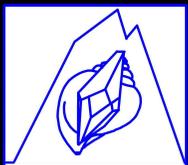


La tectonique des plaques sur Terre ... et ailleurs

Éric LEGENDRE - MFP64

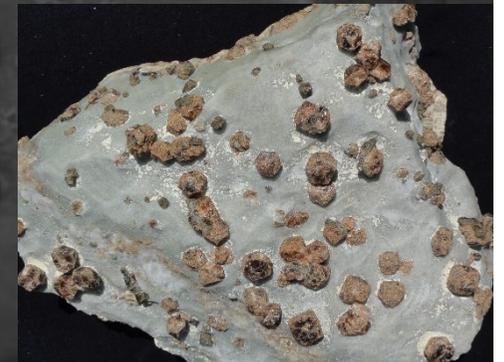
IDRON - 18 novembre 2019



1^{ère} partie – La tectonique des plaques
(sur Terre !)

**2^{ème} partie – Formation des Pyrénées et
phénomènes magmatiques
au Crétacé moyen** (→ analogues possibles pour
détecter des manifestations tectoniques sur autres planètes)

**3^{ème} partie – La tectonique des plaques
sur d'autres planètes ?**



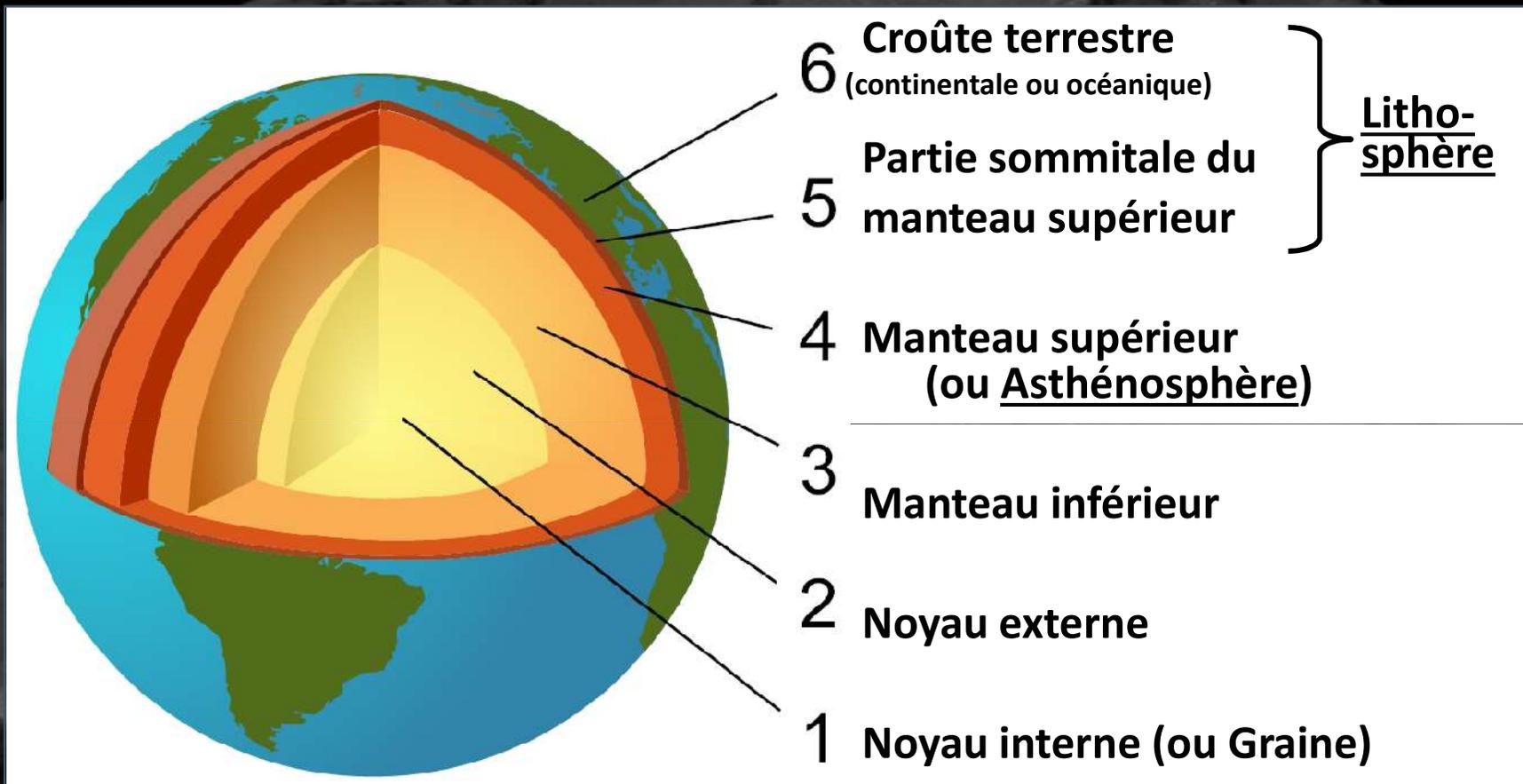
1^{ère} partie - La tectonique des plaques

**2^{ème} partie – Formation des Pyrénées
et phénomènes magmatiques
au Crétacé moyen**

**3^{ème} partie – La tectonique des
plaques sur d'autres planètes ?**



La structure interne de la Terre



Structure concentrique « en peaux d'oignon »

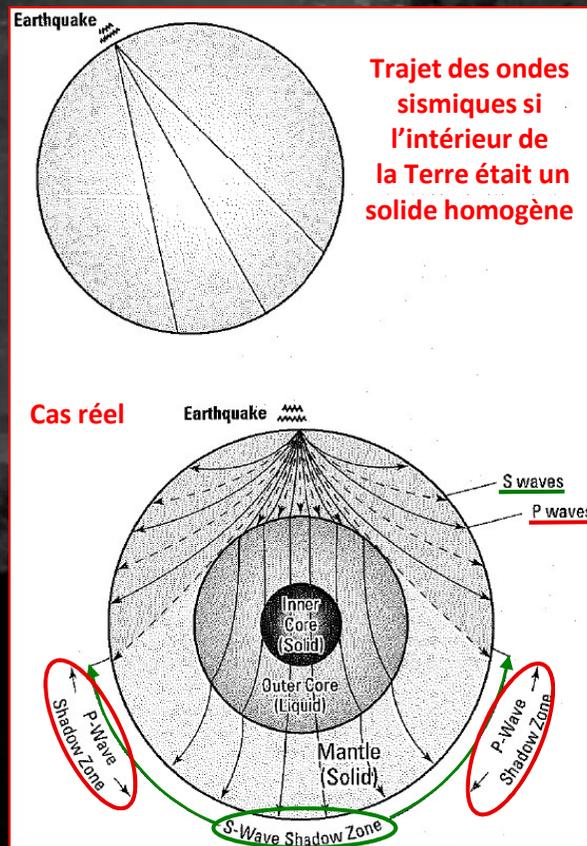
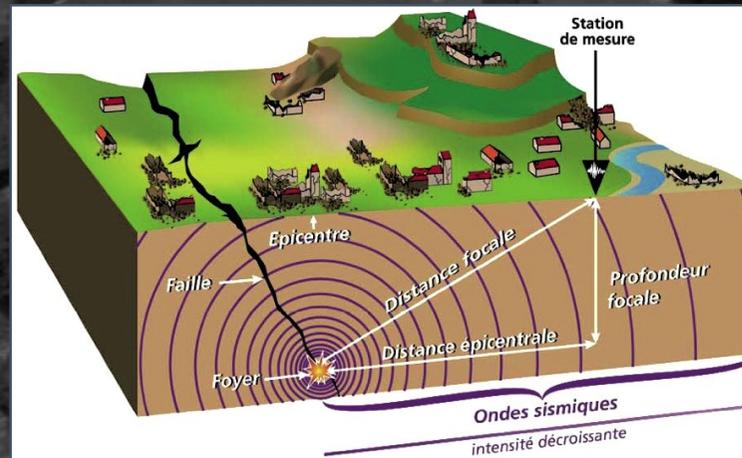
Le Noyau représente 17 % du volume total, le Manteau 81 % et la Croûte 2 % seulement



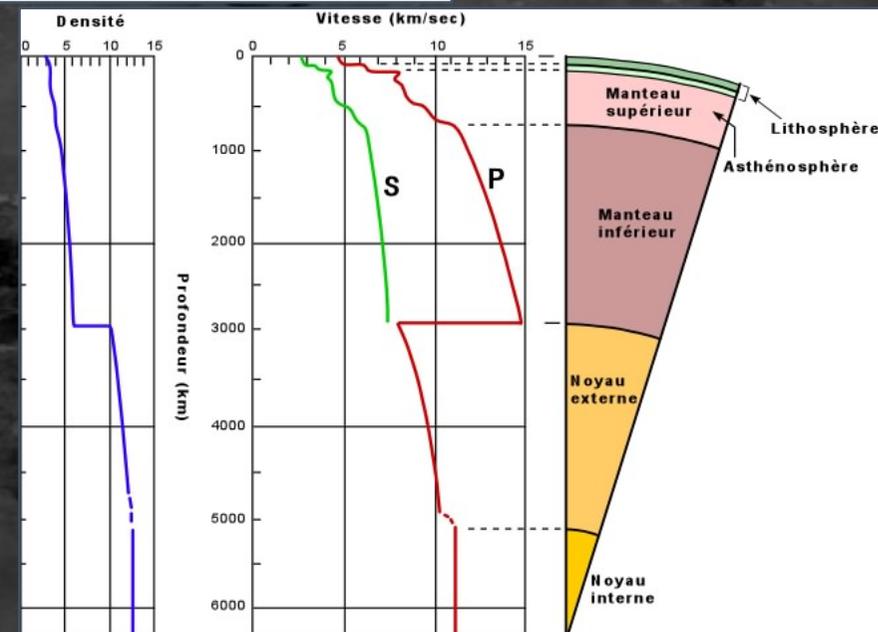
La structure interne de la Terre

La connaissance de la structure interne de la Terre dérive de l'analyse du comportement des ondes sismiques :

- Energie libérée lors des séismes se disperse soit vers l'intérieur de la Terre (ondes « de fond » pouvant être enregistrées en plusieurs points du globe) soit à la verticale de la zone de rupture (ondes « de surface ») remontant du foyer à l'épicentre (projection en surface)
- Vitesse de propagation des ondes sismiques est proportionnelle à la densité du matériel dans lequel elles se propagent
- Parmi les ondes de fond **les ondes P (ondes de compression) se propagent dans les solides, les liquides et les gaz** alors que **les ondes S (ondes de cisaillement) ne se propagent que dans les solides**



Source :
Geology
for dummies



Source : Université Laval, Canada

Les séismes

**Los Angeles – 1994
Magnitude 6.7**



Pendant un séisme, de l'énergie est libérée quand des roches sous contrainte glissent les unes par rapport aux autres le long d'une faille de la croûte terrestre

Mesure de l'énergie libérée → **magnitude**
(Estimation de l'énergie libérée au foyer
formule logarithmique)

InSight (Interior exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport)
est une mission de géophysique du Programme Discovery de la NASA
Cet atterrisseur s'est posé sur Mars le 26 novembre 2018 afin d'étudier (pendant 2 ans)
grâce au sismomètre SEIS sa structure interne
Objectif : mieux comprendre comment se forment les planètes rocheuses

**Boumerdès – 2003
Magnitude 6.8**



**Sichuan – 2008
Magnitude 8**



Le tremblement de terre qui a tué plus de 80 000 personnes pourrait avoir été déclenché par un énorme lac de barrage à proximité (5 km) de l'épicentre :

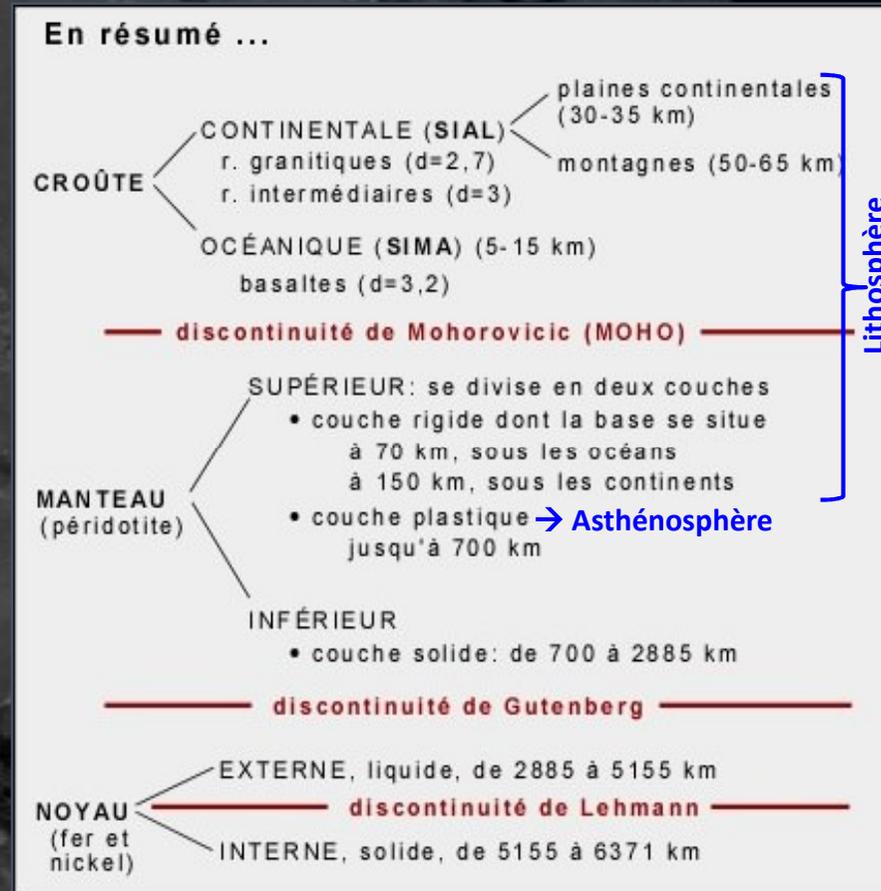
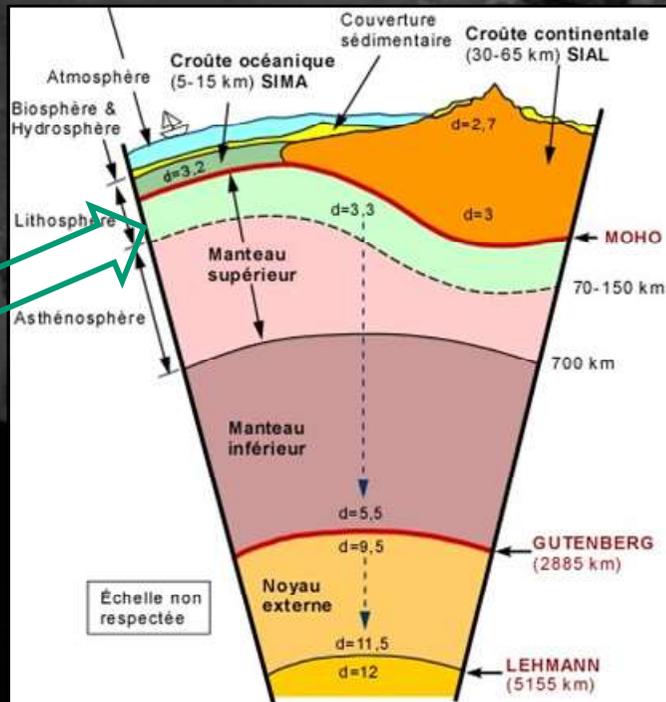
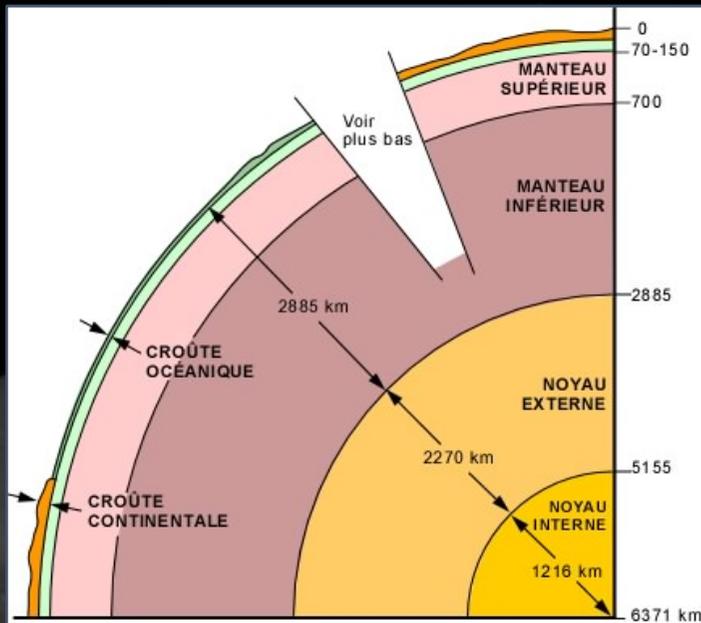
Le barrage Zipingpu, haut de 156 mètres et achevé en 2006, retient plusieurs centaines de millions de tonnes d'eau. Des scientifiques de Chine et des États-Unis pensent que le poids de l'eau et son effet de pénétration dans la roche pourraient avoir exercé une forte pression sur une ligne de faille, déclenchant une chaîne de rupture qui a mené au séisme.

D'autres experts rejettent cette théorie, et affirment que ce tremblement de terre a été un phénomène purement naturel, dans une région exposée aux séismes.

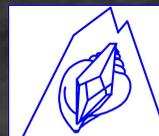


Kobe – 1995 Magnitude 7.3

La structure interne de la Terre



Source : Université Laval, Canada



La « dérive des continents »

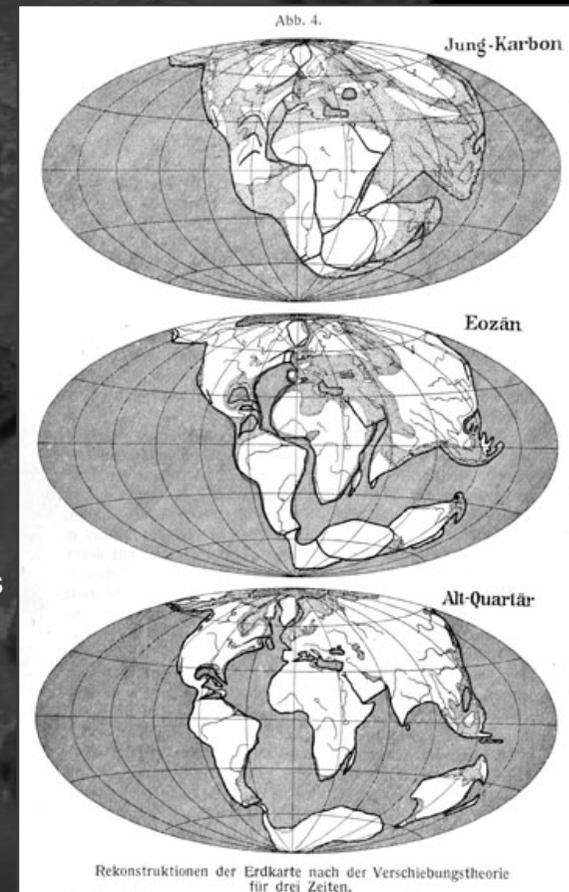
La dérive des continents est une théorie proposée au début du siècle par le physicien et météorologue **Alfred Wegener** (1880-1930) pour tenter d'expliquer la similitude dans le tracé des côtes de part et d'autre de l'Atlantique

Alfred Wegener présente son idée de la dérive des continents en janvier 1912 puis la développe progressivement jusqu'à sa mort



- Les continents constitués de « sial » reposent sur un substratum de « sima » + dense qui affleure directement au niveau des océans
Termes anciens décrivant les 3 couches de la Terre (sial, sima, nifé)
- Ils se sont déplacés de manière très importante au cours des temps géologiques
- Les continents ont été autrefois réunis en un bloc unique nommé Pangée se sont dispersés pour atteindre leur position actuelle
→ depuis la fin du Carbonifère, les masses continentales issues de cette fragmentation dériveraient à la surface de la Terre telles des radeaux

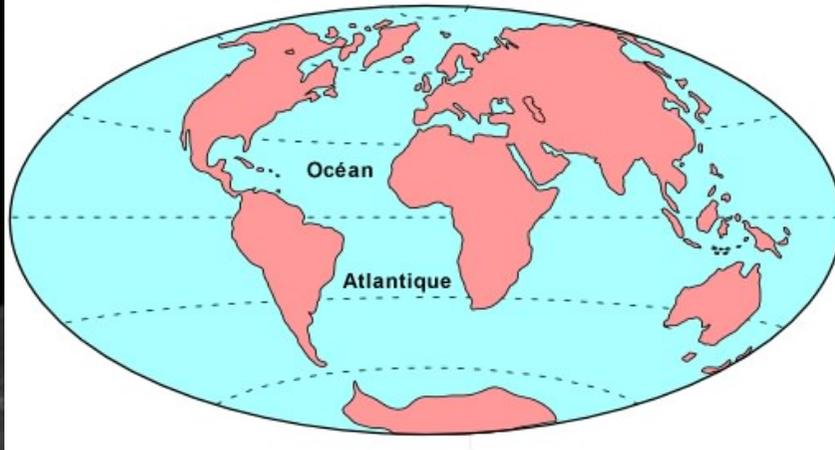
→ **dérive des continents**



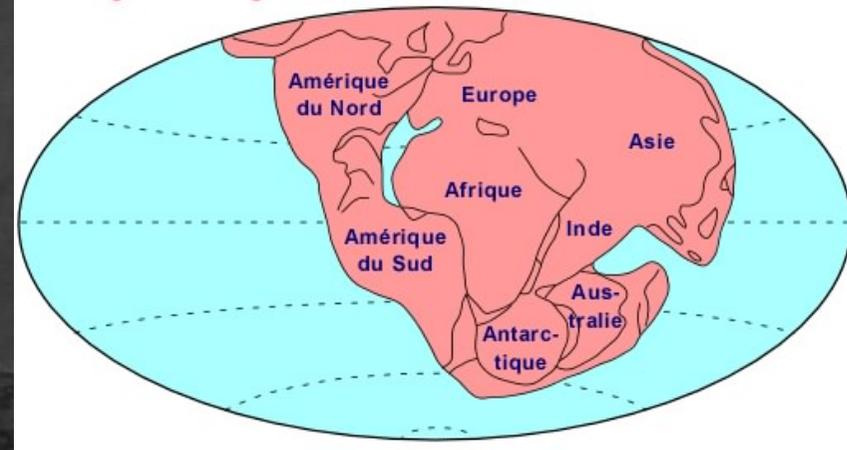
La « dérive des continents » : arguments

Complémentarité de forme des côtes de l'Atlantique

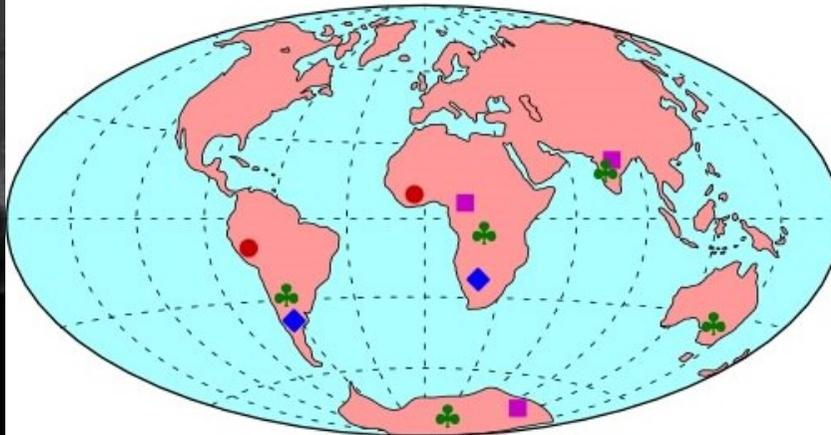
Position actuelle des continents



La Pangée de Wegener

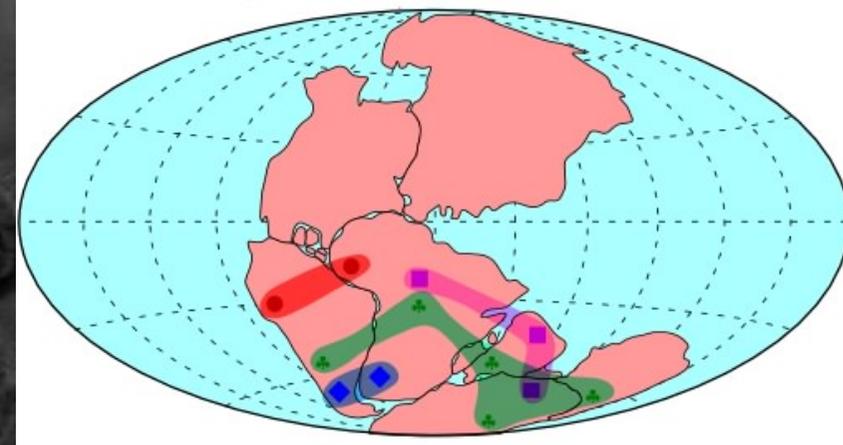


- **Cynognathus**: reptile prédateur terrestre ayant vécu il y a 240 Ma
- ◆ **Mesosaurus**: petit reptile de lacs d'eau douce, il y a 260 Ma
- **Lystrosaurus**: reptile terrestre ayant vécu il y a 240 Ma
- ♣ **Glossopteris**: plante terrestre d'il y a 240 Ma



Répartition de fossiles de plantes et de reptiles

La solution de Wegener

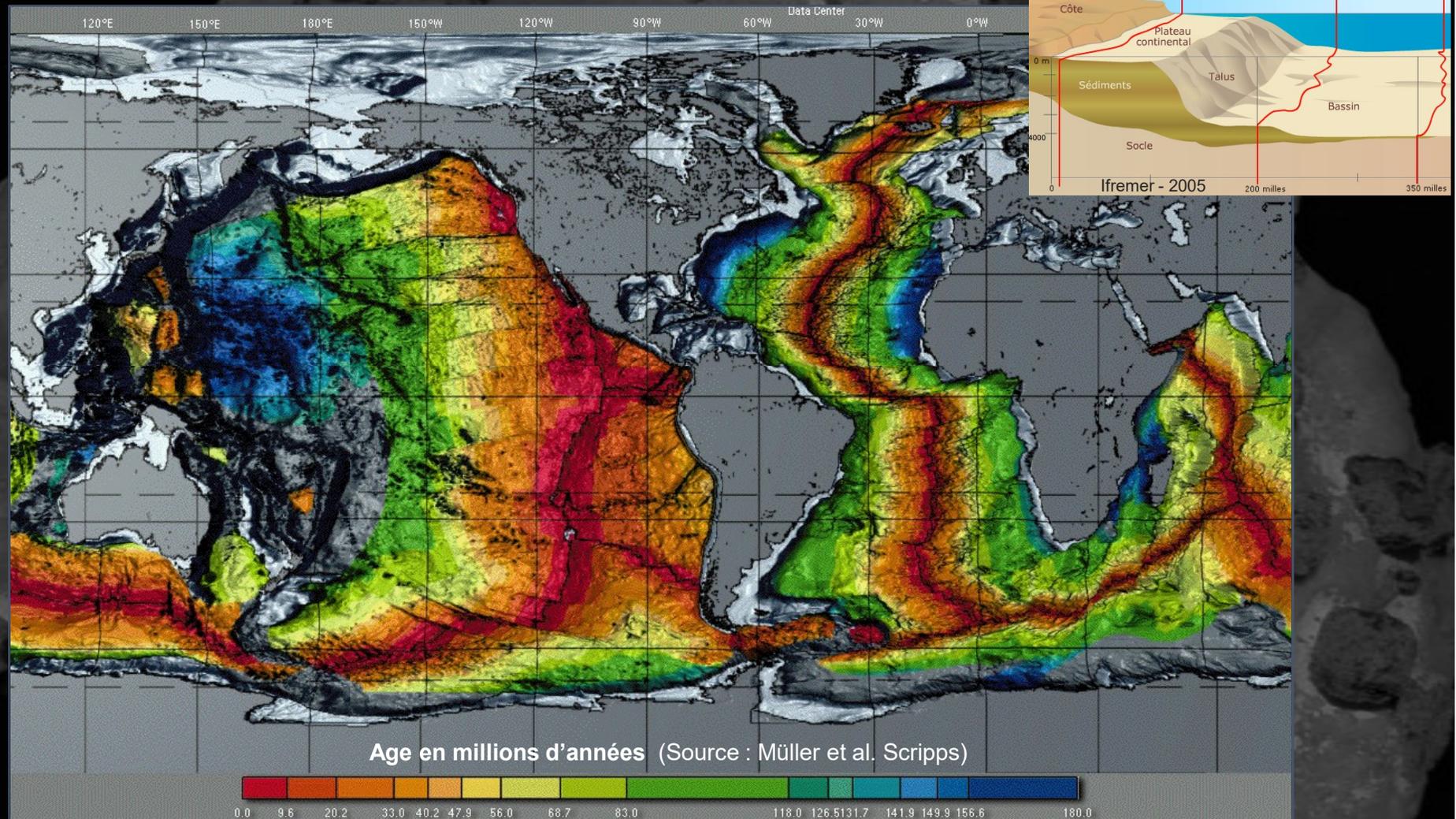


Source : Université Laval, Canada

MAIS si on arrive à reconstituer la position des continents à une époque donnée on ne comprend pas ce qui provoque leurs déplacements.
→ Quel est le « moteur » de ces déplacements ?

Topographie et âge des fonds océaniques

- La complémentarité de forme des côtes de part et d'autre de l'Atlantique est meilleure si on prend la limite du plateau continental
- Le fond des océans n'est pas plat : on observe de véritables chaînes de montagnes sous-marines s'étendant sur des milliers de km
- Carto. des fonds marins effectuée pour les besoins des sous-marins pendant la 2nde guerre mondiale
→ découverte du rift médian, datation de l'âge des roches des fonds océaniques



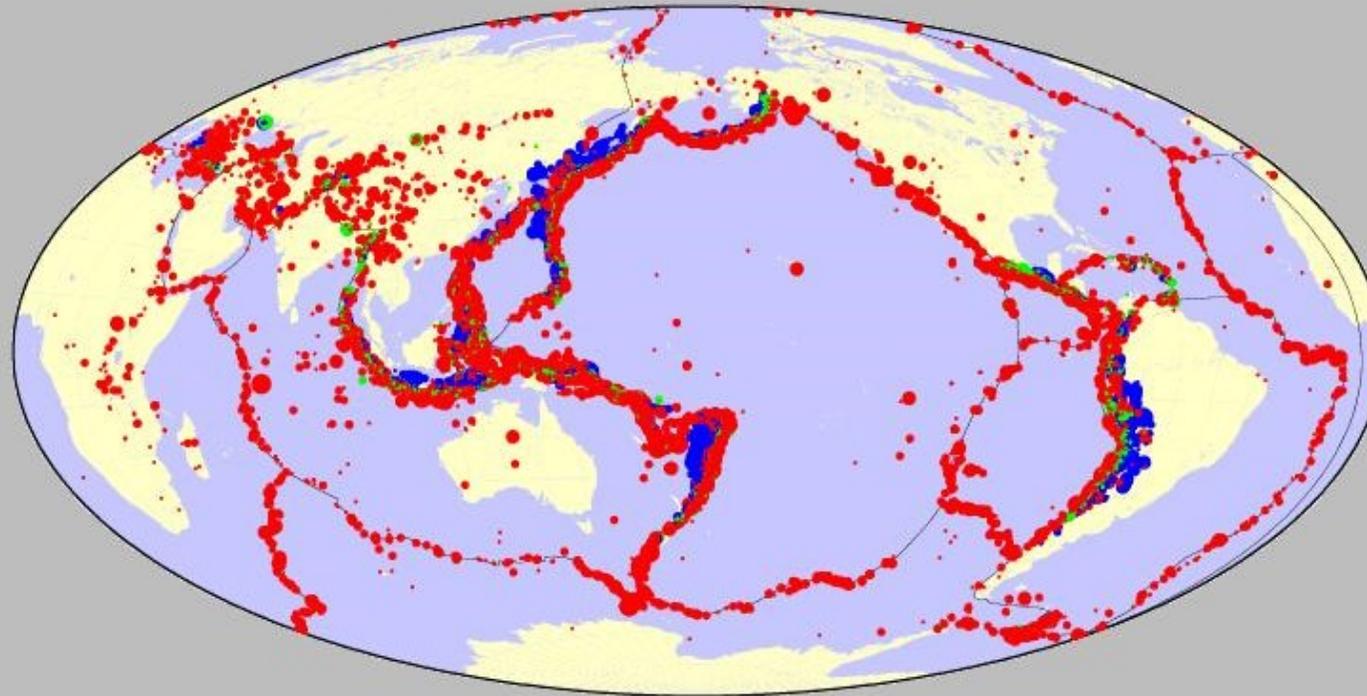
On n'observe pas de croûte océanique plus ancienne que 180 Ma (limite Jurassique inférieur-moyen)

L'âge des îles océaniques croît avec leur distance par rapport à la dorsale (qui a un âge actuel). Plus elle sont éloignées de la dorsale plus elles sont vieilles, preuve qu'une fois formées sur le plancher océanique elles ont dérivé comme sur des tapis roulants

Répartition des séismes dans le monde

Carte de la sismicité
au niveau mondial

Source : géologie.ens



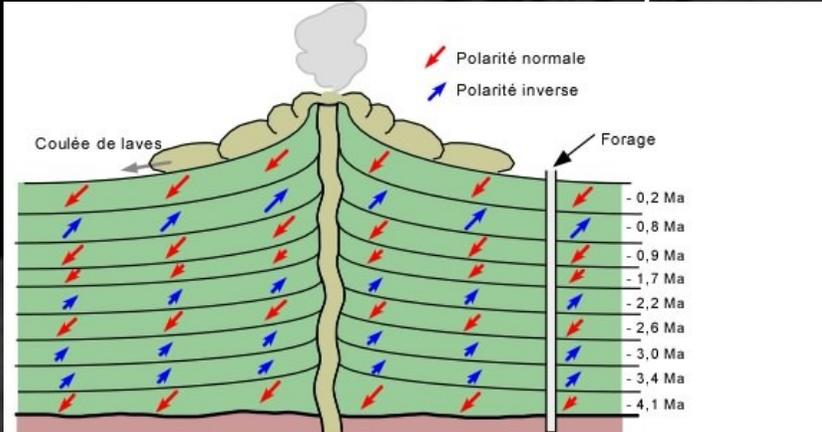
- Magnitude 7.5 - 8.5
- Magnitude 6.5 - 7.5
- Magnitude 5.5 - 6.5
- Magnitude 4.5 - 5.5

- Depth < 50km
- Depth 50km - 100km
- Depth > 100km

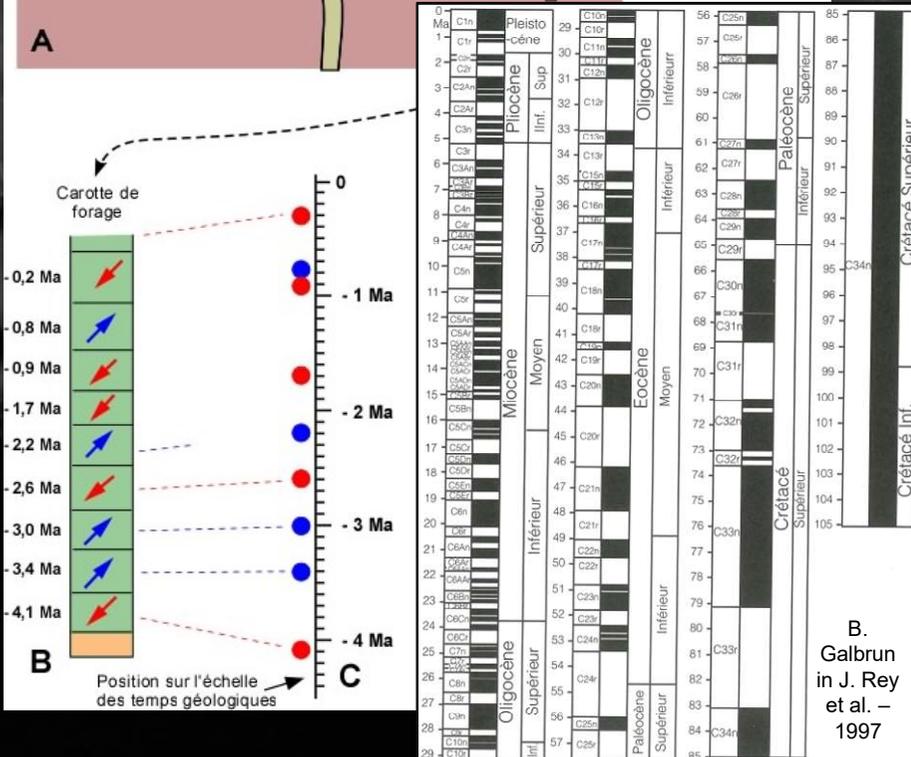


Autres observations : le magnétisme et ses inversions

Après éruption le basalte refroidit en subissant le champ magnétique terrestre
 Au-dessous de $\sim 600^{\circ}\text{C}$ (point de Curie) \rightarrow aimantation en fonction du champ magnétique du moment
 \rightarrow « *mémoire magnétique* » montrant des *inversions du magnétisme*
 comme si le dipôle Nord-Sud avait été à certaines époques Sud-Nord.



A- Empilement de coulées de laves, chacune bien datée
 Les laves enregistrent, au moment de leur cristallisation, le champ magnétique terrestre de l'époque
 (Exemple : 1^{ère} coulée datant de -4,1 Ma \rightarrow enregistrement de la polarité de l'époque = polarité normale
 2^{ème} coulée datant de -3.4 Ma \rightarrow une polarité inverse
 3^{ème} normale ... 4^{ème} inverse ...
 \rightarrow construction d'un édifice constitué de l'empilement de coulées de polarité normale/inverse de + en + jeunes vers le sommet



B- Forage carotté dans cet édifice \rightarrow datation des échantillons et mesure la polarité du paléomagnétisme

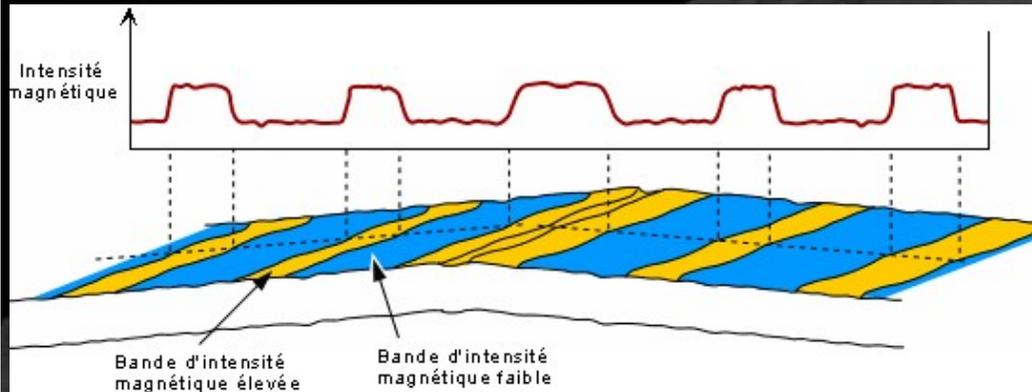
C- Report des données sur une échelle de temps géologique en indiquant la polarité
 Plus on a de points, plus l'échelle est précise

D- Synthèse à l'échelle mondiale (0 à -4 Ma, Cénozoïque à Crétacé supérieur)

B. Galbrun
 in J. Rey
 et al. –
 1997

Source : Université Laval, Canada

Les anomalies magnétiques des planchers océaniques



Au début de l'exploration des fonds océaniques, les relevés de l'intensité du champ magnétique ont montré l'existence d'une alternance de bandes parallèles de magnétisme élevé et de magnétisme faible

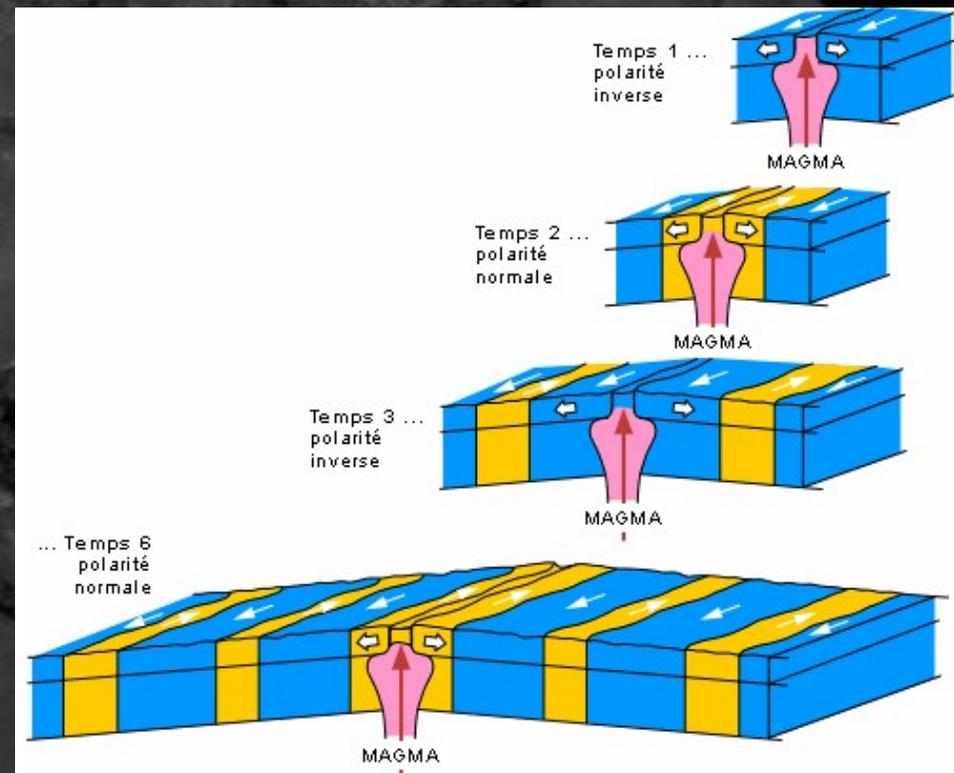
La polarité actuelle étant normale, les bandes d'intensité élevée correspondent aux bandes de polarité normale, alors que les bandes d'intensité faible correspondent aux bandes de polarité inverse, résultant d'un effet de soustraction

- On observe donc une alternance de bandes parallèles, de polarité magnétique alternant entre normale et inverse, symétriques de part et d'autre d'une dorsale

La formation de lithosphère océanique au niveau de la dorsale enregistre la polarité du champ magnétique terrestre au moment où le basalte se solidifie (même schéma que pour le volcan, mais à l'horizontale et symétrique par rapport à la dorsale)

- Ces bandes d'anomalies magnétiques s'expliquent par
- un étalement des fonds océaniques dans deux sens perpendiculaires à la dorsale

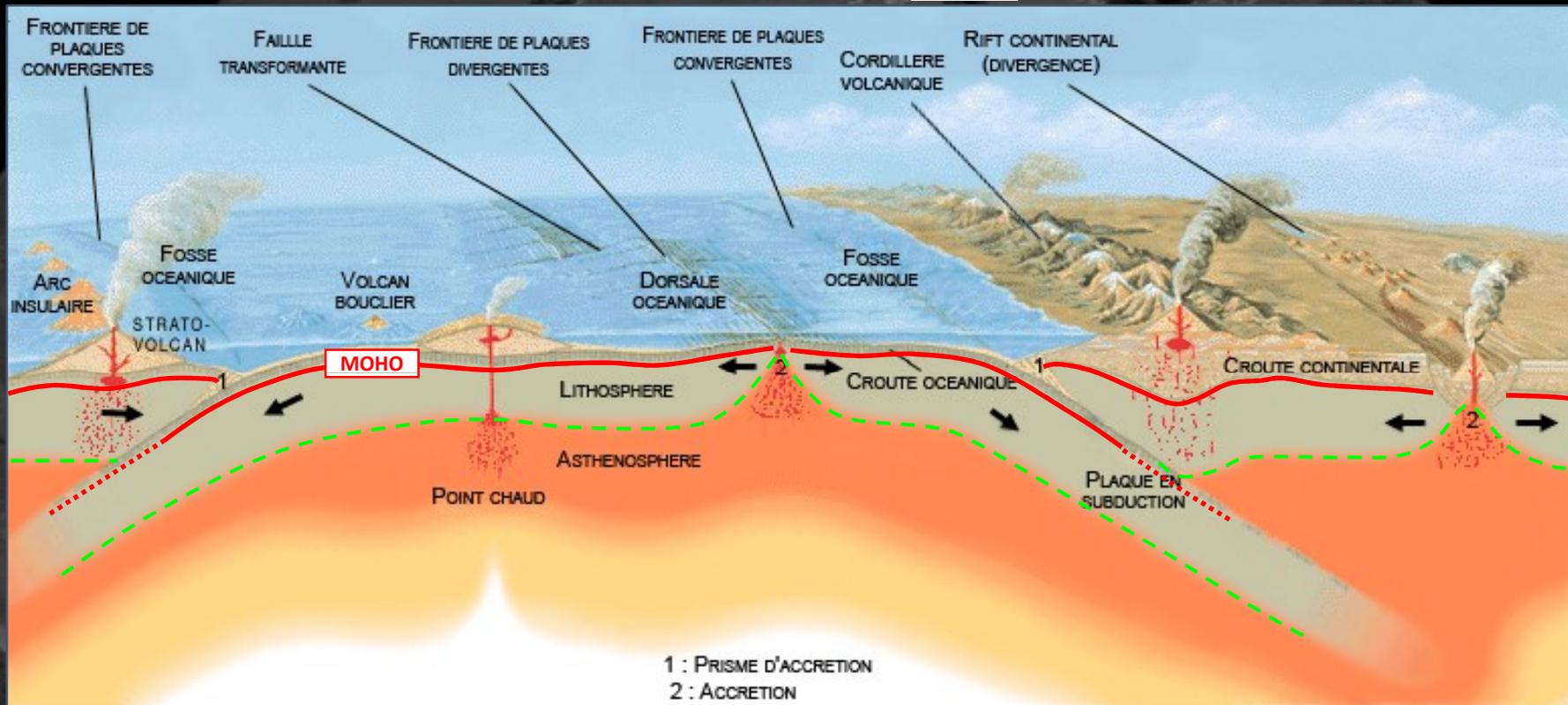
→ « double tapis roulant s'écartant perpendiculairement de part et d'autre de la dorsale »



Source : Université Laval, Canada

Les mouvements des plaques terrestres : la tectonique des plaques (Morgan, MacKenzie & Parker - années 1960)

La lithosphère, couche externe, rigide, de la Terre, est découpée en une quinzaine de plaques rigides = zones séparées les unes des autres, qui se déplacent sur l'asthénosphère, plus ductile, c'est-à-dire capable de fluer sans se briser
Le volume de la Terre reste constant



Dans les zones d'expansion (ou divergentes) la divergence des plaques et l'injection de magma liée à la remontée du manteau peuvent aller jusqu'à la création de lithosphère océanique

Dans les zones en compression (convergentes) peuvent se former des fosses océaniques ou des chaînes de montagne (par subduction c'est-à-dire plongement d'une plaque océanique, plus dense, sous une plaque continentale ou par collision de deux plaques continentales)

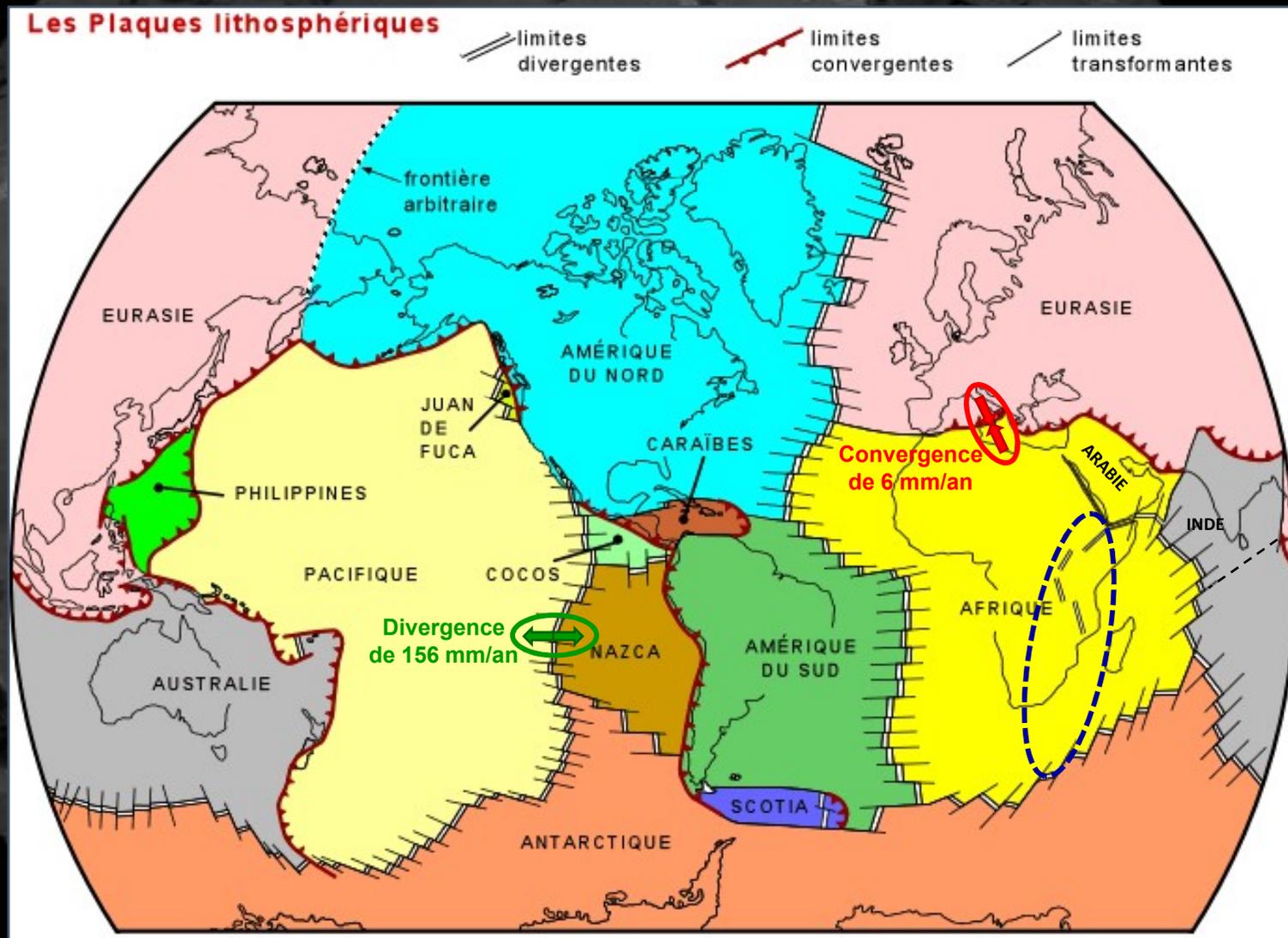
Il existe des zones de coulissage marquées par des failles transformantes

Les mouvements des plaques terrestres : la tectonique des plaques

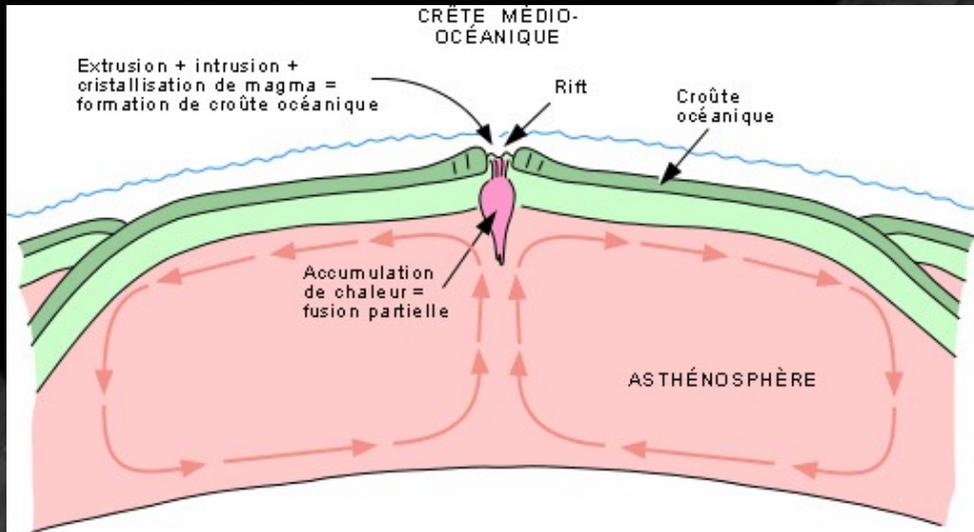
vitesse de déplacement relatif des plaques en mm/an (km/Ma)

15 plaques
actuelles
de tailles
très différentes :

Afrique
Amérique N
Amérique S
Antarctique
Arabie
Australie
Caraïbes
Cocos
Eurasie
Inde
Juan de Fuca
Nazca
Pacifique
Philippines
Scotia



Frontières divergentes

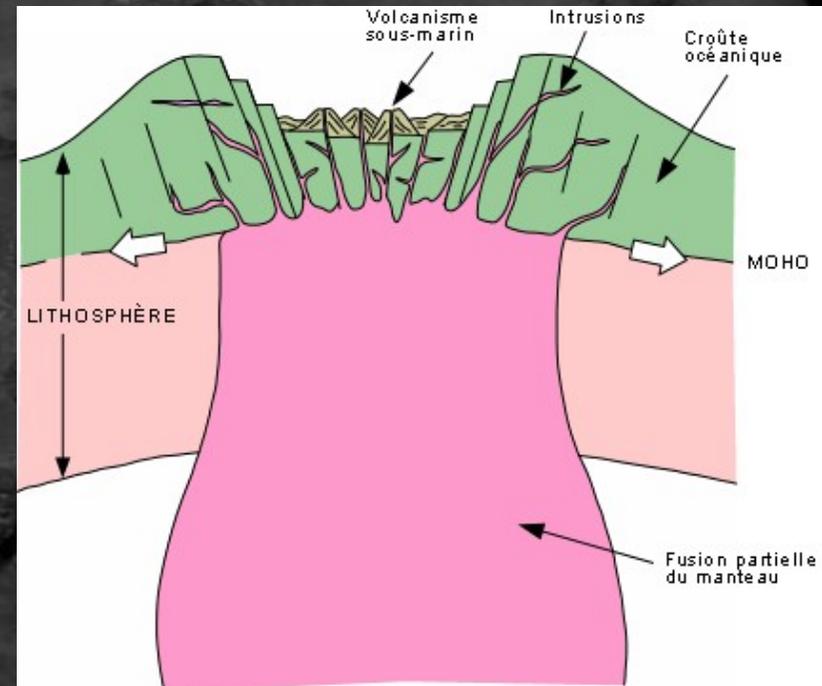


L'intérieur de la Terre est composée de roches faiblement radioactives dont la désintégration produit (encore !) de la chaleur (désintégration d'isotopes instables principalement ^{238}U ^{232}Th ^{40}K)

Certaines zones du manteau deviennent donc chaudes se mettent à monter vers la surface sous l'effet de la poussée d'Archimède (+ chaud = - dense \rightarrow montée) formant des courants de convection

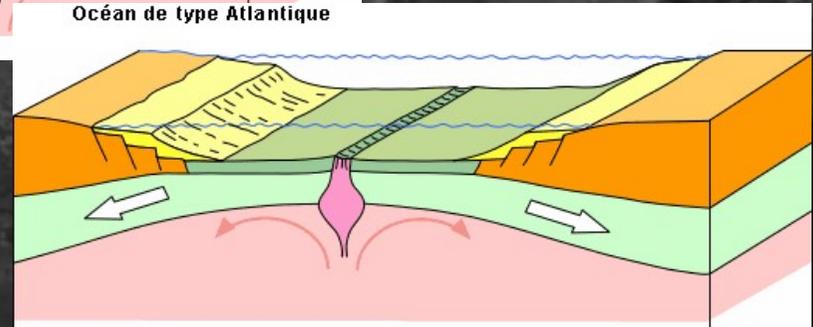
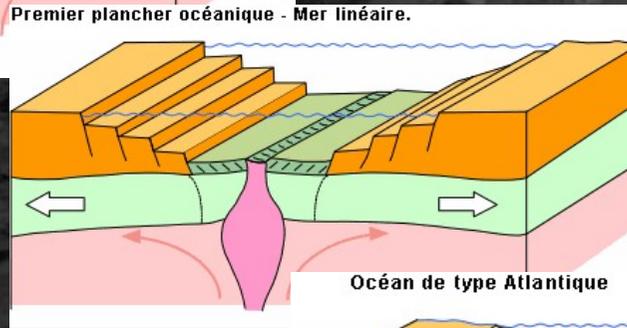
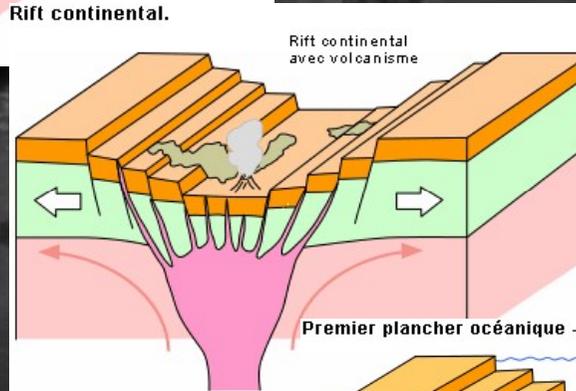
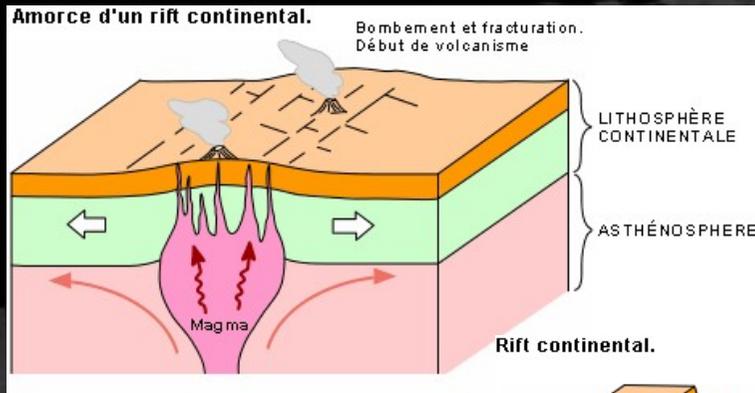


Ces courants se refroidissent au fur et à mesure qu'ils montent puis finissent par plonger pour former des cellules de convection à l'intérieur de l'asthénosphère



Source : Université Laval, Canada

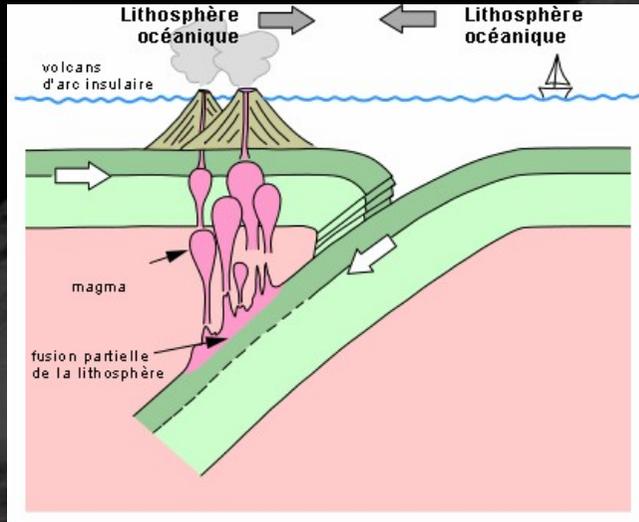
Frontières divergentes : formation d'un océan



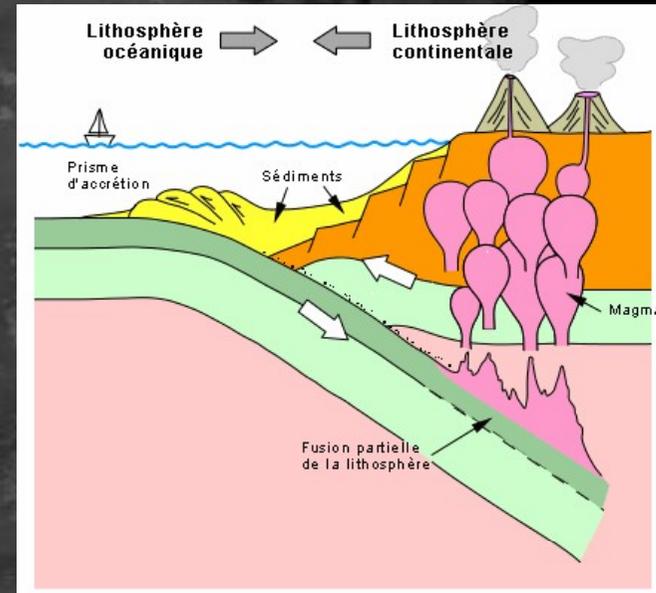
Source :
Université Laval, Canada

Frontières convergentes

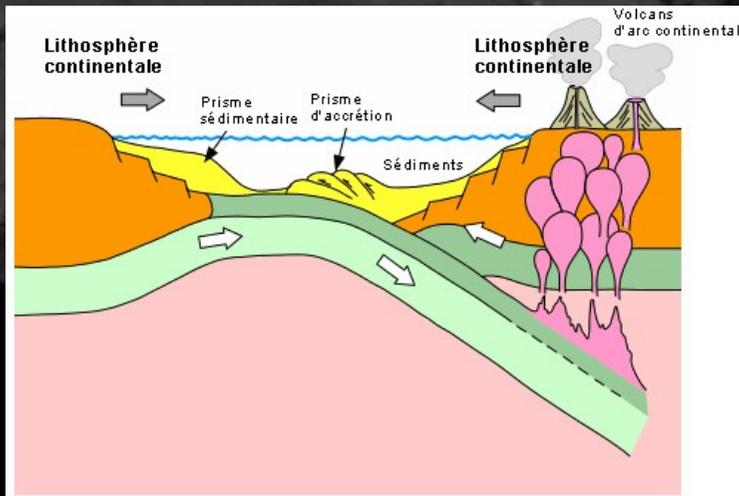
Une fois refroidie en surface (ce qui évacue la chaleur produite par l'intérieur de la Terre) la matière replonge vers les profondeurs (+ froid = + dense → descente).



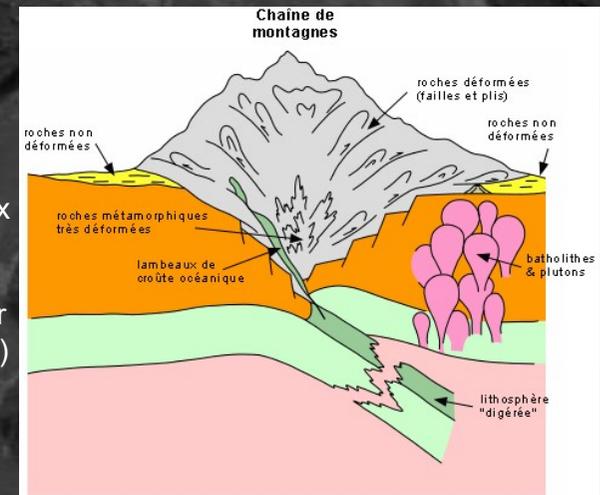
Collision entre deux plaques océaniques : la + dense (généralement la + ancienne) s'enfonce sous l'autre pour former une zone de subduction (ex. Pacifique-Ouest avec les grandes fosses des Mariannes)



Collision entre une plaque océanique et une plaque continentale : la plaque océanique + dense s'enfonce sous la plaque continentale (ex. Andes)



Collision entre deux plaques continentales : l'espace océanique se referme lors du rapprochement des deux plaques continentales
Toutes les grandes chaînes de montagnes plissées ont été formées par ce mécanisme (ex. Himalaya, Pyrénées)



Source :
Université Laval, Canada

La croûte océanique, plus dense, créée au niveau des dorsales et enfouie au niveau des fosses océaniques est « recyclée » alors que la croûte continentale, plus légère, reste en surface de la Terre

Frontières transformantes

Les frontières transformantes correspondent à de grandes fractures (failles transformantes) affectant toute l'épaisseur de la lithosphère. Elles se trouvent le plus souvent dans la lithosphère océanique. Ces failles permettent d'accommoder des différences dans les vitesses de déplacement ou même des mouvements opposés entre les plaques.



Décrochement la long de la faille de San Andreas (uqam.ca)

Faille de San Andreas en Californie : elle assure le relais du mouvement entre la limite divergente de la dorsale du Pacifique (Est), la limite convergente des plaques Juan de Fuca-Amérique du Nord et la limite divergente de la dorsale de Juan de Fuca

Rappel : vitesse de déplacement le long de la faille = 57 mm/an et distance (actuelle !) entre SF et LA d'environ 600 km...

Source : Université Laval, Canada

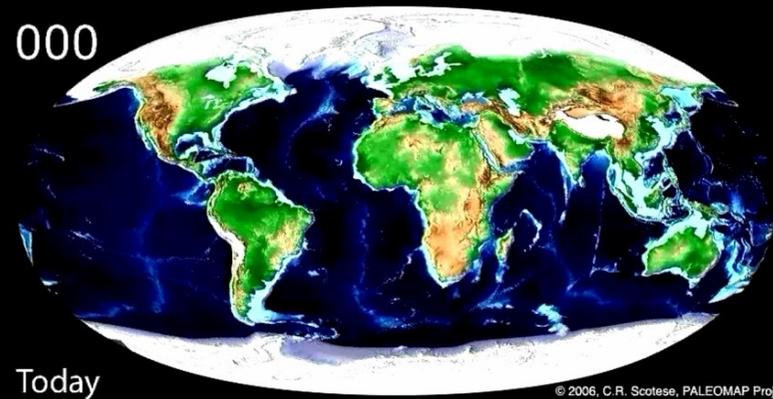


A petite échelle : « mini-rift » formé par convection et faille transformante dans un lac de lave



Reconstitution des mouvements des plaques tectoniques pendant les 80 derniers Ma

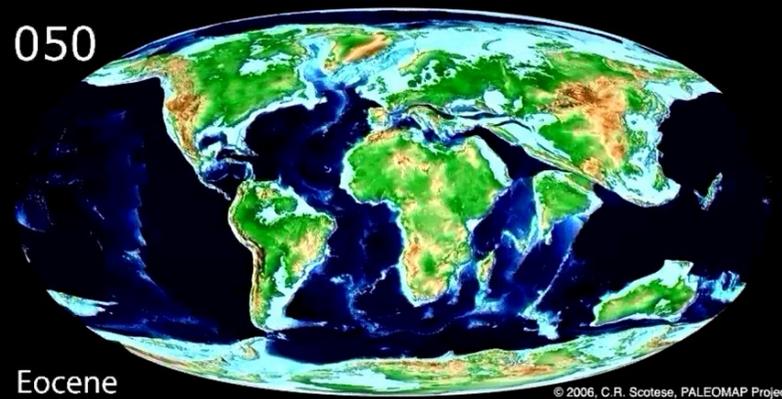
000



Today

© 2006, C.R. Scotese, PALEOMAP Project

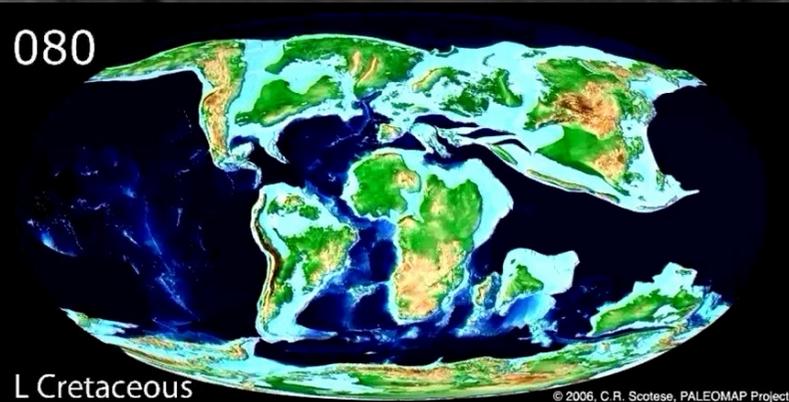
050



Eocene

© 2006, C.R. Scotese, PALEOMAP Project

080

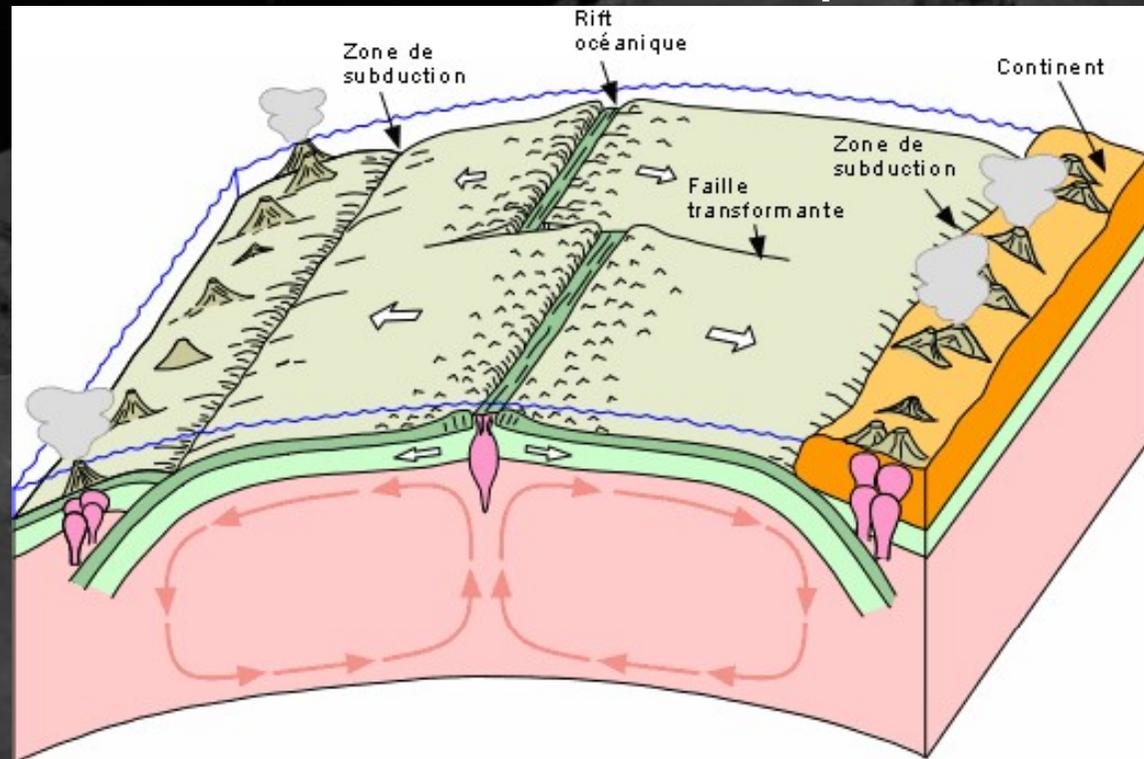


L Cretaceous

© 2006, C.R. Scotese, PALEOMAP Project

Source : Scotese PALEOMAP Project

En résumé 1/2



Source :
Université Laval, Canada

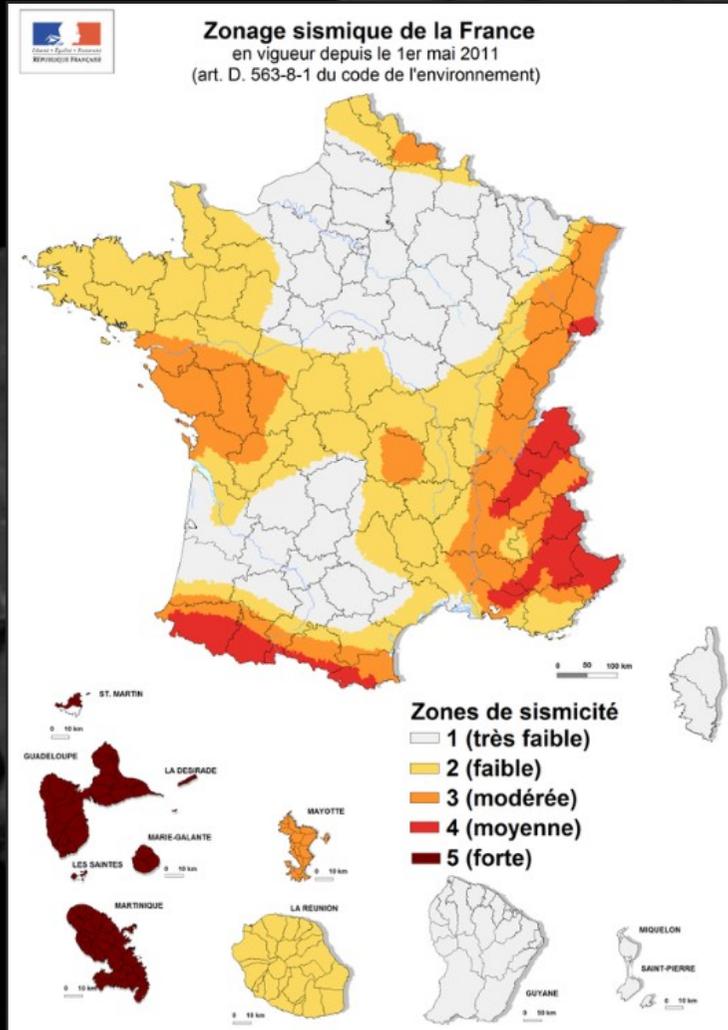
L'intérieur de la Terre est composée de roches faiblement radioactives dont la désintégration produit de la chaleur et permet à certaines zones du manteau devenues plus chaudes, de monter vers la surface sous l'effet de la force d'Archimède. Une fois refroidie en surface, cette matière replonge vers les profondeurs, créant de grandes cellules de convection qui sont le « moteur » des plaques. Le système s'organise de telle façon que des zones « stables » apparaissent.

Limites divergentes : « là où la matière monte ». Les cellules de convection concentrent de la chaleur dans leur partie ascendante, ce qui cause une fusion partielle du manteau tout à fait supérieur et une expansion des matériaux. Cette expansion crée les dorsales médio-océaniques.

Limites convergentes : Puisque le globe terrestre n'est pas en expansion, il faut détruire de la lithosphère, ce qui se fait par enfoncement de lithosphère océanique dans les zones de subduction « là où la matière redescend » correspondant aux fosses océaniques profondes (maxi 11 km dans la fosse des Mariannes). Ou par collision de deux plaques continentales. En surface, la matière est simplement translaturée des dorsales vers les subductions.

Limites transformantes : Les dorsales sont décalées par des failles dites transformantes pour accommoder des différences de vitesses de divergence.

En résumé 2/2



- Séismes provoqués par le déplacement et le contact des plaques tectoniques entre elles
- A l'intérieur d'une plaque : les séismes se concentrent au niveau des massifs et des chaînes de montagnes
- Tremblements de terre en métropole concentrés dans trois grandes zones :
 - Alpes, Pyrénées & partie de côte Atlantique (bord massif armoricain)
 - moindre activité sismique : Massif central, Vosges & Jura
 - forte récurrence des séismes dans les Antilles« carrefour » des plaques caraïbe, nord- et sud-américaine
- Origine = rapprochement plaques eurasienne & africaine de qq mm/an

Conséquence 1 : cycle des roches et des minéraux

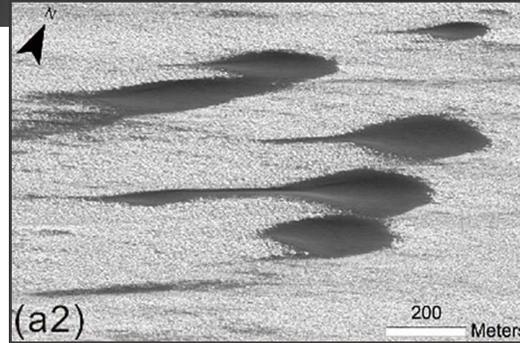
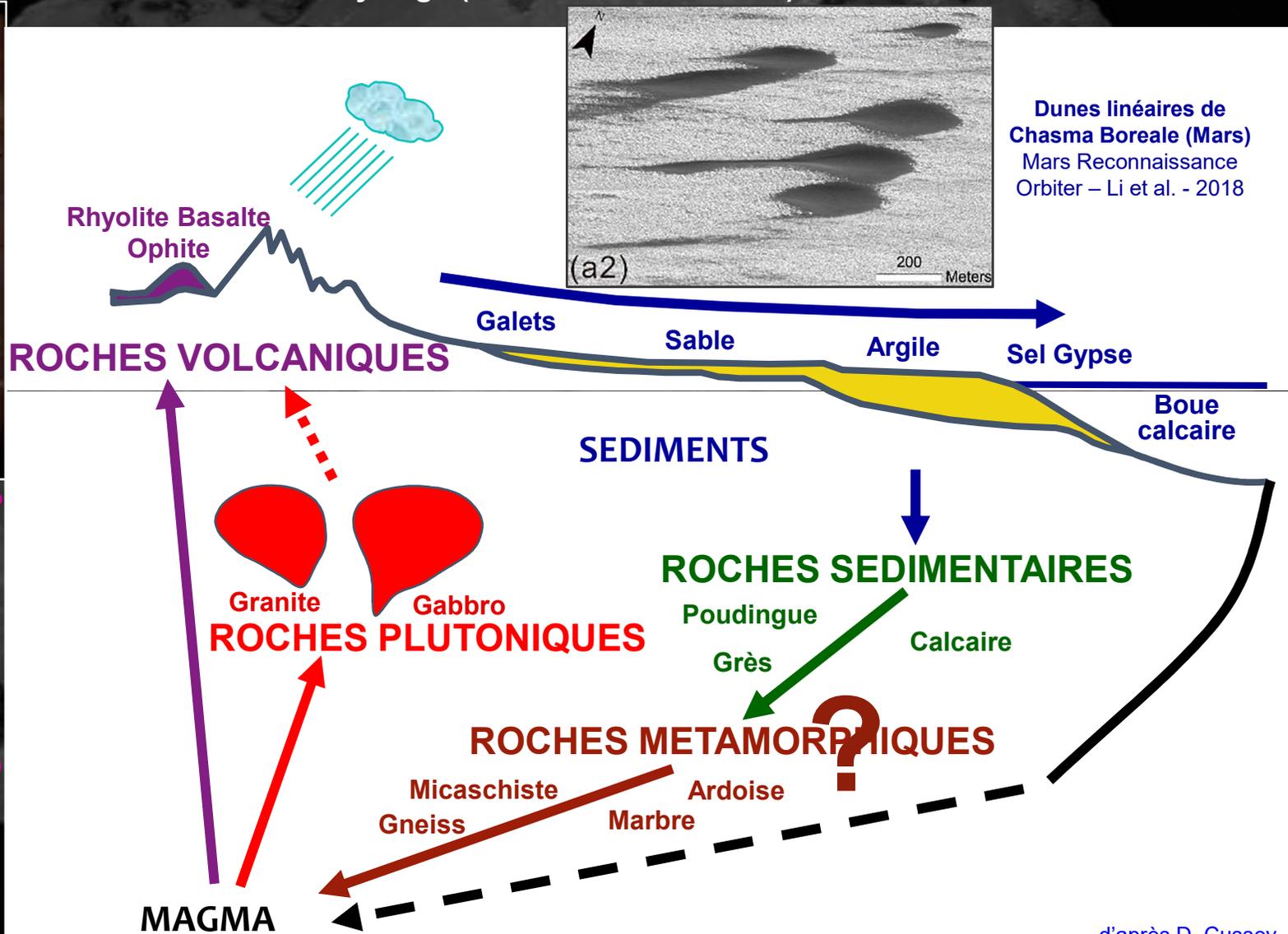
- La Terre est une planète vivante et les roches et minéraux composant sa croûte ont eux aussi leur cycle de formation et destruction qui s'exprime en millions d'années (Ma)
 - Recyclage (dont celui du carbone)



Volcanisme actif sur Io (panache de 200 km)
 NASA/JPL mission Galileo
 Droits réservés - © 1998

Des éruptions ont été directement observées dans le Système solaire :

- Terre
- Vénus
- Io (satellite de Jupiter)
- Encelade (satellite de Saturne)

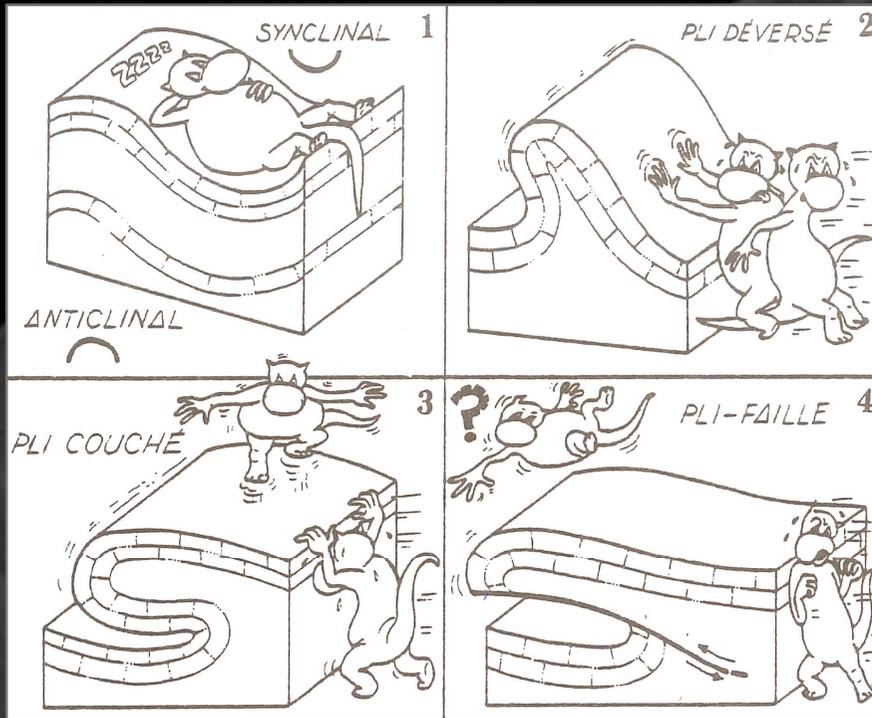


Dunes linéaires de Chasma Boreale (Mars)
 Mars Reconnaissance Orbiter – Li et al. - 2018

d'après D. Cussey (2005)

Conséquence 2 : déformations des roches

(Guide de lecture de la carte géologique 1/50000 – BRGM)

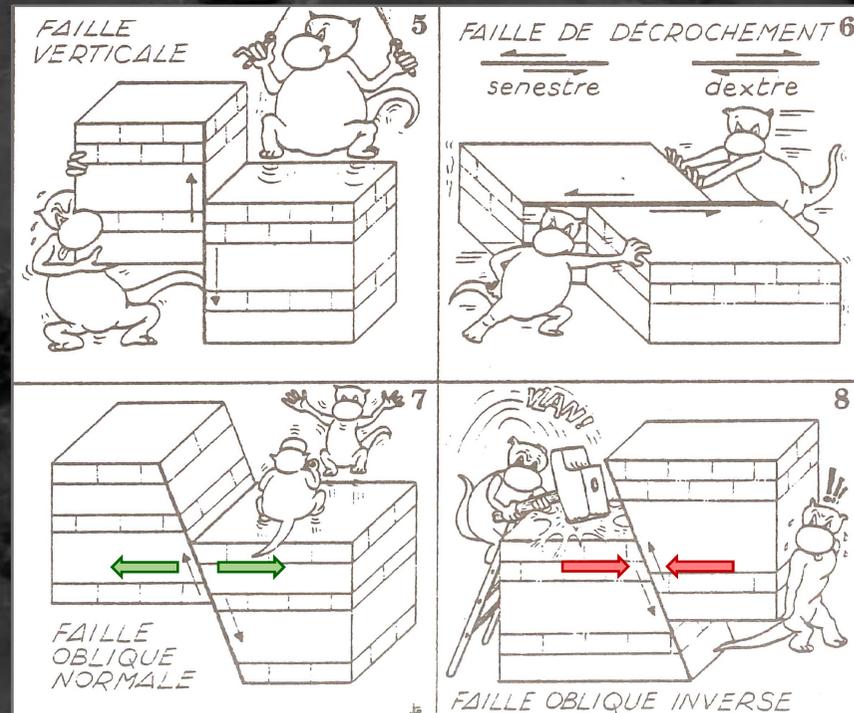


Les couches sédimentaires peuvent être *plissées* sous l'effet des contraintes mécaniques (1 à 3)

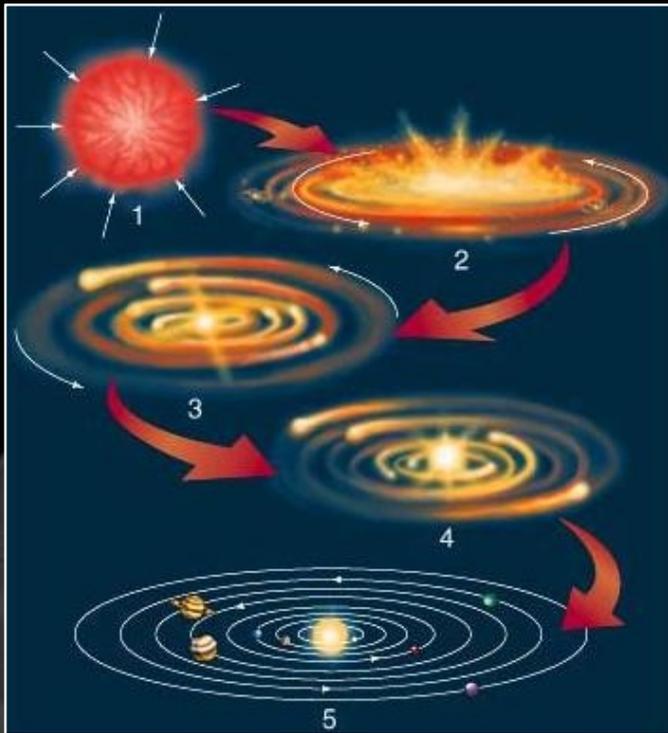
Quand la contrainte est trop forte les couches se rompent (4 à 8) le plan de rupture est nommé *faille*

Les terrains volcaniques se déforment comme les couches sédimentaires

Les terrains plutoniques sont moins sensibles à la déformation superficielle (< 5 km) mais sont fréquemment fracturés



Et avant ?



Les différentes étapes de la formation du système solaire :

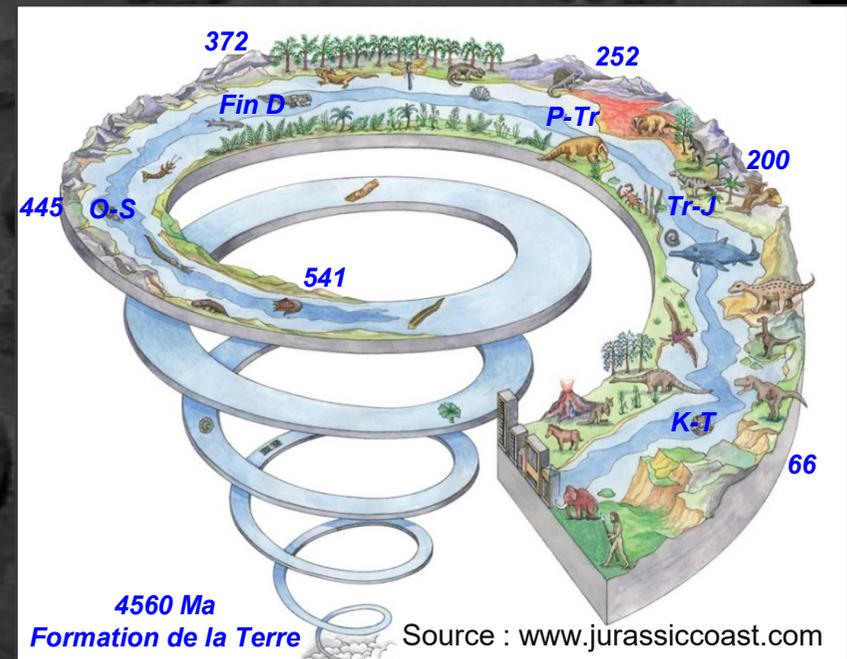
- Contraction d'un nuage d'hydrogène et d'hélium
- Aplatissement du système
- Formation de planétésimaux
- Mise en route des réactions nucléaires au centre
- Apparition du système sous sa forme actuelle (4,6 Ga)

Source : www.astronomes.com/le-systeme-solaire-interne/la-formation-du-systeme-solaire

Les planètes résultent de l'accrétion de planétésimaux
(*magmatisme primordial*)

- Chute de ces petits corps les uns sur les autres
- Libération d'énergie gravitationnelle + radioactivité à courte période → Réchauffement/fusion du corps en accrétion
- Séparation du fer qui descend au centre pour former le noyau et des silicates qui vont former un *océan magmatique*
- . Mais accrétion et radioactivité à courte période sont des phénomènes brefs qui déclinent rapidement
- Planètes et satellites, partiellement voire totalement fondus, refroidissent. Des minéraux cristallisent dans l'océan magmatique. Les plus denses (olivines et pyroxènes) tombent et vont former le manteau. Les moins denses flottent et vont former la croûte.

Source : ENS Lyon - 2012



4560 Ma
Formation de la Terre

Source : www.jurassiccoast.com

Et avant ?

Mise en place de la tectonique des plaques ?

Notion de cycle de Wilson (ou cycle des super-continentes)

Le « cycle » de Wilson décrit la formation puis la dislocation d'un supercontinent sur une période de l'ordre de 300 à 600 Ma

→ Evolution des continents et bassins océaniques en 3 phases :

- fragmentation des continents et ouverture des océans (1 & 2)
- fermeture des océans et rapprochement des continents (3 & 4)
- collision entre les continents, formation puis érosion de chaînes de montagnes (5 & 6)

Source :
Florida State University

En buttant sous une plaque continentale, des courants de matière chaude ascendante divergent et provoquent la fracture de cette plaque : un océan se forme (fig. 1). Les courants séparent ensuite les deux parties de la plaque, conduisant à l'expansion des fonds océaniques et à la divergence des continents (fig. 2). Pour des raisons inconnues, ce mouvement peut finir par s'inverser (fig. 3). Les plaques se rapprochent à nouveau (fig. 4) et entrent en collision pour former des montagnes (fig. 5) qui seront érodées (fig. 6).

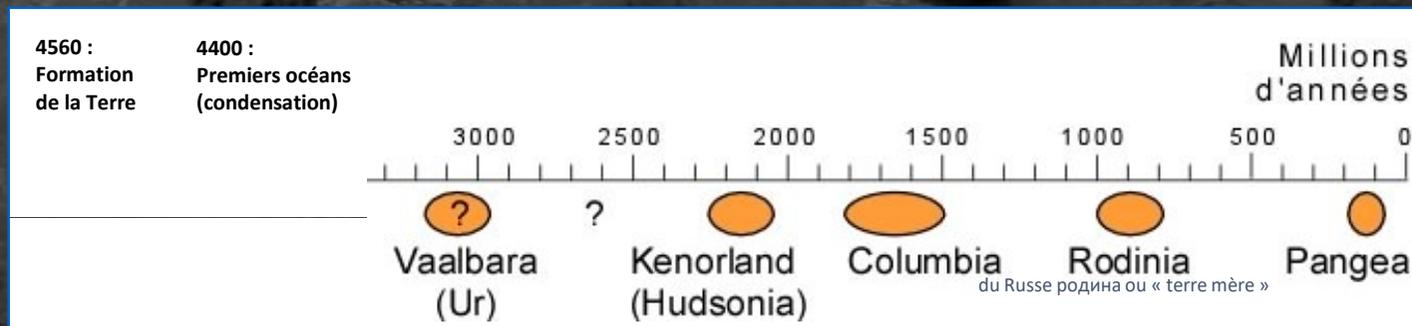
Et avant ?

Hypothèse des cycles de Wilson

Des travaux récents sur la géologie du Précambrien permettraient d'identifier au moins 4 (5 ?) de ces supercontinents

Le dernier de ces cycles a abouti à la constitution de la Pangée il y a environ 300 Ma, dont l'éclatement n'est pas encore achevé de nos jours → existence d'un "hémisphère continental" et d'un "hémisphère océanique" actuellement

*Les études géologiques n'ont trouvé aucune trace de roches remontant à plus de 4 Ga à la surface de la Terre
→ les continents n'existaient pas pendant l'Hadéen (âge > 4 Ga) ? ou érosion de la croûte primitive par subduction ?*



Source : Université Laval, Canada

On pense qu'un méga-continent, entouré de zones de subduction, reste immobile par rapport au manteau

Comme la conductivité thermique de la croûte continentale (sa capacité à transporter la chaleur) est la moitié de celle de la croûte océanique qui l'entoure, le méga-continent agit comme une plaque isolante

→ La chaleur s'accumule sous le méga-continent

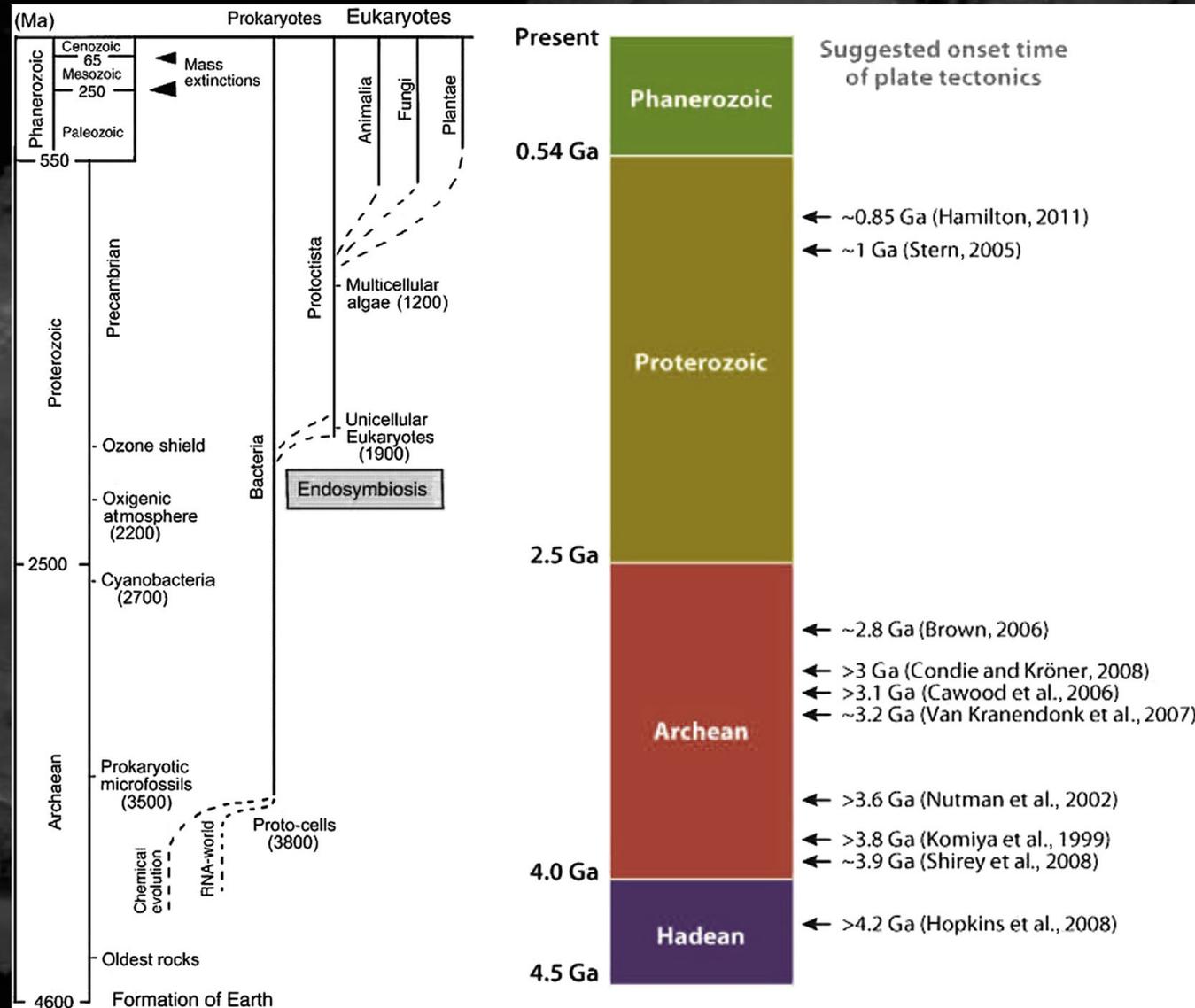
→ Les matériaux sont en expansion, amenant un soulèvement du continent

→ Création de tensions dans la masse continentale qui vont contribuer à la fragmenter



Alors, sur Terre ça a démarré quand ?

R.J. Stern - 2016

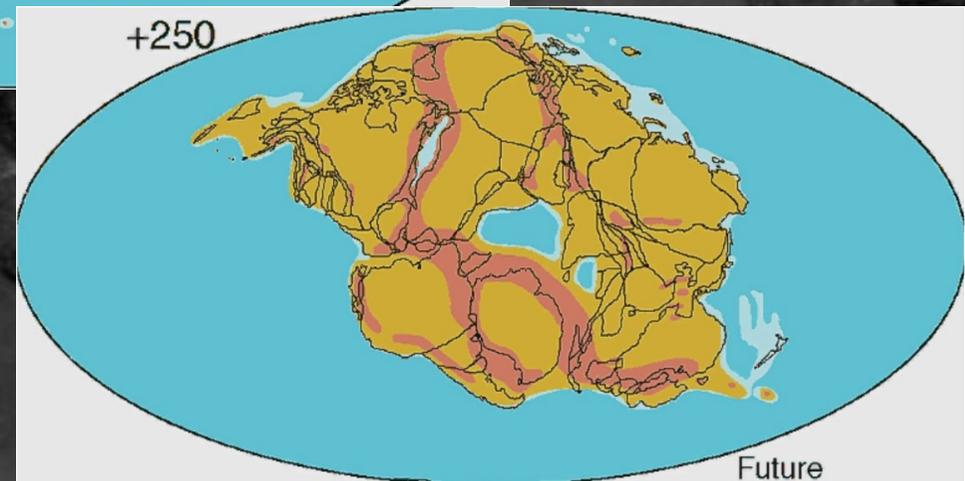
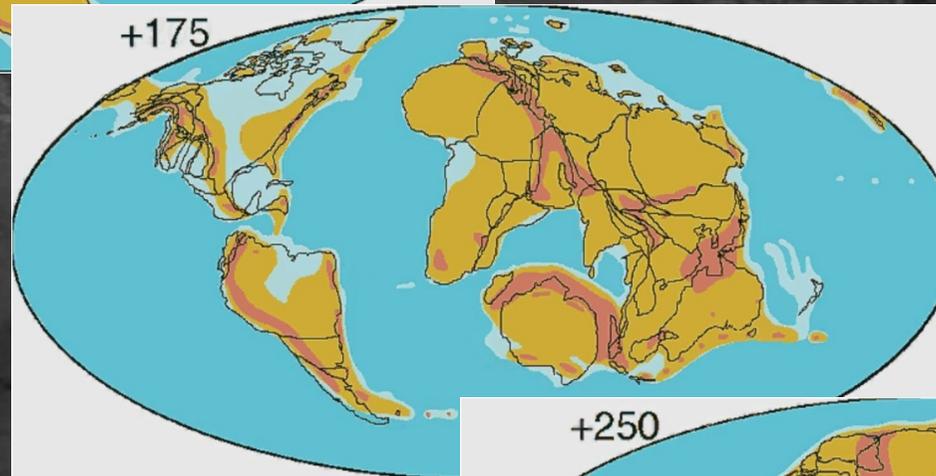
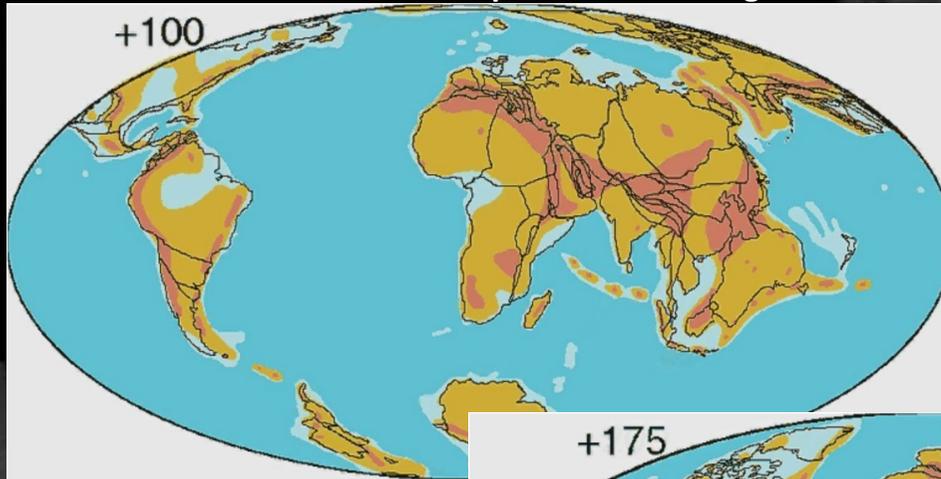


Échelle des temps géologiques avec événements clés de l'histoire de la Vie de la formation de la Terre à l'Actuel

à droite : suggestions sur la période de démarrage de la tectonique des plaques
→ pas de consensus actuellement !

Et après ?

Fin de la dispersion de la Pangée → début d'un nouveau cycle (?)



Source : Scotese Project

1^{ère} partie - La tectonique des plaques

2^{ème} partie – Formation des Pyrénées
et phénomènes magmatiques
au Crétacé moyen

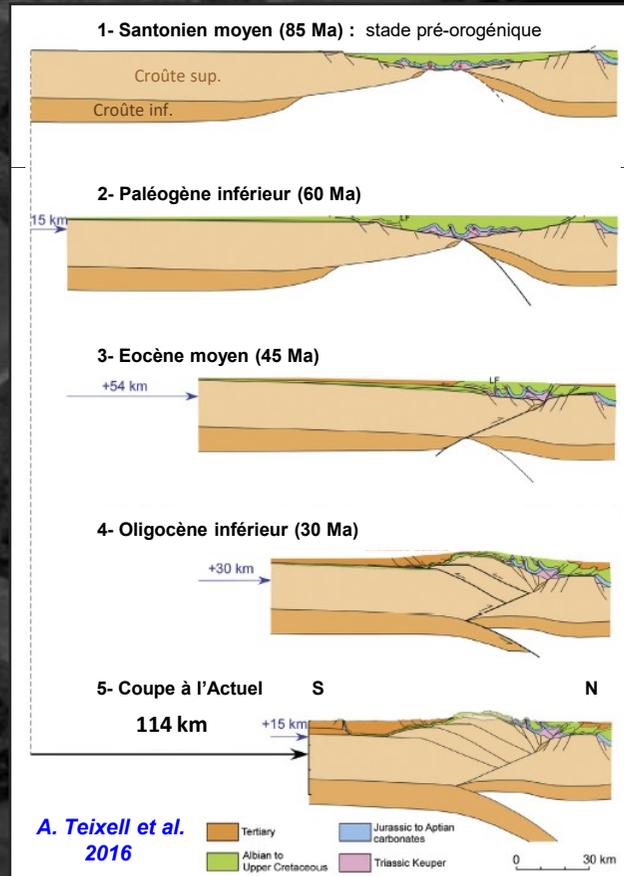
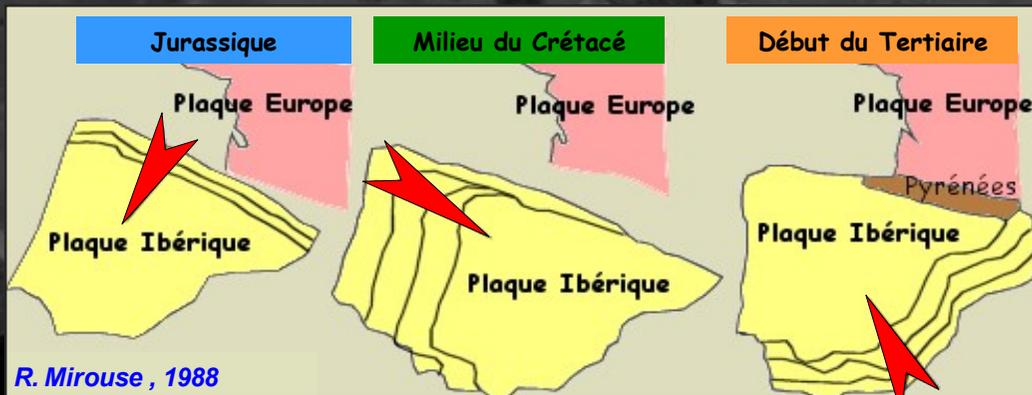
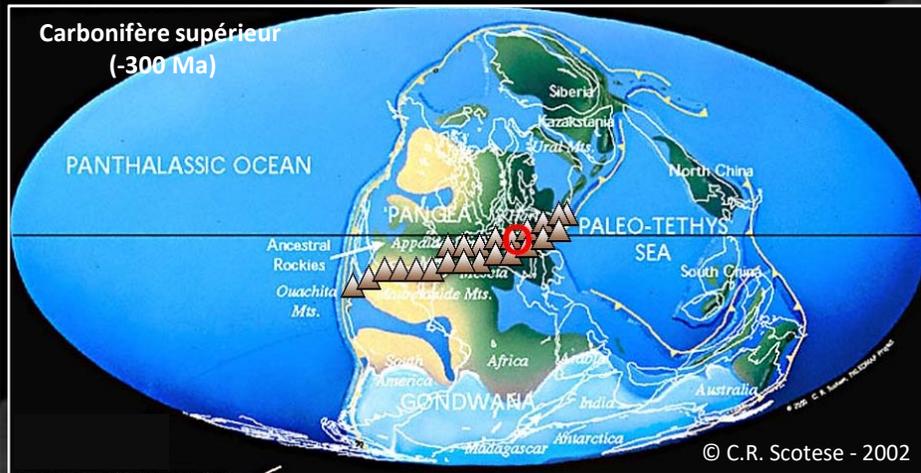
3^{ème} partie – La tectonique des
plaques sur d'autres planètes ?



Formation des Pyrénées

3 grandes phases d'édification :

- une **orogénèse Hercynienne** (Dévonien à Permien) avec mise en place des Pyrénées « hercyniennes » érodées dès le Permien
- une **histoire Secondaire marine** dominée par l'ouverture de l'Océan Nord Atlantique (début du cycle Alpin)
- une **orogénèse Pyrénéenne ou Alpine** (de la fin du Crétacé au Miocène) avec mise en place des Pyrénées « récentes ou alpines » suite à la convergence puis à la collision de deux plaques continentales : les plaques Ibérique et Européenne



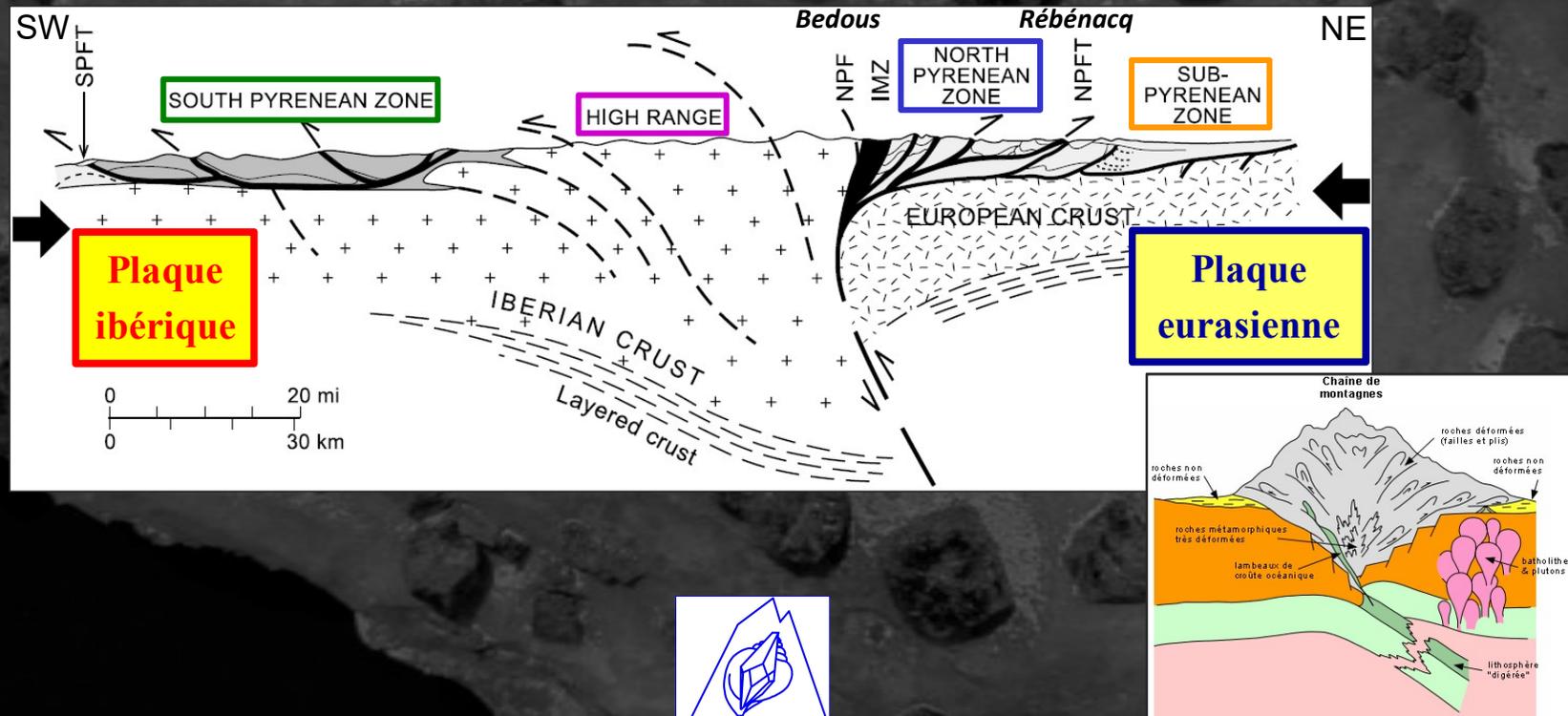
Du Nord au Sud, les Pyrénées se divisent en quatre grandes unités structurales (d'après J.J. Biteau & J. Canérot) :

- **la Zone Sous-Pyrénéenne ou avant-pays plissé nord**, formée des deux sous-bassins d'Arzacq et du Comminges. Cette zone est bordée au sud par le Front de Chevauchement Nord-Pyrénéen (NPFT sur la coupe).

- **la Zone Nord-Pyrénéenne**, caractérisée par la présence de chevauchements et de plis à vergence nord. Elle est bordée au sud par la Faille Nord-Pyrénéenne (NPF sur la coupe) qui la sépare de la haute chaîne. Intensément déformée, elle est aussi métamorphisée (IMZ sur la coupe) et injectée de lherzolites (roches d'origine très profonde, témoins du manteau supérieur mis en place à l'état solide dans la croûte terrestre).

- **la Haute Chaîne comprend les plus hauts sommets**. Elle porte à l'affleurement des formations paléozoïques qui ont été plissées pendant l'orogénèse hercynienne et reprises lors de la compression pyrénéo-alpine, ainsi que des séries permienes et néocrétacées en discordance.

- **la Zone Sud-Pyrénéenne**, présentant une couverture sédimentaire réduite, formée de Mésozoïque dans le bassin central de Graus-Tremp et de Paléogène dans le bassin de Jaca. Cette zone porte des nappes à vergence sud (Gavarnie ...). Elle est bordée au sud par le Chevauchement Frontal Sud-Pyrénéen (SPFT sur la coupe).

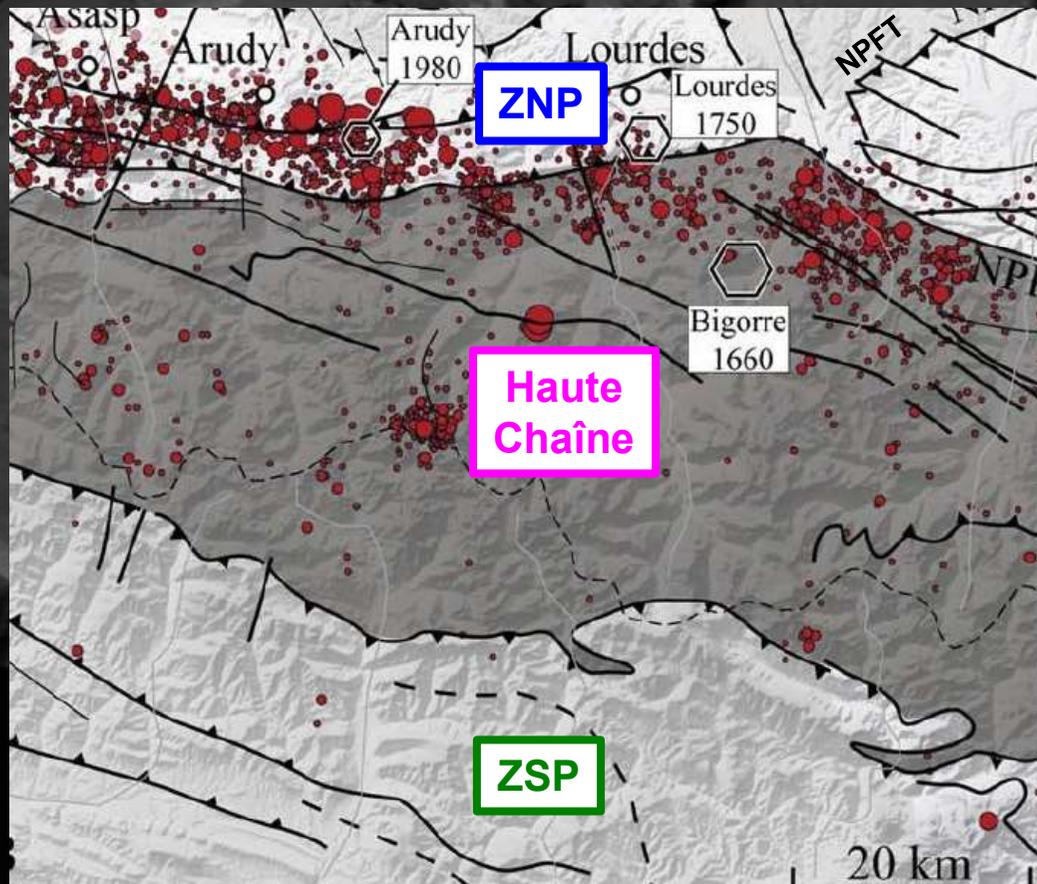


Activité sismique permanente dans les Pyrénées

résultant de la convergence (compression) entre les plaques ibérique et européenne avec une vitesse de déplacement annuel mmétrique → évènements d'amplitude modérée

Nombreux séismes lors des quatre derniers siècles (au moins !) : Arrette (13 août 1967 - magnitude comprise entre 5,3 et 5,7 sur l'échelle de Richter) et Arudy (29 février 1980 - magnitude 5,2 à 5,5)

Le + important séisme « historiques » fut celui de Bagnères-de-Bigorre (21 juin 1660 - magnitude *estimée* à 6)



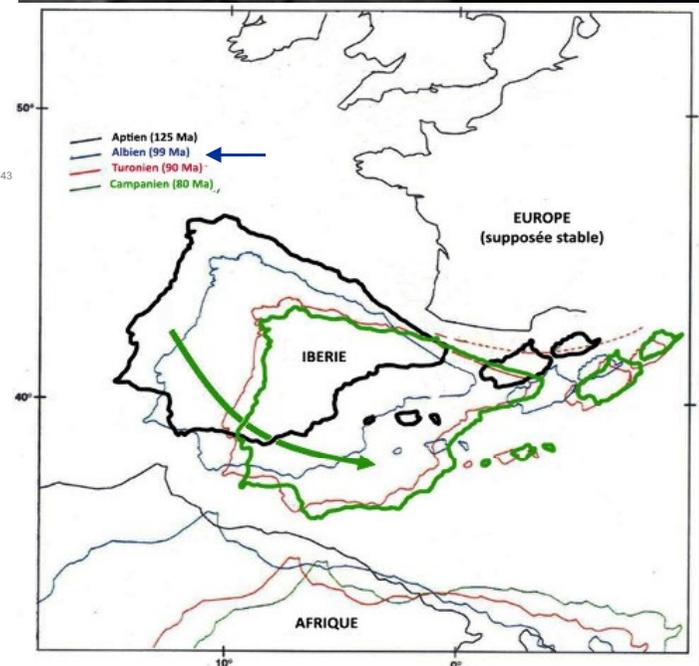
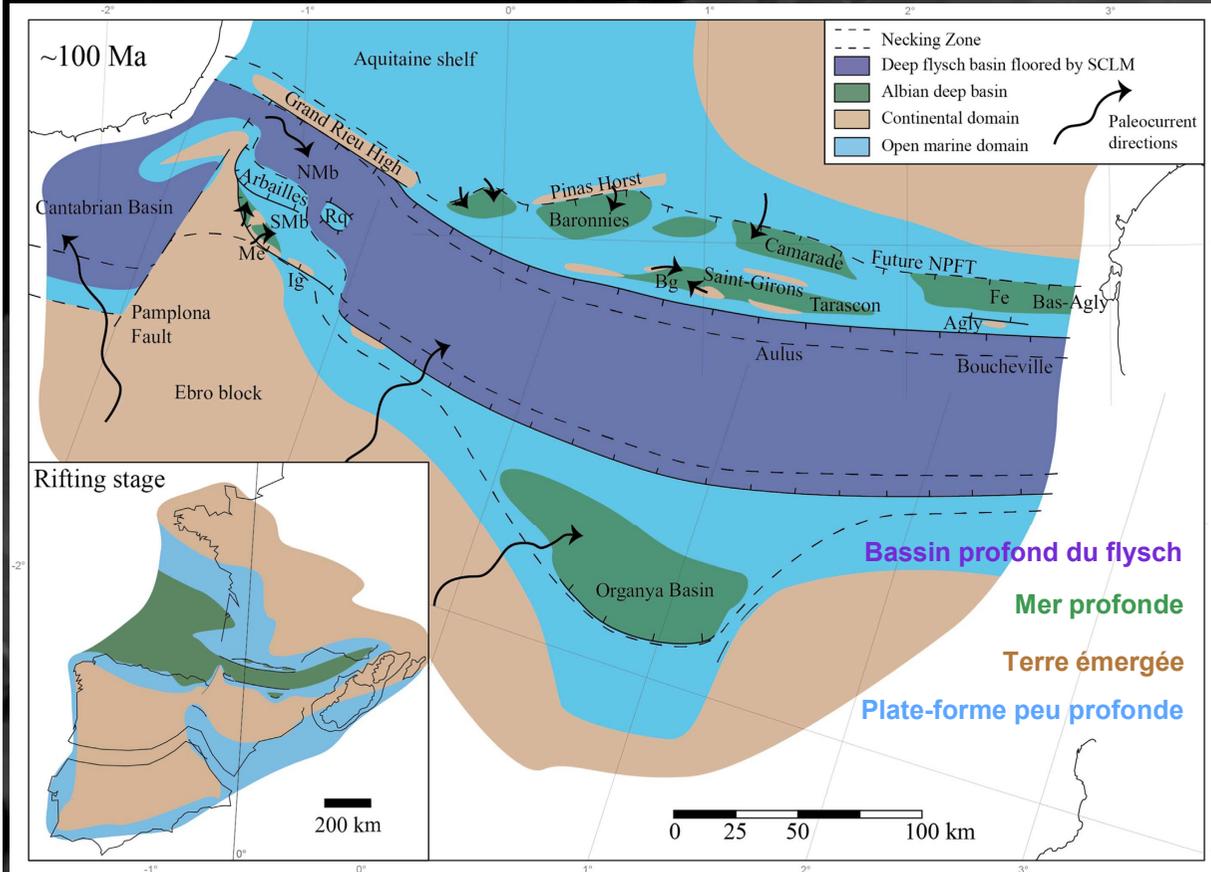
Carte de la sismicité dans les Pyrénées occidentales (P. Lacan et al. - 2012)

Les ronds rouges représentent des mesures et les hexagones des séismes « historiques »

Phénomènes magmatiques au Crétacé moyen

L'Aquitaine Sud il y a 100 millions d'années :

Carte paléogéographique à la limite Albien-Cénomanien ~100 Ma (A. Vacherat et al. - 2017)



Reconstitution du déplacement de l'Ibérie par rapport à l'Europe (supposée stable) entre l'Aptien et le Campanien

- A cette époque, la région a la forme d'un sillon de mer profonde, bordé par deux plate-formes rattachées respectivement aux plaques Europe (Nord) et Ibérie (Sud) :

le jeu sénestre des plaques Europe et Ibérie permet l'extension d'un bras de l'Océan Atlantique Nord qui commence à être comblé par des avalanches sous-marines venant des zones de plate-formes (flysch)

- Au Crétacé moyen-supérieur (entre -110 et -85 Ma) la croûte continentale est amincie et faillée permettant la remontée du manteau supérieur ainsi qu'à des laves en fusion de s'épandre en milieu sous-marin

La lherzolite

La lherzolite est une roche magmatique issue de la partie lithosphérique du manteau supérieur à une profondeur de 60 à 70 km, donc sous la croûte terrestre

C'est une roche **ultra-basique** de la famille des **péridotites** (roches très riches en Fe et en Mg) avec olivine dominante

Une roche de telle profondeur est rarement observable à l'affleurement, car sa remontée en surface nécessite un enchaînement de phénomènes géologiques complexes

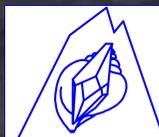


Cristaux d'olivine dans un fragment de basalte La Réunion (Wikipédia)

Localisation des massifs de lherzolite sur le versant Nord des Pyrénées (E.-J. Debroas – 2011)



Lherzolite serpentinisée
Moncaut - 64
(photo : G. Bonnetaud)

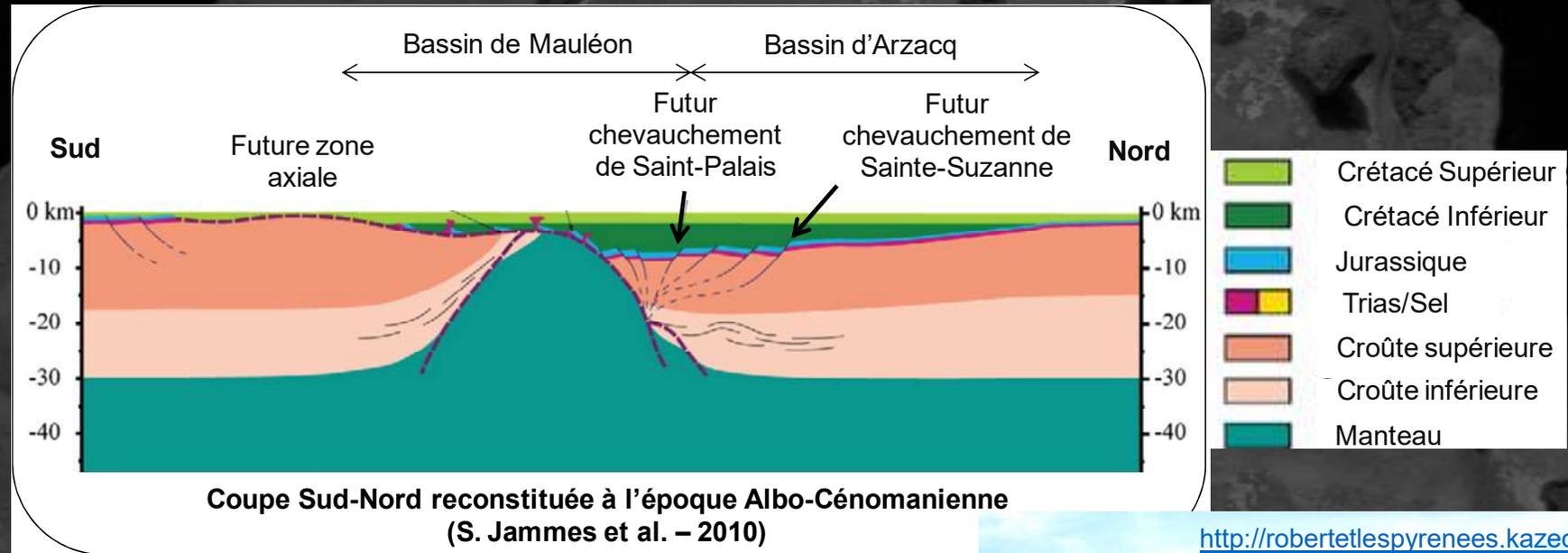


Bloc d'opicalcite = lherzolite serpentinisée + filons de dolomite/magnésite
Col d'Urdach - 64
(photo : R. Batté)

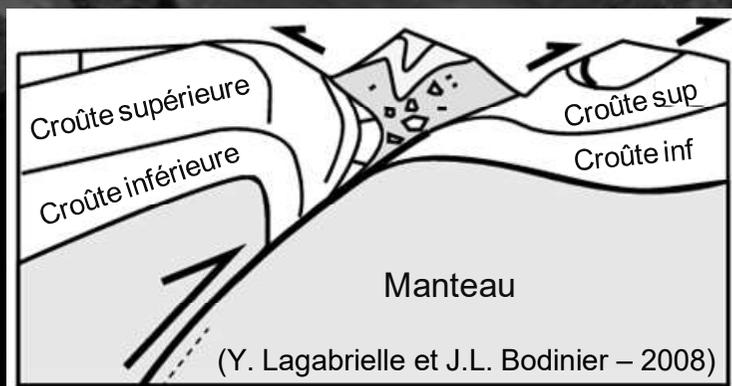


Les trois principaux stades de mise en place de la lherzolite correspondent à des événements géologiques en lien avec le mouvement des plaques :

- 1- Etirement et amincissement extrême de la croûte continentale, initiés dès le Trias-Jurassique (-220/-200 Ma)
- 2- Remontée et dénudation du manteau supérieur au fond de l'océan du Crétacé inférieur-moyen (à la faveur de grandes failles normales sub-horizontales dites de détachement) qui amincissent voire font disparaître la croûte.
Évènement daté de -108 à -103 Ma (Albien) pour la lherzolite du Col d'Urdach



- 3- Soulèvement et exhumation dus à la tectonique pyrénéenne (fin Crétacé à début Tertiaire)



La serpentinisation ... créatrice de Vie ?

1- Serpentinisation : Transformation en serpentine de minéraux ferromagnésiens (en particulier olivine) dans les péridotites transformées en serpentine



2- Synthèse Sabatier/Fischer-Tropsch :



Cette réaction se produit au niveau des systèmes hydrothermaux océaniques

3- Les systèmes hydrothermaux :

- sont également le lieu d'une **synthèse de formaldéhyde (CH₂O)** par oxydation de méthane ou de CO₂ Le formaldéhyde est un précurseur de la synthèse prébiotique d'acides aminés = « briques » des protéines et de la synthèse de bases azotées → ARN, ADN
 - contiennent de l'ammoniaque (NH₃) ainsi que du cyanure d'hydrogène (HCN)
→ synthèse d'oligomères azotés (**réaction de Strecker**)
→ hydrolyse de ces oligomères conduit à la formation de nouvelles molécules azotées utiles au vivant (bases azotées, acides aminés)

La serpentinisation favorise la synthèse de composés organiques par réactions de type Fischer-Tropsch

Les systèmes hydrothermaux sont également le lieu d'une synthèse de précurseurs d'acides aminés et de la synthèse de bases azotées

La structure en feuillets des minéraux issus de la serpentinisation ainsi que leur capacité à adsorber des nucléotides favorisent ces réactions et leur confinement/protection

→ environnement favorable à l'émergence de la vie sur Terre

Roches effusives et intrusives

On trouve près d'Ogeu un exemple de volcanisme sous-marin avec des coulées de laves en tubes et en coussins

En se solidifiant, elles donnent des **basaltes** qui sont des **roches effusives basiques**
(avec refroidissement très rapide au contact de l'air ou de l'eau)

roche basique = sous-saturée
en silice avec une teneur entre
45 % et 52 % de SiO_2

Les formes résultent de la nature sous-marine des épanchements :
la lave (700 à 1200 °C) entre en contact avec de l'eau de mer (à environ 5 °C)

« *Pillow lavas* » récents
Hawaï (Wikipédia)

Les premiers *pillow lavas* ont été
directement observés par lors de
l'opération franco- américaine FAMOUS
(1973-74)
sur l'axe de la dorsale médio-atlantique

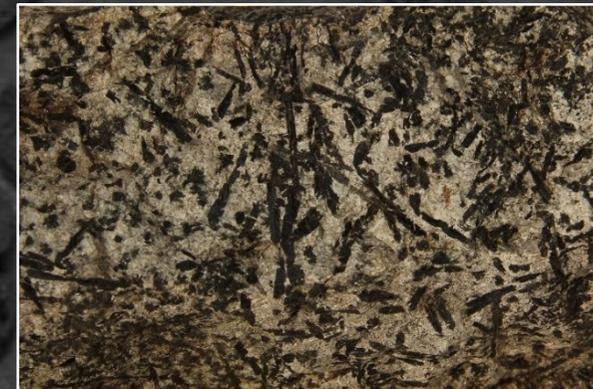


Basaltes en tubes
et en coussins
(photo : E. Legendre)

A qq km (Buzy) on trouve un filon de roche très particulière : la **teschénite**

Comme les basaltes c'est une roche basique mais **intrusive**
(produite par refroidissement lent du magma en profondeur)

(photo : G. Bonnetaud)



- Ce sont 2 manifestations des événements magmatiques qui ont affecté la région il y a environ 100 Ma
 - Ces événements sont à mettre sur le compte de l'amincissement de la croûte continentale
- remontée du manteau supérieur → transit de magmas alcalins par failles à travers le flysch (sédiments)
avec d'abord des roches **effusives** (coulées de basalte) datées Albien supérieur/Cénomanién inférieur
puis des roches **intrusives** (filons de teschénite)

Le Bager d'Arudy



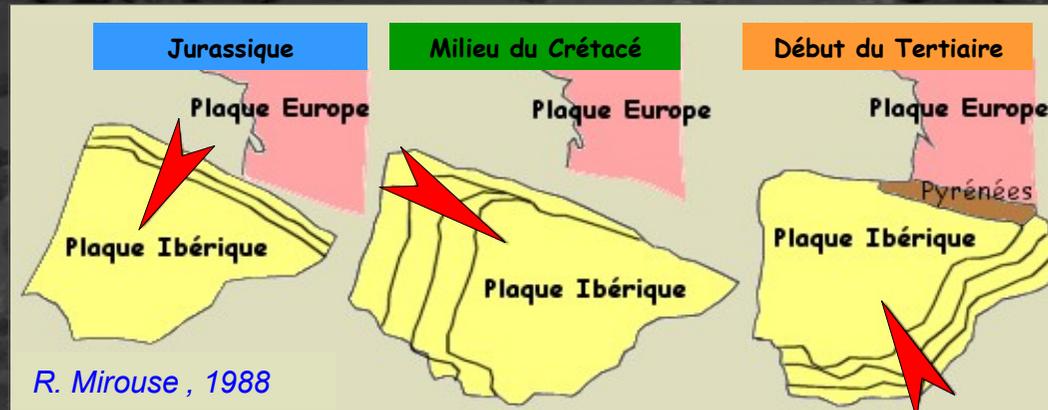
Coulée volcanique (lave en coussins)
(photo : R. Batté)

- Méga pillow-lava à prismes de refroidissement orientés vers le coeur de la structure
- Sous ce pillow-lava on observe les prismes d'un autre épisode volcanique
(photo : G. Bonnetaud)



En résumé

Les Pyrénées « alpines » se sont formées du Crétacé terminal au Miocène suite à la convergence puis à la collision de deux plaques continentales : les plaques Ibérique et Européenne



Avant cela, au Crétacé moyen (environ 100 Ma), le jeu des plaques Europe et Ibérie avait permis l'extension d'un bras de l'Océan Atlantique Nord, qui a commencé à être comblé par des produits d'érosion venant des zones de plate-formes (dépôt du flysch noir Albo-Cénomaniens)

En conséquence, la croûte continentale s'est trouvée amincie et faillée, ce qui a permis localement la remontée du manteau supérieur directement au fond de l'eau (→ **serpentinisation**)

Cet épisode s'est accompagné de remontées de magmas alcalins, ayant pu transiter par des failles à travers le flysch qui se déposait. Suivant le mode de remontée et de refroidissement de ces magmas se sont formés des basaltes sous-marins (à Ogeu – mode effusif) et des teschénites (à Buzy – mode intrusif)

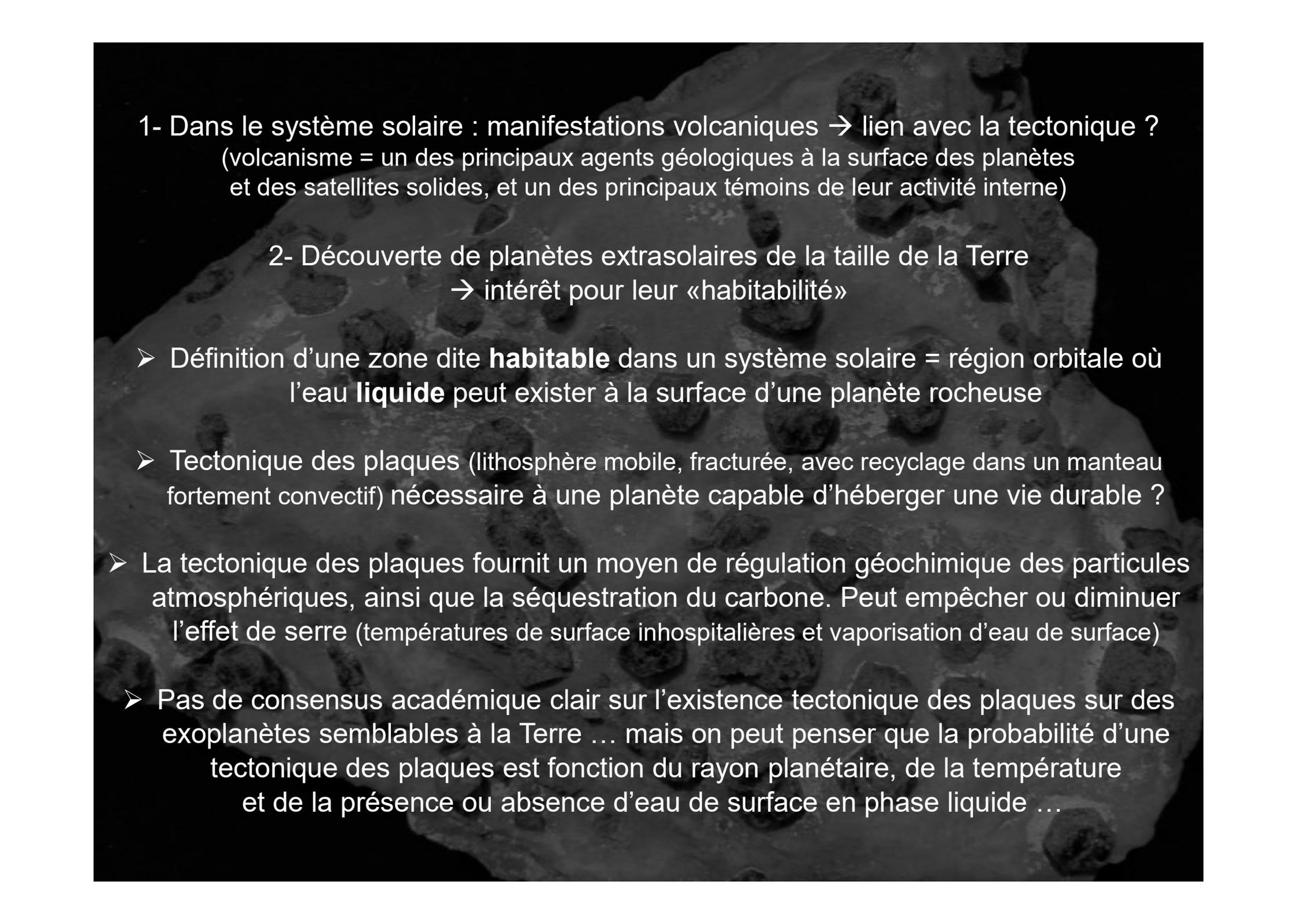


1^{ère} partie - La tectonique des plaques

**2^{ème} partie – Formation des Pyrénées
et phénomènes magmatiques
au Crétacé moyen**

**3^{ème} partie – La tectonique des
plaques sur d'autres planètes ?**





1- Dans le système solaire : manifestations volcaniques → lien avec la tectonique ?
(volcanisme = un des principaux agents géologiques à la surface des planètes et des satellites solides, et un des principaux témoins de leur activité interne)

2- Découverte de planètes extrasolaires de la taille de la Terre
→ intérêt pour leur «habitabilité»

- Définition d'une zone dite **habitable** dans un système solaire = région orbitale où l'eau **liquide** peut exister à la surface d'une planète rocheuse
- Tectonique des plaques (lithosphère mobile, fracturée, avec recyclage dans un manteau fortement convectif) nécessaire à une planète capable d'héberger une vie durable ?
- La tectonique des plaques fournit un moyen de régulation géochimique des particules atmosphériques, ainsi que la séquestration du carbone. Peut empêcher ou diminuer l'effet de serre (températures de surface inhospitalières et vaporisation d'eau de surface)
- Pas de consensus académique clair sur l'existence tectonique des plaques sur des exoplanètes semblables à la Terre ... mais on peut penser que la probabilité d'une tectonique des plaques est fonction du rayon planétaire, de la température et de la présence ou absence d'eau de surface en phase liquide ...

Hyp. de base : une planète avec tectonique est semblable à la Terre donc « rocheuse » \neq gazeuse

→ différenciation en 3 zones concentriques (noyau de fer partiellement fondu, manteau silicaté convectif sur des durées géologiques, lithosphère silicatée relativement froide et cassante)

→ 3 régimes géodynamiques possibles :

- Tectonique des plaques

Mécanisme : manteau ayant une force motrice > limite d'élasticité de la lithosphère fragile ce qui la fracture en plusieurs plaques en mouvement relatif

La tectonique des plaques est une méthode efficace de transfert de chaleur de l'intérieur de la planète à la surface → **manifestation en surface de la convection**. Seul cas connu : la Terre !

- Couvercle stagnant

Un régime de couvercle stagnant se produit lorsque la force motrice du manteau ne dépasse pas la limite élastique lithosphérique, donc une seule plaque rigide continue recouvre le manteau. Les couvercles stagnants ne se développent que lorsque le contraste de viscosité entre la surface et l'intérieur planétaire dépasse environ quatre ordres de grandeur

Type de tectonique supposé le + courant dans le système solaire : Io, Lune, Mercure

- Tectonique épisodique

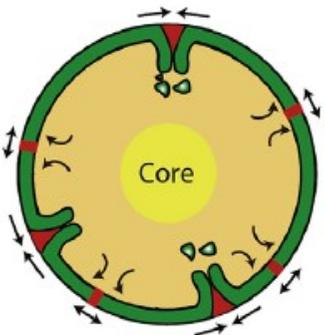
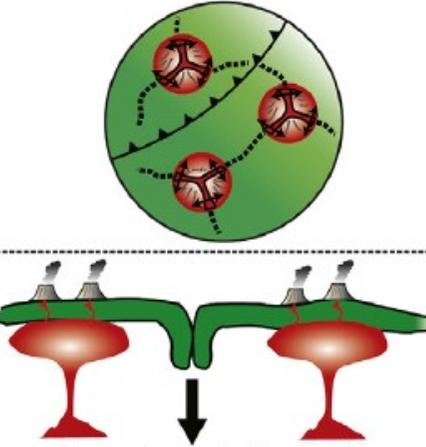
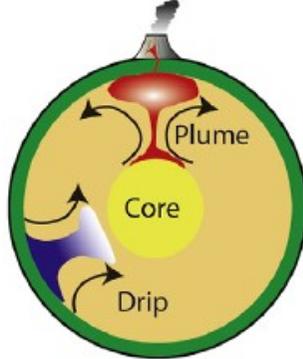
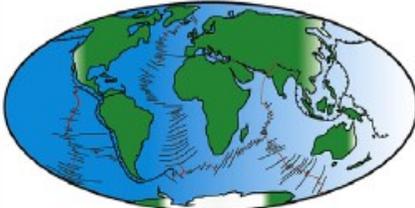
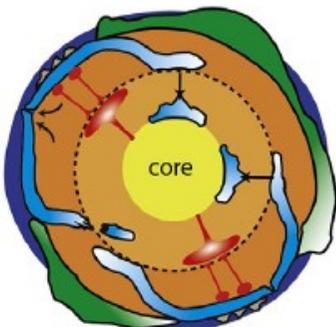
régime géodynamique mixte entre les 2 précédents → « couvercles » de surface immobiles pendant de longues périodes puis changement dans les conditions d'équilibre (affaiblissement de la lithosphère ? augmentation de la force motrice du manteau ?)

→ passage généralement catastrophique à la tectonique des plaques puis retour à un (pseudo) équilibre → couvercle stagnant

Cas de Vénus ? Mars ??

Régimes tectoniques des planètes -

S. Maruyama et al. - 2018

Io Magma Ocean	Modern Venus & Earth	Modern Moon & Mars
 <p data-bbox="201 734 560 774">Magma ocean tectonics</p>	 <p data-bbox="660 750 974 782">Pseudo plate tectonics</p>	 <p data-bbox="1041 734 1444 774">Stagnant-lid/Drip tectonics</p>
	<p data-bbox="761 813 862 853">Earth</p>   <p data-bbox="683 1428 952 1468">Plate tectonics</p>	

Mars et Vénus actuellement sous régime de couvercle stagnant (dans lequel la convection du manteau est causée par montée et descente de panaches chauds sous un couvercle rigide)
 Tecto. épisodique sur Vénus ?
 Drip tectonics = tecto. en goutte

Régime de tectonique des plaques active dominant sur Terre actuellement

Activité volcanique terminée sur Mars, Lune

Relation taille d'une planète & volcanisme -

ENS Lyon - 2012

1. Les "gros corps" (Terre et Vénus, $D = 12000$ km) ont un volcanisme encore actif
2. Sur Mars (taille moyenne, $D = 7000$ km) le volcanisme est éteint depuis « seulement » qq dizaines de Ma
3. Sur les "petits corps" (Lune et Mercure, $D = 4-5000$ km) le volcanisme est éteint depuis des Ga

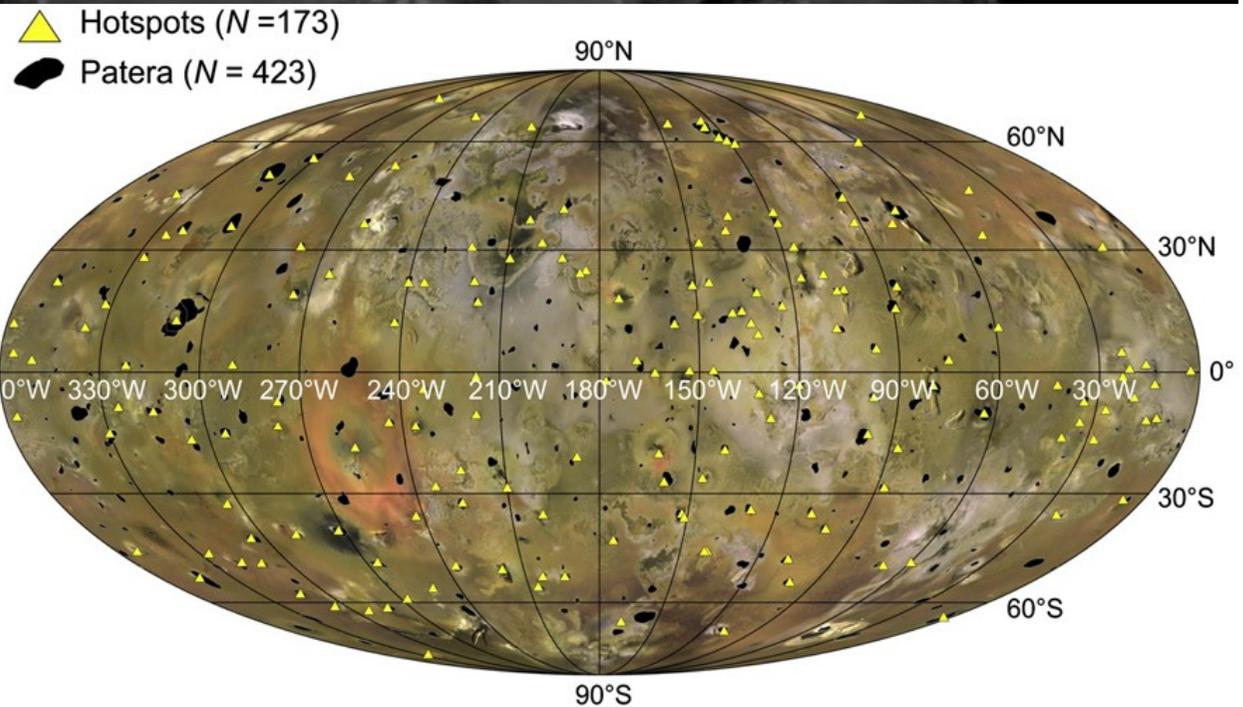
→ La durée du volcanisme semble donc dépendre de la taille

Energie interne d'une planète tellurique principalement fournie par la radioactivité naturelle
(manteau silicaté chaud)

Pas de raison de penser que la Lune et Mercure soient moins radioactifs que la Terre ou Vénus
(teneurs en U, Th et ^{40}K - en gr/t - des roches de ces planètes *a priori* voisines)

- Production de chaleur totale des planètes et des satellites proportionnelle à leur volume (donc à R^3)
 - Chaleur produite évacuée par la surface de la planète (donc proportionnelle à R^2)
 - Température interne de chaque planète déterminée par la "facilité" de l'évacuation de cette chaleur
- Plus le rapport volume (dans lequel se produit la chaleur) / surface (par où s'évacue la chaleur) est grand, plus la chaleur a des difficultés à s'évacuer
 - Rapport volume/surface est fct de $R^3 / R^2 = R$
- **Plus une planète est grosse, plus elle est chaude, donc volcaniquement active**
(Attention : radioactivité issue du manteau)
- Jusqu'à il y a -3 Ga, Mercure, Lune, Mars, Vénus et Terre étaient assez chauds pour être volcaniques.
 - Avec le temps, la radioactivité naturelle diminue → la température interne baisse
 - Vers -3 Ga, les températures internes de la Lune et de Mercure sont descendues sous la température critique permettant le volcanisme.
 - Mars a franchi ce seuil il y a qq dizaines de Ma
 - Sur Terre et Vénus, la température interne est encore largement supérieure à cette température critique → le volcanisme va encore durer des Ma !

Io (satellite de Jupiter)



Distribution globale des volcans sur Io - Hotspots volcaniques et paterae reportés sur une mosaïque Galileo-Voyager :
20% des paterae associées à des points chauds actifs, mais la majorité semble éteintes ou dormantes - Hamilton et al. - 2013

Une **patera** est une structure géologique.
Ce terme est utilisé en géologie planétaire pour désigner des édifices volcaniques, mais également pour des cratères différents de cratères d'impact classiques.

Sur Terre, on parle plutôt de caldeira

Source : Wikipédia

Io



[NASA/JPL/University of Arizona](#) mission Galileo
Droits réservés - © 2001

- En 1999 et 2000, Galileo a survolé 2 fois la région de *Tvashtar Catena* : 2 éruptions volcaniques non synchrones et distantes de 25 km entre nov. 1999 et février 2000, avec coulées et fontaines de laves actives
 - Les caméras de Galileo n'ont pas capté la couleur rouge-orangée de cette lave : la lave, trop lumineuse, a saturé les détecteurs
 - Les données infra-rouge ont permis de mesurer la température de ces laves, soit plus de 1200°C. En fonction de cette très haute température que la NASA a colorisé ces coulées en jaune-orangé comme les plus chaudes coulées d'Hawaii

Source : ENS Lyon - 2012

Io

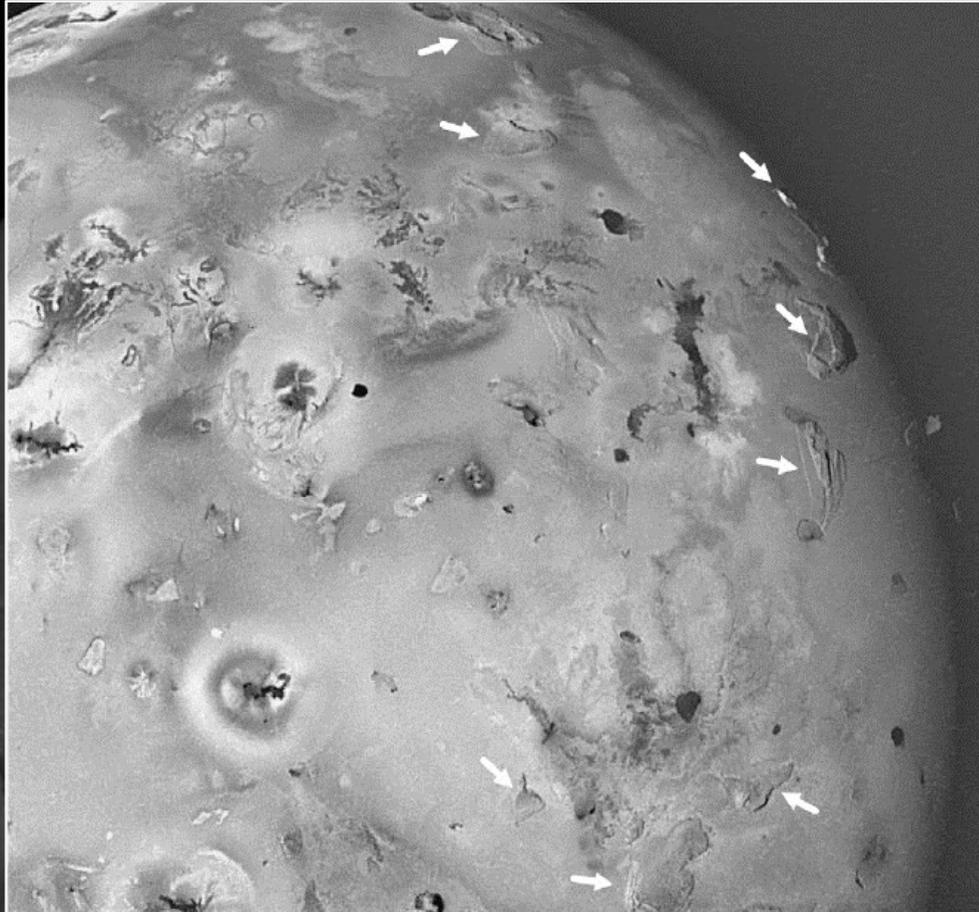


Image Galileo régionale de Io (20 S à 65 N et 90 W à 175 W) :
Montagnes individuelles (indiquées par flèches)
→ mécanisme de formation différent de sur Terre
(chaînes de montagnes)

Source : NASA Planetary Photojournal

Io a la taille, la masse et une densité légèrement supérieures à celles de la Lune
→ Io devrait être volcaniquement inactive
... Io est le plus actif et le plus volcanique des corps du système solaire !

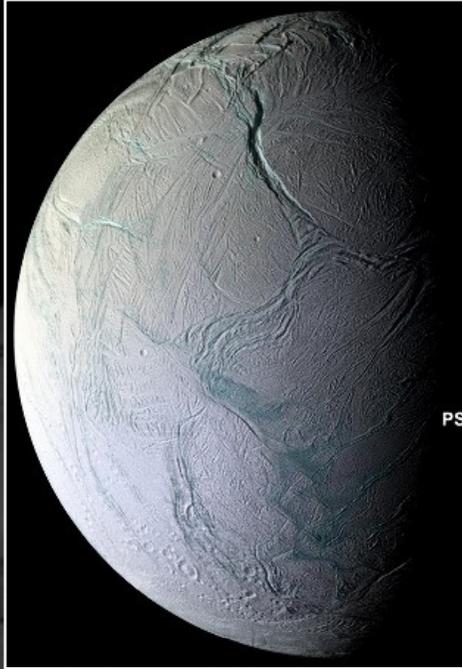
Io est très près (~35 000 km) de la planète géante Jupiter (317 fois la masse de la Terre)

→ **fortes marées** (déformation)

→ Présence de 3 autres gros satellites (Europe, Ganymède et Callisto) fait que l'orbite de Io est périodiquement déformée, sa vitesse de révolution modifiée

→ Frictions considérables donc chaleur à l'origine du volcanisme observé (effet >> celui de la radioactivité naturelle)

Encelade et le volcanisme des satellites de glace - ENS Lyon - 2012



PS

Encelade = 2^{ème} + petit (R = 250 km) des 7 satellites majeur de Saturne

- constitué d'un noyau ferro-silicaté recouvert d'un manteau de glace occupant + des 2/3 du volume du satellite
- Radioactivité naturelle des silicates, et surtout forces de marées (comme pour Io) réchauffent ce manteau glacé qui est animé de mouvements internes complexes → déformations de la surface

PS = position (approximative) du pôle Sud

[NASA/JPL/Space Science Institute](#)

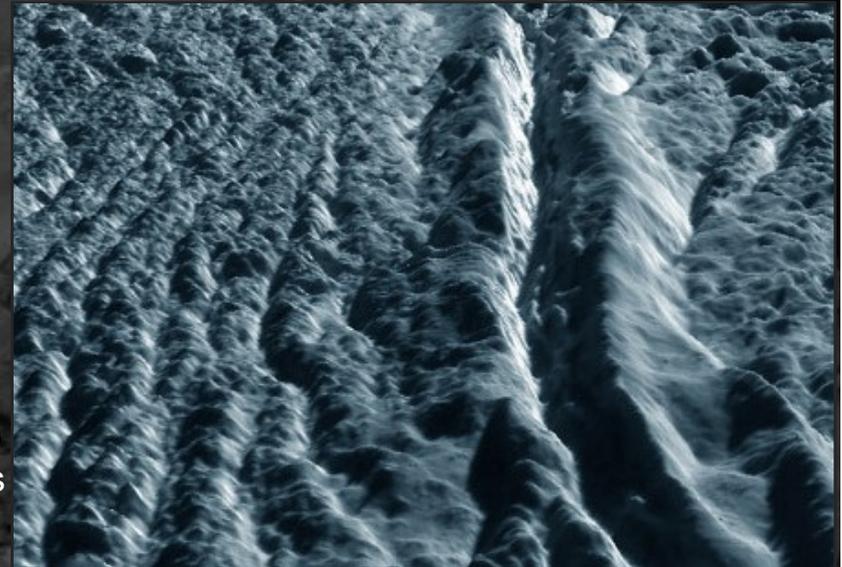
mission Cassini-Huyghens

Droits réservés - © 2008

Surface intensément déformée par des mouvements internes de la couche de glace & par des fissures nommées *sulci* (forte ressemblance avec le rift océanique d'une dorsale lente) d'où s'échappent des panaches de vapeur et d'aérosols glacés s'élevant à plusieurs centaines de km au-dessus de la surface

Radioactivité des silicates sous-jacents et marées peuvent suffisamment réchauffer la glace pour la fondre localement et donner de l'eau liquide. Si celle-ci gagne la surface → **cryovolcanisme** (coulées de glace et jets de vapeur condensant immédiatement en μ -cristaux de glace)

Rque : il faut une température > à 1000°C pour fondre des silicates, mais 0°C suffit pour fondre de la glace d'H₂O, et -200°C pour fondre de la glace d'azote ...



[NASA/JPL/Space Science Institute/Universities Space Research Association/Lunar & Planetary Institute](#)

mission Cassini-Huyghens

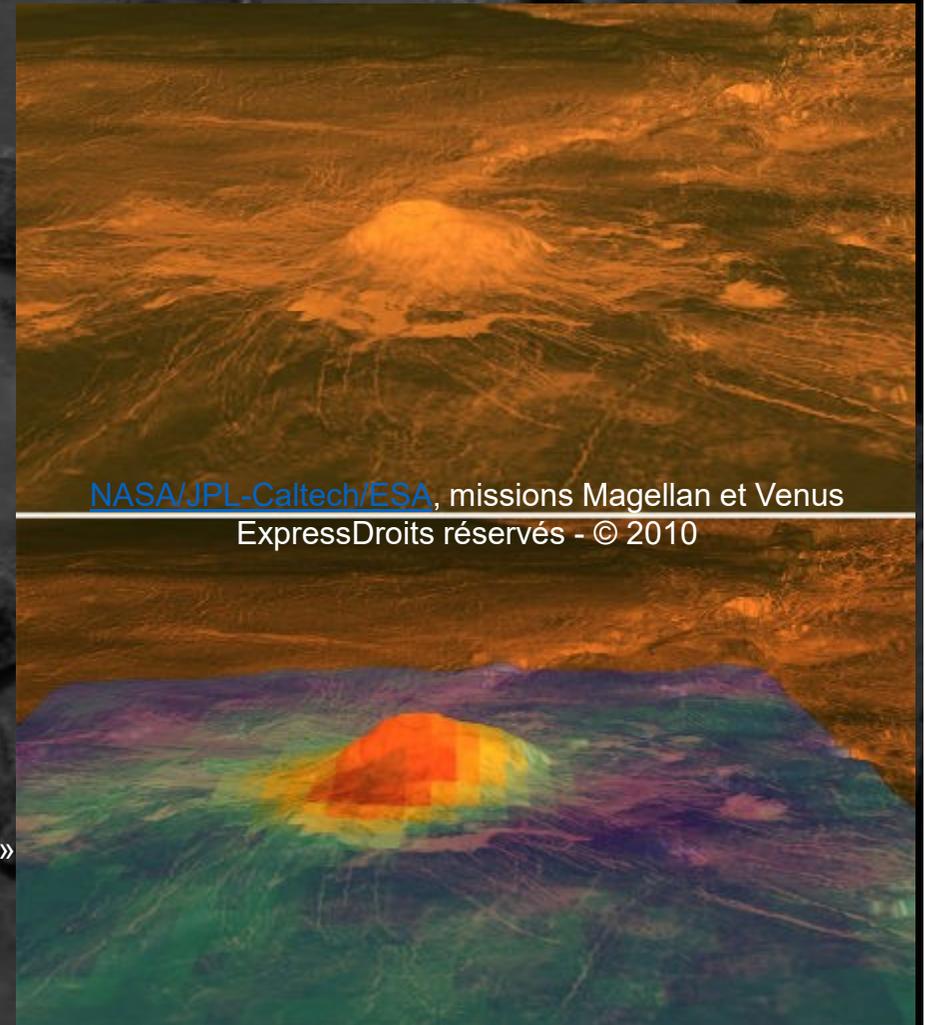
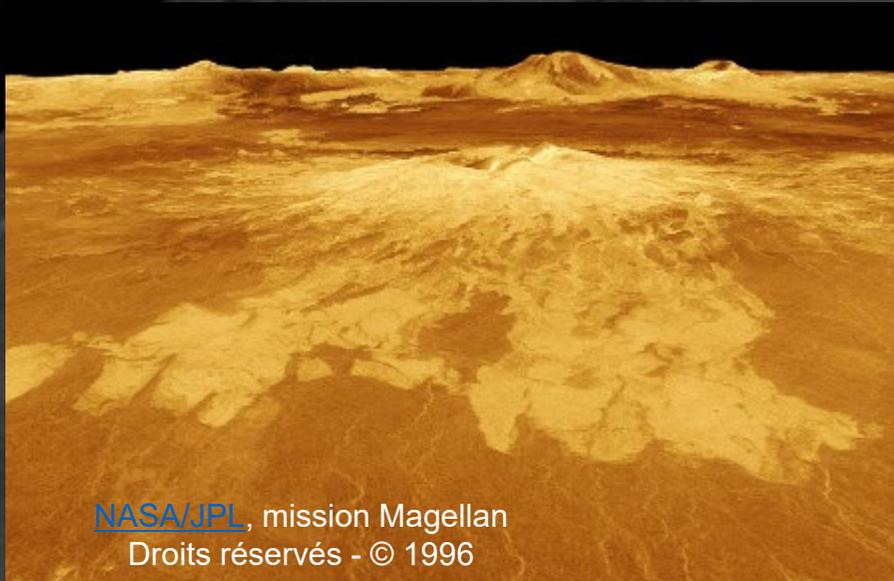
Droits réservés - © 2009

Vénus - ENS Lyon - 2012

- Totalité de la surface de Vénus constituée de volcans, coulées de lave ... mais les volcans ne présentent **aucun** alignement (type dorsales ou subduction) → Vénus = champ de points chauds ou de fractures locales (pas de tectonique des plaques active)

- Pas de cratères de météorites → volcanisme jeune/actif

Exemple : Sapas Mons - volcan de type hawaiien (400 km de diamètre pour 1500 m de hauteur)



Double image : volcan Idunn Mons
(200 km de diamètre pour 2500 m de hauteur)

- haut = image radar classique sonde NASA Magellan
- bas = superposition des données Venus Express avec code couleur classique (vert-bleu-violet = temp. « normales »
jaune-orange-rouge = températures anormalement élevées)
 - zone chaude centrée sur le sommet
 - volcan encore actif

Vénus - ENS Lyon - 2001

Terre et Vénus très proches (en taille et en composition) mais sur Vénus la tectonique des plaques est absente
→ manifestations très différentes de la convection ...

L'intensité de la convection dans un corps donné est fonction :

- de l'énergie thermique à évacuer, c'est le moteur de la convection
- de la capacité des matériaux à se déformer et à s'écouler (rhéologie)

- Terre & Vénus semblables en taille & en chimie → quantités de chaleur probablement comparables à évacuer
- Rhéologie : comme les 2 planètes sont très proches chimiquement, la rhéologie des manteaux convectifs doit être également très proche ...

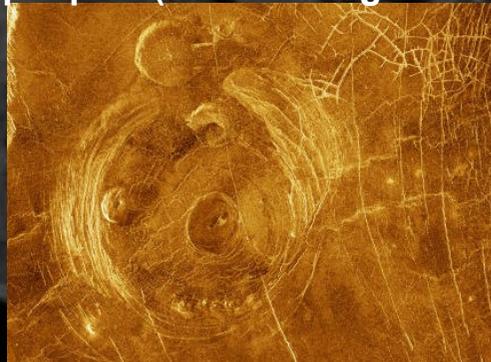
**Mais sur Terre, de l'eau est recyclée dans le manteau (injectée par la subduction) et change sa rhéologie (diminution de la viscosité pour découplage entre lithosphère et asthénosphère)
→ ça permet la convection et donc la tectonique des plaques. Pas sur Vénus !**

De plus sur Vénus l'absence d'eau fait que la surface froide (par rapport à l'intérieur de la planète) forme un couvercle rigide. Seuls les panaches arrivent à "percer" la lithosphère visqueuse de Vénus → volcans

- Autre explication (D. Bercovici – 2014) : Sur Terre, les contraintes mécaniques créent des dommages → sur le long terme ces dommages s'accumulent → des fractures restent ouvertes et créent des frontières de plaques (il faut des Ga pour former des plaques)

→ La croûte de Vénus (+ chaude de plusieurs centaines de °C) se « répare » trop vite pour initier une tectonique des plaques (les dommages n'ont pas le temps de s'accumuler !)

[NASA/JPL](#), mission Magellan, modifié
Droits réservés - © 1996



Failles circulaires concentriques appelées *coronae* entourant un dôme et/ou une dépression
- diamètre de ces *coronae* de 100 à 2600 km
- *coronae* classiquement interprétées comme résultant de l'ascension de diapirs mantelliques (à l'origine du bombement) affaissés après leur refroidissement

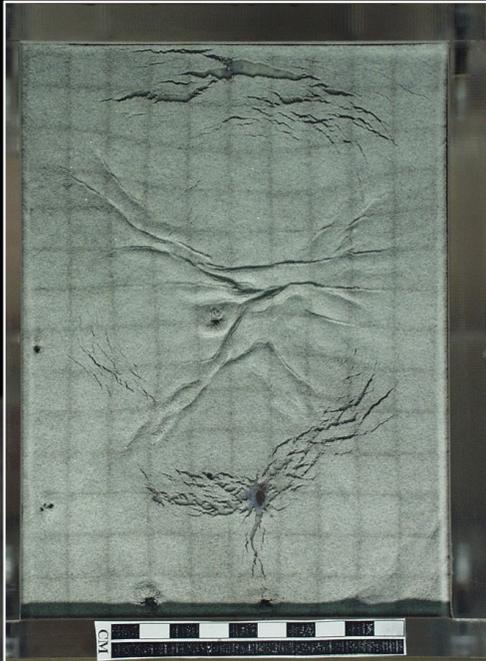
Vénus – A. Cruden (U. Toronto)

Venus Tectonics
Laboratory "drip experiment"

Side View



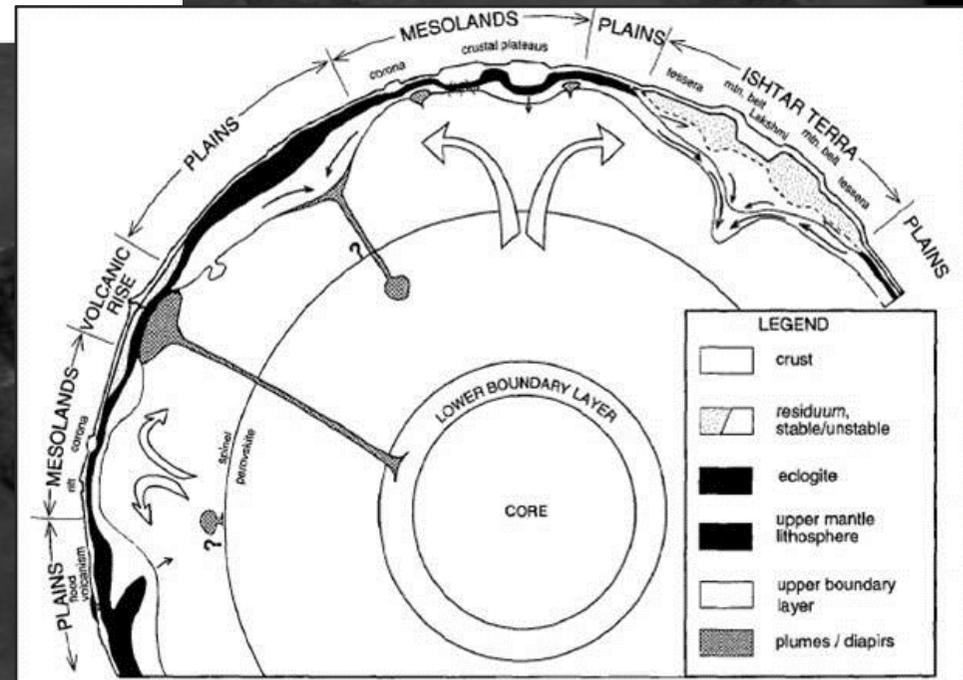
Top View



Modélisation en laboratoire de la réponse des déformations de la croûte en réponse à la dynamique unique à chaque planète

Cas de Vénus

Vénus est considérée comme une planète avec une seule plaque (couvercle stagnant)
→ ces caractéristiques résultent de diverses interactions avec le flux dans le manteau et la croûte



Vénus – A. Cruden (U. Toronto)



Figures de compression complexe (tessera)
et d'extension (fissures ou chasma) créées
en surface par les interactions
flux/manteau/croûte

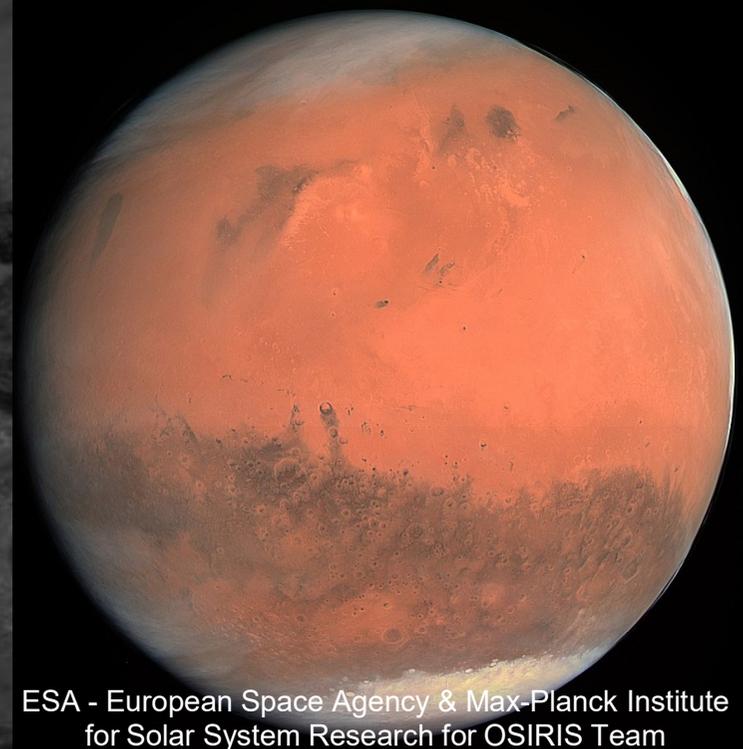
Comparer avec l'image de Vénus



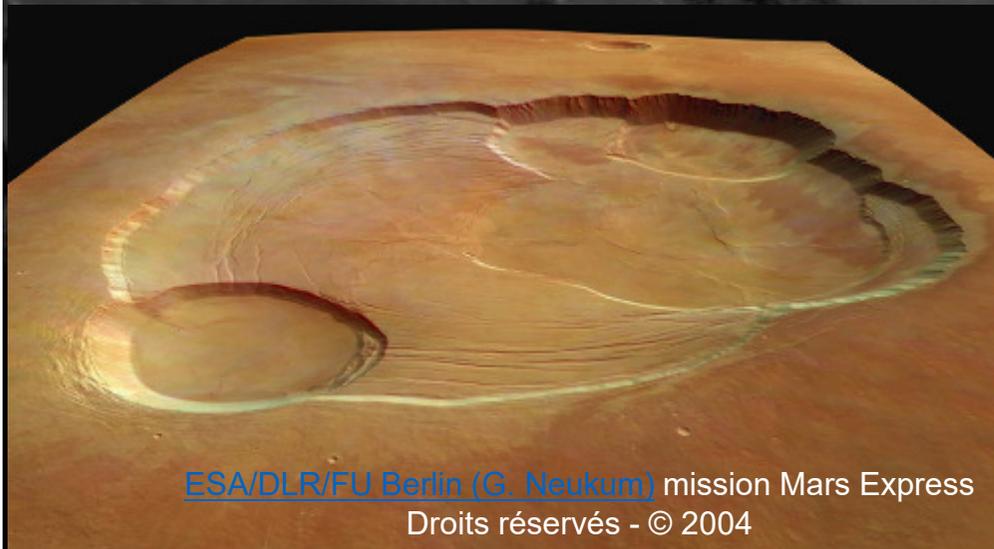
Mars - ENS Lyon - 2012

- volcanisme semble éteint depuis qq dizaines de Ma
- derniers édifices = grands volcans isolés (points chauds ?) de type volcan bouclier
 - plus vieux = grandes plaines de laves
- aucun indice morphologique de dorsales ou de subduction

La planète Mars par la caméra OSIRIS
de la sonde spatiale Rosetta



ESA - European Space Agency & Max-Planck Institute
for Solar System Research for OSIRIS Team



Sommet d' Olympus Mons
(+ grand volcan du système solaire - 600 km de D
pour > 20 km de hauteur) avec au moins 6 caldeiras
emboîtées = cratères dus à la vidange de réservoir(s)
de lave profond(s) et à l'effondrement du toit

[ESA/DLR/FU Berlin \(G. Neukum\)](#) mission Mars Express
Droits réservés - © 2004

Mars



Après 128 jours de mission SEIS a capté distinctement son *premier séisme martien* le 6 avril 2019 : équivalent d'un petit séisme (magnitude 1 sur l'échelle de Richter)

Le sismomètre français SEIS posé sous une cloche à côté de la sonde InSight de la Nasa

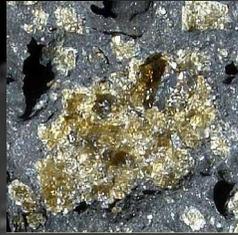
→ a réussi à enregistrer + de 10 tremblements de Mars (activité sismique !)

→ informations sur la structure interne de la planète

(Source : NASA/JPL-Caltech)

La serpentinisation ... créatrice de Vie ... sur Mars ?

1- Serpentinisation



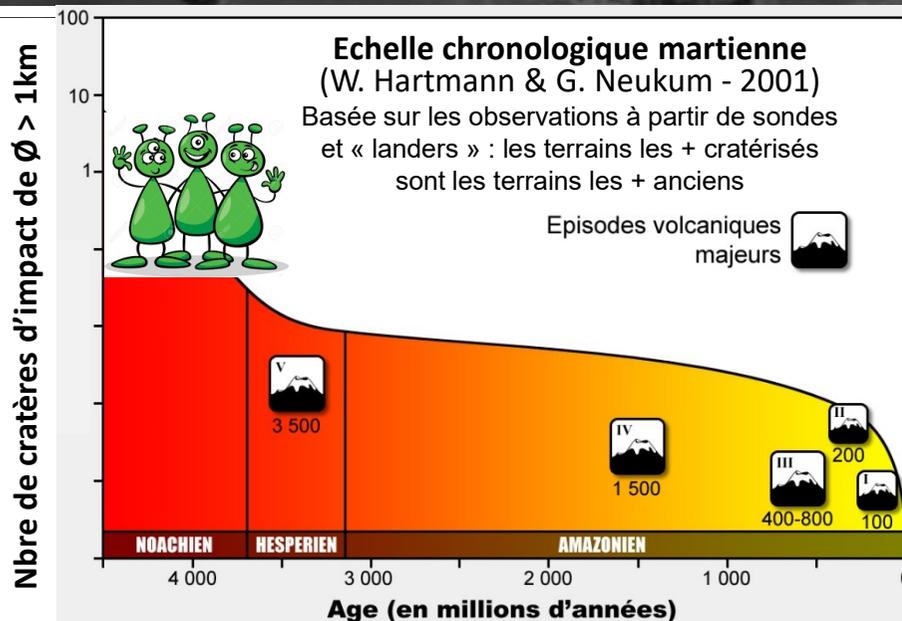
2- Synthèse Sabatier/Fischer-Tropsch

3- Synthèse de formaldéhyde ... Strecker ... bases azotées ...
... ARN-ADN ... Vie

- Olivine présente en abondance dans de nombreuses météorites ainsi que sur d'autres corps planétaires
- Olivines extraterrestres souvent altérées (notamment par hydratation) → **serpentinisation**

Rq : serpentine = le minéral hydraté le + abondant dans ses chondrites carbonées (considérées les + primitives et les + proches de la composition de la nébuleuse solaire)

- Météorite martienne Nakhlite présente des veines de serpentine
- Serpentine identifiée à la surface de Mars par la sonde *Mars Reconnaissance Orbiter* dans des terrains datés du Noachien (4,1 à 3,7 Ga) pendant lequel de l'eau liquide était présente en surface
→ **Serpentinisation, eau liquide : environnement favorable à l'émergence d'une vie martienne !?! avec une tectonique « couvercle stable »**
→ **Egalement applicable à d'autres planètes !?!**



Source : ENS Lyon - 2014

La serpentinisation ... créatrice de sel ... sur Mars ?

Hypothèse traditionnelle (sur Terre !): les dépôts salifères résultent de l'évaporation de faibles tranches d'eau marine ou lacustre → dépôt d'évaaporites



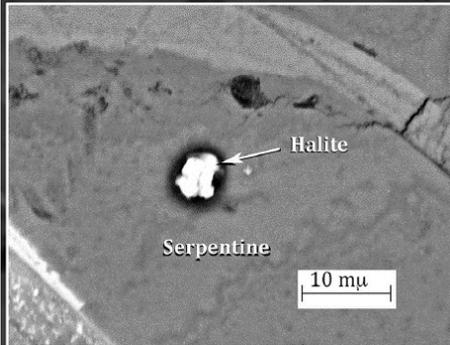
1- La serpentinisation consomme de grandes quantités d'eau pure
→ concentration des sels de l'eau de mer dans la saumure résiduelle

2- La précipitation de serpentine provoque une augmentation de volume de 40 %
forte pression de cristallisation qui expulse la saumure

3- Formation de déshydratites

Sources: E. Gaucher et al. – 2018, V. Scribano et al. – 2018

Inclusion de saumure avec agrégat de cristaux d'halite cubique dans une serpentine (Sicile)



- Dépôts correspondant à des matériaux contenant du chlorure identifiés et cartographiés en surface (Mars Odyssey - 2001)
- Dépôts petits (25 km²) mais largement répandus, dans des terrains d'âge Noachien moyen à terminal et Hespérien basal

Source : M.M. Osterloo et al. – 2008 (Nature)

Alors ...

Lune - ENS Lyon - 2012

- volcanisme semble éteint depuis 2-3 Ga
- Lave très fluide → coulées horizontales
→ pas d'édifices volcaniques



[NASA - Apollo 17](#) Droits réservés - © 1972

Vue globale de la Lune :
« continents » anorthositiques (en clair)
et « mers » basaltiques (en sombre)

Bord oriental de la Mer de la Sérénité

- La moitié droite de l'image montre les « continents » formés de la croûte primordiale anorthositique
 - Très nombreux cratères d'impacts
→ ces continents ont plus de 3,9 Ga
- La moitié gauche est constituée d'une vaste plaine basaltique lisse, faiblement cratérisée (âge ~3,5 Ga)

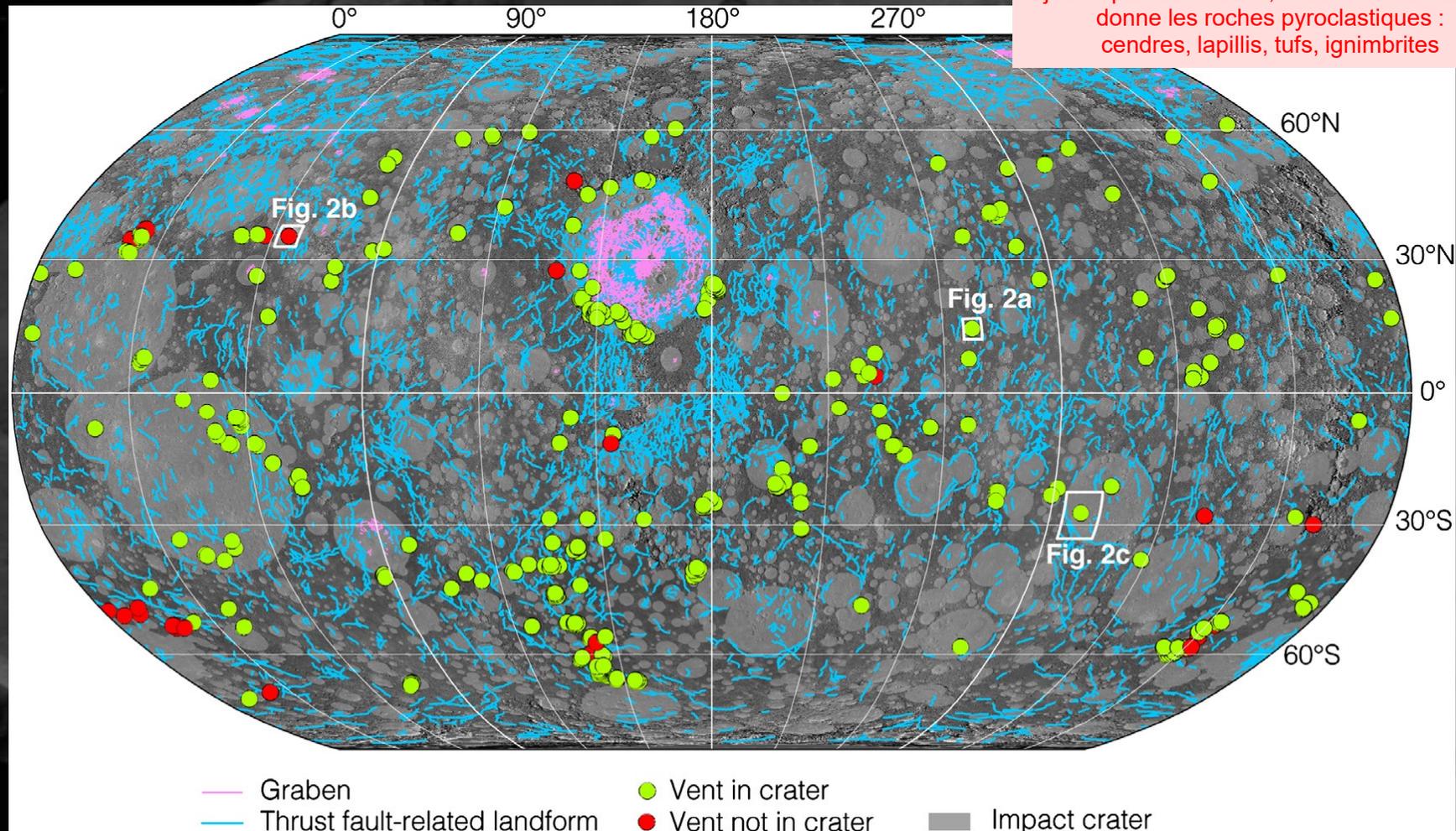


[NASA/Lunar and Planetary Institute](#) mission Apollo 17
Droits réservés - © 1972

Répartition spatiale de l'activité pyroclastique sur Mercure et la relation avec les faiblesses lithosphériques

C. Klimczak et al. - 2018

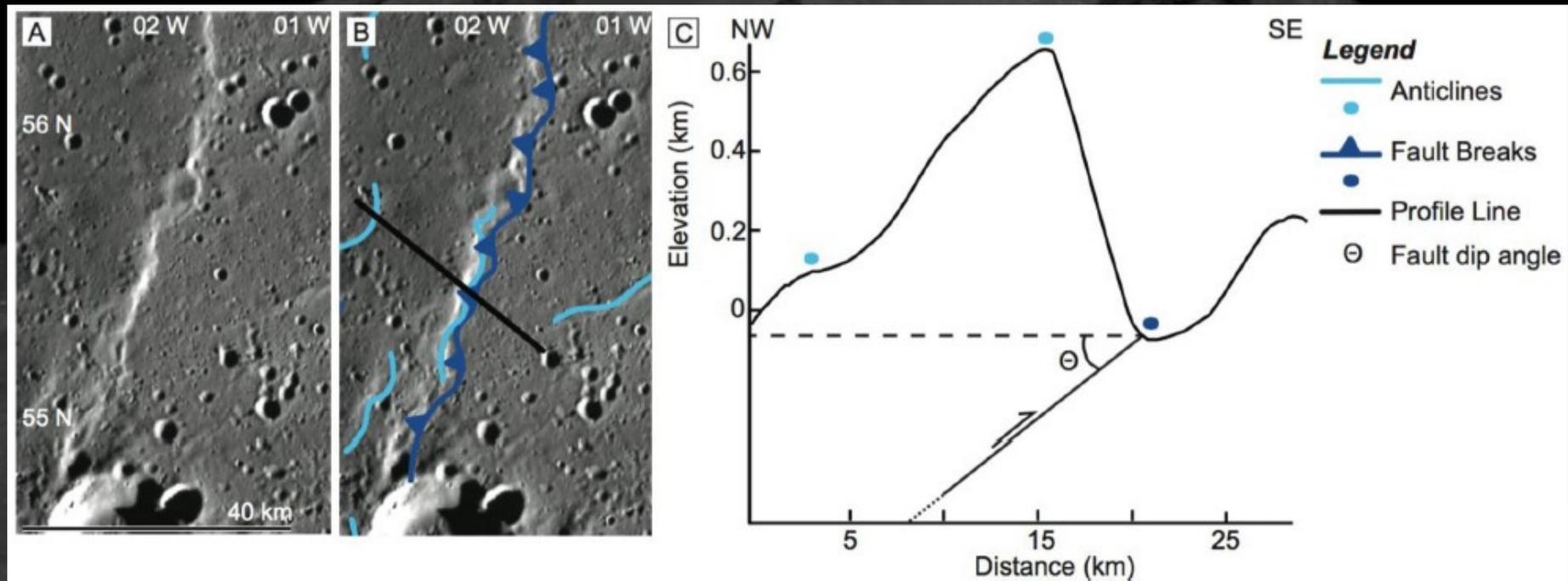
S'applique aux débris de roches magmatiques éjectés par les volcans, et dont l'accumulation donne les roches pyroclastiques : cendres, lapillis, tufs, ignimbrites



Répartition globale des événements associés au volcanisme pyroclastique (points) des failles normales (roses) et des chevauchements (bleus) représenté sur une mosaïque mondiale d'images monochromes MESSENGER (proj. Robinson centrée à 180°) Les événements qui se produisent dans des cratères d'impact sont en vert ceux qui ne sont pas à l'intérieur d'un cratère d'impact sont en rouge

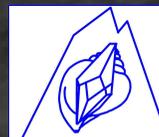
le volcanisme semble éteint depuis 2-3 Ga (ENS Lyon – 2012)

Figures tectoniques de raccourcissement dans les plaines de Mercure (1/2) - K.T. Crane & C. Klimczak – 2019

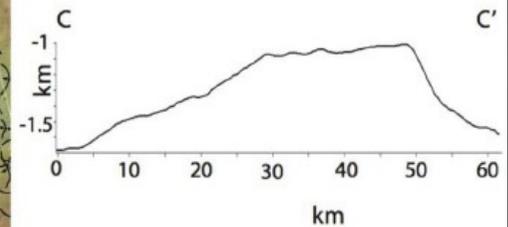
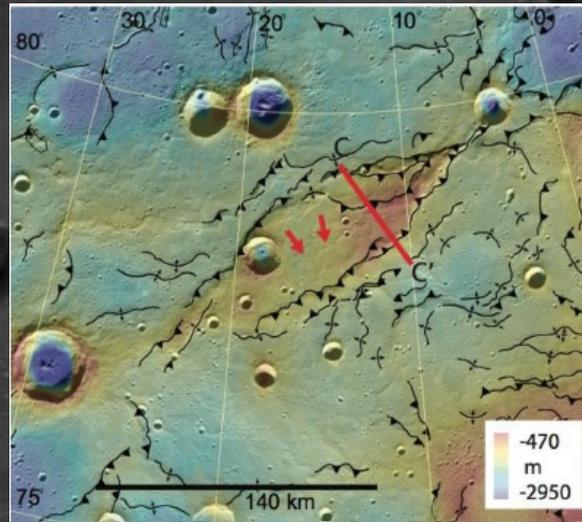
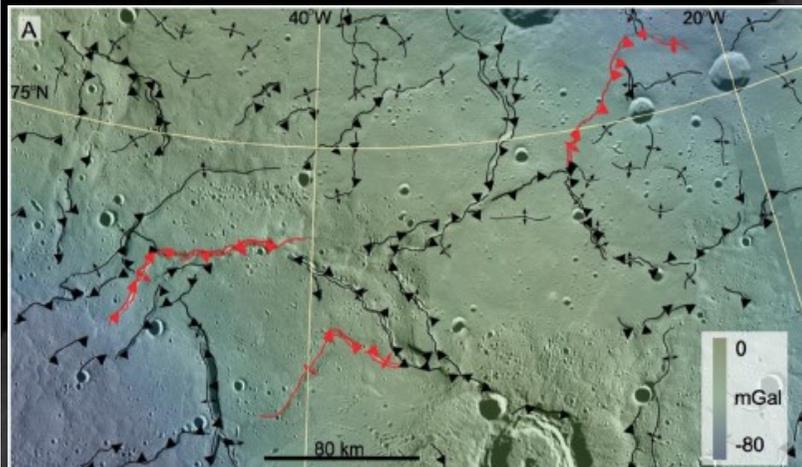


Exemple de cartographie de linéaments (alignements structuraux de plusieurs dizaines ou centaines de km correspondant à des accidents de l'écorce) :

- **Contraste brillant entre l'escarpement vers l'Ouest et le terrain plat vers l'Est → faille probable**
- **Topographie arrondie vers le haut sans escarpements apparents → anticlinaux**
- **Donc : tectonique compressive**

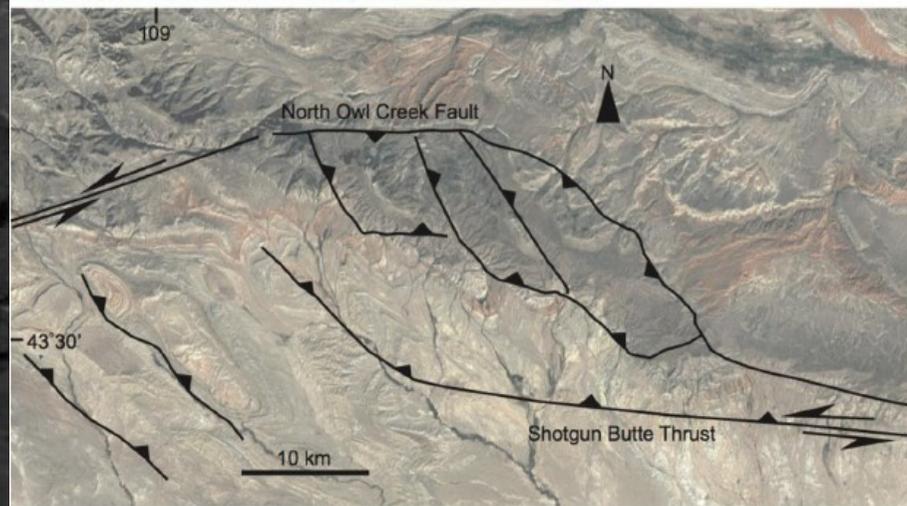


Figures tectoniques de raccourcissement dans les plaines de Mercure (2/2) – Analogues terrestres



Analogue terrestre :
Anticinal de Horse Heaven Hills
(Etat de Washington)

Analogue terrestre :
Structure de Owl Creek
(Etat du Wyoming)

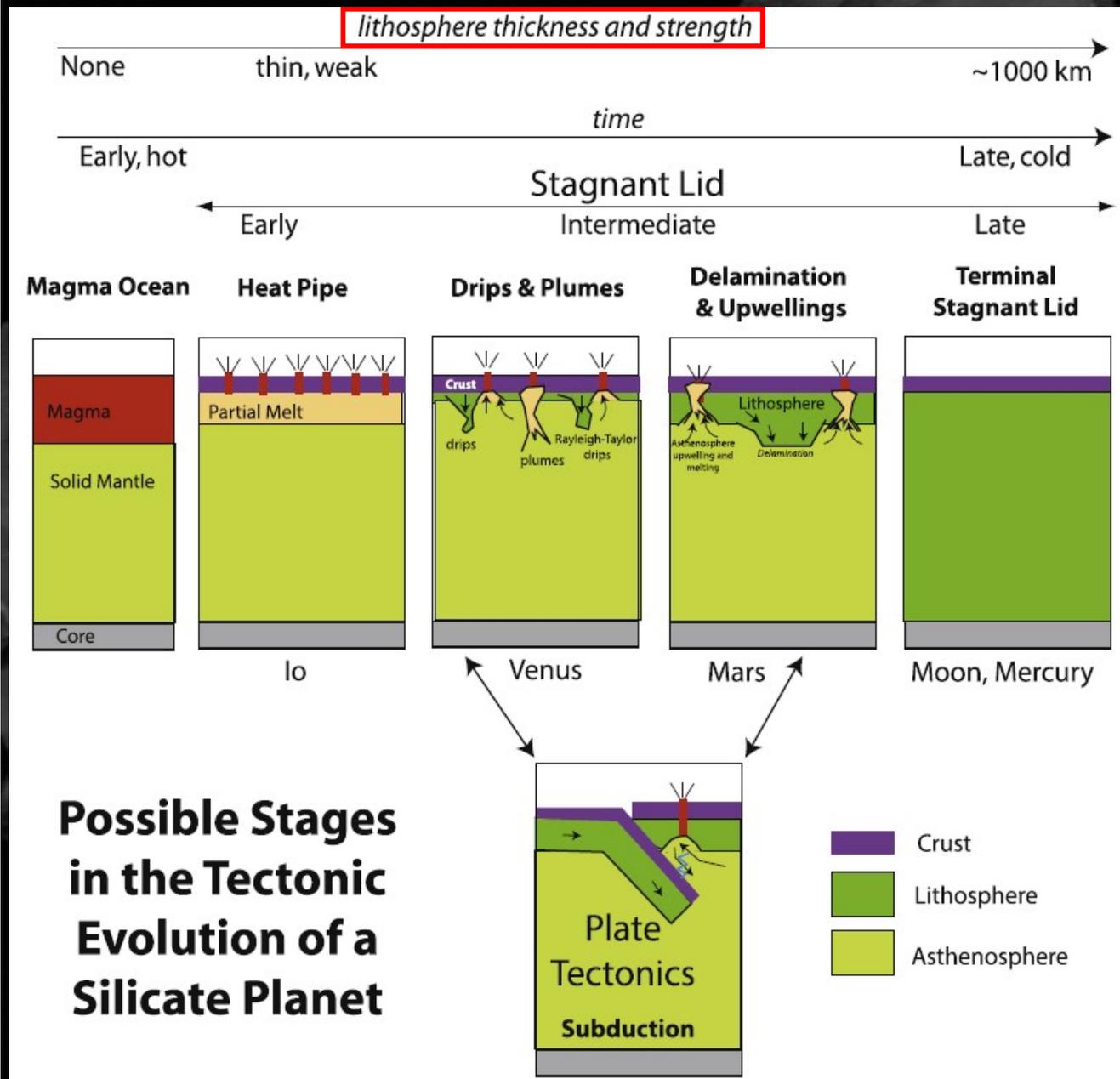


→ tectonique de couverture plutôt que tectonique de fond
avec chevauchements induits par la contraction globale liée au refroidissement (?)

MAIS : pas de tectonique des plaques active

Evolution possible des stades tectoniques -

R.J. Stern et al. - 2018

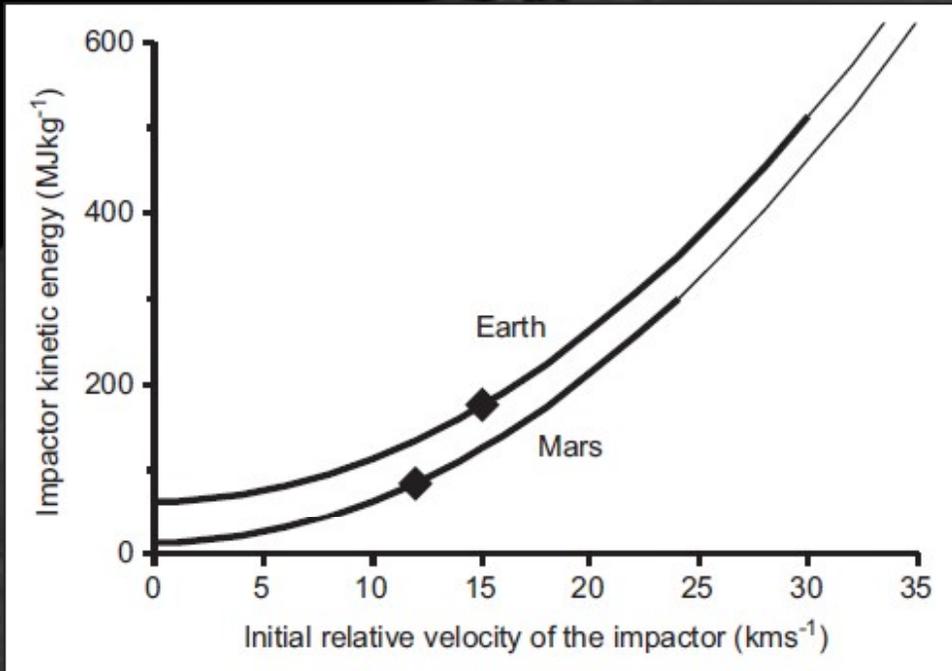


Évolution possible des styles magmato-tectoniques d'une planète silicatée.

Les flèches entre « Plate Tectonics » et « Stagnant Lid » intermédiaire montrent que des changements dans le régime tectonique d'une planète silicatée entre « couvercle stagnant » et « tectonique des plaques » sont possibles mais on n'attend pas de transition entre « Heat Pipe » et « Terminal Stagnant Lid »

La tectonique des plaques nécessite certaines conditions de densité et de résistance lithosphérique pour évoluer et peut être précédée et suivie par un régime de couvercle stagnant

Impacts géants et amorce de la tectonique des plaques sur les planètes du système solaire



Des impacts géants pourraient avoir affaibli la couche supérieure
 → initiation précoce de la tectonique des plaques sur Terre

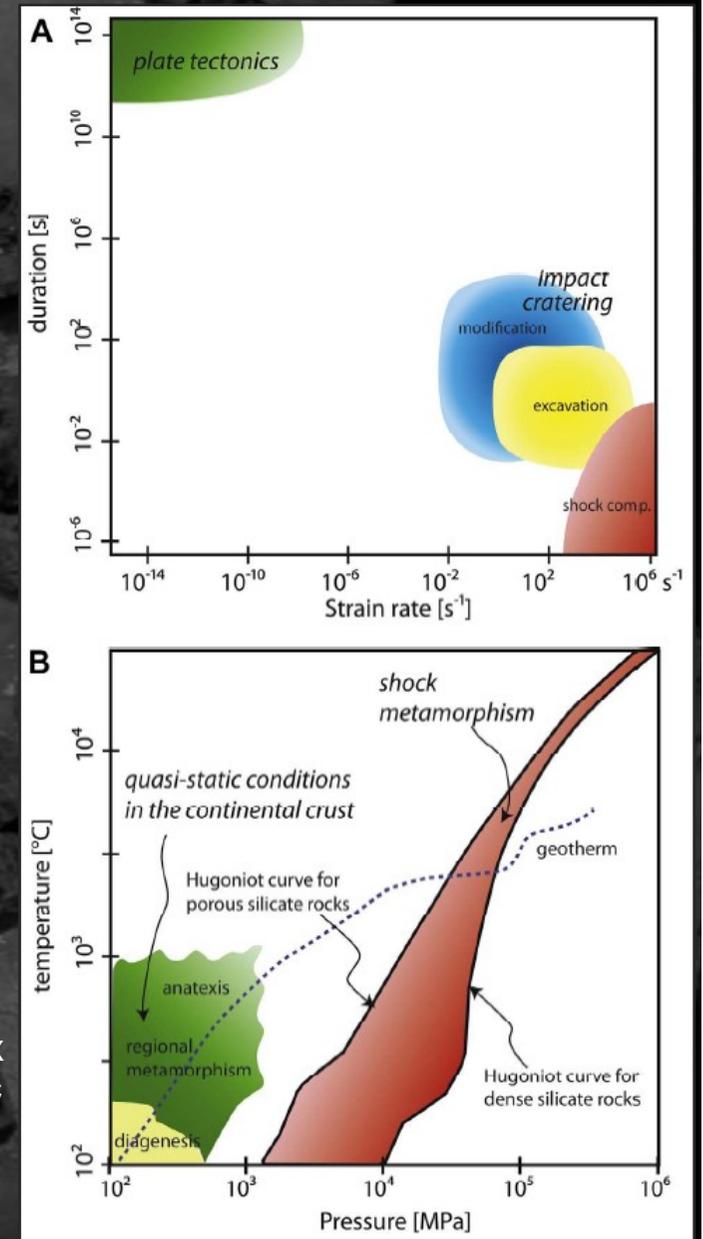
Impacts + énergétiques sur Terre que sur Mars
 → Mars n'aurait jamais eu de recyclage de la lithosphère

J. Ruiz - 2011

Mais ...

Impacts = phénomènes très brefs (μs à mn) avec des taux de contraintes et des conditions P et T incompatibles avec celles de la tectonique des plaques

T. Kenkmann et al. - 2014



Informations apportées par les météorites 1/4

On distingue deux types principaux de météorites suivant leur corps parent :

- Les « **météorites non différenciées** » (**chondrites**) provenant de corps trop petits ($\emptyset <$ qq dizaines de km) pour se différencier intérieurement depuis leur formation

Leur matériau constitutif s'est formé il y a 4,57 milliards d'années (en même temps que le système solaire)

Les fragments de ces petits astéroïdes sont restés dans leur état originel et sont les parents de météorites constituées majoritairement de silicates. Forment ~ 90 % des météorites

- Les « **météorites différenciées** » provenant de corps parents beaucoup plus gros (\emptyset de plusieurs centaines de km) qui ont subi une **différenciation planétaire (prélude à une activité tectonique ?)**. Sous l'effet d'un réchauffement interne (provoqué par la désintégration d'éléments instables ...) l'intérieur du corps devient partiellement fondu : les éléments les plus lourds sont allés constituer des noyaux métalliques (comme sur Terre le Ni Fe) alors que les éléments les plus légers ont formé un manteau et une croûte rocheuse

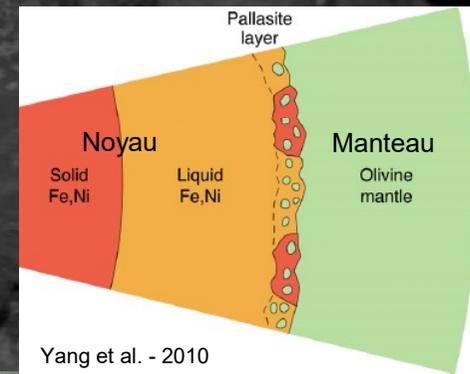
Cette classe de météorites renferme : - **les achondrites** essentiellement silicatées (ayant pour origine la croûte des corps parents)

- **les météorites de fer** (ayant pour origine les noyaux des corps parents)

- **les lithosidérites** contenant autant de silicates que de métaux

(ex. les pallasites formées de cristaux d'olivine dans une matrice métallique proviendraient de l'interface entre le noyau métallique et le manteau d'un astéroïde **différencié**)

Une hypothèse alternative en ferait des mélanges de fragments de manteau et de noyau produits par impact)



Figures de Widmanstätten sur une section de météorite de fer traitée à l'acide

Source : d'après Wikipédia

Coupe de la pallasite Esquel tombée en Argentine



Informations apportées par les météorites 2/4



Météorite martienne NWA 7034
Crédit : NASA

Les brèches martiennes (météorite « Black Beauty » NWA7034 NWA7533 et NWA 7455) présentent des preuves abondantes d'altération aqueuse survenue sur leur planète mère :
10 fois + d'eau que dans les autres météorites martiennes connues
(Beck et al. – 2015)

Minéraux des éléments de terres rares dans les météorites de brèches martiennes NWA 7034 et 7533
→ Implications d'interaction fluide-roche dans la croûte martienne
(Liu et al. – 2016)

NWA 7533 contient des zircons sur lesquels un âge de 4,4 Ga a été mesuré (Noachien)

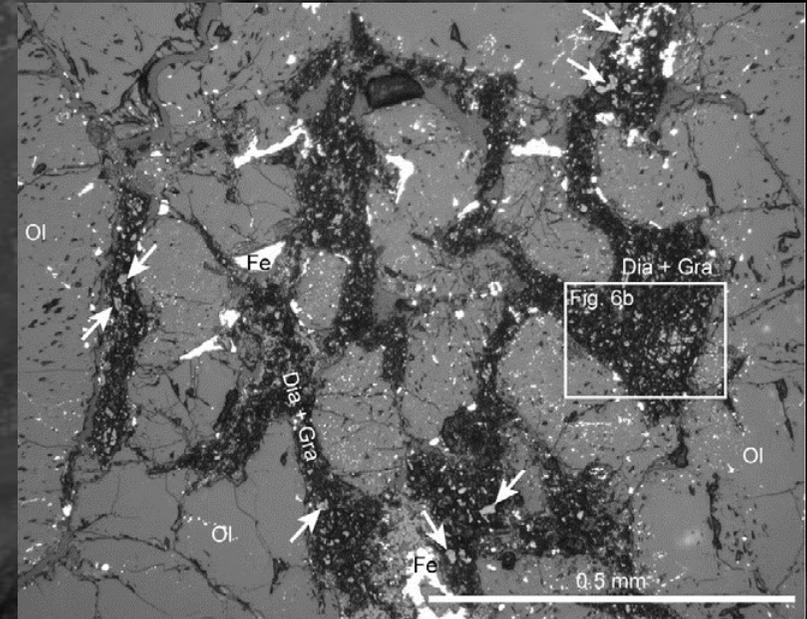
Cette preuve de différenciation crustale précoce implique que la croûte martienne s'est formée dans les 100 premiers Ma de l'histoire de Mars

→ évènement contemporain de la formation de la croûte la plus ancienne sur la Terre et sur la Lune
(Humayun et al. - 2013)

Informations apportées par les météorites 3/4

→ Présence de diamants

Rappel : sur Terre les diamants se forment dans le manteau (→ indices de différenciation)



Almahata Sitta MS-170 : "gros" diamants indiqués par flèches blanches – M. Miyahara et al. - 215

En 2008 : chute d'une météorite dans le désert nubien au Soudan

Fragments de roche contenant des diamants + gros que ceux vus dans d'autres météorites

Rque : idée standart = diamants (très petits) dans les météorites sont formés lors de collision d'astéroïdes

→ mode de formation inhabituelle pour les diamants de Almahata Sitta ?

Les « gros » diamants se seraient formés à l'intérieur d'une très grosse masse rocheuse (planète ? planétésimal ?). Si c'est vrai, ces diamants viennent d'une planète existant au début du système solaire (avant que les planètes soient définitivement formées et installées dans leurs orbites) puis qui aurait été détruite depuis longtemps !?!

Informations apportées par les météorites 4/4

→ « Fabrication » de diamants liés à l'impact ≠ différenciation

Grand cratère d'impact ($\varnothing = 100$ km) creusé voici 35,7 Ma
 par la chute d'un corps céleste de 5 à 8 km de diamètre
 Lors de l'impact les diamants se sont formés par compression de couches
 de graphite présent dans le sol
 Quantité estimée à 1000 milliards de carats (?)

Source : www.cieletespace.fr/actualites/

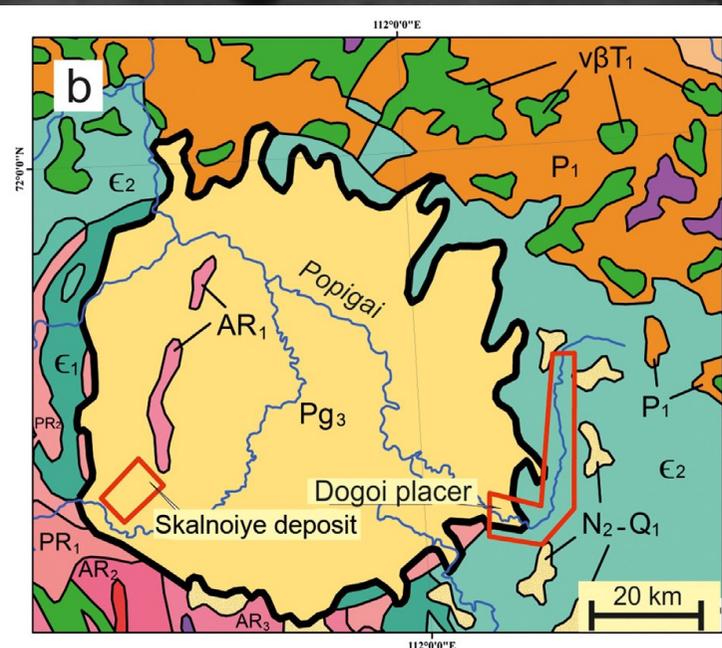
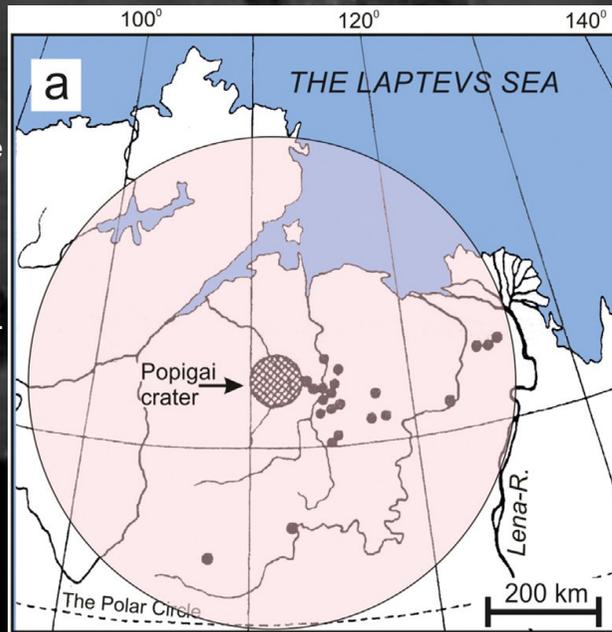


Taille moyenne 1,5 mm
 A. P. Yelisseyev et al. - 2013



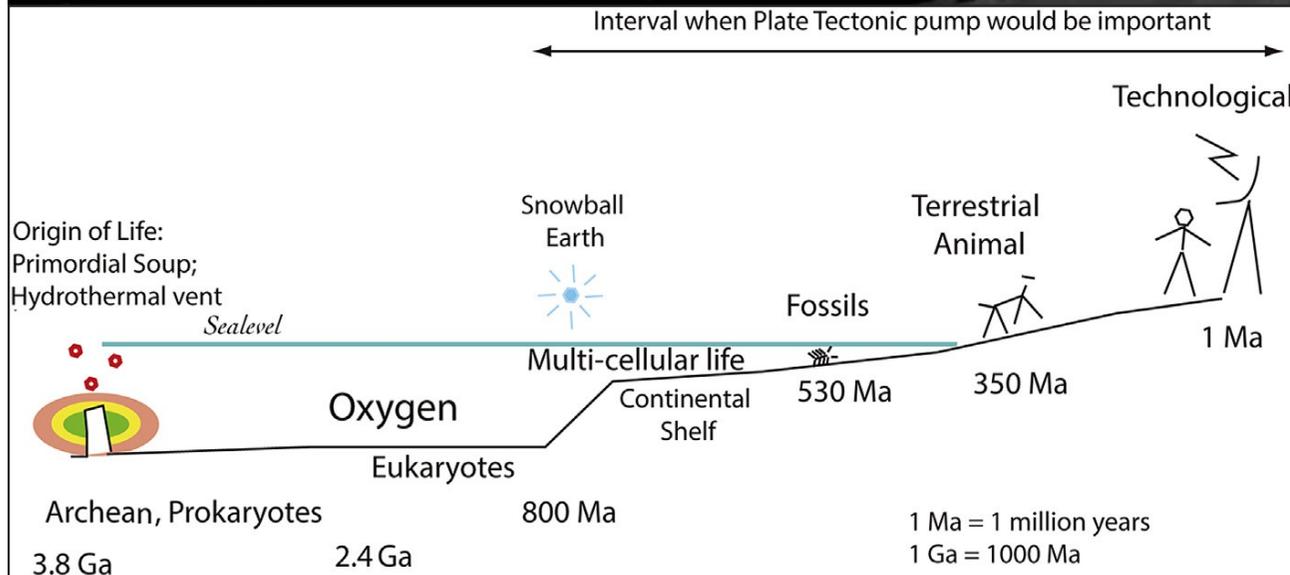
Le cratère Popigai vu depuis l'espace - Crédit : Nasa/JPL

Certains diamants
 retombés dans cratère
 D'autres éjectés à
 l'extérieur du cratère
 Puis déplacés par
 érosion
 A. P. Yelisseyev et al. -
 2018



- Archean (AR)
- Proterozoic (PR)
- Permian (P)
- Cambrian (€)
- Neocene-
Quaternary (N-Q)
- Palaeogenic
impact rocks (Pg)
- Siberian Trap
rocks (vβT)

Et encore + loin : les exoplanètes - R.J. Stern - 2016



Evolution et moment où la tectonique des plaques peut avoir le + d'effet sur l'évolution
 → développement de l'utilisation d'outils et ensuite d'« espèces technologiques »

Déf : « espèces technologiques »
 Groupe d'organismes (capables de se reproduire) et dépendant de la technologie pour leur réussite

Rq : quelle que soit la période de début de la TP, elle avait démarré avant l'apparition des Métazoaires

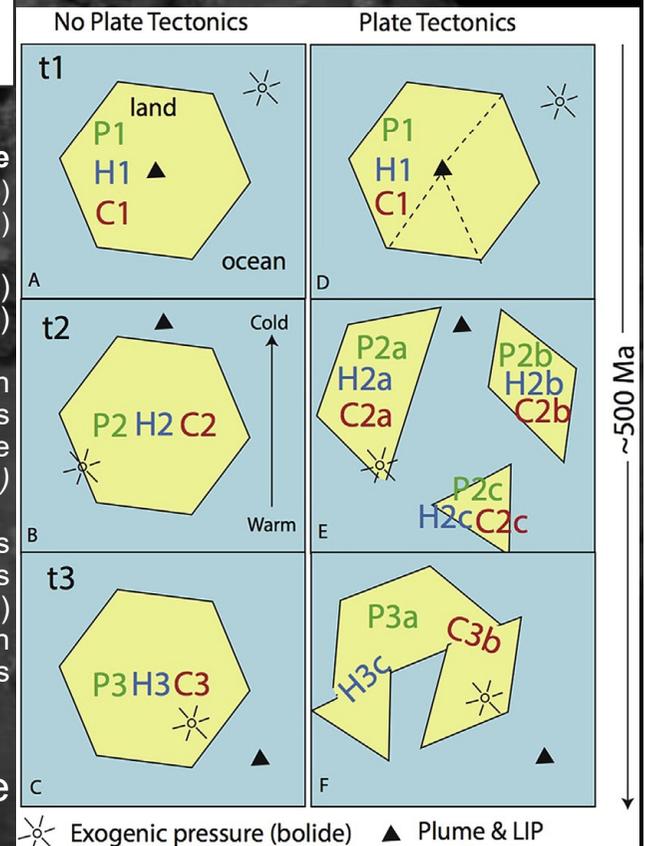
Variation de sélection naturelle et évolution sur une planète simplifiée semblable à la Terre
 avec océans, continents et 3 formes de vie interdépendantes (plante P, herbivore H, carnivore C)
 pendant 3 phases du cycle de supercontinent (intervalles d'environ 100 Ma)

Haut de chaque case → latitudes hautes (froid arctique)
 Bas → latitudes équatoriales (chaud)

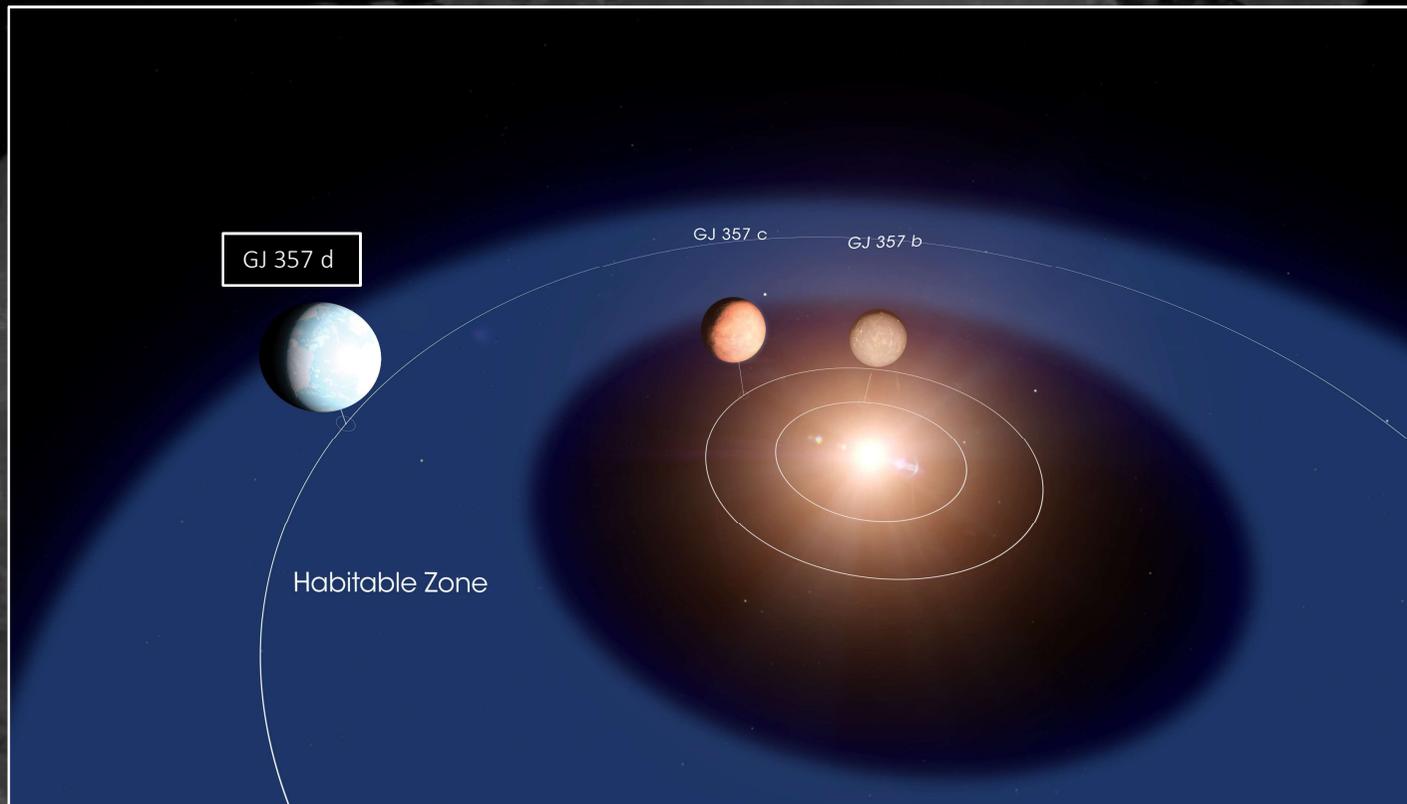
Gauche : Planète sans tectonique des plaques, peu de changement de configuration continentale, mais seulement un isolement climatique, peu de barrières et un changement climatique lent → toujours 3 grandes formes de vie
 Pressions évolutives principalement biologiques et exogènes (*venant de l'espace*)

Droite : même planète avec tectonique des plaques
 Bcp + d'opportunités d'isolement et de diversification sous des conditions différentes de sélection naturelle (Nbre de formes de vie variant en fct du nbre de continents)
 puis de compétition lorsque les continents entrent en collision
 Les pressions évolutives endogènes (*liées à l'activité tectonique*) sont + importantes

Tectonique des plaques exerce une pression environnementale
 → pilote l'évolution, sans être capable d'éteindre toute forme de vie



Mais si possible ... recherche de planètes compatibles avec la vie



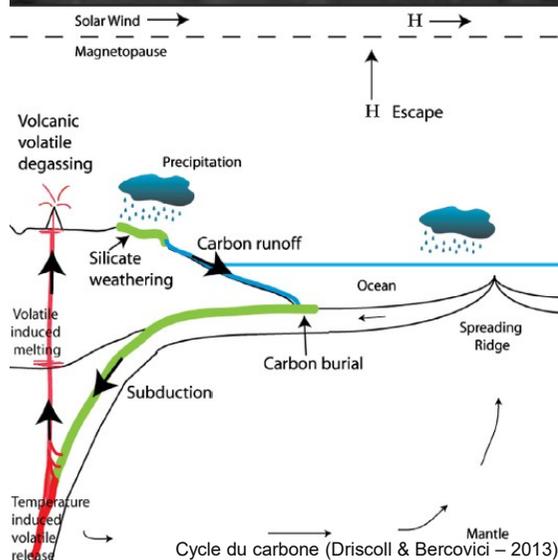
Système GJ 357 (découvert le 31 juillet 2019 par le satellite TESS de la NASA à 31 années-lumière de la Terre) :

- Planète d située dans la zone dite **habitable** de l'étoile (= région orbitale où l'eau **liquide** peut exister à la surface d'une planète rocheuse)
- $T_{\text{surface}} = -53\text{ °C}$... mais si l'atmosphère est dense (effet de serre) GJ 357 d pourrait être suffisamment chaude pour permettre la présence d'eau liquide

Crédit : NASA Goddard Space Flight Center/Chris Smith

Éléments de conclusion 1/2

- **Tectonique des plaques active actuellement pas prouvée ailleurs que sur Terre**
(y/c dans le système solaire avec cependant :
 - des planètes avec différenciation noyau/manteau/croûte
 - une possible « tectonique en goutte » existerait sur Vénus
 - mais pour l'instant seul du volcanisme a été démontré sans déplacements latéraux de grande ampleur sauf peut-être sur Mercure liés à la contraction (?)
 - **Au moins 3 éléments se dégagent** (comparaison avec Vénus) :
 - Planètes rocheuses différenciées
 - Volume approprié ($D = 12000$ km dans le système solaire)
- pour production de chaleur suffisante**
- **Présence d'eau liquide abondante** (également nécessaire à la Vie) !



- **Tectonique des plaques peut-être pas nécessaire à l'apparition de la Vie mais pourrait favoriser l'évolution d'espèces « technologiques »**
- **Activité tectonique permet le cycle des minéraux et recycle le carbone** (pas de tectonique des plaques sur Vénus → atmosphère avec 96 % de CO_2)

Éléments de conclusion 2/2

- Évolution des «espèces technologiques» possiblement favorisée sur des planètes avec océans, continents, tectonique des plaques et ... ciel nocturne intermittent (planète avec atmosphère suffisamment mince pour que les étoiles soient visibles dans le ciel → les « espèces technologiques » auront envie de découvrir la galaxie → désir de communiquer avec la vie sur d'autres planètes !)
- *Ces hypothèses sont nécessairement spéculatives*
La Terre est la seule planète connue avec vie,
«civilisation technologique» et tectonique des plaques R.J. Stern - 2016

- Beaucoup de travaux actuellement (résultats InSight sur Mars ...)

Planetary Science: Projects  Jet Propulsion Laboratory
California Institute of Technology

Cassini-Huygens
The Cassini-Huygens spacecraft explored the ringed planet, its mysterious moons, the stunning rings and its complex magnetic environment.

Europa Mission
NASA's Europa mission will conduct detailed reconnaissance of Jupiter's moon Europa to investigate whether the icy moon could harbor conditions suitable for life.

InSight
InSight (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport) is a NASA Discovery Program mission that will place a single geophysical lander on Mars to study its deep interior.

Mars Odyssey
In its extended mission, Mars Odyssey continues to map chemical elements and minerals on the surface of Mars and to monitor changes at the surface for another Mars year.

MER - Mars Exploration Rovers
NASA's twin robot geologists, the Mars Exploration Rovers, launched toward Mars on June 10 and July 7, 2003, in search of answers about the history of water on Mars.

MRO - Mars Reconnaissance Orbiter
NASA's Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) launched in 2005 and is on a search for evidence that water persisted on the surface of Mars for a long period of time.

MSL - Mars Science Laboratory
The Curiosity rover landed at Gale Crater on August 5, 2012. It is designed to search for and assess past or present habitable environments, i.e., those capable of supporting microbial life.

Habitability of Hydrocarbon Worlds: Titan and Beyond
NASA Astrobiology Institute
<https://science.jpl.nasa.gov/PlanetaryScience/projects.cfm>



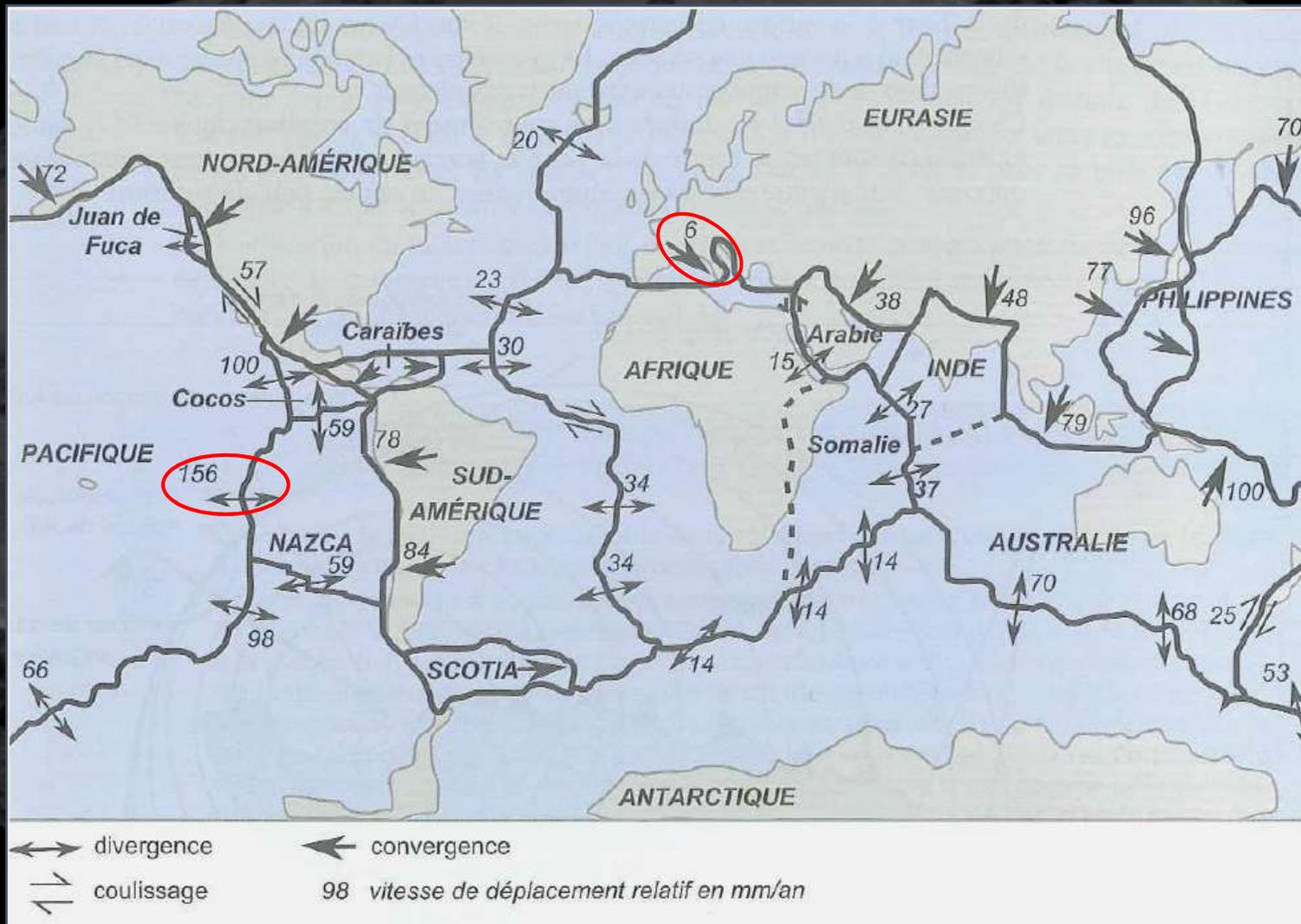
Merci de votre attention !



Annexes



Les mouvements des plaques terrestres : la vitesse des plaques (mm/an → km/Ma)



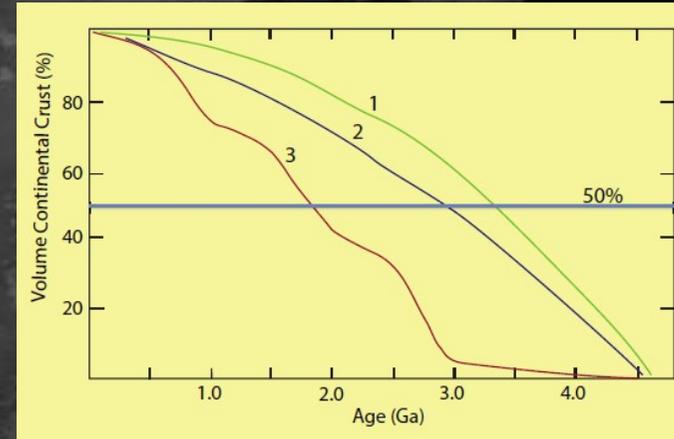
Source : Modèle NUVEL-1, De Mets, 1990 & 94

Alors, sur Terre ça a démarré quand ?

Hyp. 1 - une planète en transition : le début de la tectonique des plaques sur Terre entre 3 et 2 Ga ? K.C. Condie - 2018

➤ **Modèles de croissance cumulative de la croûte continentale** (courbes 1 et 2 basées sur les âges des zircons issus du modèle isotopique Hf et courbe 3 basée sur les isotopes Nd de la roche totale et les âges zircon)

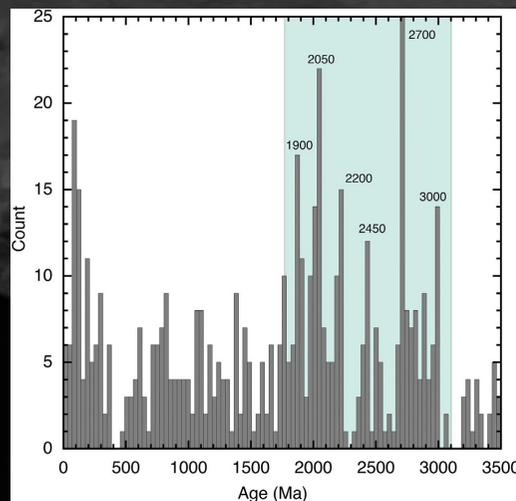
➔ **la croissance rapide de croûte continentale (3) serait associée au début et à la propagation de la tectonique des plaques**



➤ **Apparition d'ophiolites** (portions de la croûte océanique et de manteau supérieur d'anciens océans qui auraient été charriées sur de la croûte continentale) :

la première apparition d'ophiolites se fait autour de 2 Ga

(beaucoup sont disloquées, ce qui pourrait faire remonter leur apparition à 2.5 Ga ?)



➤ **Répartition des grandes provinces magmatiques en fonction du temps**

Ces événements sont définis comme se produisant sur six cratons ou plus, et sont interprétés comme le résultat de l'action de plumes mantelliques largement répandues

Les 1^{ers} sont enregistrés à environ 3 Ga avec six événements significatifs entre 3 et 2 Ga (3,0 – 2,7 – 2,45 – 2,2 – 2,05 et 1,9 Ga)

Tous ces changements pourraient être liés directement ou indirectement au refroidissement du manteau terrestre et aux changements induits dans le style convectif et dans la résistance de la lithosphère

➔ ils pourraient enregistrer le démarrage progressif et la propagation de la tectonique des plaques

Alors, sur Terre ça a démarré quand ?

Hyp. 2 : quasiment rien avant -600 Ma – J.D.A. Piper - 2017

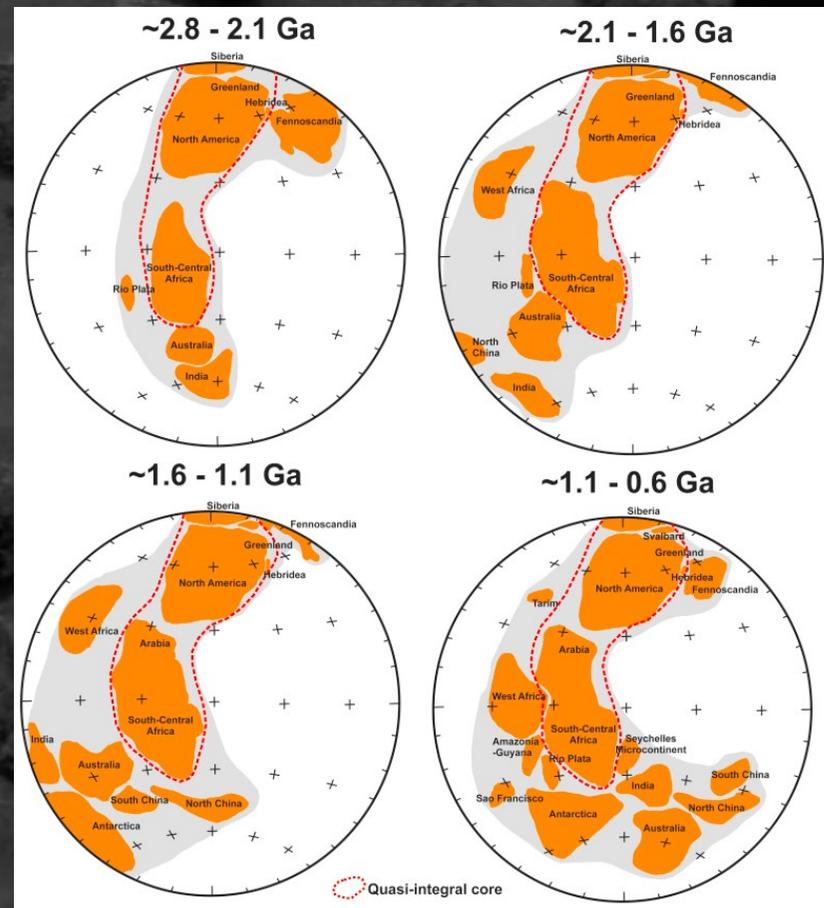
La tectonique des plaques ne peut pas être efficacement utilisée durant le Précambrien en raison du manque de données sur les pôles magnétiques ...

Mais on peut tester la possibilité de « tectonique de couvercle stable » car cette hypothèse recherche l'accord du + grand nombre de données sur des intervalles de temps longs

→ Mise en évidence d'une croûte continentale quasi-intégrale sur des milliards d'années (avec reconnaissance de très longs intervalles caractérisés par des mouvements polaires minimaux (-2.6 à -2.0, -1.5 à -1.25 et -0.75 à -0.6 Ga) avec néanmoins des épisodes de déplacement rapide des pôles vers -2.7 et -2.2 Ga

→ une hypothèse est celle des Cycles de Wilson

→ une alternative considère que la Tectonique des plaques n'aurait pas commencé avant la fin du Néoprotérozoïque (environ -600 Ma) par rupture de la Rodinia



The dominant driving force for supercontinent breakup: Plume push or subduction retreat?

Nan Zhang et al. - 2018

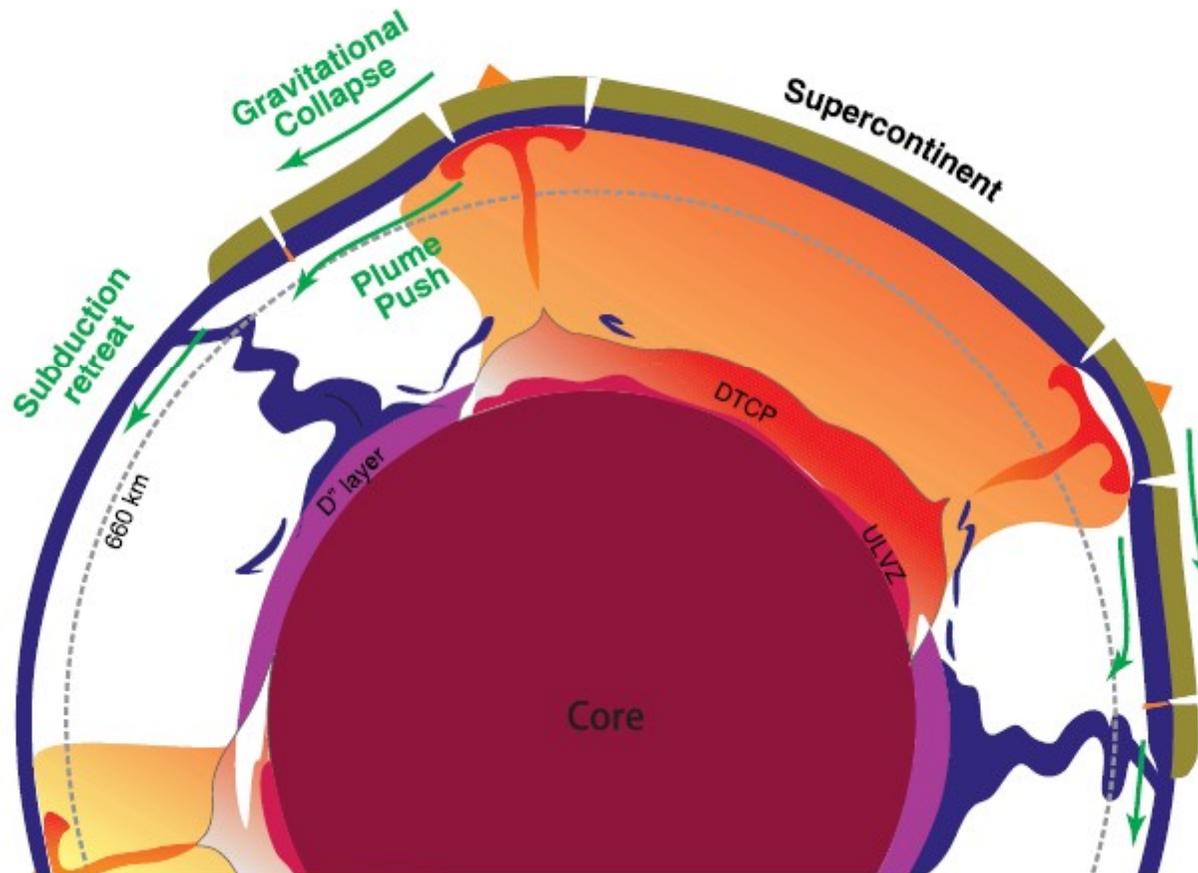
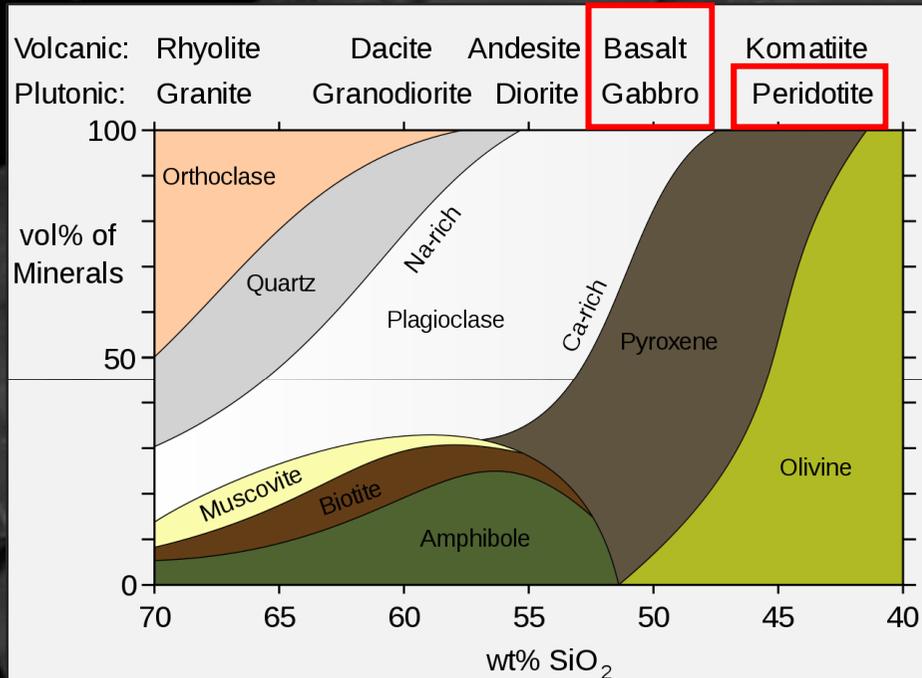


Figure 1. A cartoon demonstrating the three potential forces (including plume push, subduction retreat and gravitational collapse) for supercontinent breakup (after Li, 2014). ULVZ and DTCP are abbreviations for ultra low velocity zones and dense thermo-chemical piles, respectively.

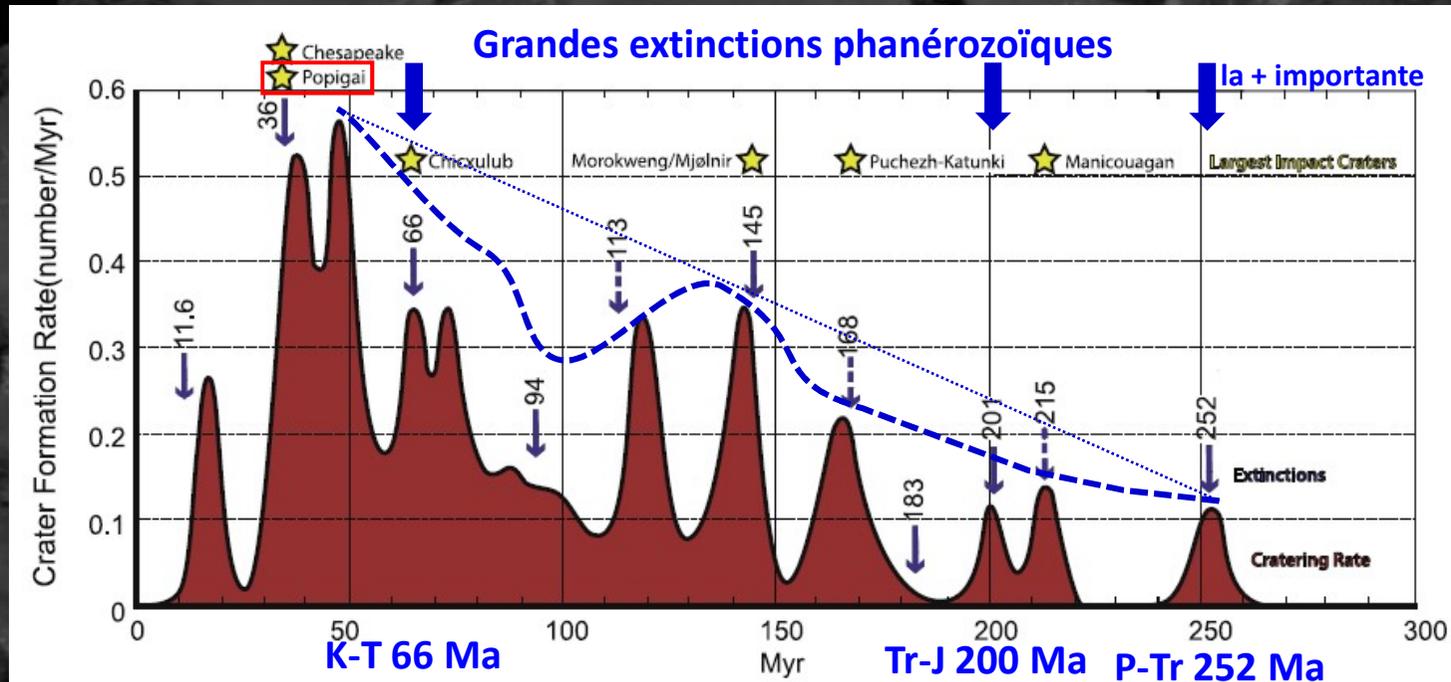


Classification des roches magmatiques
(Wikipédia)

N° échantillon	Localisation	1/50000	Type de roche	Système	Age K/Ar	Age 40Ar/39Ar
Corbières						
FI-9-3	Fitou	1079	ne-syérite	A + P	90,0 ± 4,5	
ROQ-6	Roquefort	1078	monchiquite	M	89,0 ± 3	
FRA-84	Fraissé	1078	gabbro alc.	A	93,0 ± 3	
				A		89,5 ± 0,5
FA-75	Mas Farine	1078	sannaïte	A	95,5 ± 3,5	
Inconnu	Mas Farine	1078	sannaïte	A		95 ± 2,3
Pyrénées centrales						
ERET	Lherz	1086	gabbro picrit.	A	109 ± 4	
				M	107 ± 4	
ARG-2	Argein	1073	cortlandtite	A + M	104 ± 4	
				A	101 ± 3	
SN-904	St Sernin	1074	gabbro			101 ± 1
A101-5	Aurignac	sondage	gabbro alc.	M	111 ± 4	
A43-B	Aurignac	sondage	gabbro alc.	M	113 ± 4	
A101-4003	Aurignac	sondage	lamprophyre	A		110 ± 4
Pyrénées occidentales						
PO-703	Pouzac	1053	ne-monzonite	M	91,5 ± 3	
				A	89,0 ± 3	
				M		96 ± 1
LA-73	Arrodet	1053	sod-syérite	S + F	91,5 ± 3,5	
AD-77	Adé (Lourdes)	1052	picrite	M + A	96 ± 4	
BLU-721	Rebenacq	1051	teschénite	A	96 ± 4	
				A	93	
BUZ-1	Buzy	1051	teschénite	A	93 ± 4	
HAB-69	Arudy	1051	picrite	M	108 ± 4	
AY-2	Arudy	1051	teschénite	A	94 ± 4	
				A		92 ± 2
MIX-691	Mixe	1002	teschénite	A	99 ± 4	
BAD-2067	Bardos	sondage	gabbro alc	A	113 ± 4	
				A	118 ± 5	
				A		115 ± 4
Pays basque espagnol						
ELIZ-1	Elizondo	91/26-6	gabbro alc.	A	86,5 ± 3,5	
4049	Vergara	88/23-6	teschénite	A	83,5 ± 3	
				A		84-85
ANZ-6952	Anzuola	88/23-6	gabbro alc.	A	87,5 ± 3	
				A		86 ± 2
AXP-705	Axpe	87/22-6	teschénite	A	104 ± 4	
				M	113 ± 4	
				A		106
EIB-1A	Eibar	63/23-5	cumulat	A	88,5 ± 3	
				A		86

Informations apportées par les météorites

→ corrélation des plus grands cratères, des signatures d'impact stratigraphique et des extinctions au cours des 250 derniers Ma - M. R. Rampino et K. Caldeira - 2017

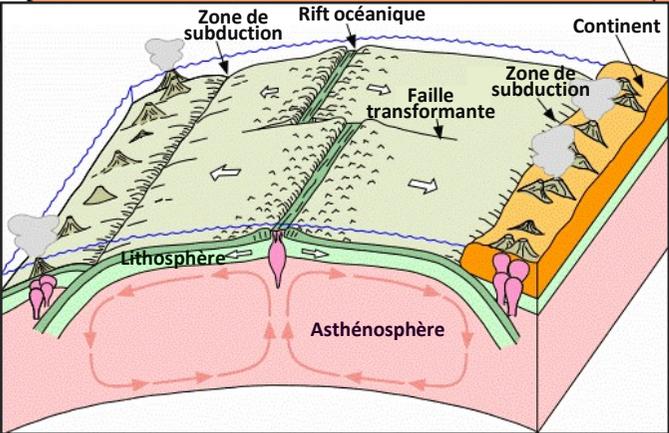
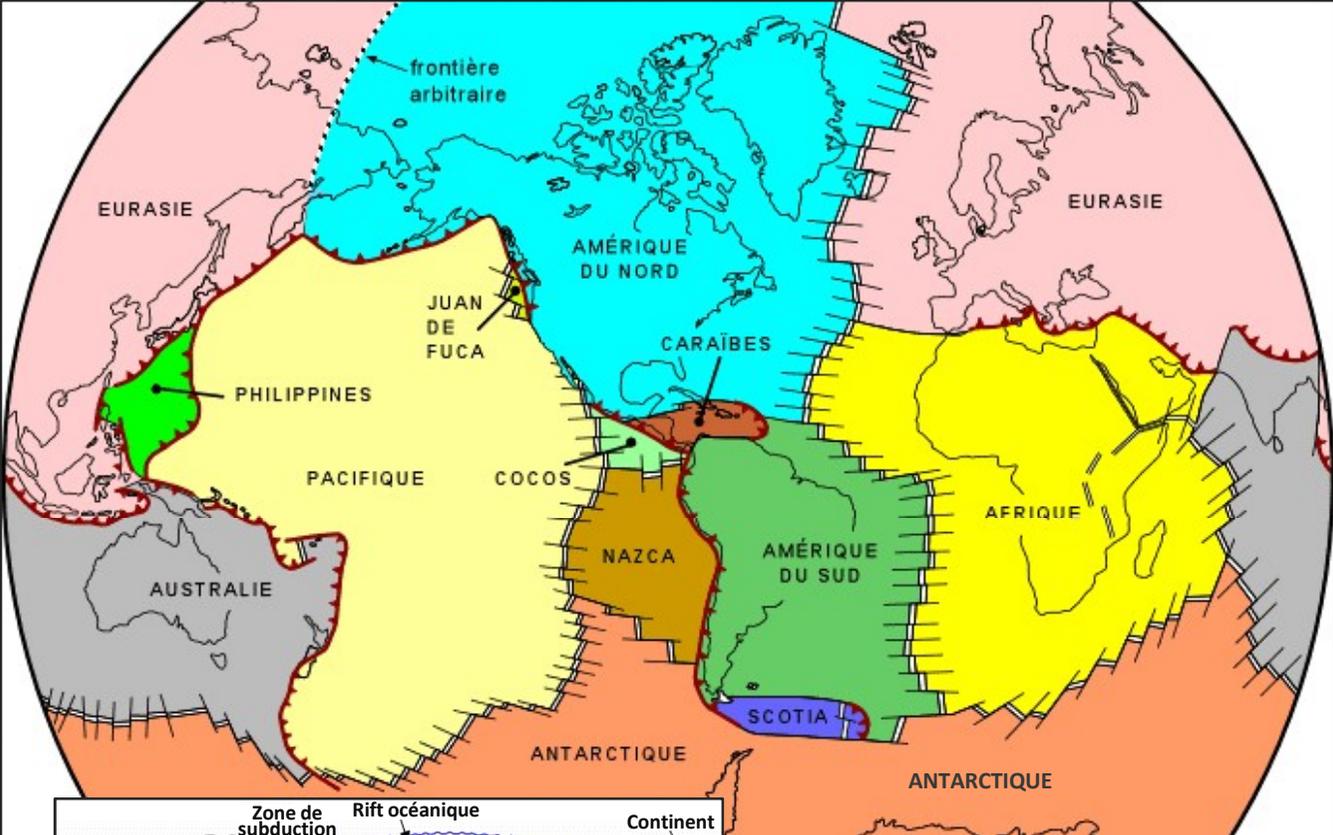


Distribution de 37 âges de cratère (lissée par une fonction de fenêtre gaussienne de 3 Ma) créant 11 sommets d'âges de cratère

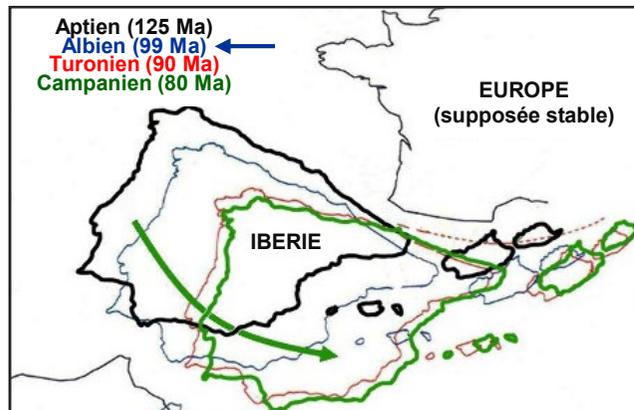
- Les flèches indiquent 11 extinctions (flèches en pointillé -> événements mineurs)
 - Les étoiles sont les âges des 6 plus grands cratères d'impact ($\varnothing > 70$ km) qui corrént avec 4 (2 avec le même événement à 36 Ma) ou probablement 6 extinctions (si on inclut les extinctions mineures à 168 et 215 Ma)

Applicable sur d'autres planètes !?!

Les plaques terrestres



Source :
Université Laval, Canada



Reconstitution du déplacement de l'Ibérie par rapport à l'Europe (supposée stable) entre l'Aptien et le Campanien

