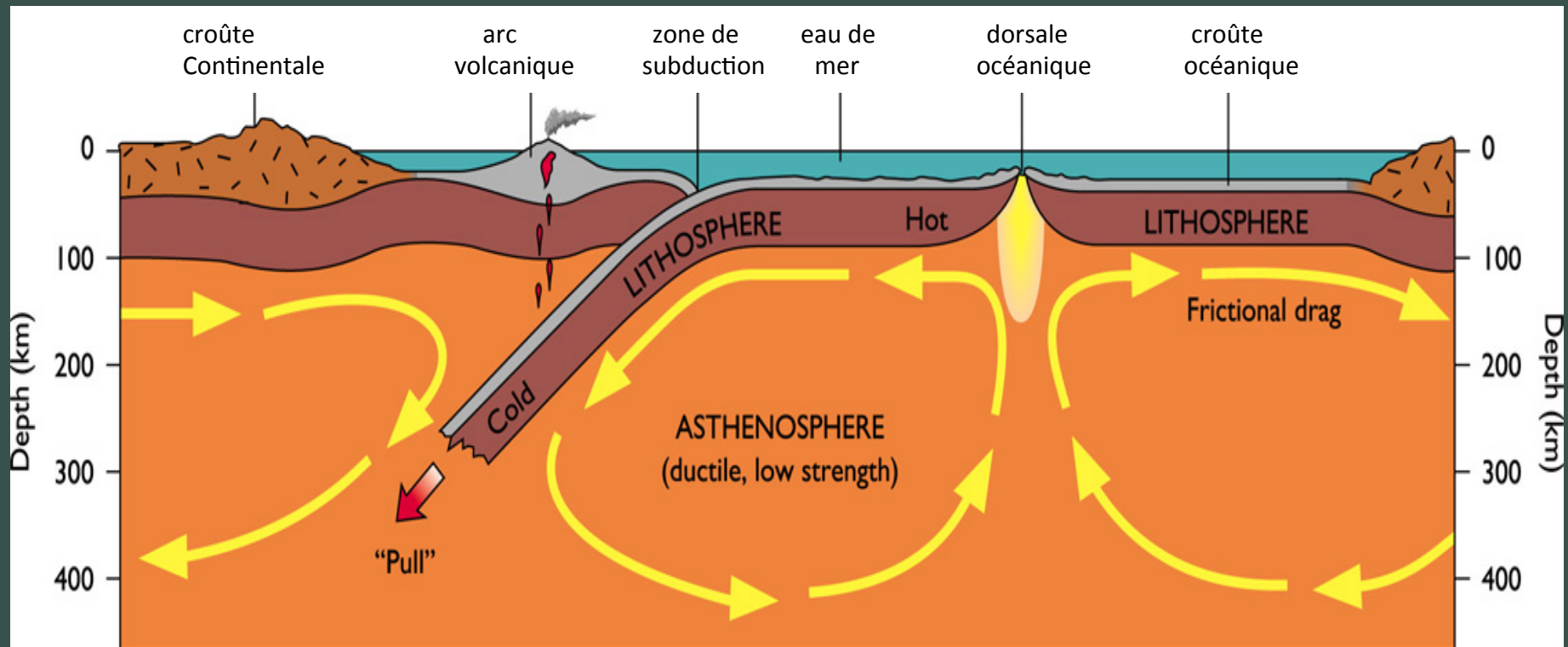
3 - La serpentinitisation aux dorsales océaniques et son influence sur la géodynamique



Les dorsales océaniques sont des chaînes de montagne volcaniques qui parcourent le fond des océans sur 60 000 km de long

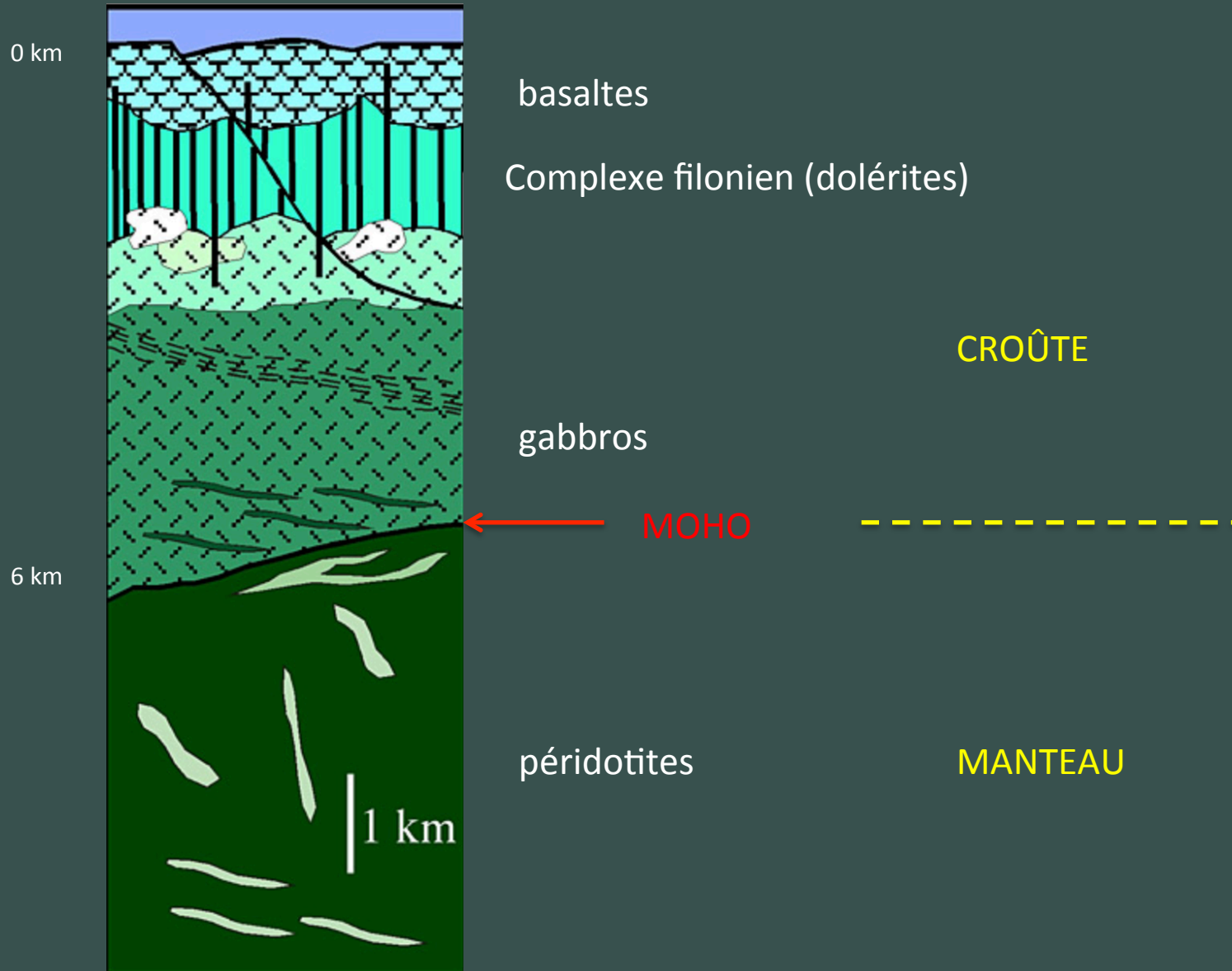


Les dorsales océaniques jouent rôle essentiel dans la tectonique des plaques



Elles sont la manifestation des courants de convection qui animent l'intérieur du globe
fusion partielle qui produit des magmas basaltiques qui construisent la croûte océanique

Coupe de lithosphère océanique



Depuis les années soixante dix, les dorsales océaniques ont fait l'objet d'une exploration intense pour comprendre leur mode de fonctionnement et la dynamique du globe terrestre

Navires océanographiques (IFREMER)



Atalante



Pourquoi Pas ?

Cartographie des fonds océaniques (bathymétrie, anomalies magnétiques, etc...)

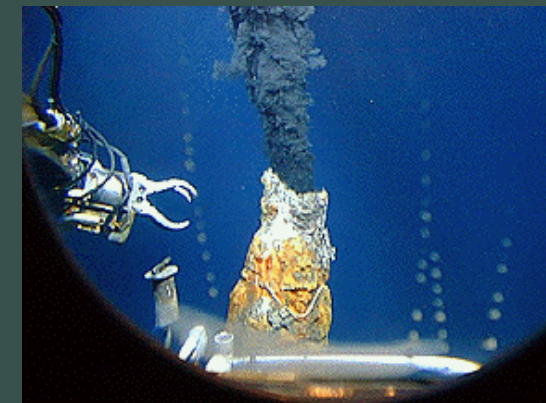
Pour connaître la nature du fond, on a beaucoup utilisé un moyen assez rudimentaire, le dragage



*Positionnement peu précis, échantillons récoltés sur plusieurs centaines de mètres
Pas d'observation du contexte géologique*

Un énorme progrès a été fait avec le développement des engins sous marins

Submersibles habités



Nautille (IFREMER)

Capacité de plonger à 6000m de fond

Bras manipulateurs qui permettent l'échantillonnage et la mise en œuvre d'outils sur le fond

On utilise maintenant de plus en plus des submersibles téléopérés
« Remotely Operated Vehicles »



VICTOR 6000 (IFREMER)
Relié au navire par une laisse : images et manipulations

Forages océaniques

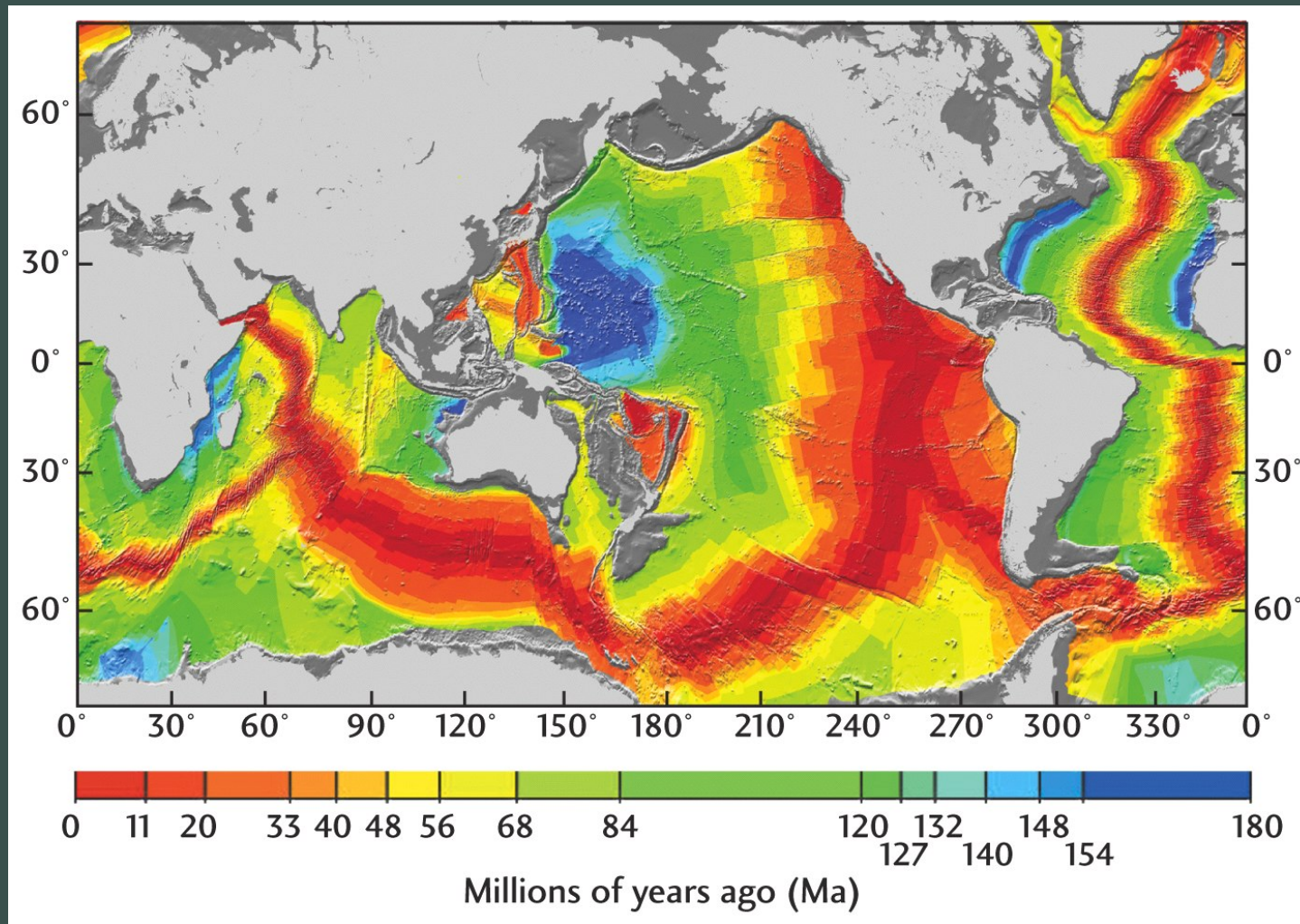


Effectués dans le cadre de grands programmes internationaux qui mettent en œuvre des navires de forage dédiés à des projets scientifiques

IODP (INTERNATIONAL OCEAN DISCOVERY PROGRAM)

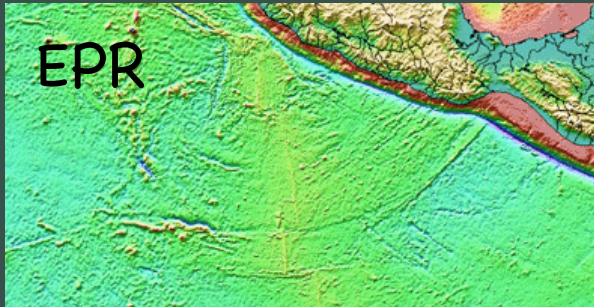


Que nous ont apporté les études sur les dorsales océaniques ?

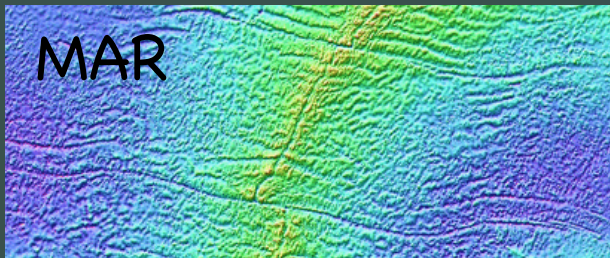
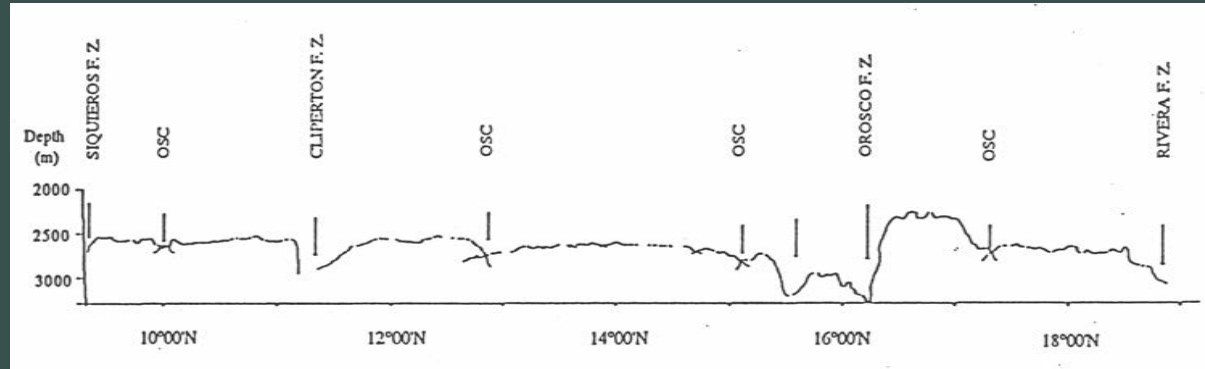


Le taux d'expansion des dorsales varie d'une vingtaine de cm par an (demi-taux) à moins d'un cm par an

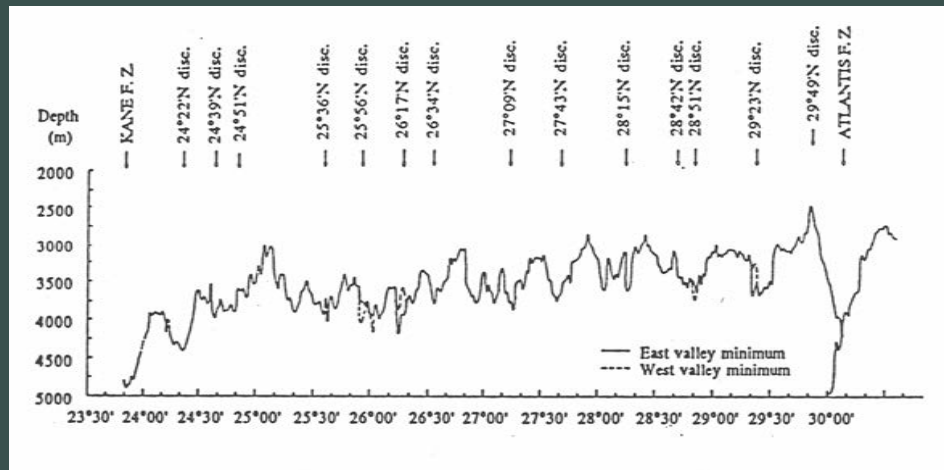
La morphologie des dorsales est fonction de leur taux d'expansion



Dorsale Est-Pacifique
Dorsale rapide (10-16 cm/an)



Dorsale médio-Atlantique
Dorsale lente (2-3 cm/an)

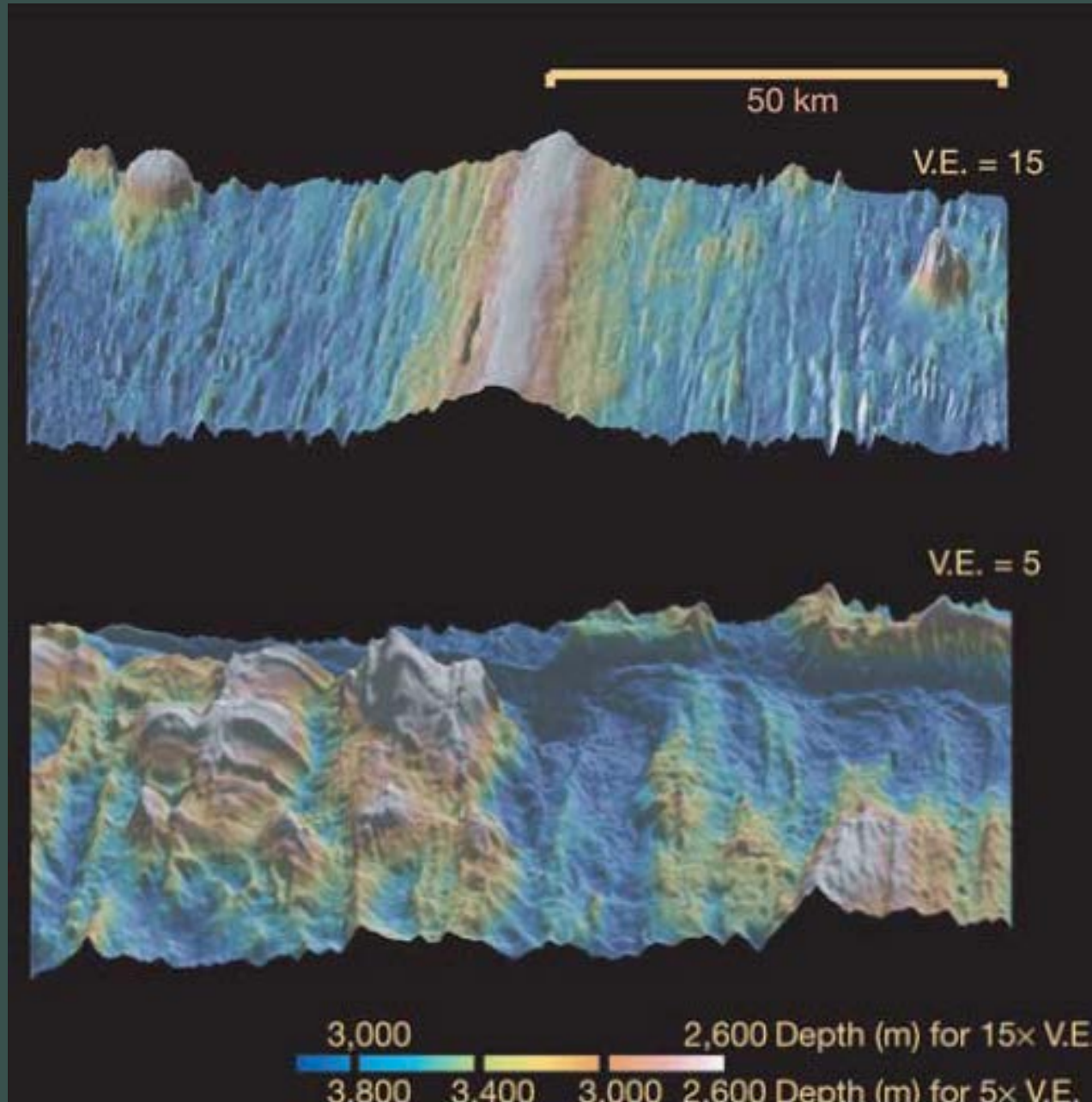


Coupes longitudinales

La morphologie des dorsales océaniques est dépendante du taux d'expansion

rapide
(dorsale Est-
Pacifique)
bombement axial

>8cm/y

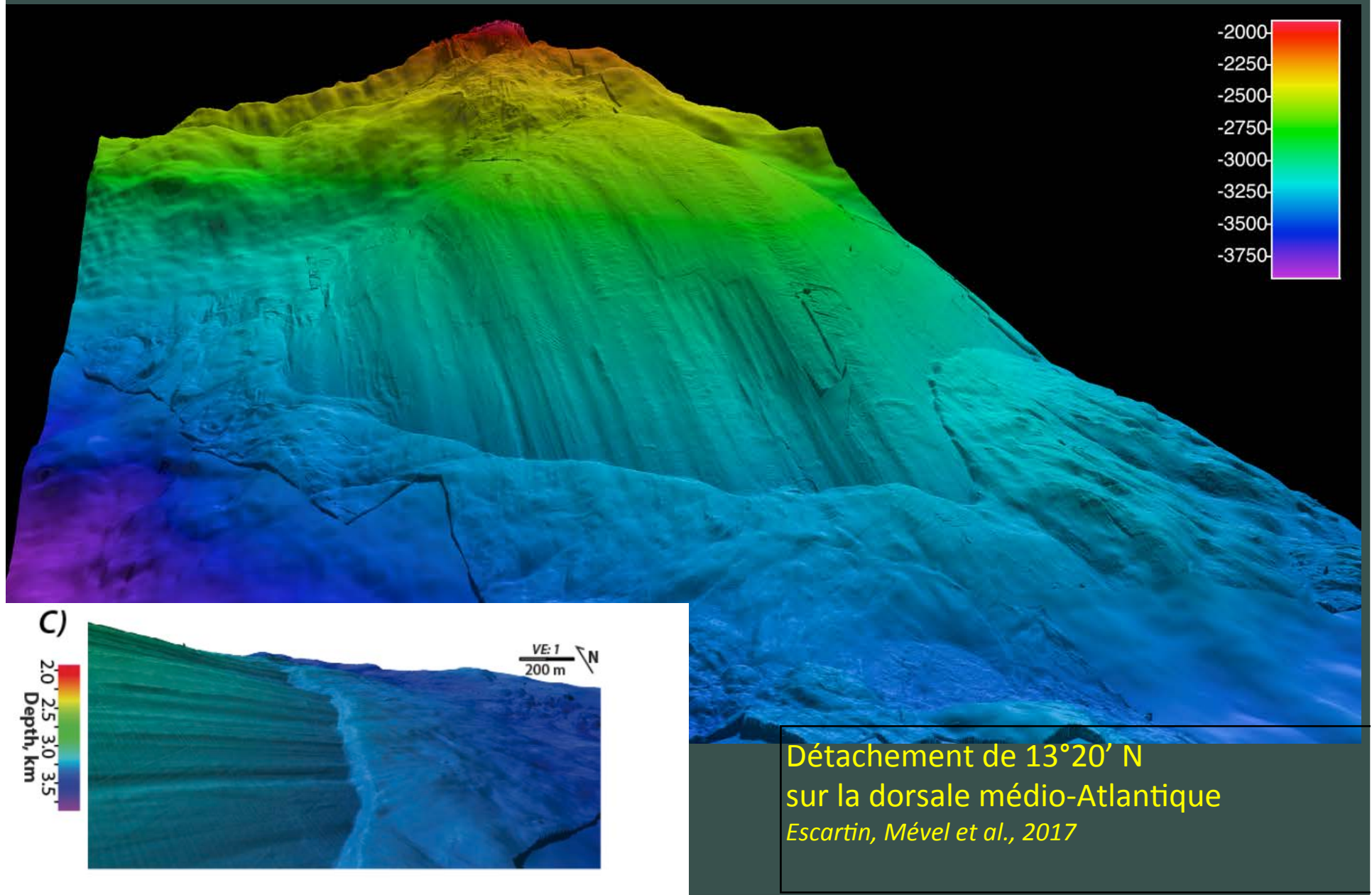


lente
(dorsale médio-
Atlantique)
vallée axiale

<4cm/y

Cartes bathymétriques (V.E. = exagération verticale)

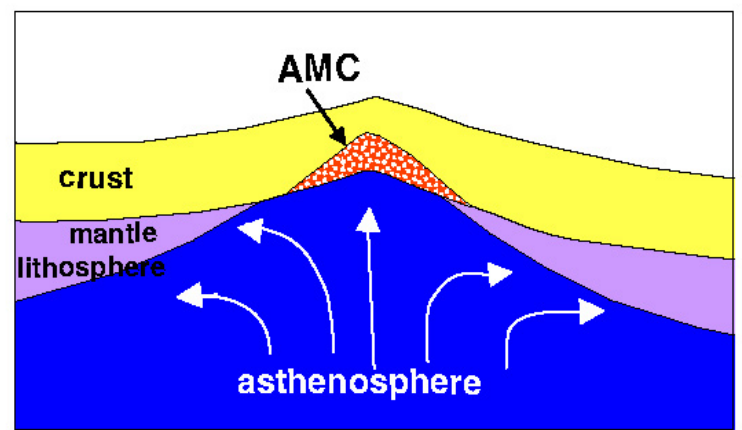
Aux dorsales lentes, l'expansion océanique est localement accommodée par des grands failles « failles de détachement »



Détachement de 13°20' N
sur la dorsale médio-Atlantique
Escartin, Mével et al., 2017

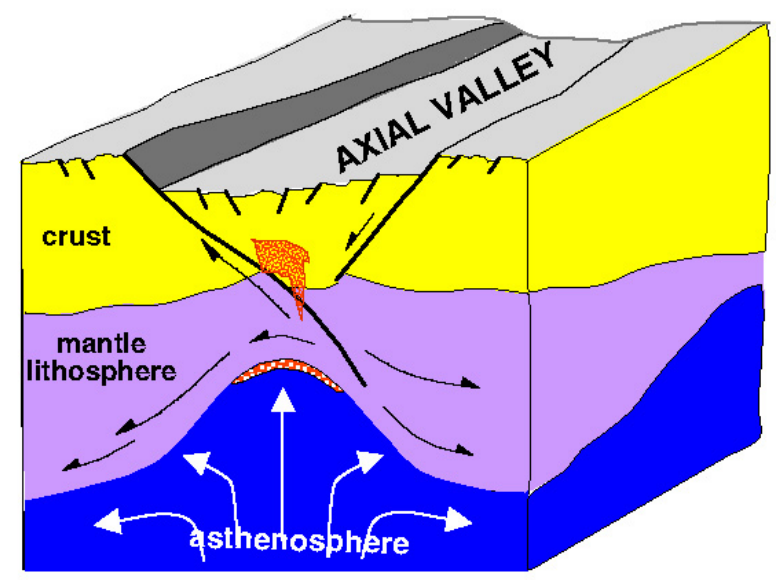
Cette différence dans la morphologie reflète le régime thermique à l'axe qui influe sur l'épaisseur de la lithosphère

Dorsale rapide
chaude



Lithosphère mince
Activité tectonique
réduite
Magma abondant

Dorsale lente
froide

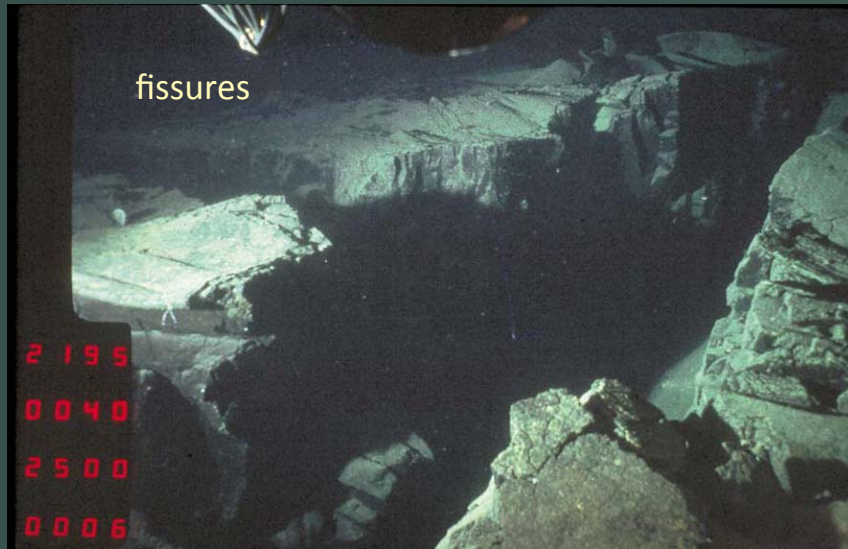


Lithosphère épaisse
Activité tectonique
importante
Moins de magma
L'expansion
océanique est
accommodée par
une activité
tectonique intense

Qu'est ce qu'on observe aux dorsales océaniques ?

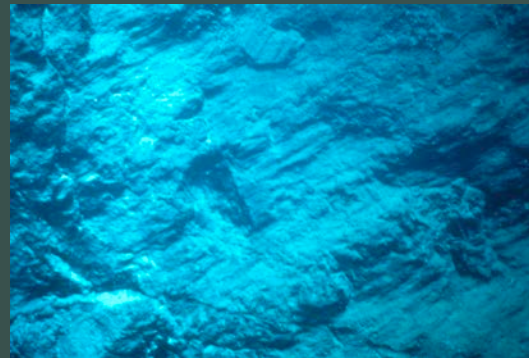
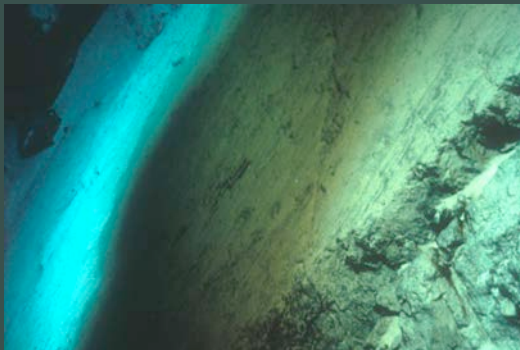
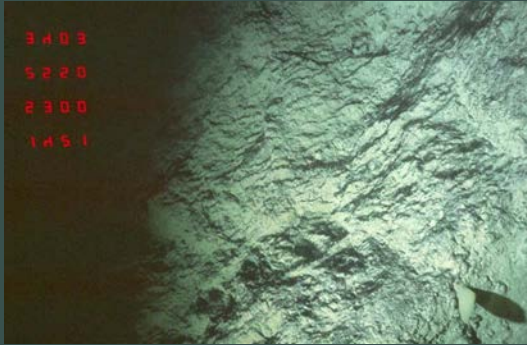


Épanchement des magmas formés par la fusion partielle du manteau

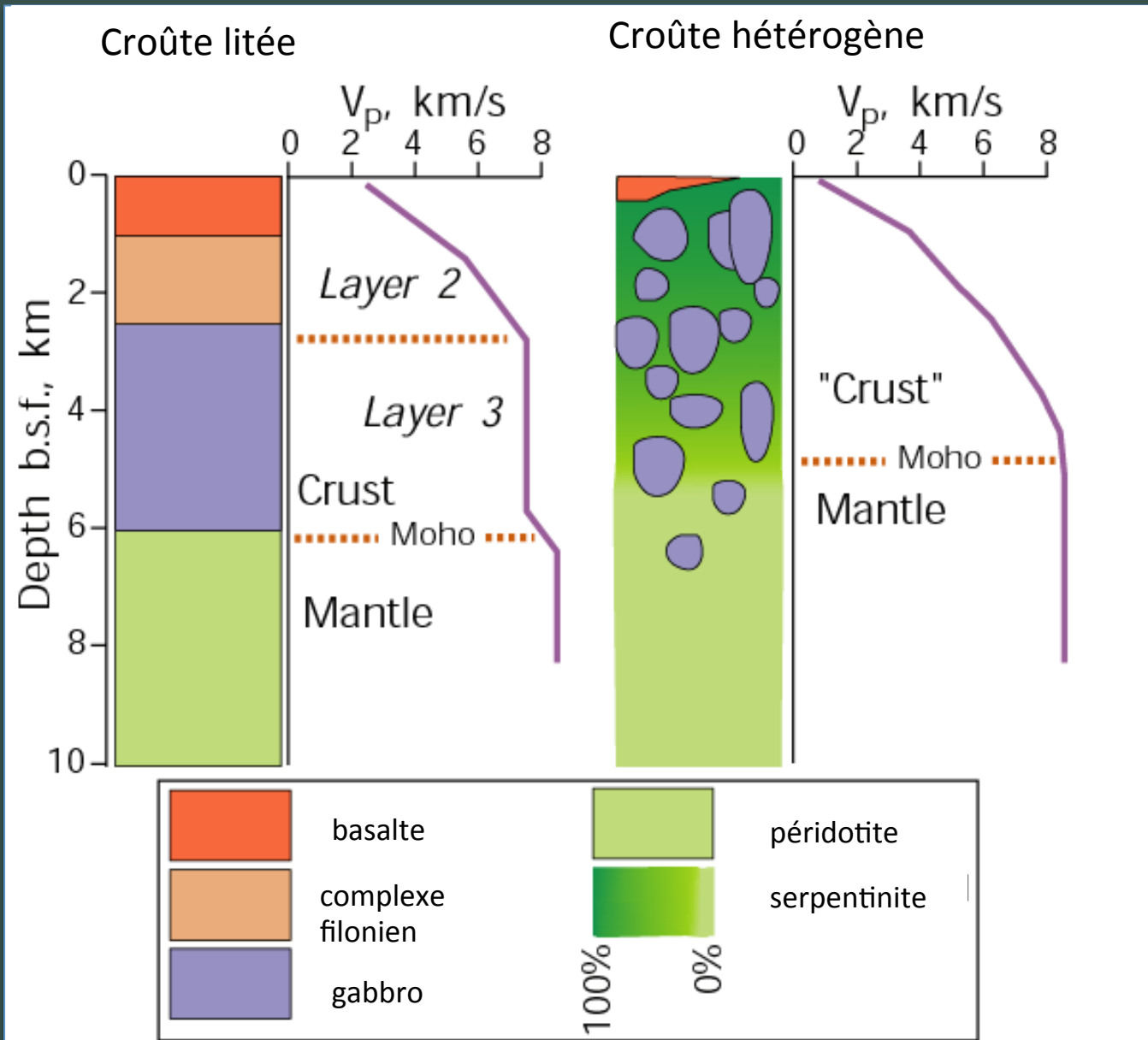


On observe aussi de nombreuses fissures parallèles à l'axe de la dorsale
«extension» due à l'ouverture océanique
Ces fissures permettent à l'eau de mer de pénétrer en profondeur

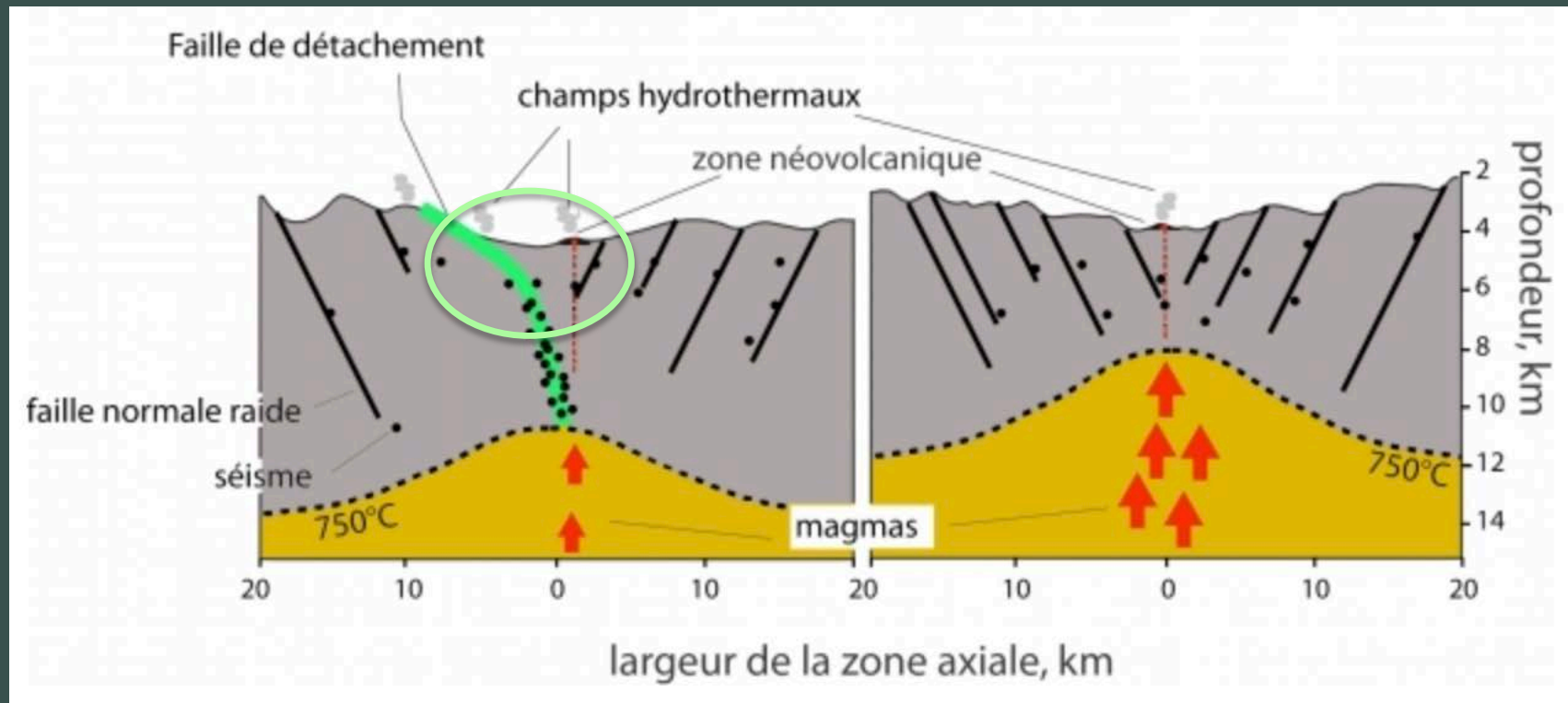
Mais quand on explore les zones de grandes failles, on observe des affleurements complètement différents



Mise à l'affleurement de niveaux profonds par l'activité tectonique
Serpentinites avec des intrusions de gabbros



Coupes verticales dans la lithosphère océanique

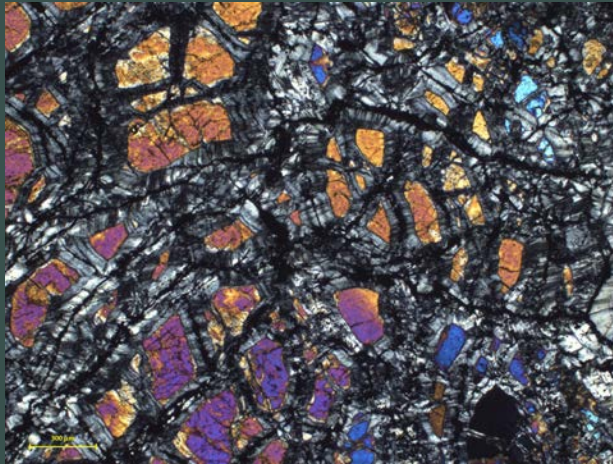
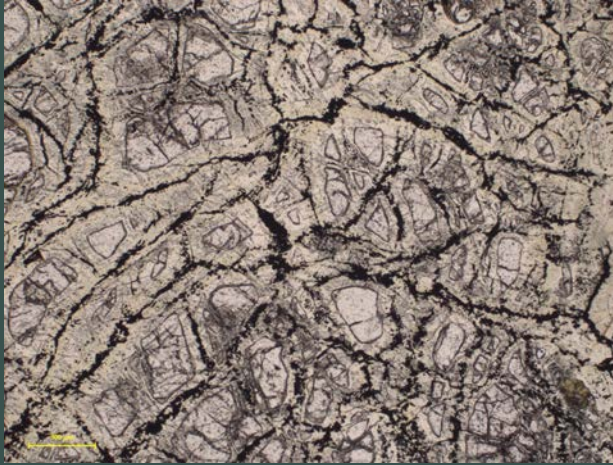


Croûte hétérogène

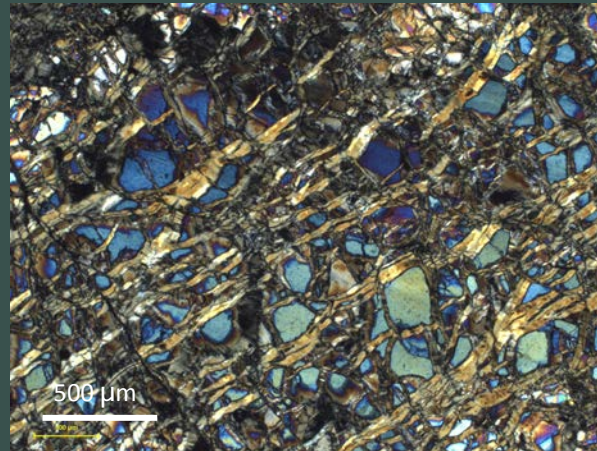
Croûte litée



Les serpentinites sont le plus souvent des roches non déformées, dans lesquelles les textures de péridotites sont encore identifiables

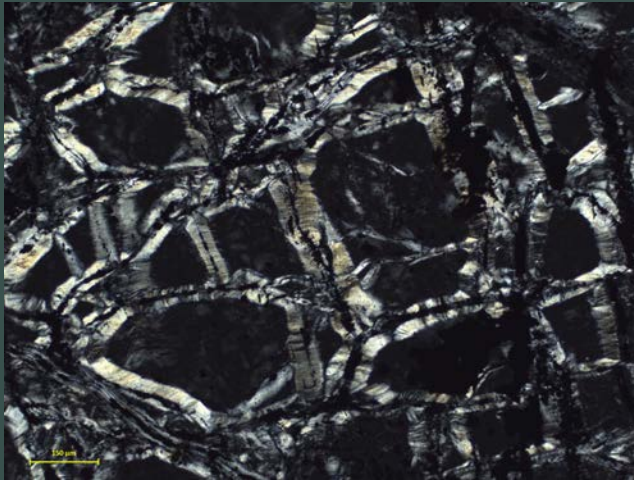


Les péridotites sont plus ou moins serpentinisées, et on reconnaît les fantômes des minéraux primaires (olivine, pyroxène)

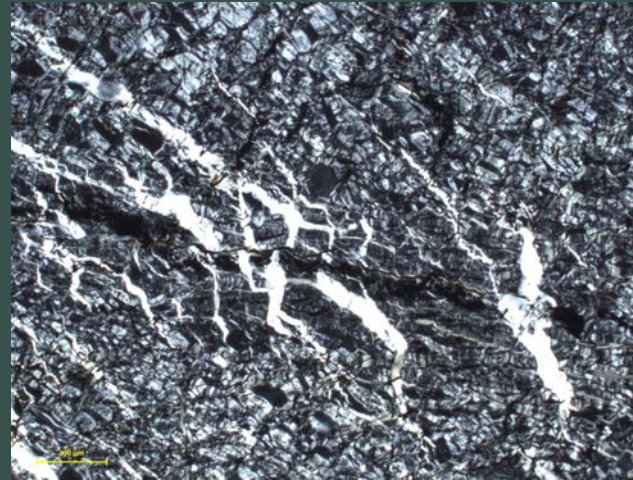


Les roches présentent souvent des réseaux de fractures parallèles qui ont permis la circulation d'eau de mer et donc la serpentinisation

Les variétés de serpentine observées dans les serpentinites océaniques



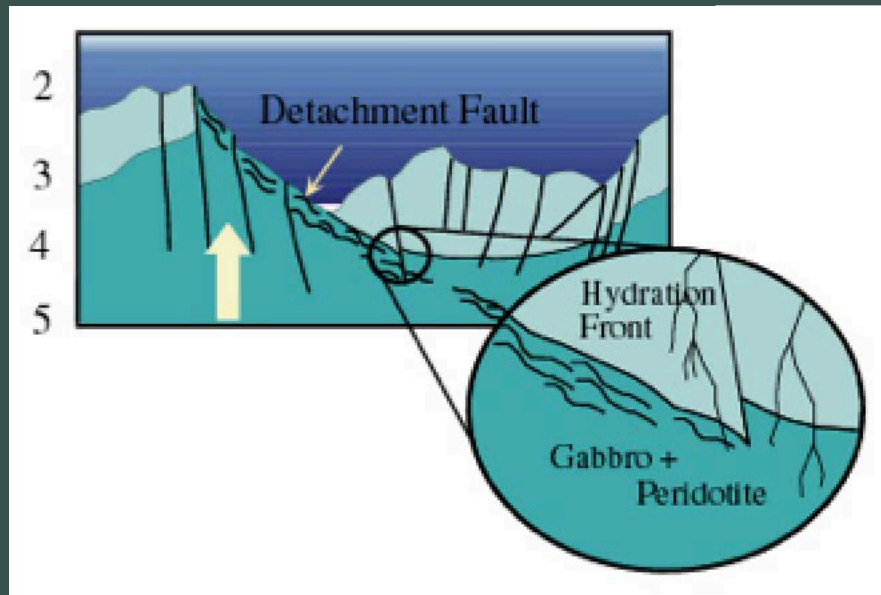
La **lizardite** pour les serpentines maillées



Le **chrysotile** pour la serpentine des veines

on n'observe pas d'antigorite

La serpentinisation a lieu en profondeur, à des températures moyennes de 300°C, avant l'exhumation sur le fond de la mer par les grandes failles

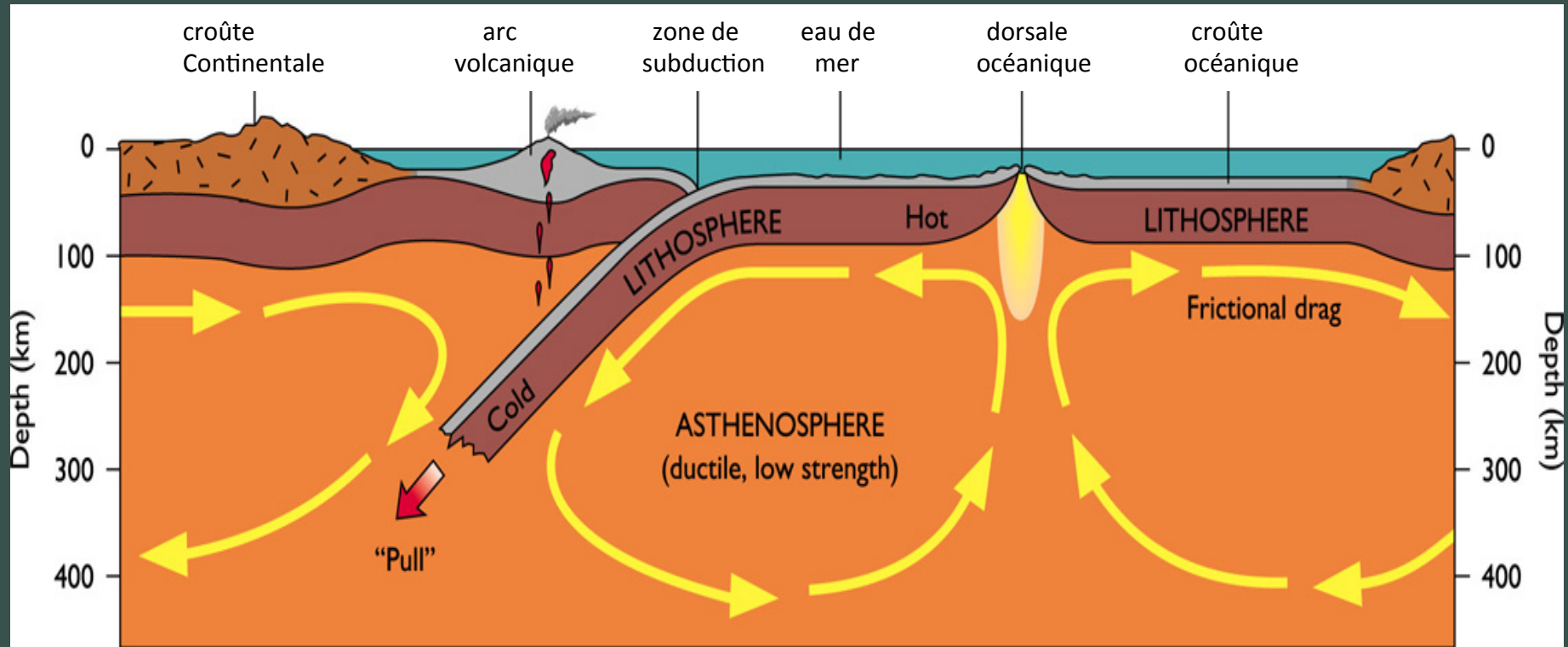


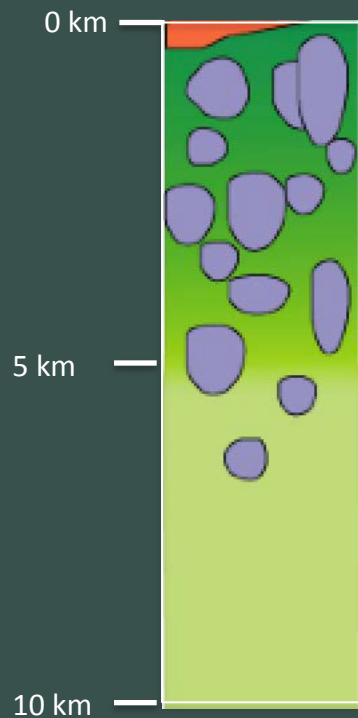
Ce sont les grandes failles qui génèrent cette fracturation et permettent la pénétration de l'eau de mer en profondeur et donc la serpentinisation

La serpentinisation se traduit par une forte hydratation de la croûte qui peut contenir jusqu'à 15% d'eau

Cette croûte hydratée va jouer un rôle géodynamique très important quand elle est entraînée dans les zones de subduction

Image G. Früh-Green





Croûte hétérogène

La croûte hétérogène qui entre en subduction est serpentinisée (riche en eau)

lizardite

Son enfoncement en profondeur va entraîner une augmentation de la température et de la pression

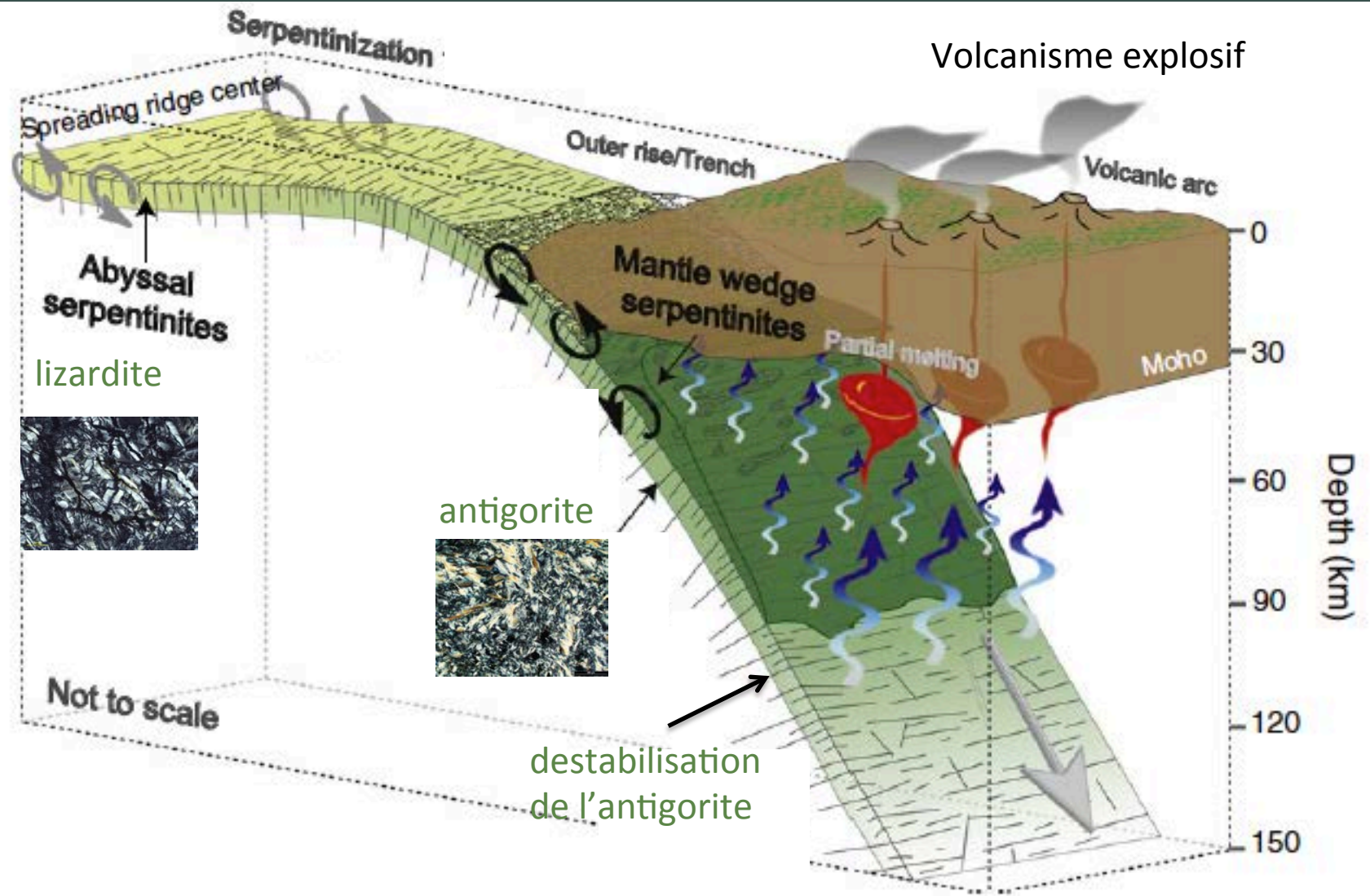
lizardite → **antigorite**

Au delà d'une certaine profondeur

antigorite → **olivine**

Libération de l'eau

Zone de subduction



Des fragments de cette lithosphère océanique peuvent être incorporés dans les chaînes de montagne : **ophiolites**

La plupart des massifs de serpentine que l'on observe à terre font partie des séries ophiolitiques

Ce sont donc des serpentines qui se sont formées à l'axe des dorsales océaniques – même si elles ont pu subir des transformations ultérieures...

antigorite

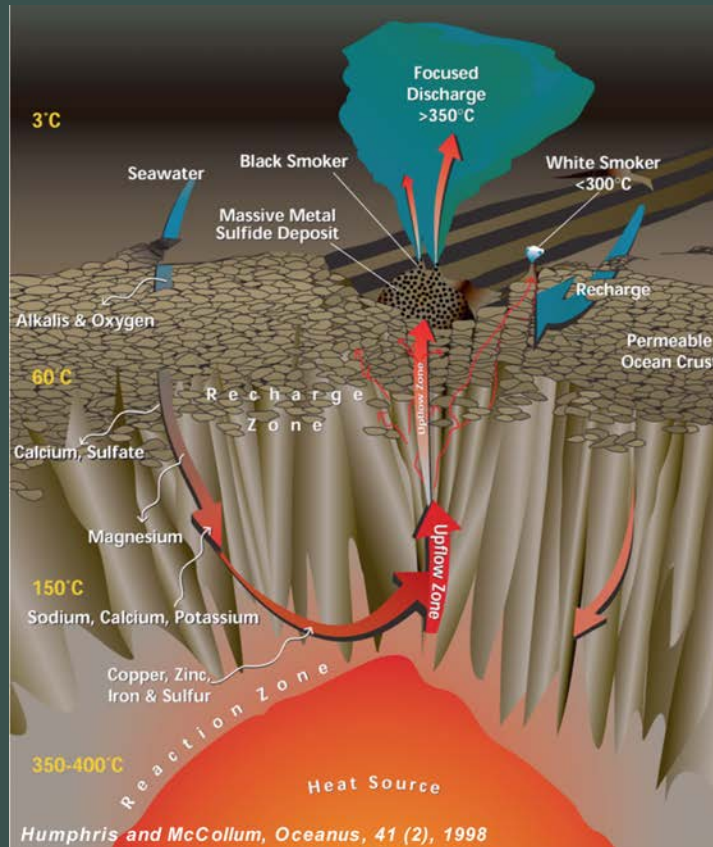


Ophiolites de Haute Ubaye, Alpes occidentales

4 - Les champs hydrothermaux, témoins de la serpentinisation active



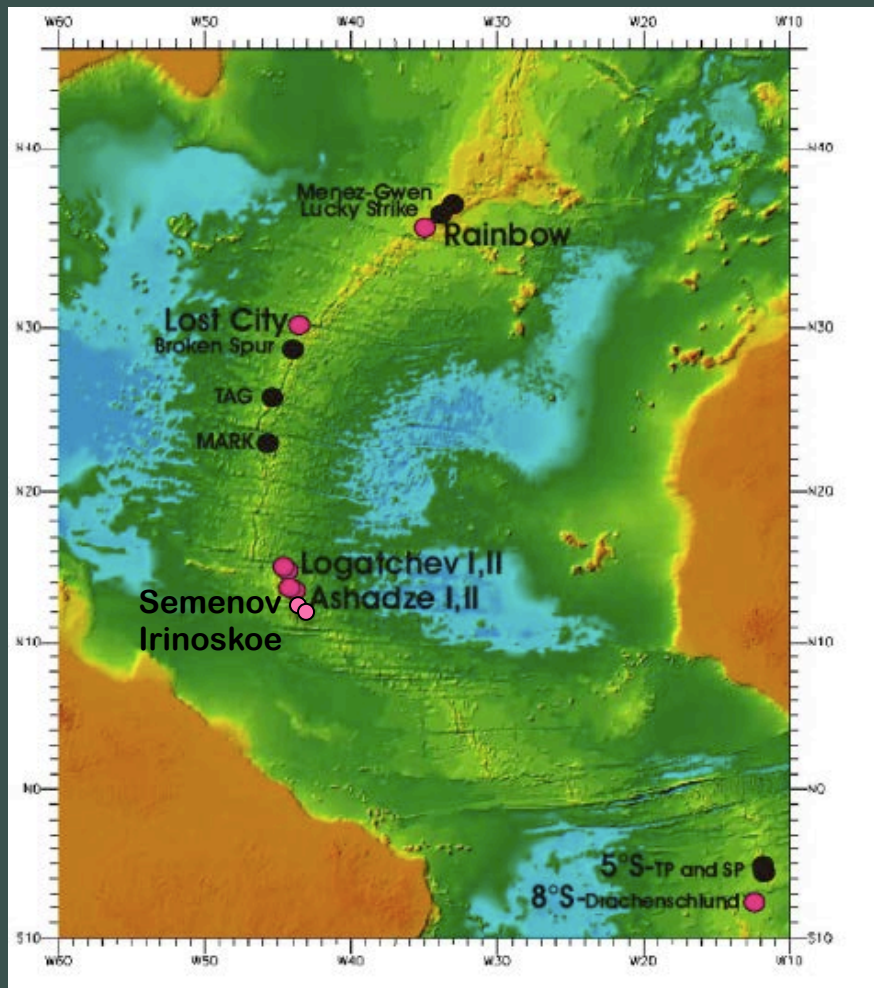
Le processus de serpentinisation active aux dorsales océaniques a été confirmé par l'étude des champs hydrothermaux installés sur un plancher océanique constitué de roches ultrabasiques



Les champs hydrothermaux sont la manifestation de surface d'une cellule de convection hydrothermale d'eau de mer activée par une source de chaleur en profondeur
« fumeurs noirs »

On a longtemps pensé qu'ils n'étaient installés que sur un substratum basaltique, c'est à dire dans des zones de forte productivité magmatique

Mais depuis une vingtaine d'années, on en a découvert également installés sur un substratum de roches ultrabasiques, des péridotites d'origine mantellique



Sur la dorsale médio-Atlantique, le premier site hydrothermal installé sur des péridotites serpentinisées a été découvert en 1995 – site de Rainbow

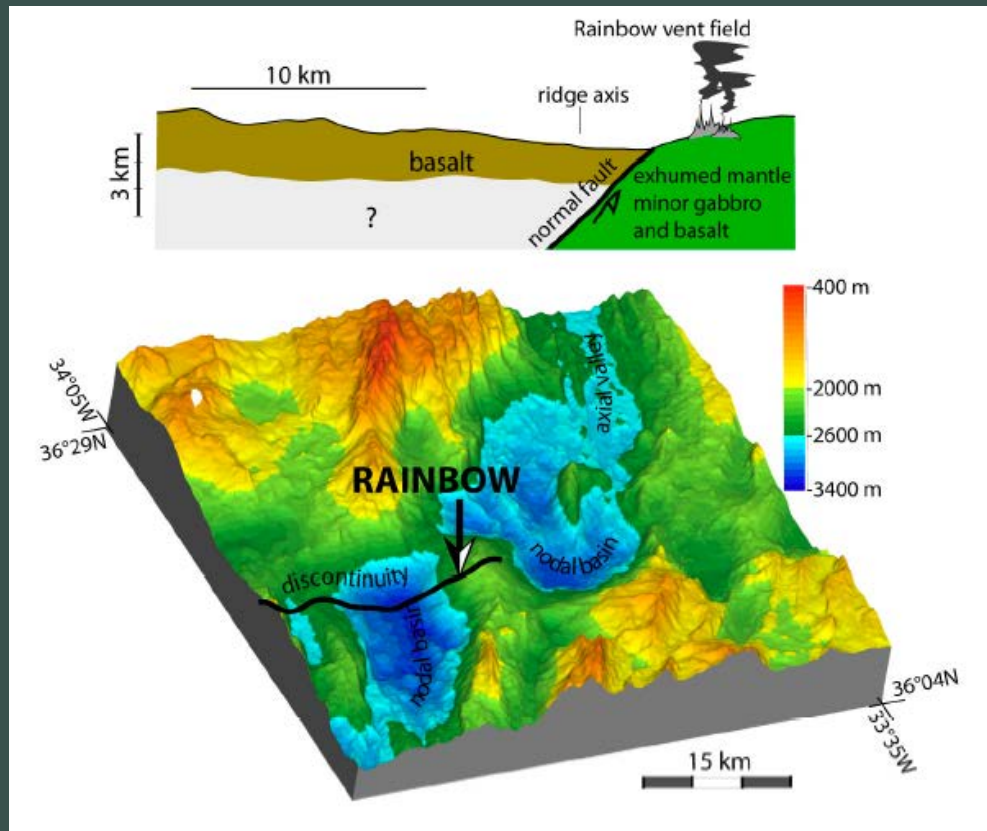
D'autres ont été découverts depuis....

La cellule de convection hydrothermale affecte des roches ultrabasiques et met en œuvre des réactions de serpentinisation

- substratum basaltique
- substratum ultrabasique

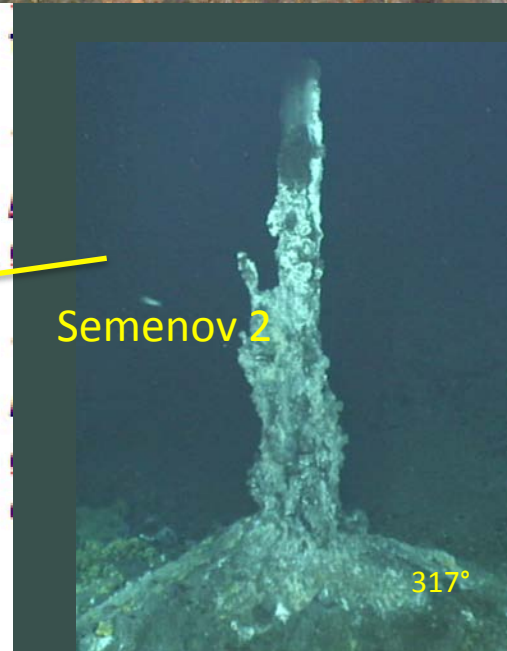
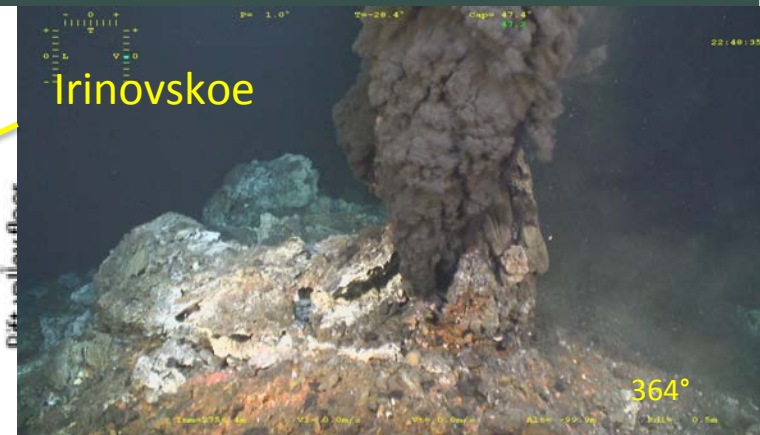
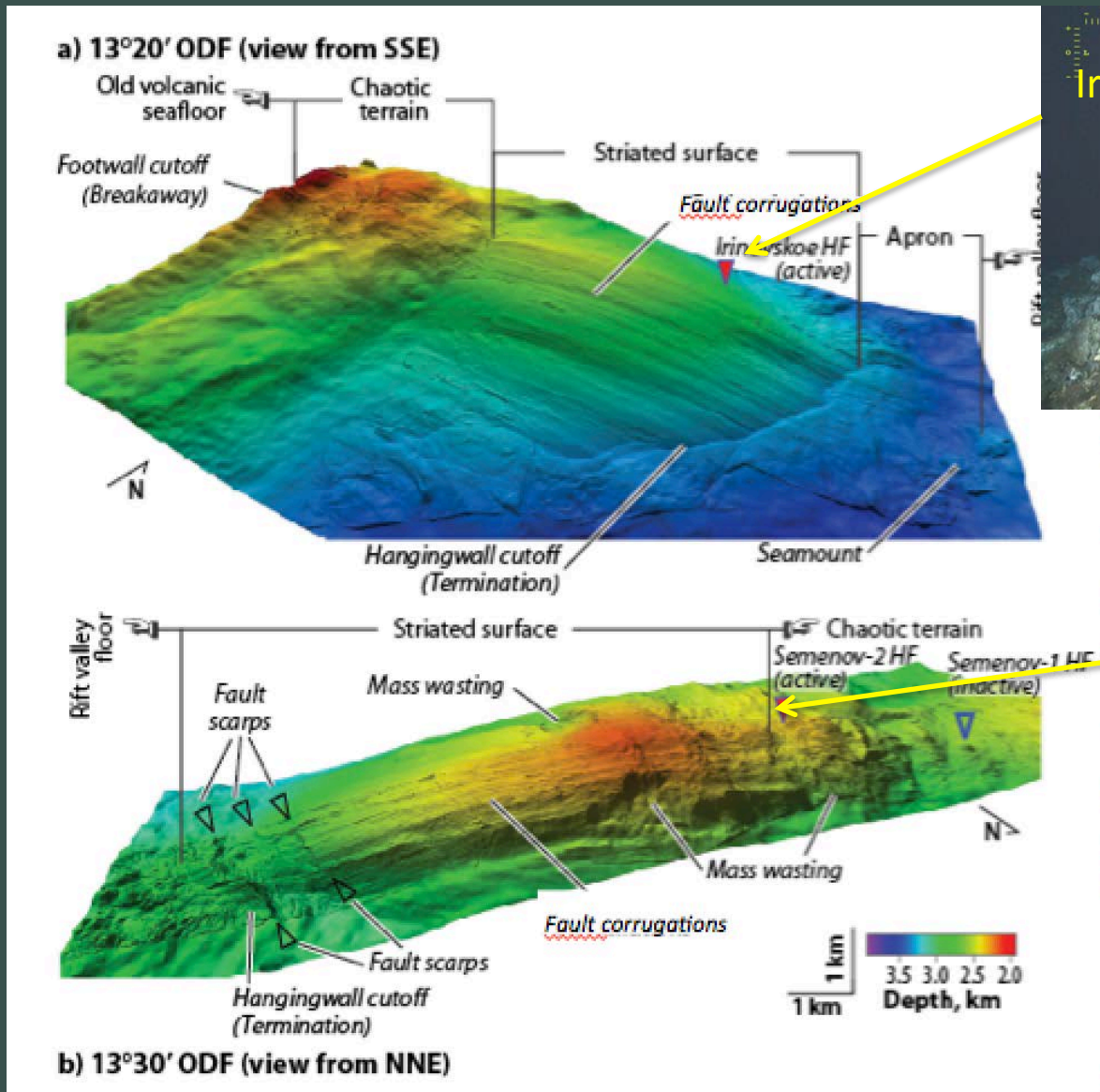
Distribution des différents types de champs hydrothermaux sur la dorsale médio-Atlantique

Le site de Rainbow est situé sur une faille de détachement qui expose des péridotites serpentinisées

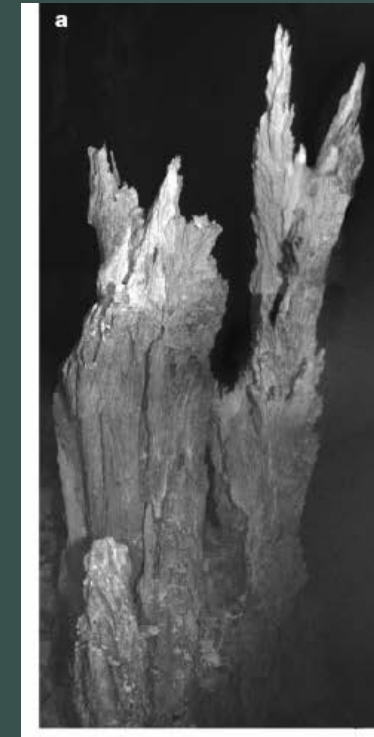
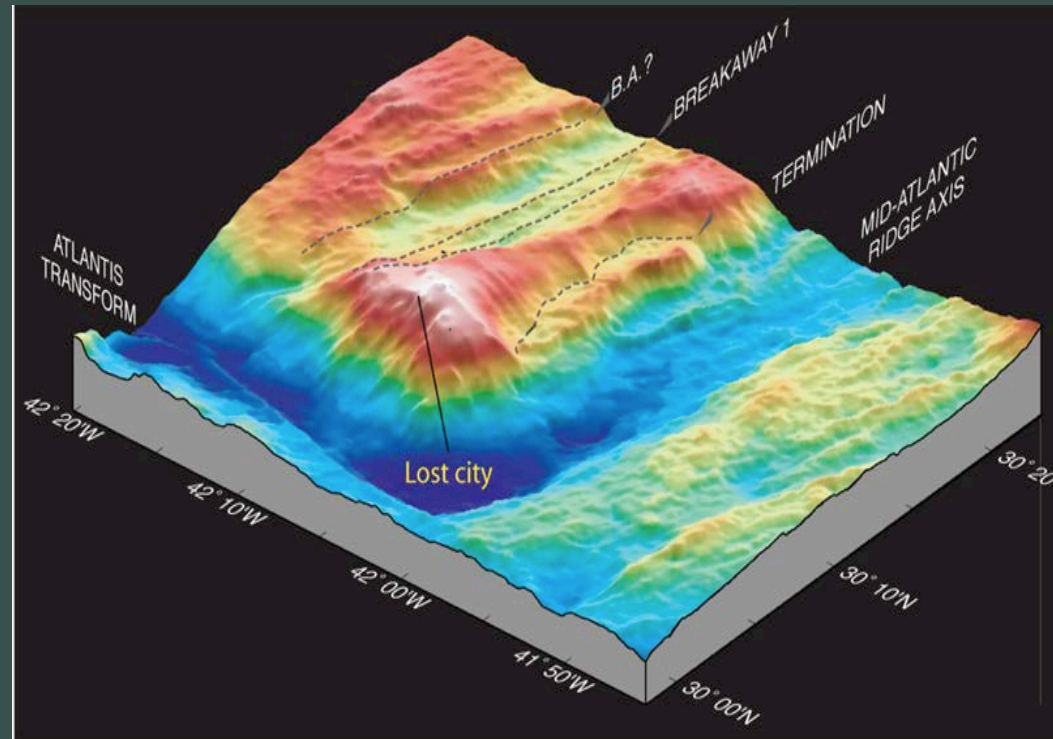


Il émet des fluides de haute température (350°C) et construit des cheminées de sulfures

Les sites de Semenov 2 et Irinoskoe ont des caractères similaires



Le site de Lost City est situé aussi sur une faille de détachement



Kelley et al., 2005

Mais ses caractères chimiques sont complètement différents
La température est beaucoup plus faible ($\sim 90^{\circ}\text{C}$), et il construit des cheminées de carbonates

Les fluides émis par les sources hydrothermales ont été modifiés par leur interaction avec le substratum

Dans le cas d'un substratum ultrabasique, réaction de serpentinisation

Olivine + eau = serpentine + magnétite + **hydrogène**



L'hydrogène peut se combiner à du dioxyde de carbone pour former du méthane

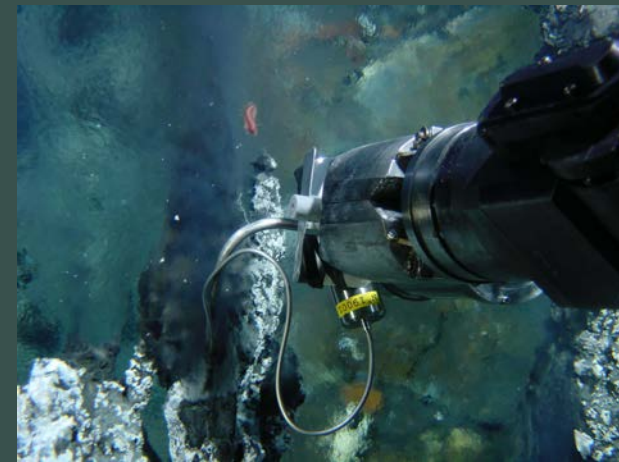
Hydrogène + dioxyde de carbone = **méthane** + eau



La présence d'hydrogène et de méthane dans les fluides hydrothermaux peut donc être considérée comme marqueur d'une réaction de serpentinisation en profondeur

Cela se vérifie dans la composition des fluides hydrothermaux échantillonnés aux événements

	eau de mer	TAG (basaltes)	Rainbow	Logachev	Lost city
Tre (°C)	2	321	360	346/352	94
pH	7.8	3.3	2.8-3	3.3-3.9	12.1
Cl (mM)	614	659	750	511-515	545-570
SO4 (mM)	28.2	0	0	0	-
H2S (mM)	0	6	1,2	1.1-1.4	0.1
Mg (mM)	53	0	0	0	0
Fe (µM)	<0.001	1640	24000	2500	-
Cu (µM)	0.007	150	121/162	15-54	-
Zn (µM)	0.01	46	115-185	13	-
H2 (µM)	0.0004	150-370	16000	12000	7800
CH4 (mM)	0.0003	124-147	2500	2100	900



Charlou et al., 2010

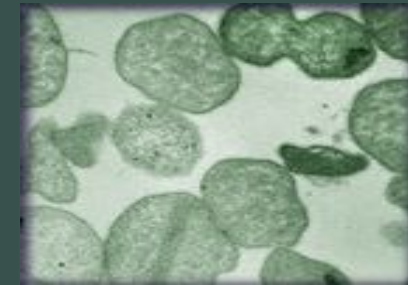
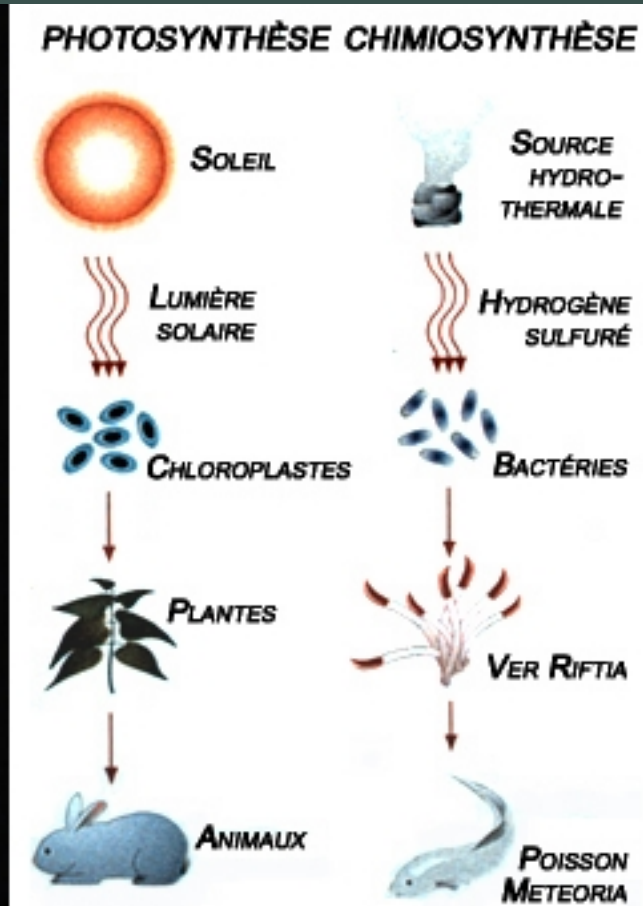
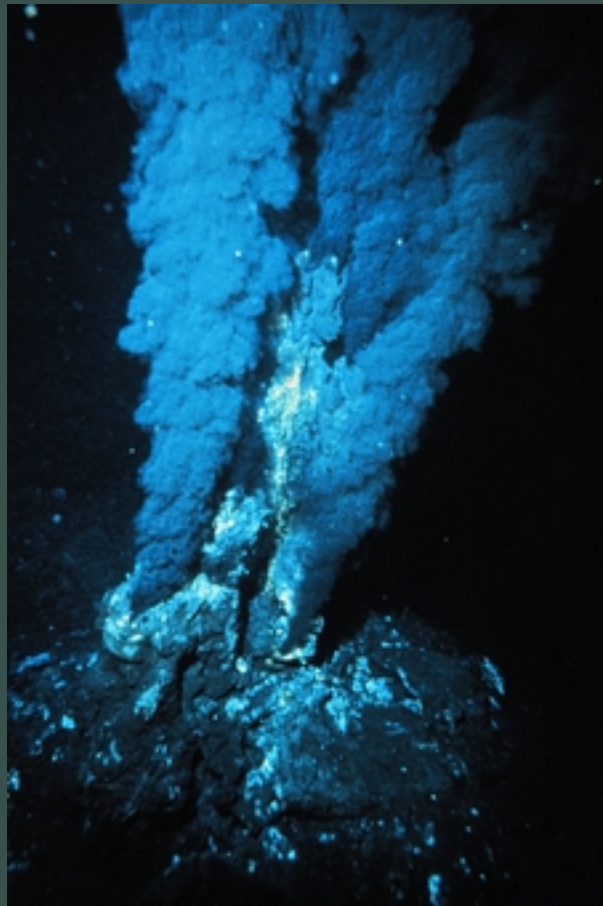
Les sources hydrothermales entretiennent des colonies biologiques extraordinaires



Site de Rainbow, photos Ifremer

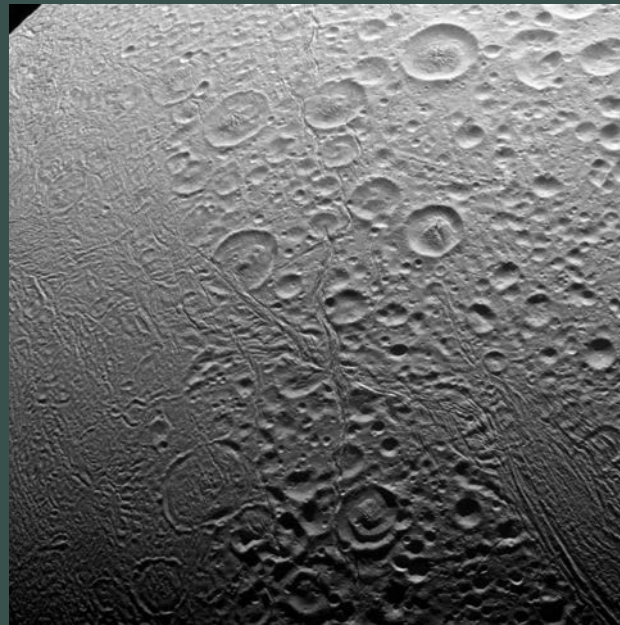
Dans ces milieux extrêmes, ces organismes dépendent non de la photosynthèse mais de la chimiosynthèse

Des micro-organismes utilisent certains éléments contenus dans les fluides pour produire l'énergie qui leur est nécessaire

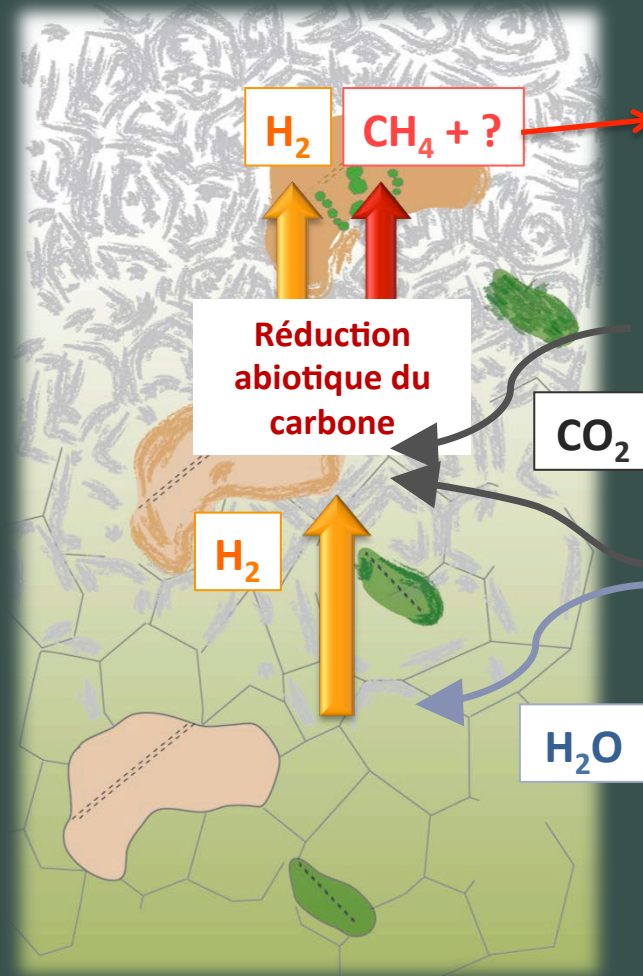


Il forment la base de la chaîne alimentaire sur laquelle se développent d'autres organismes

5 - Les serpentines et l'apparition de la vie



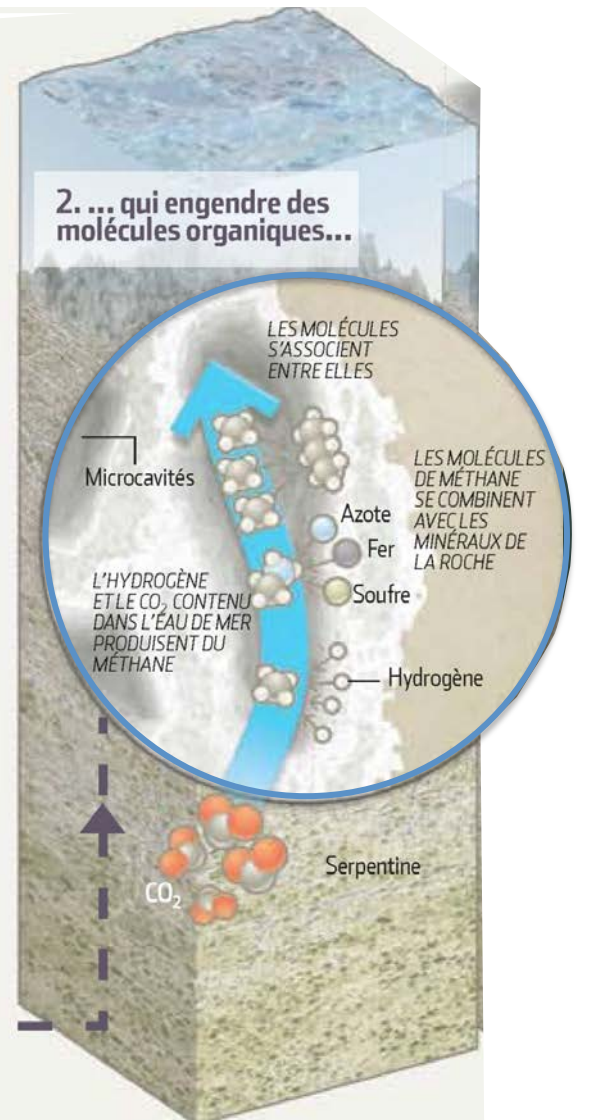
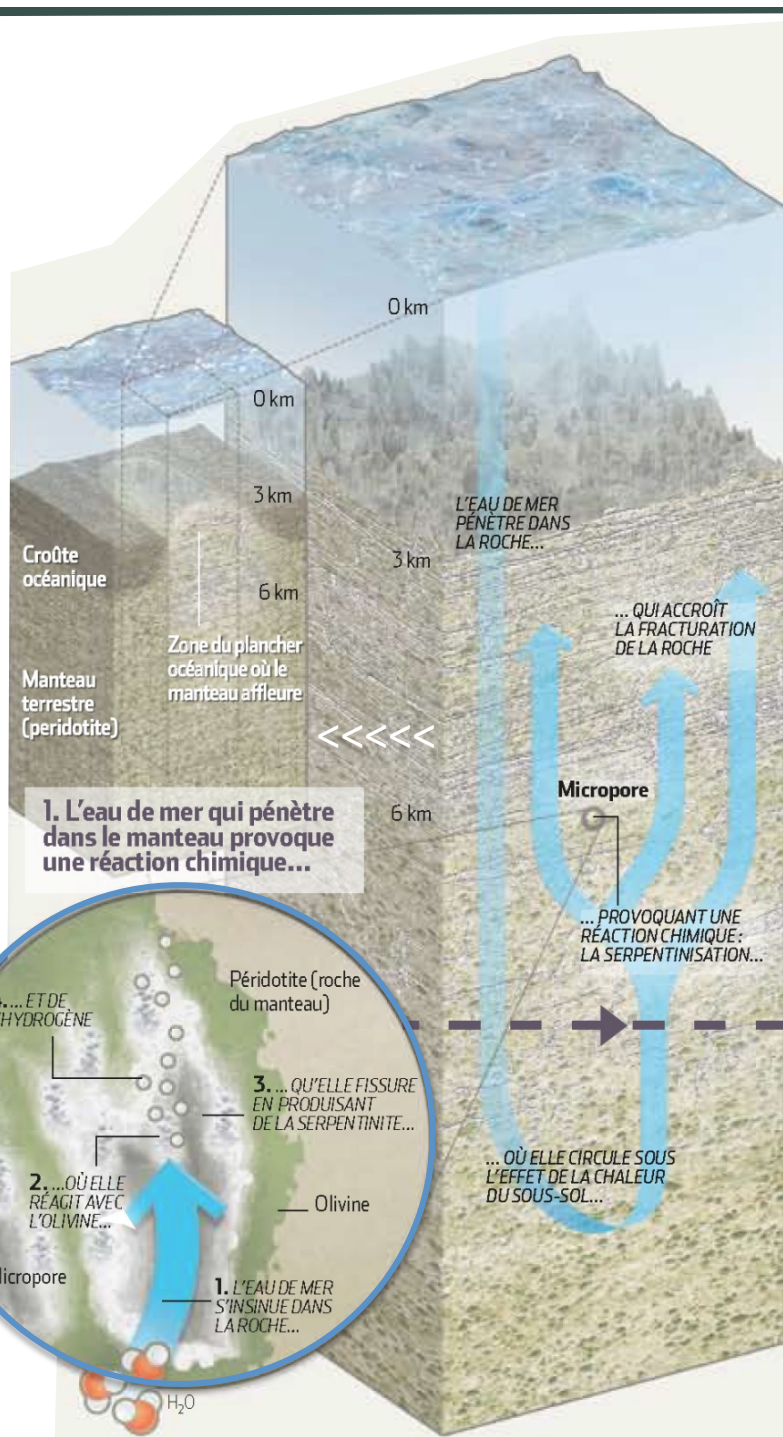
La réaction de serpentinisation libère des molécules organiques



des molécules organiques complexes sont associées au méthane

molécules prébiotiques

« soupe primitive »



La circulation de l'eau dans les roches riches en olivine pourrait produire l'énergie et les ingrédients nécessaires à la vie

Image Science et Vie, 2013

la Terre à l'Archéen il y a 4 milliards d'années

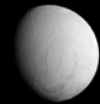
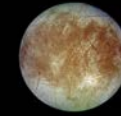


Environnement plus chaud qu'à l'actuel, activité volcanique très importante

- Les roches archéennes : des basaltes et des komatiites riches en olivine comme les roches du manteau actuel
- Un océan liquide

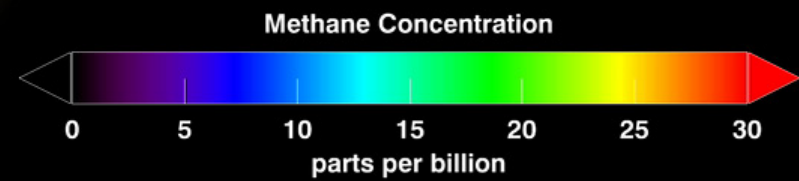
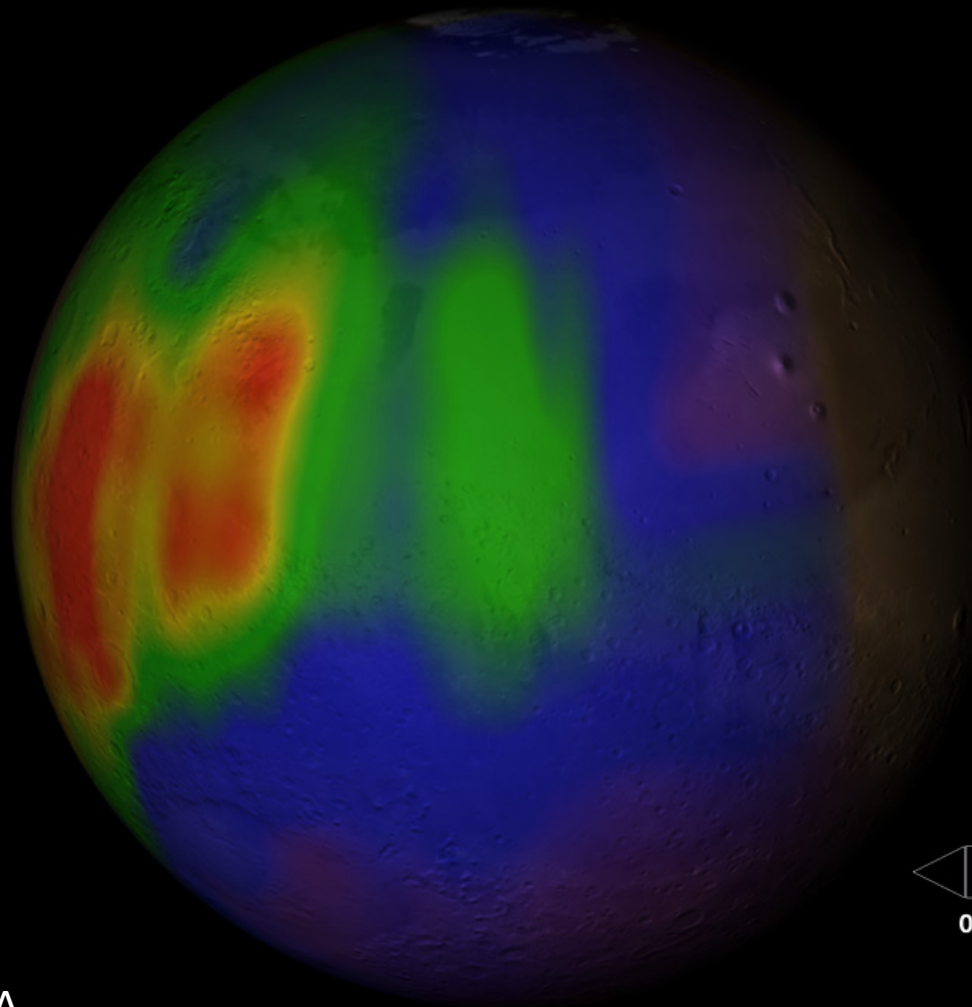
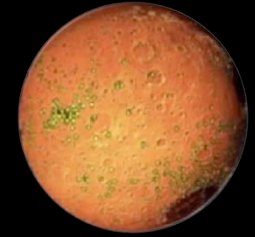
L'interaction entre les roches riches en olivine et l'eau (serpentinisation) aurait pu produire l'énergie et les ingrédients nécessaires à la vie

Contribue à la formation de la « soupe primitive », riche en méthane, hydrogène, azote

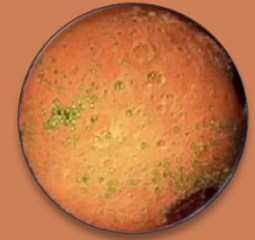


Cela rend il la vie possible ailleurs ?

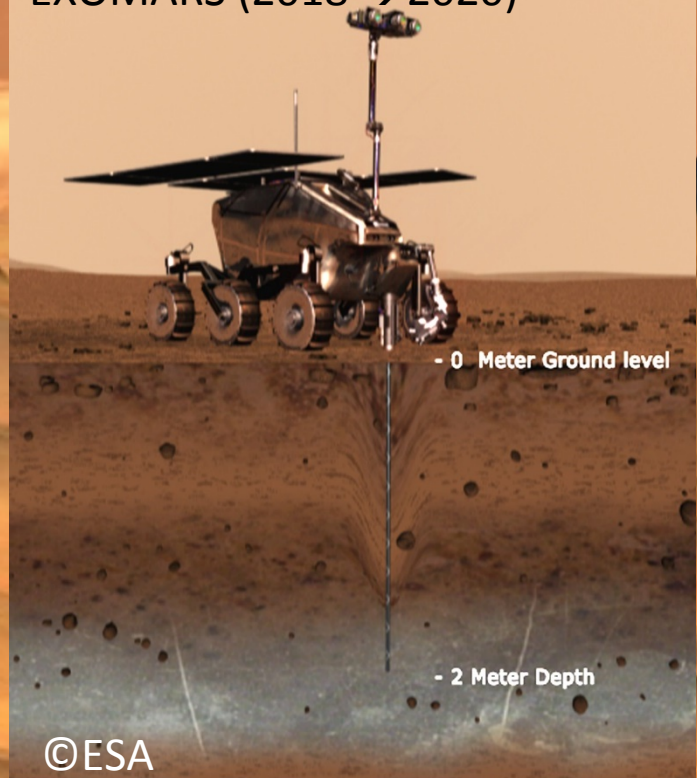
**Des émissions de méthane sur Mars :
Des réactions similaires à celles trouvées sur Terre ?**



La surface actuellement désertique de Mars dissimule probablement la présence d'eau dans le sous- sol
Quel type de réaction a lieu en profondeur ?

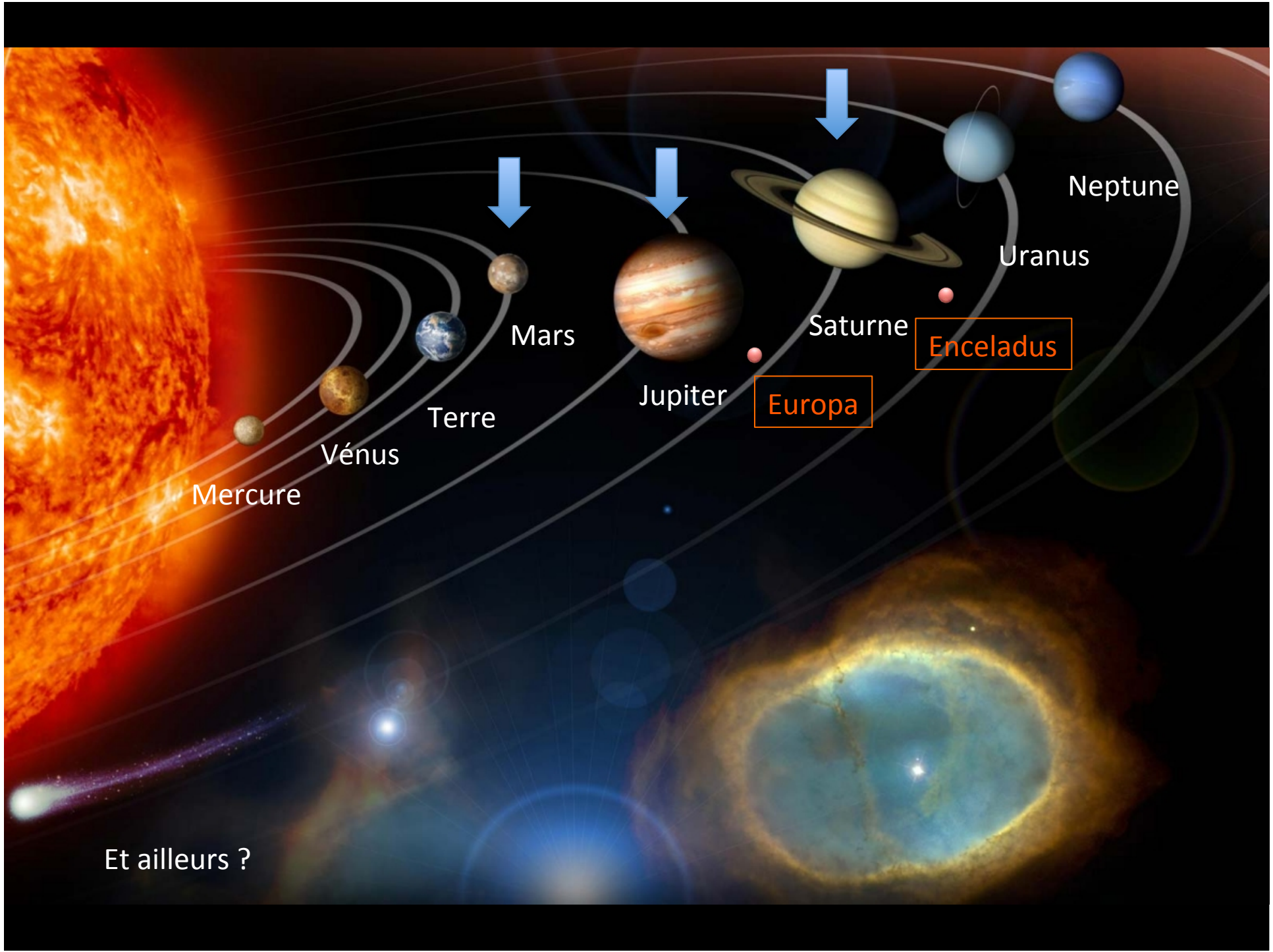


EXOMARS (2018 → 2020)



©ESA

©NASA



Et ailleurs ?

merci !

