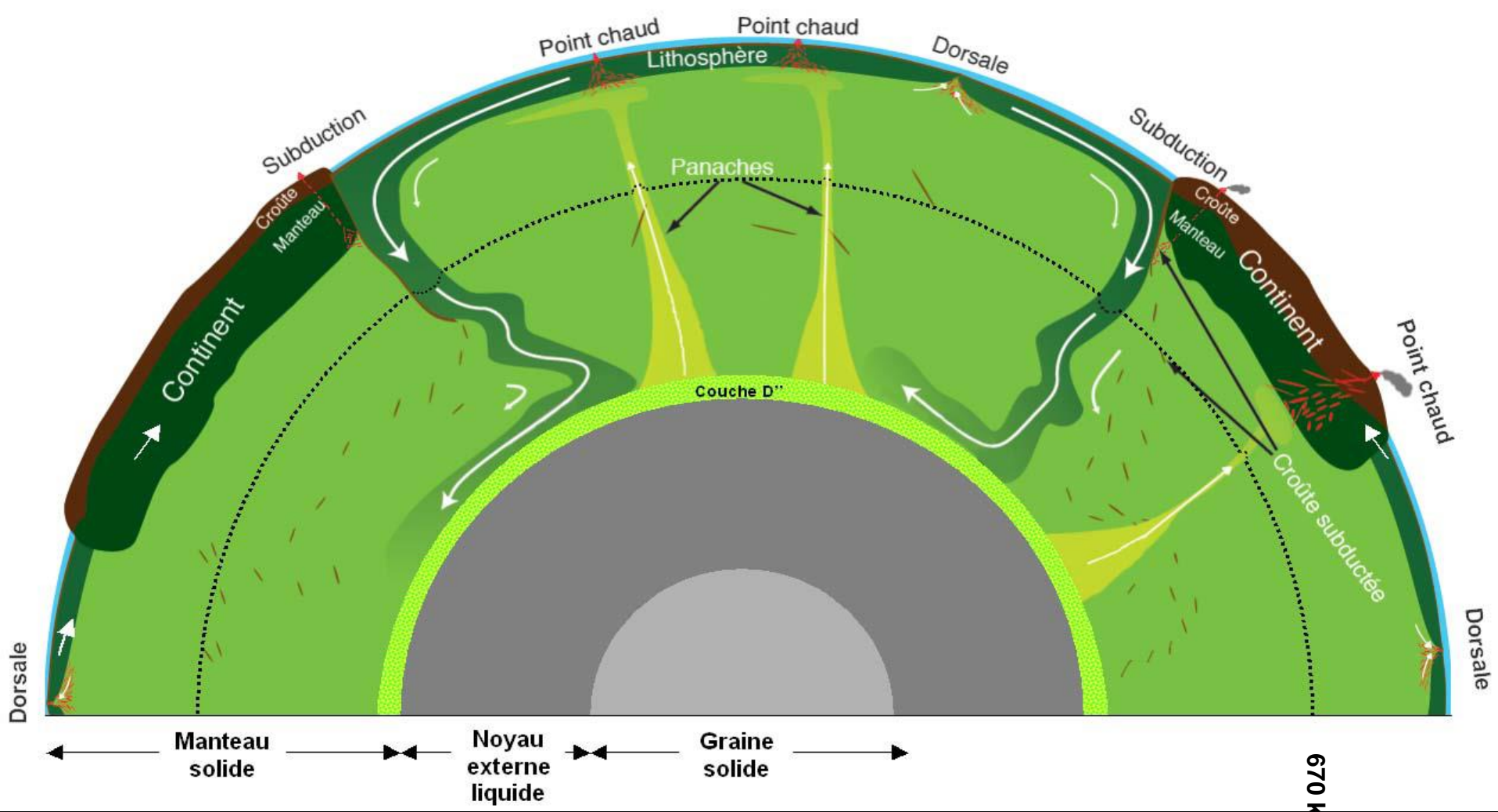


Histoire(s) de la planète Terre, un système global.

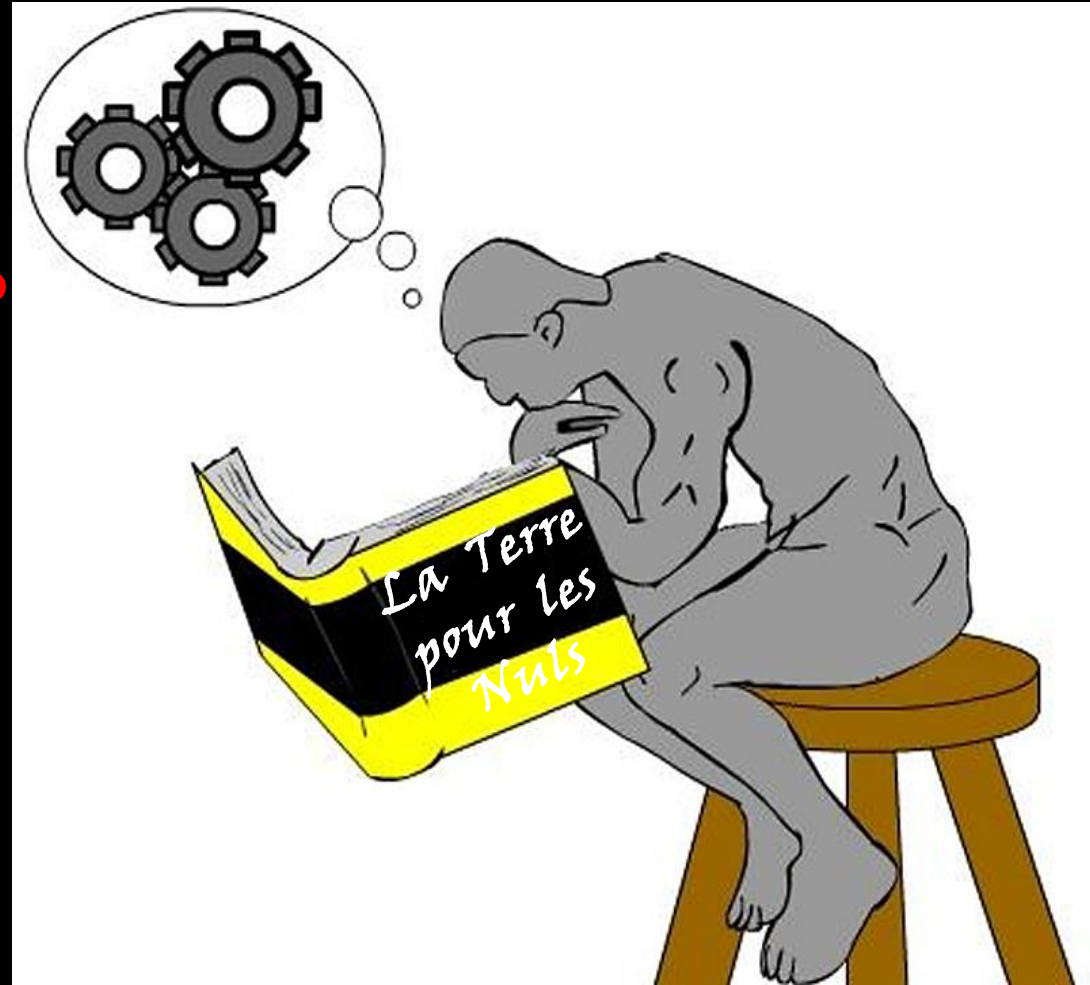




Le modèle (très) simplifié couramment admis du fonctionnement de la Terre interne actuelle : plongement «actif» de la «couche limite thermique» des cellules de convection mantellique (les plaques lithosphériques, rigides, lentes et de grande taille) et remontée passive au niveau des dorsales. Quelques remontées actives locales et ponctuelles (les points chauds).

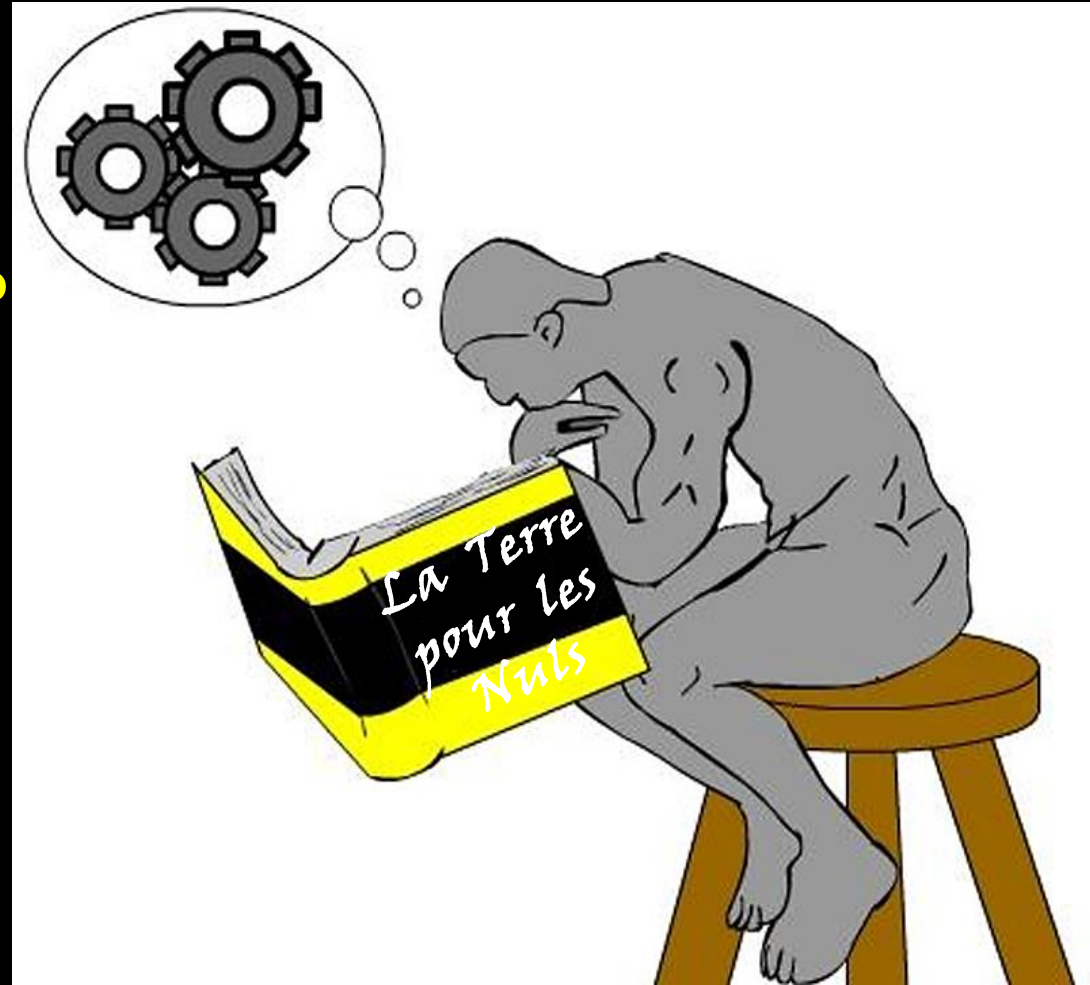
D'où quelques questions

- La Terre est-elle le seul corps du SS à avoir ce type de dynamique interne ?
- Depuis quand la Terre a-t-elle cette dynamique ?
- Y-a-t-il un (des) lien(s) entre cette dynamique interne et les conditions externes ?



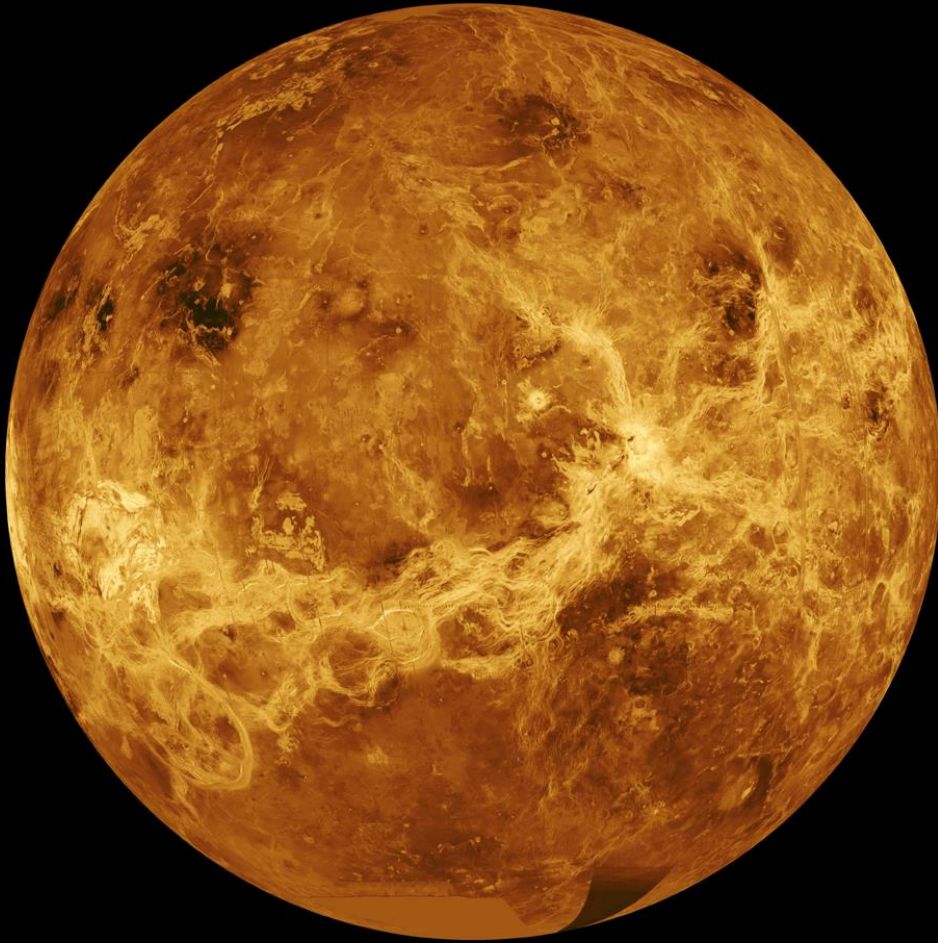
D'où quelques questions

- La Terre est-elle le seul corps du SS à avoir ce type de dynamique interne ?
- Depuis quand la Terre a-t-elle cette dynamique ?
- Y-a-t-il un (des) lien(s) entre cette dynamique interne et les conditions externes ?

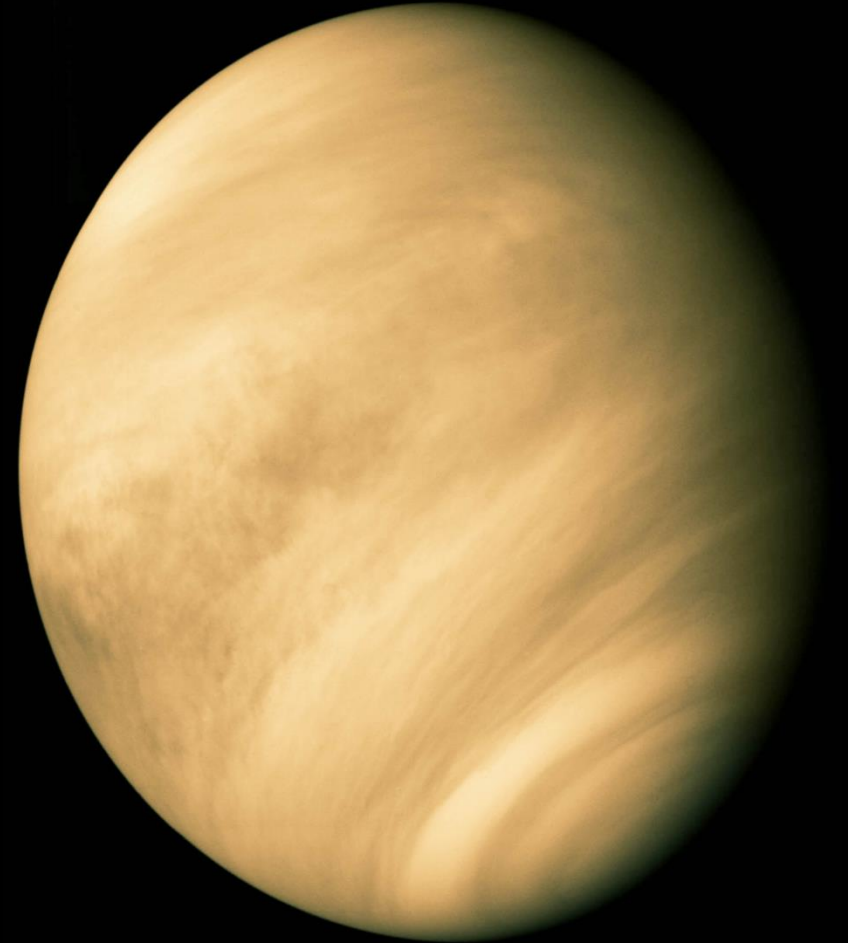


Venus

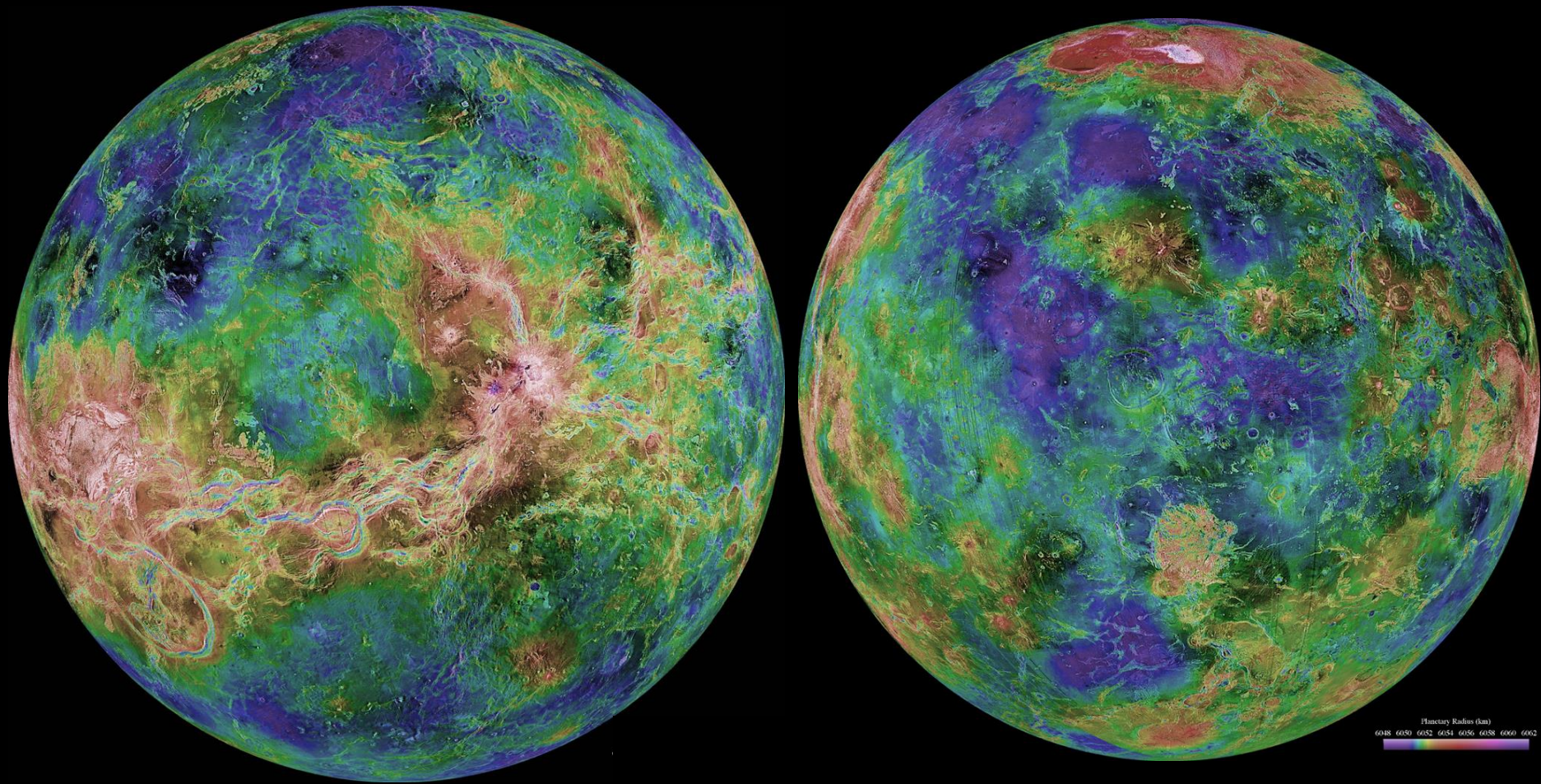
Dévoilée



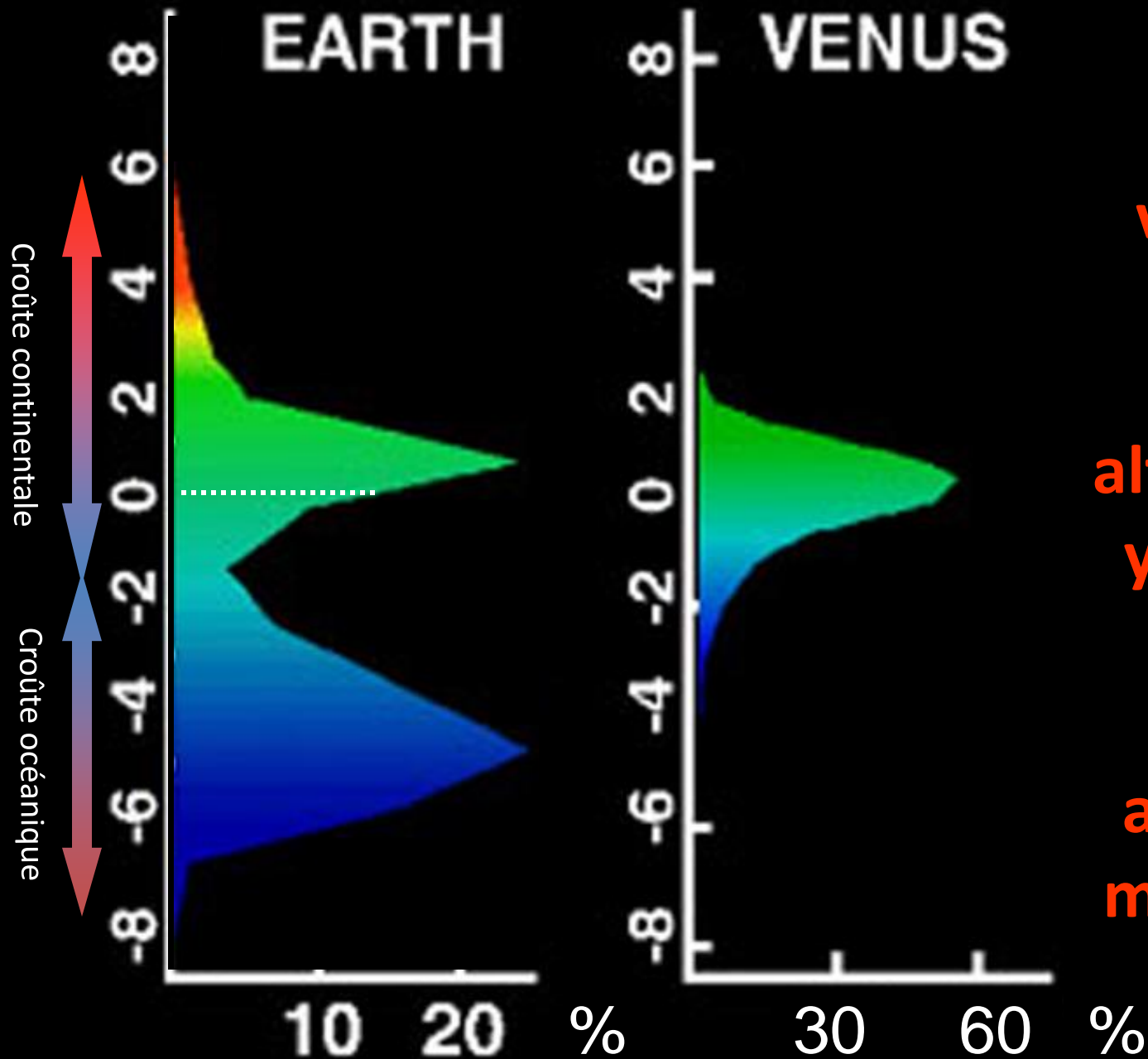
Voilée



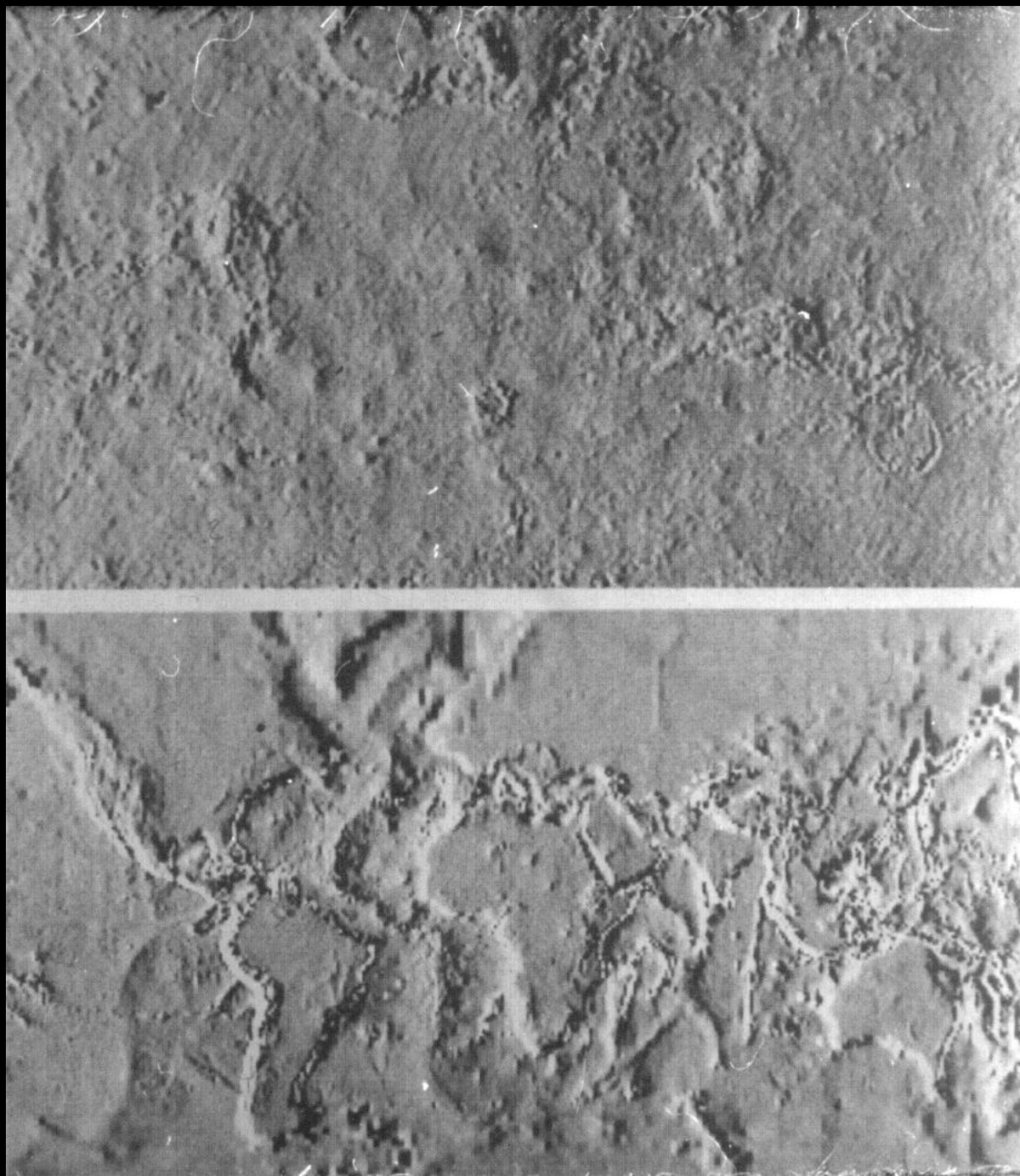
**Vénus, même taille et même masse que la Terre, donc
« à priori » même dynamique interne. Voyons ça !**



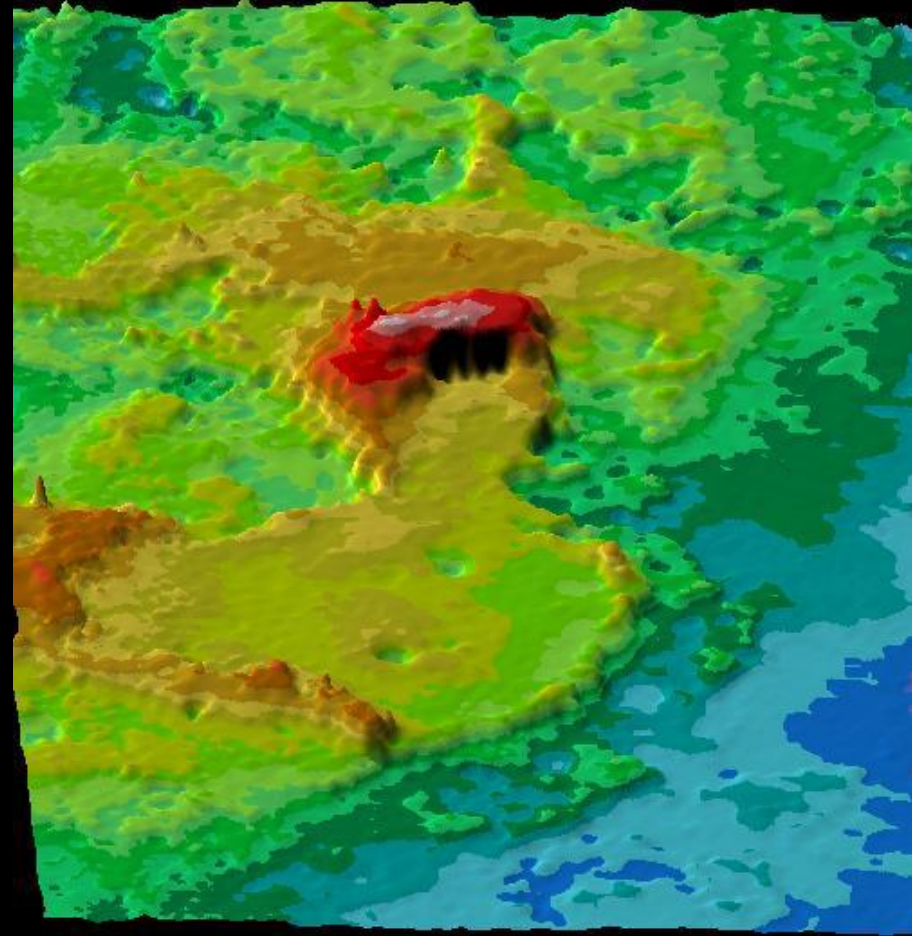
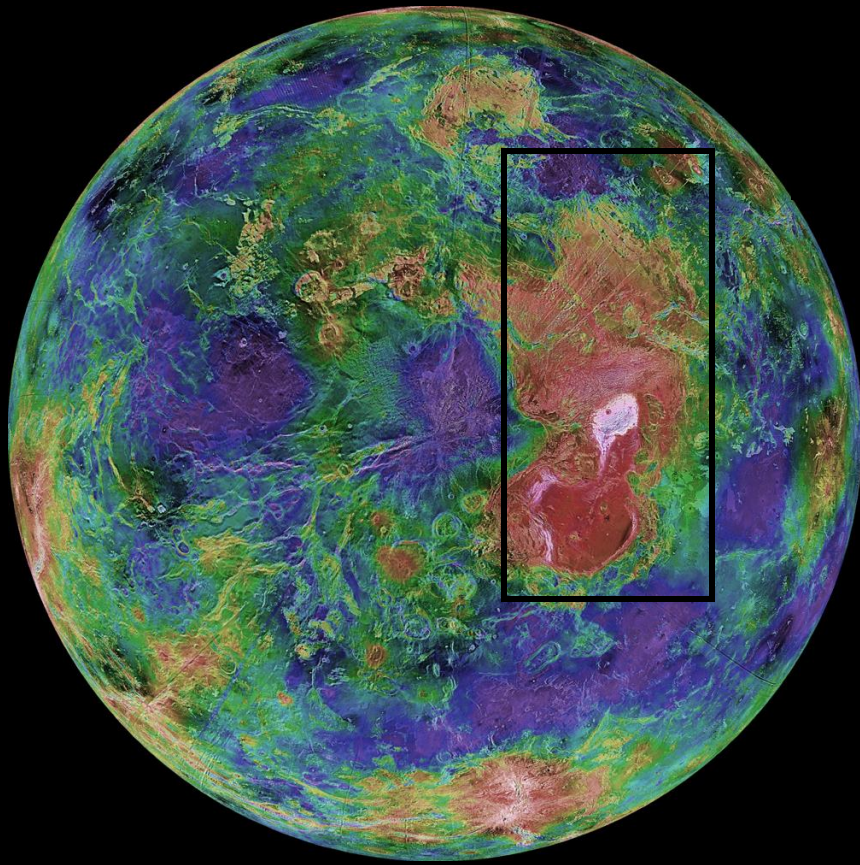
La topographie vénérienne (Magellan, 1990-1994)



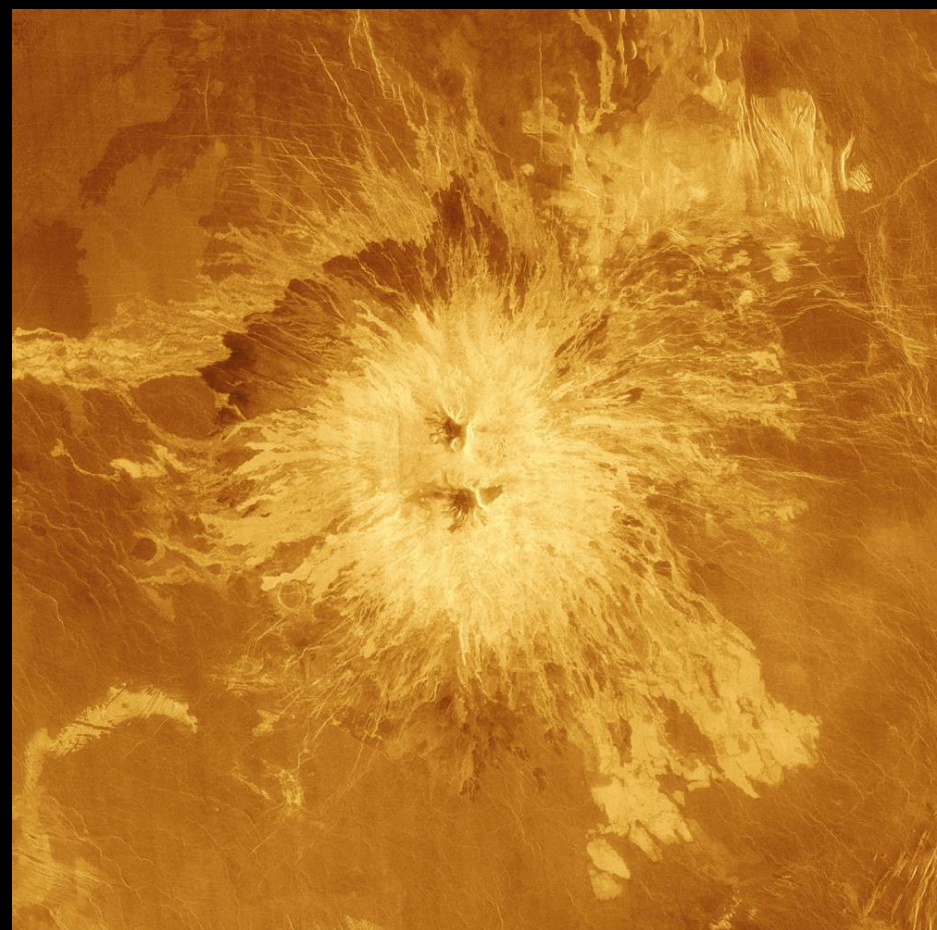
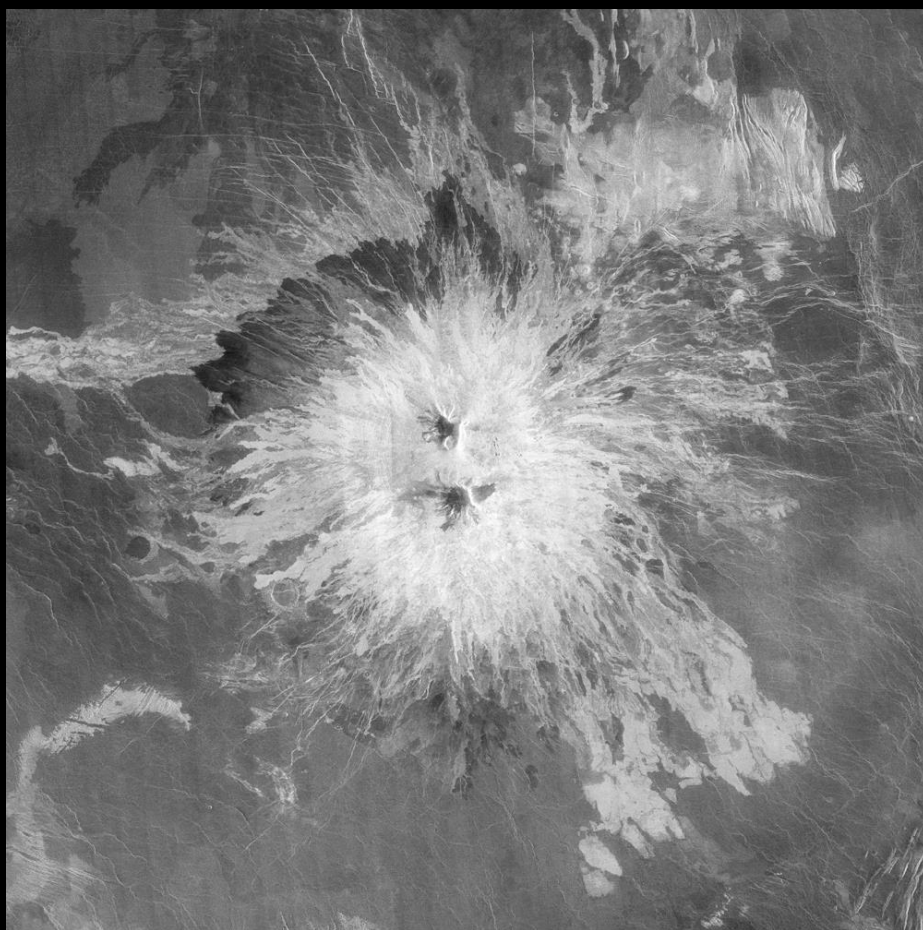
Comparaison du relief terrien et vénérien. Sur Terre, bimodalité des altitudes, car il y a 2 types de croûtes. Sur Vénus, les altitudes sont monomodales (1 type de croûte ?)



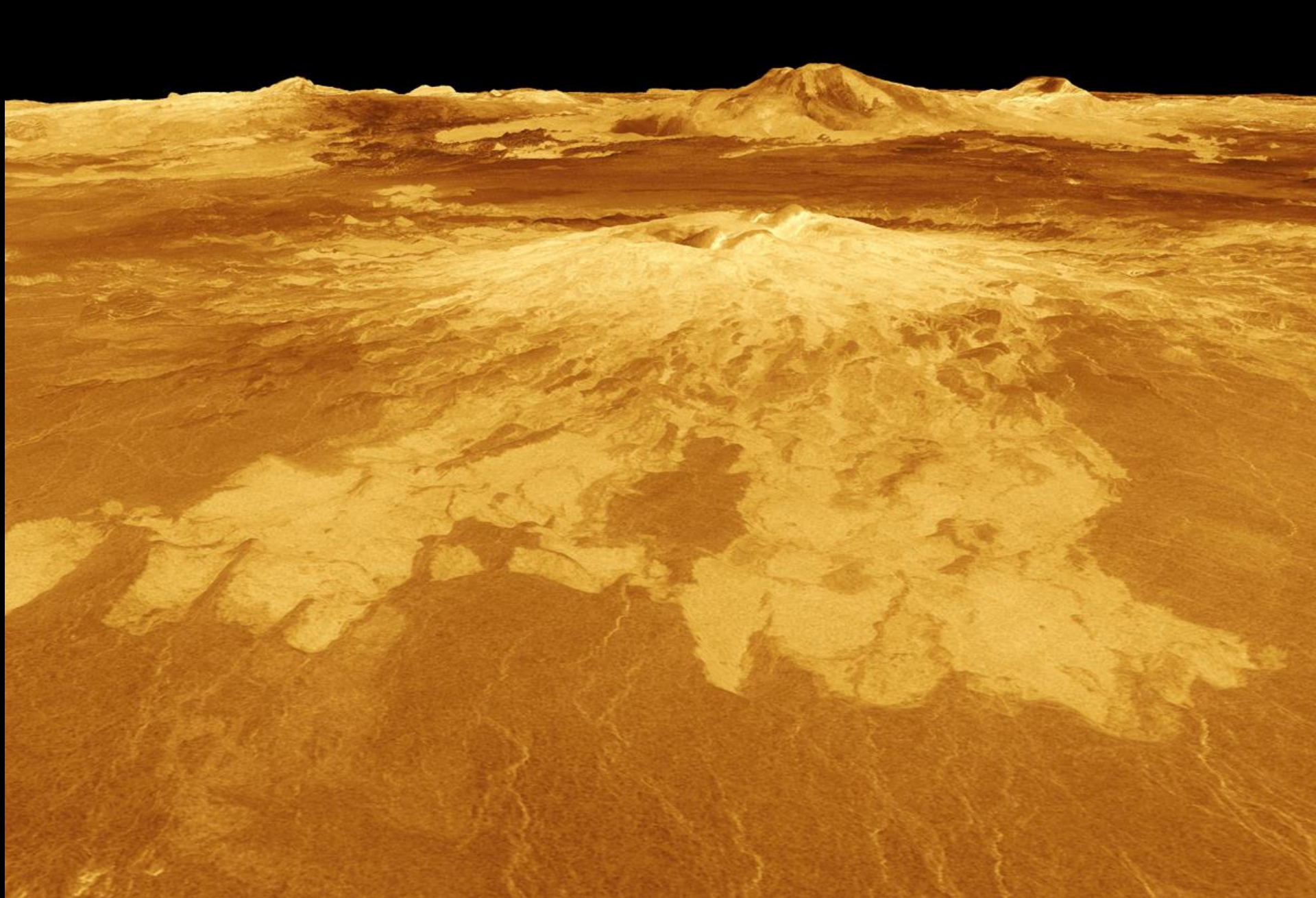
Pour visualiser la différence topographique Terre / Vénus, cette vieille comparaison datant de l'année 1978. Et en plus de la non dualité des altitudes (océan/continent) on note l'absence de reliefs allongés, marqueurs de la tectonique des plaques.



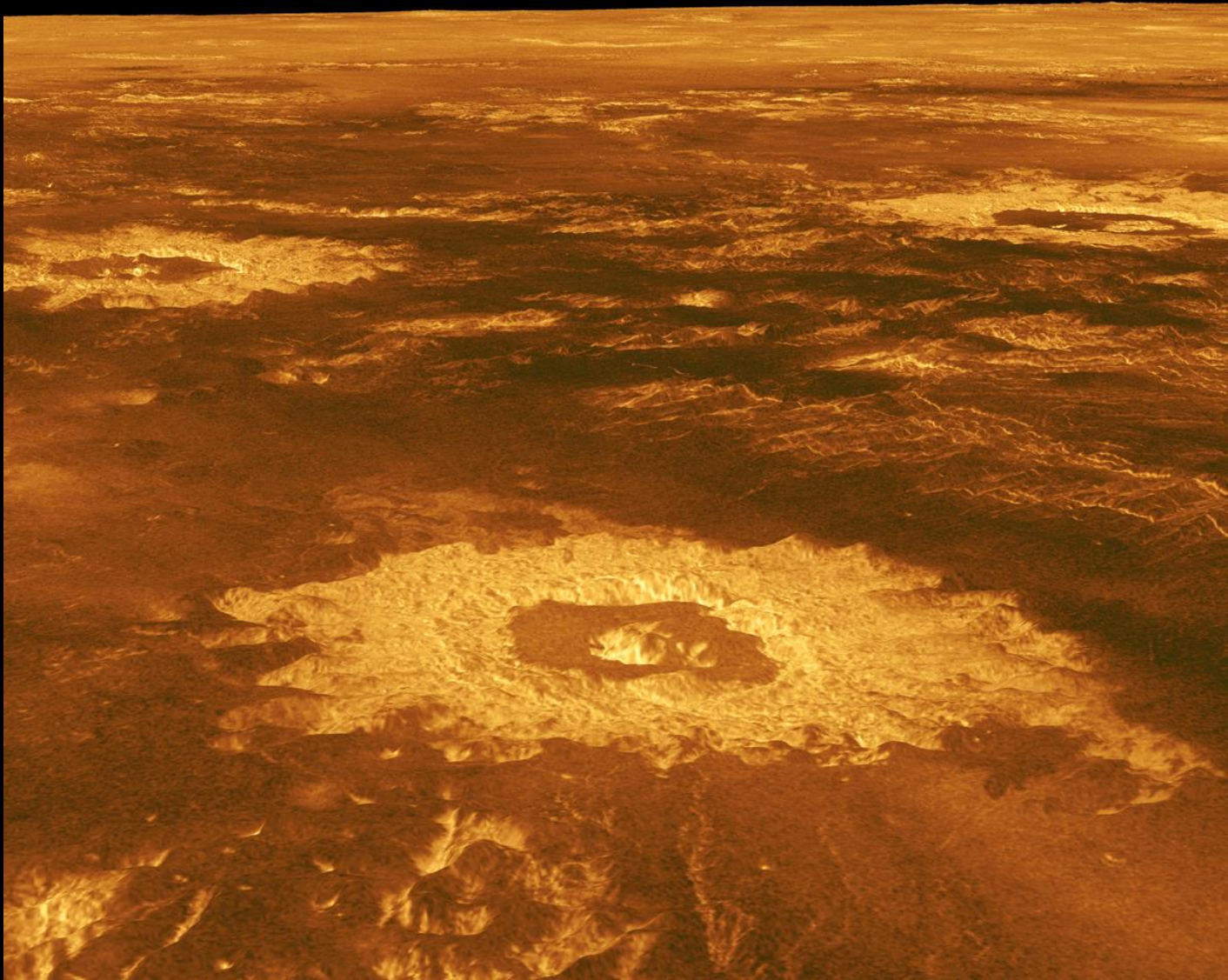
La seule chose qui, sur Vénus, ressemblerait à un continent terrestre, ou à un plateau basaltique : Ishtar Terra



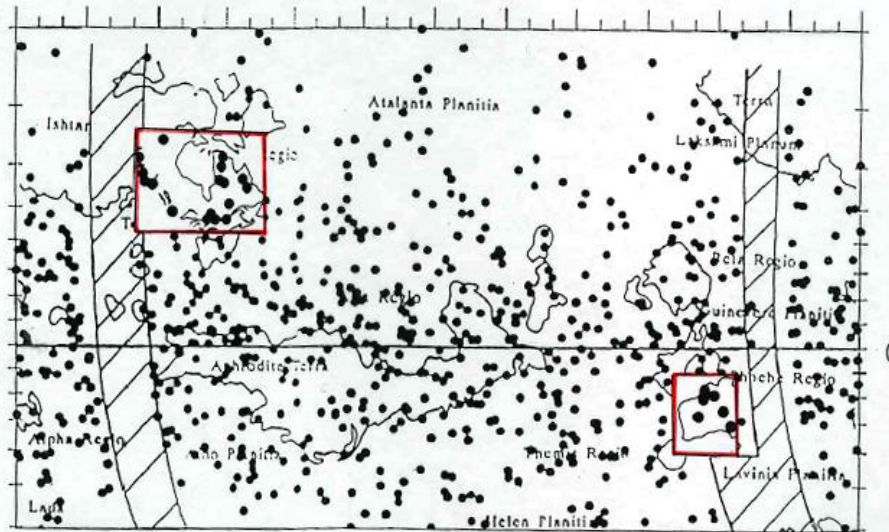
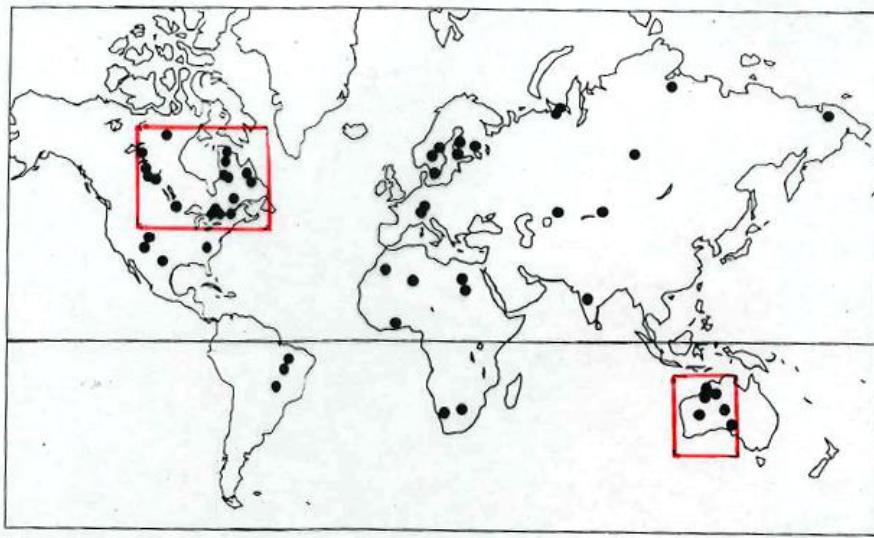
A gauche, image radar « moderne » (Magellan, 1990-1994) : blanc = rugueux ou pente tournée vers la sonde ; noir = lisse ou pente à l'opposé de la sonde. A droite, même chose colorisée (une image radar n'a bien sûr pas de couleur).



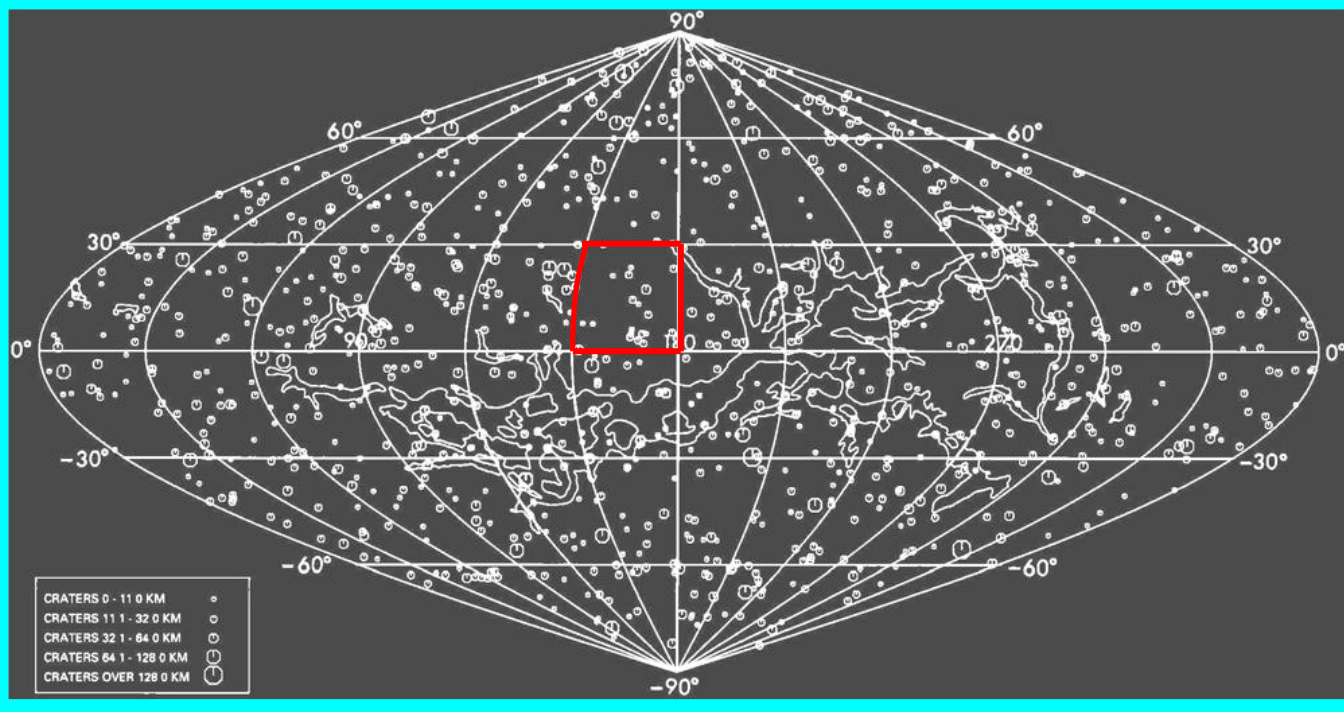
Même chose en vue 3D ($\Phi = 300$ km, $h = 1500$ m, relief exagéré 8 fois)



Trois des \approx 900 cratères de météorites vénériens

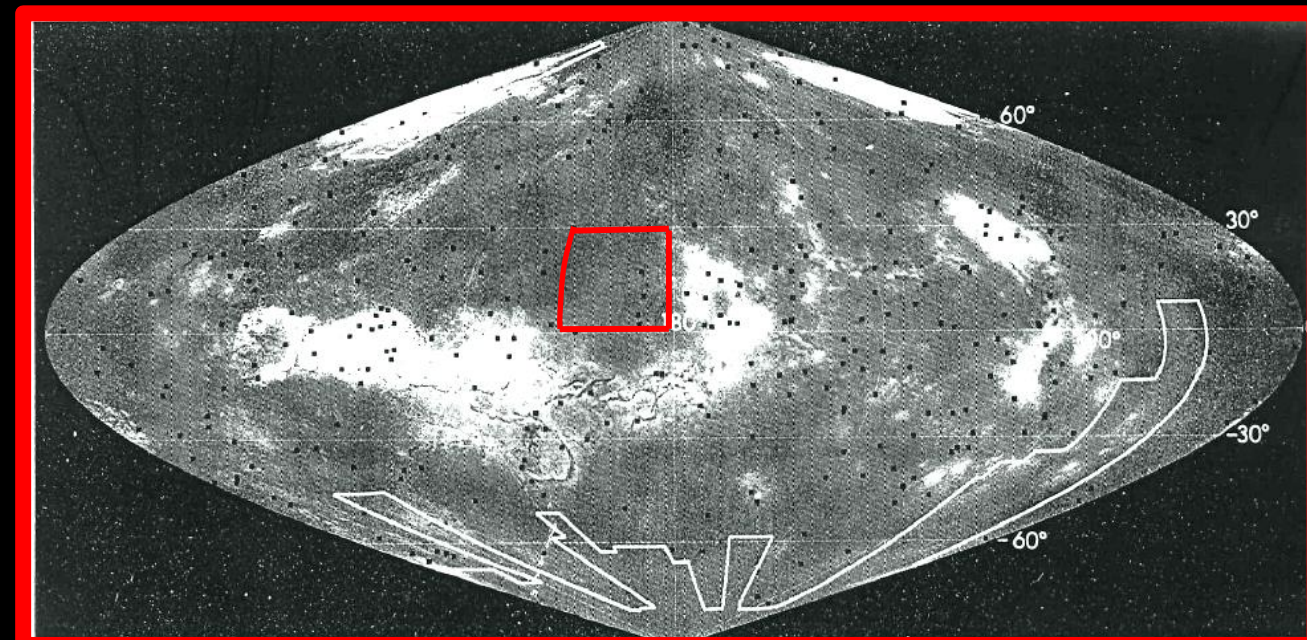


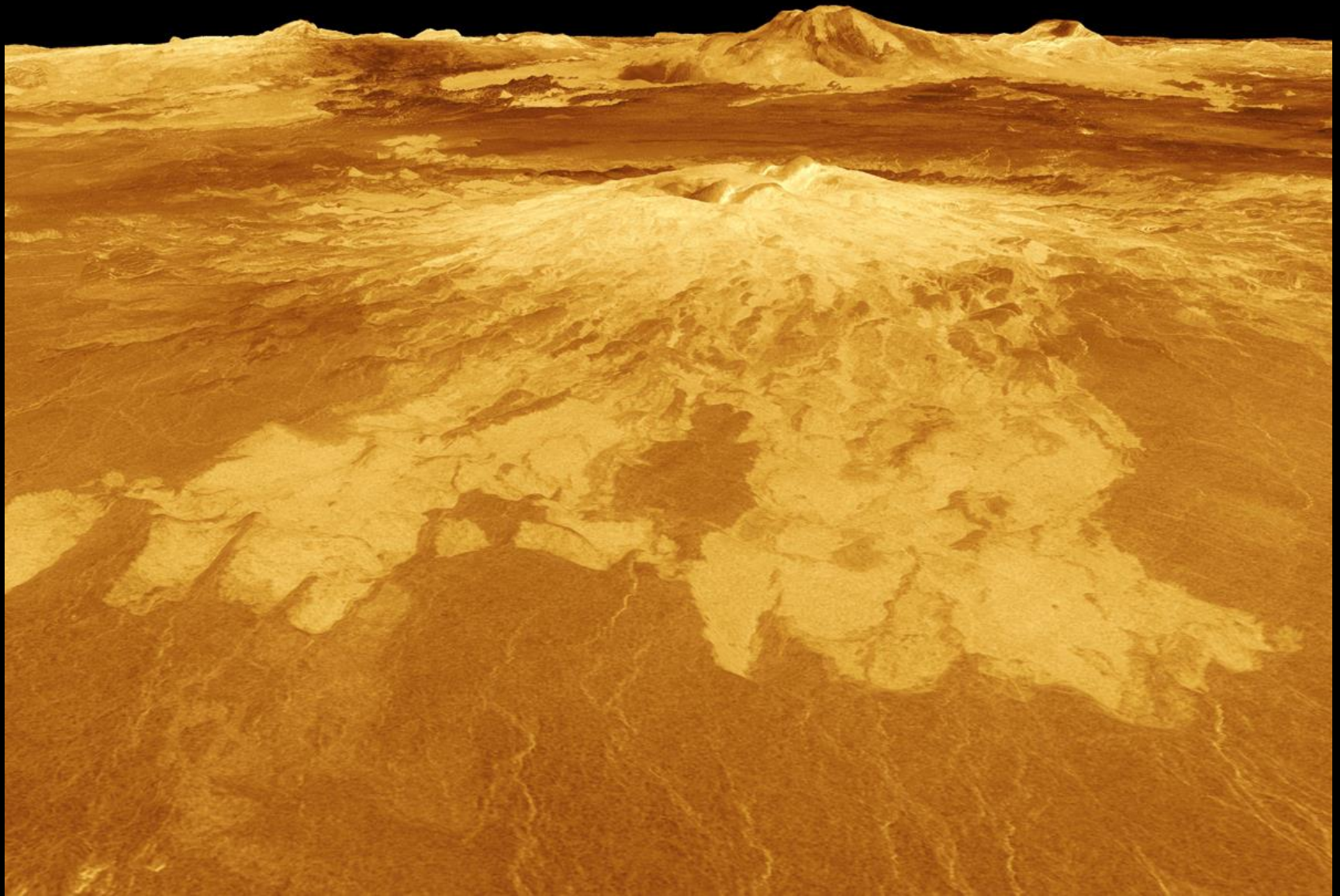
La répartition des cratères de vénus est uniforme. Elle est voisine de ce qu'on trouve sur les boucliers terrestres, dont la surface date de 500 Ma



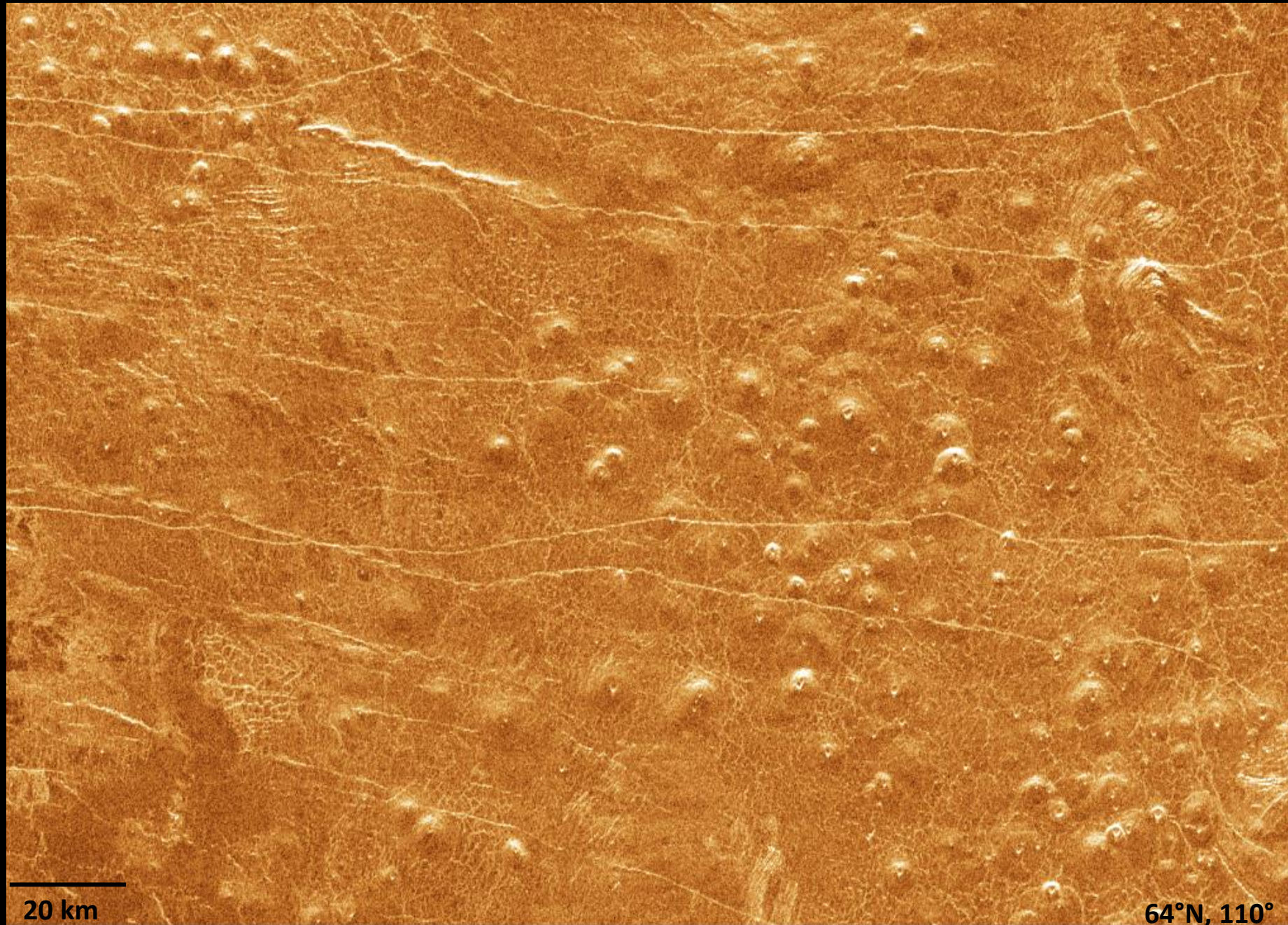
Carte des
 ≈ 900 cratères
 avec un mode
 de projection
 qui conserve
 les surfaces

Carte des ≈ 200
 cratères
 « modifiés »
 (partiellement
 recouverts de
 lave, coupés par
 une faille ...)





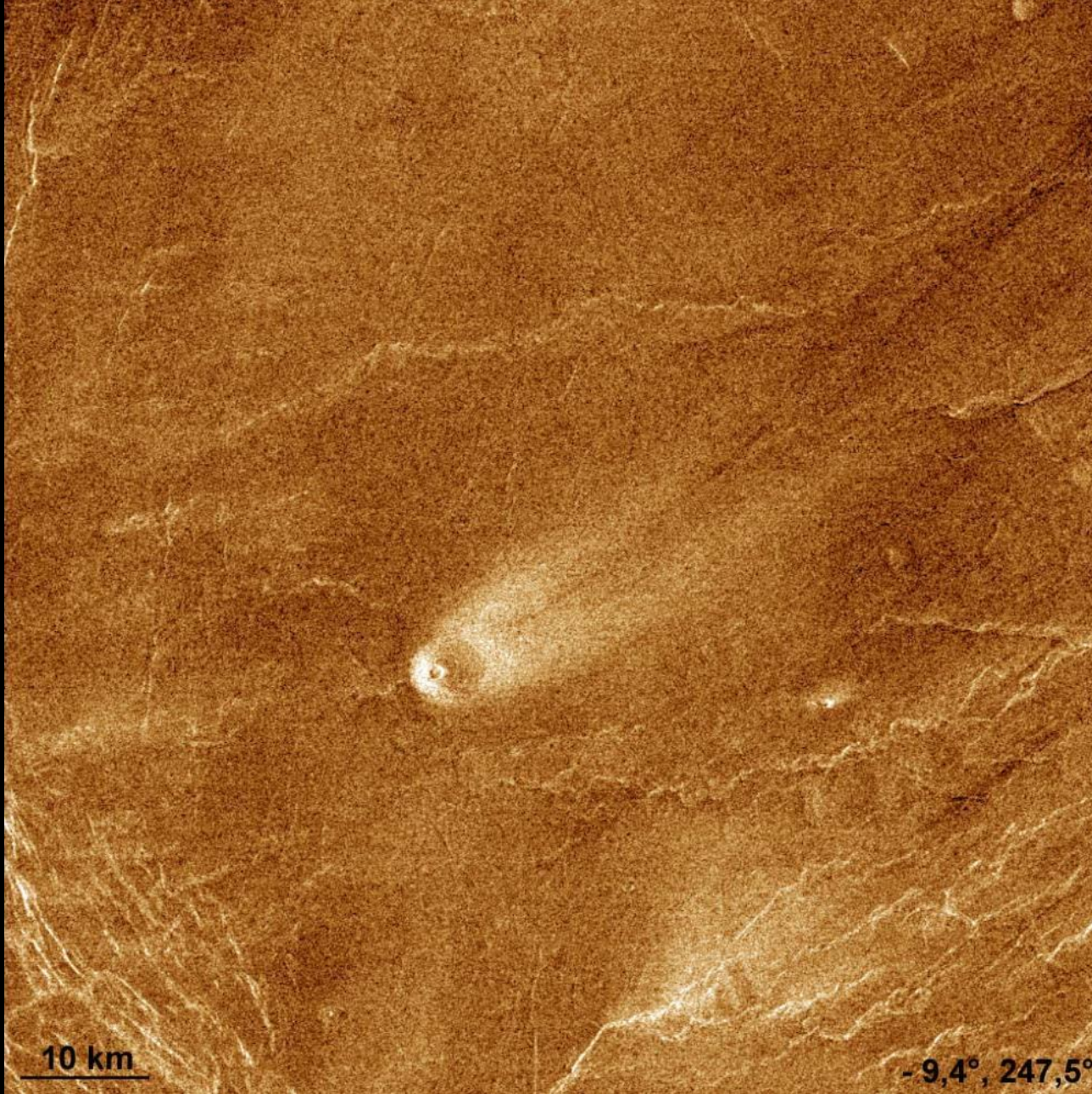
Vénus, un champ de volcans ! Des gros (300 km de diamètre) ...



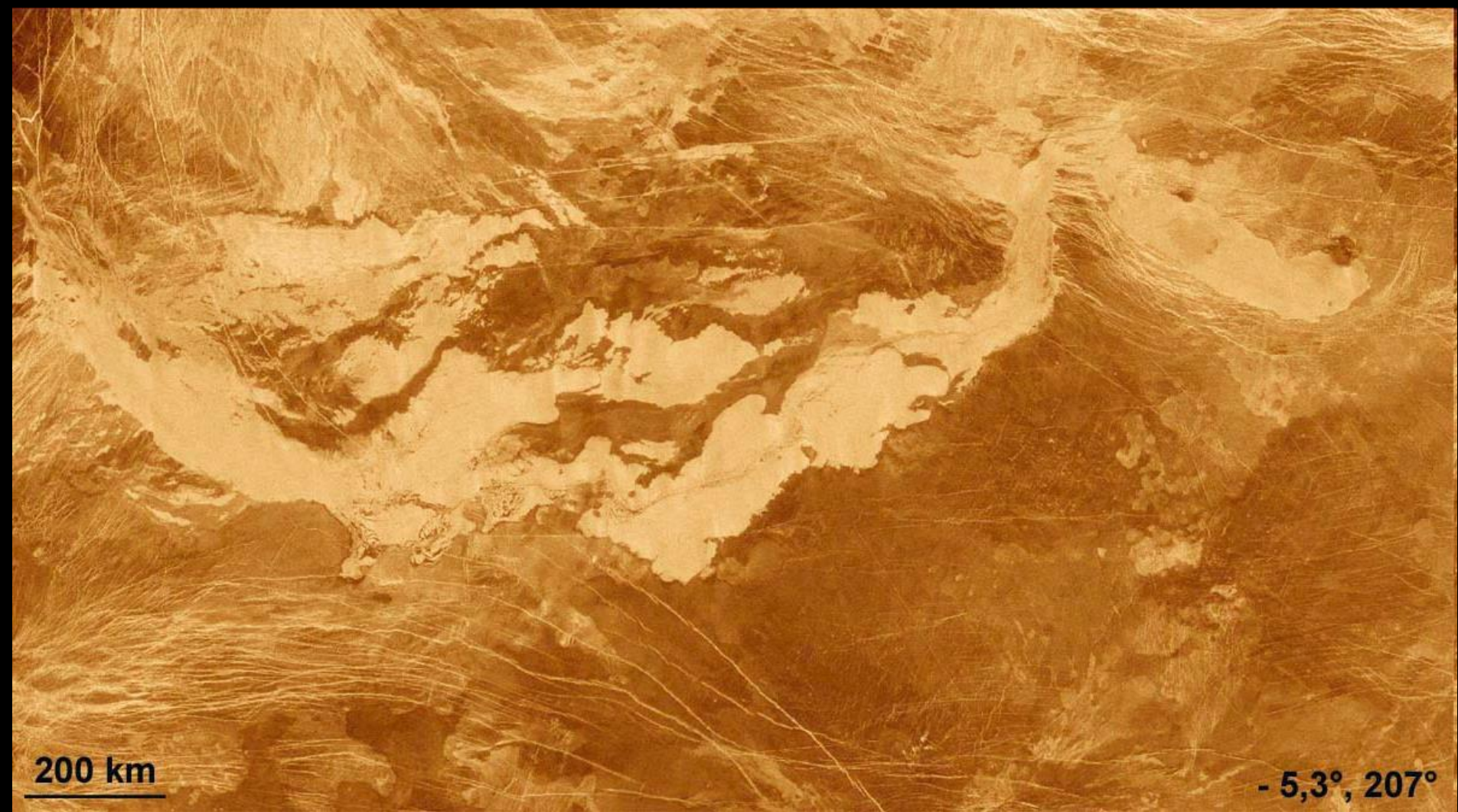
20 km

64°N, 110°

Plein de petits cônes volcaniques, peu de coulées

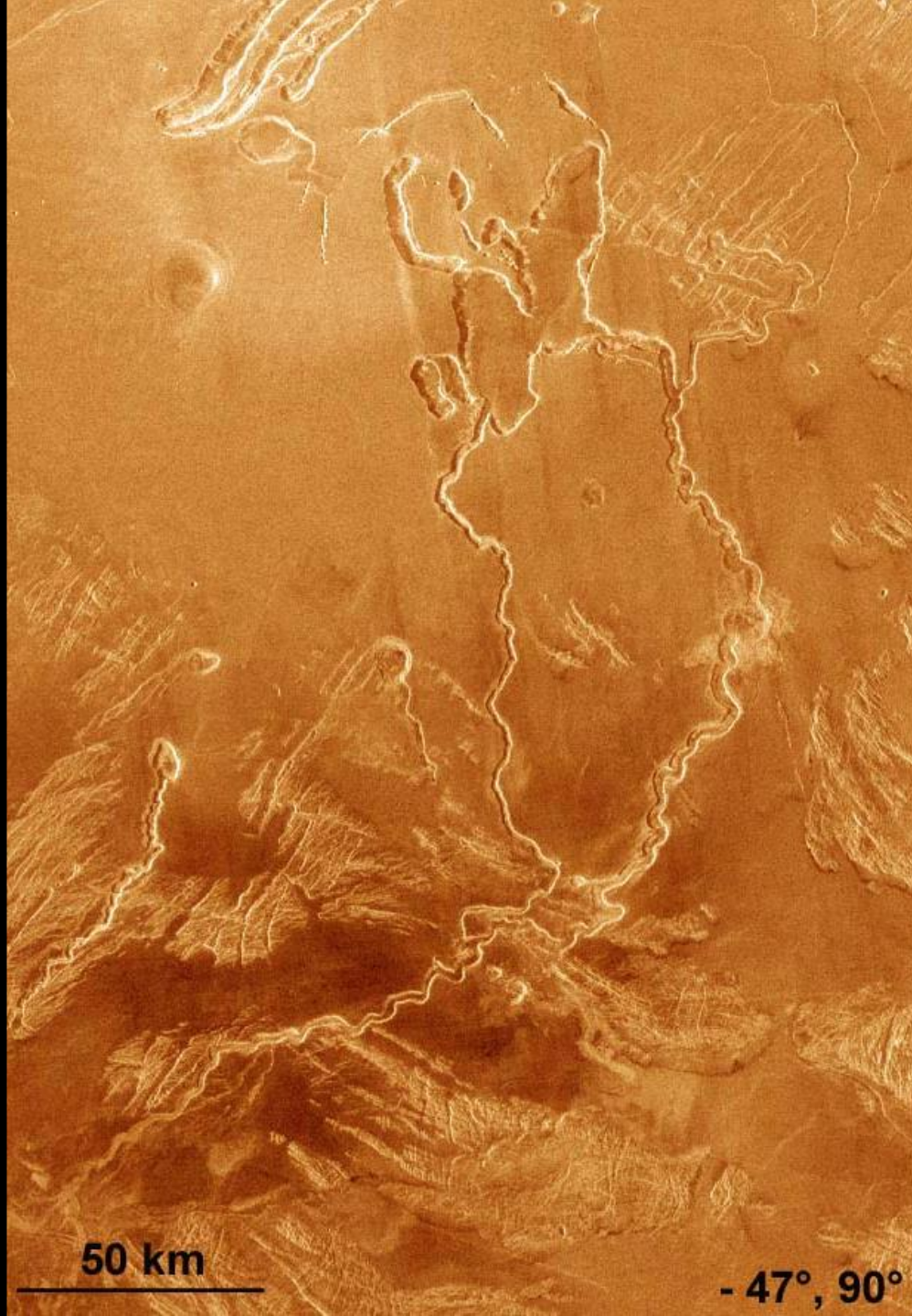


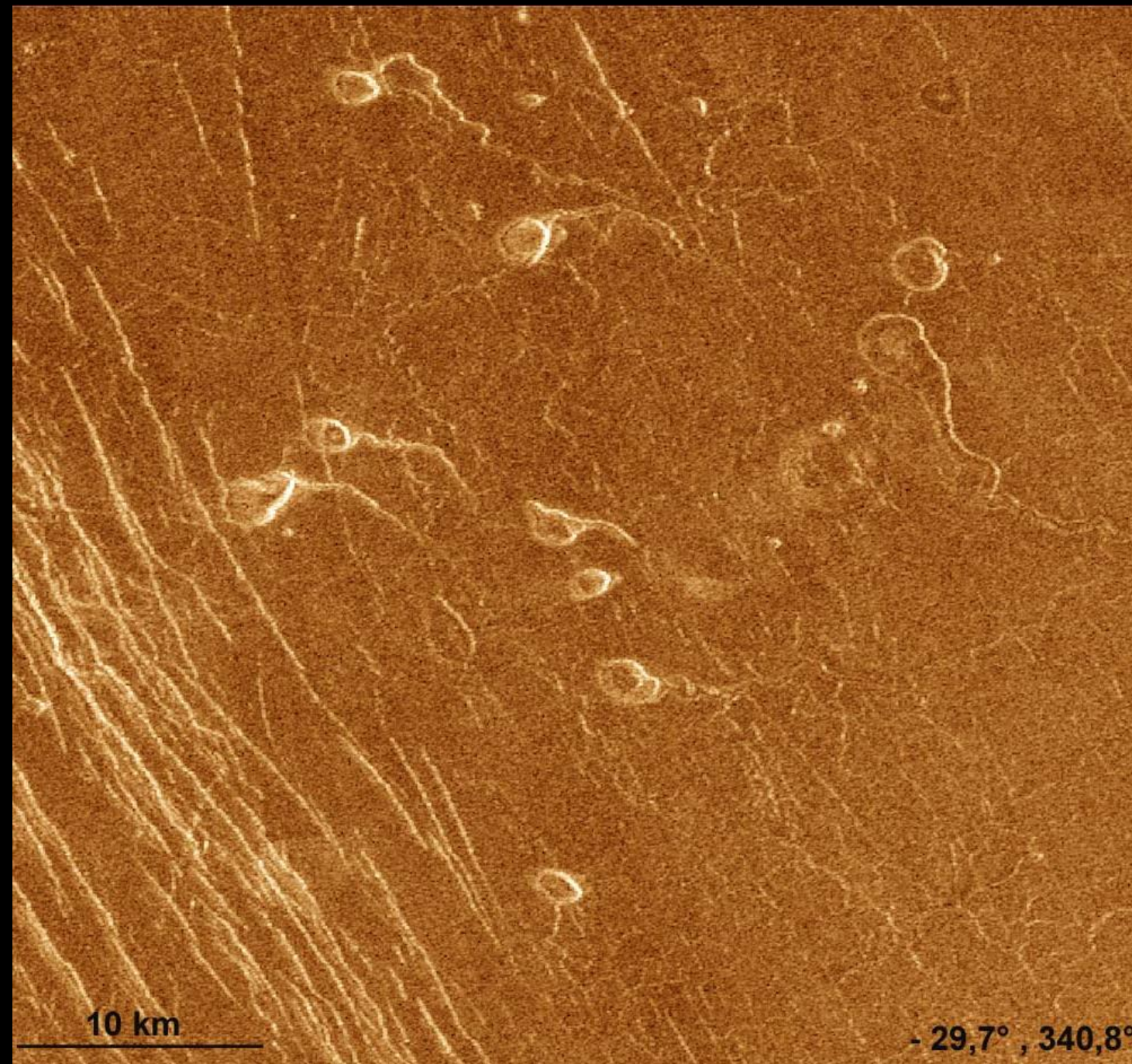
Un petit cône isolé, avec un peu de vent pendant l'éruption.



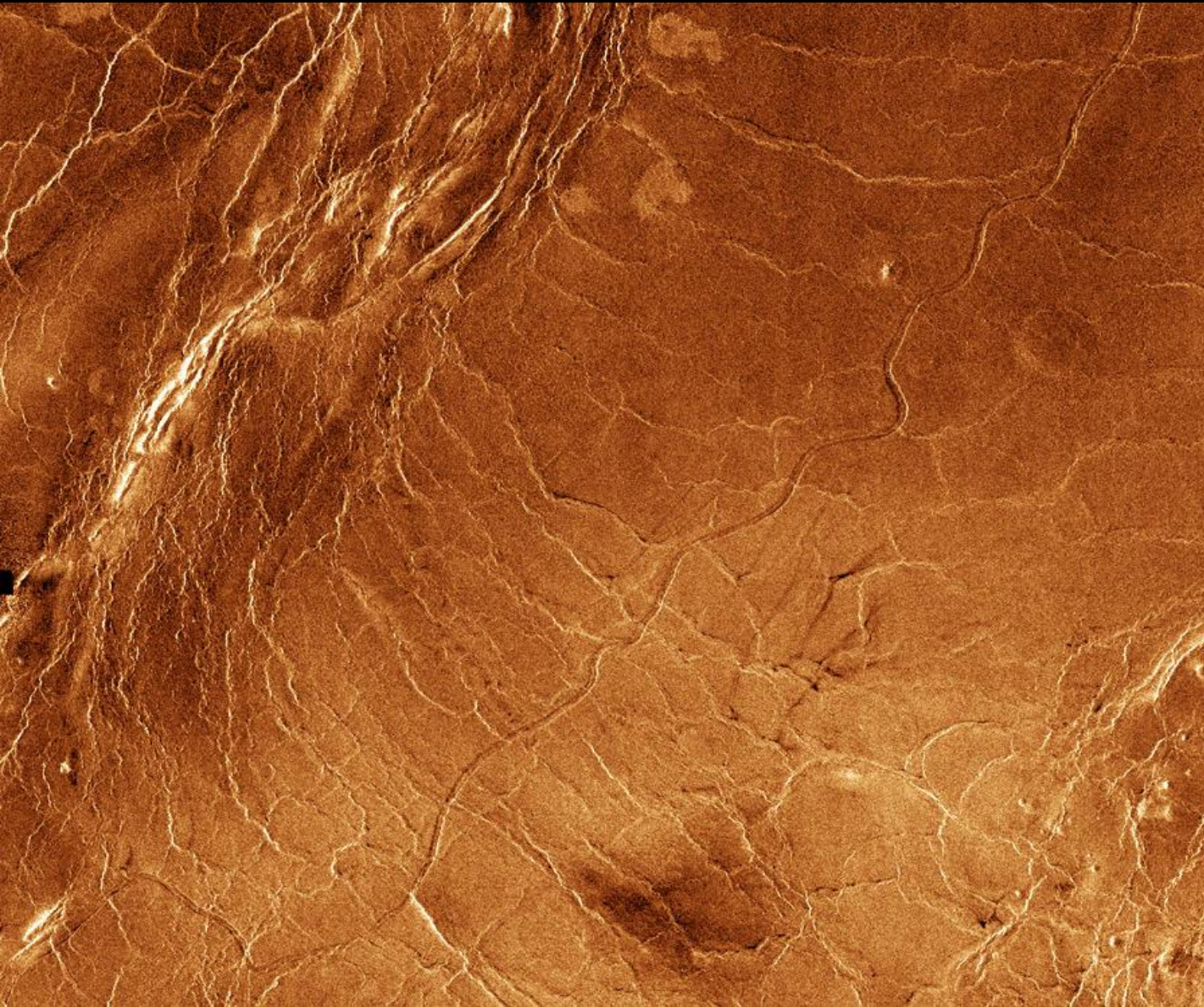
Des giga-coulées de lave (> 1000 km de long), très fluides

**Qui dit lave très fluide
dit coulées de lave
avec tunnels de lave
effondrés**



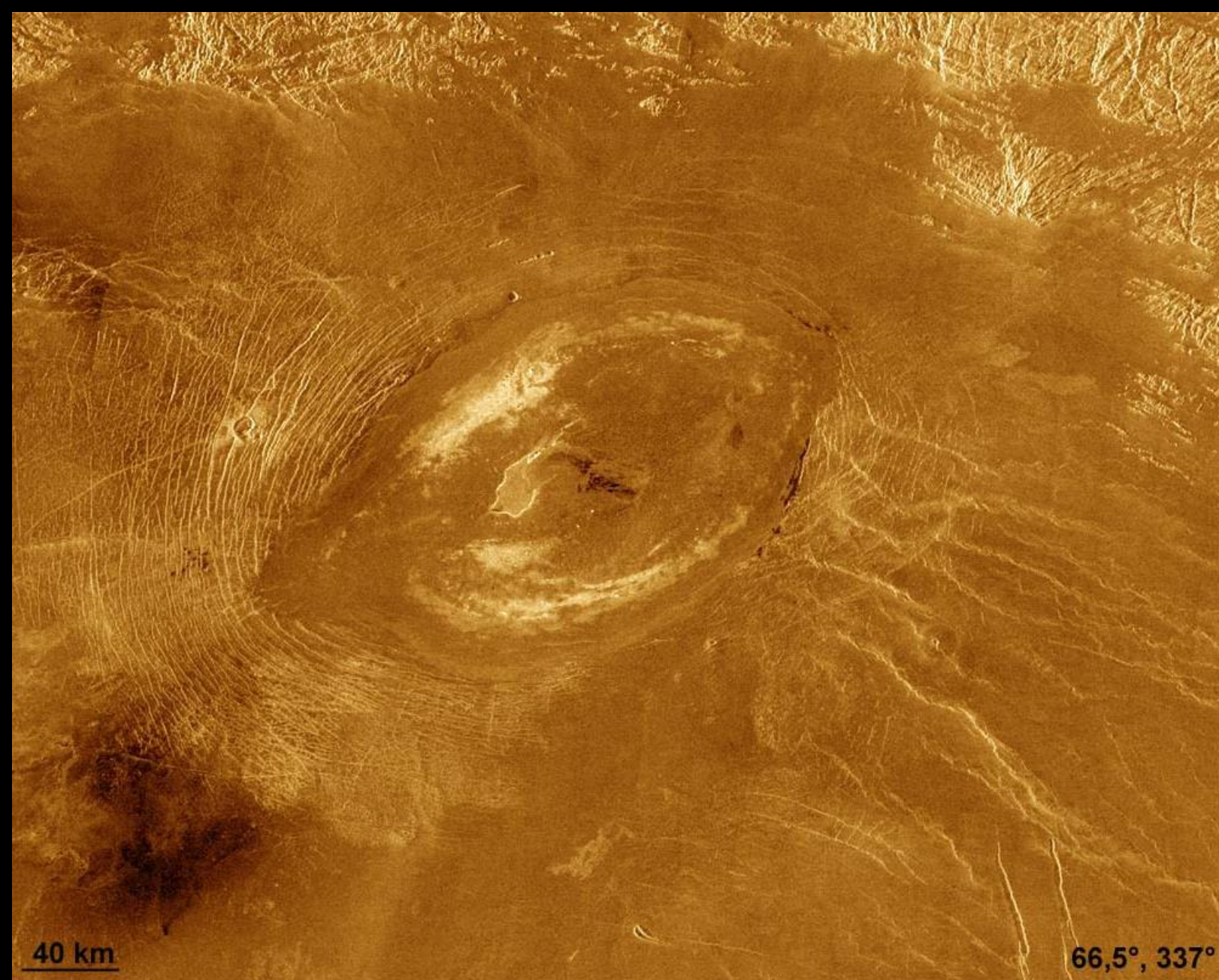


Des spermatozoïdes vénériens, de belle taille, association tunnels de lave effondrés et cratères volcaniques (normal, on est sur Vénus, déesse de l'amour)

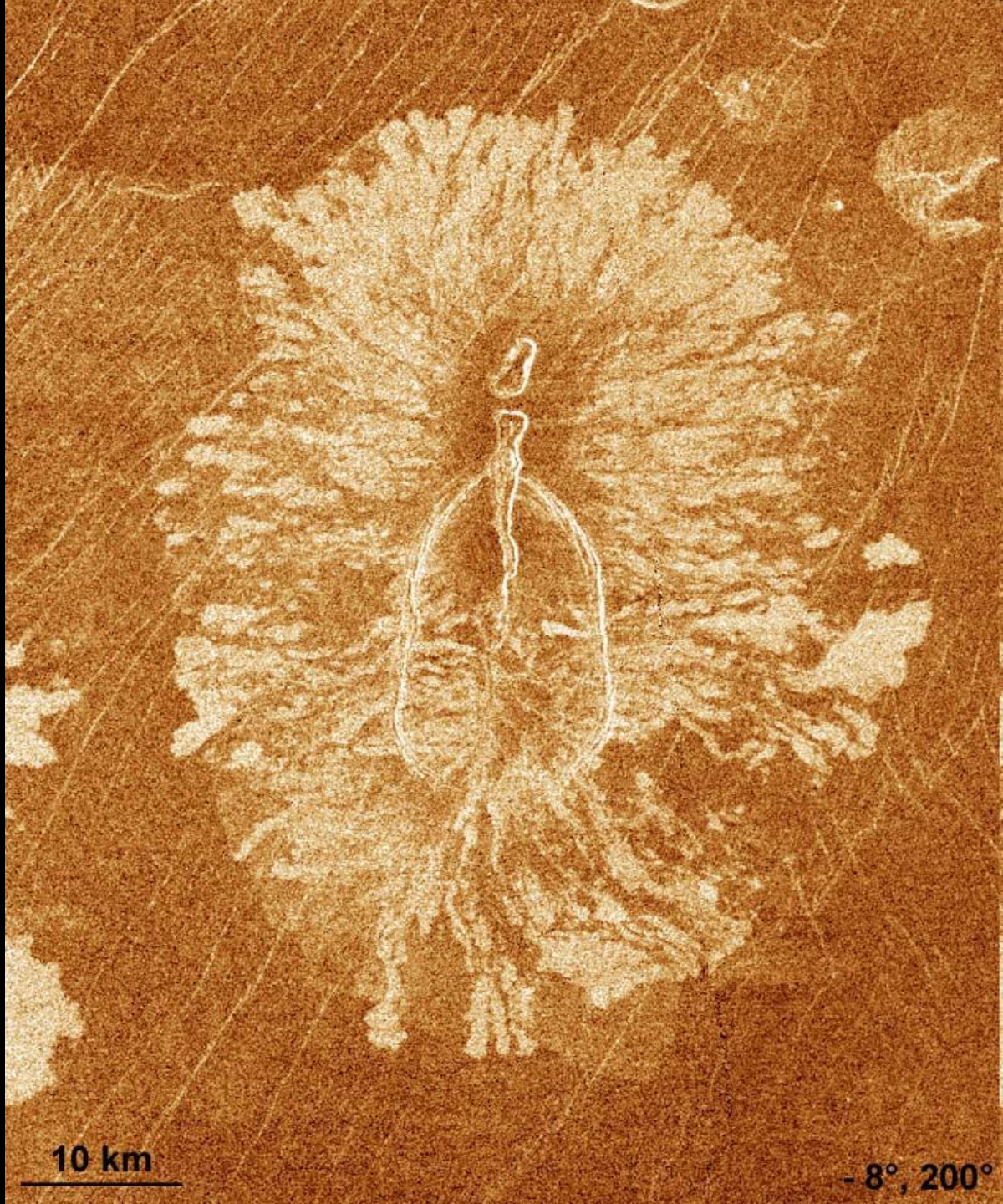


**Portion de
400 km de
long d'une
vallée de
7000 km de
long, avec
les caracté-
ristiques
d'une vallée
creusée par
érosion.**

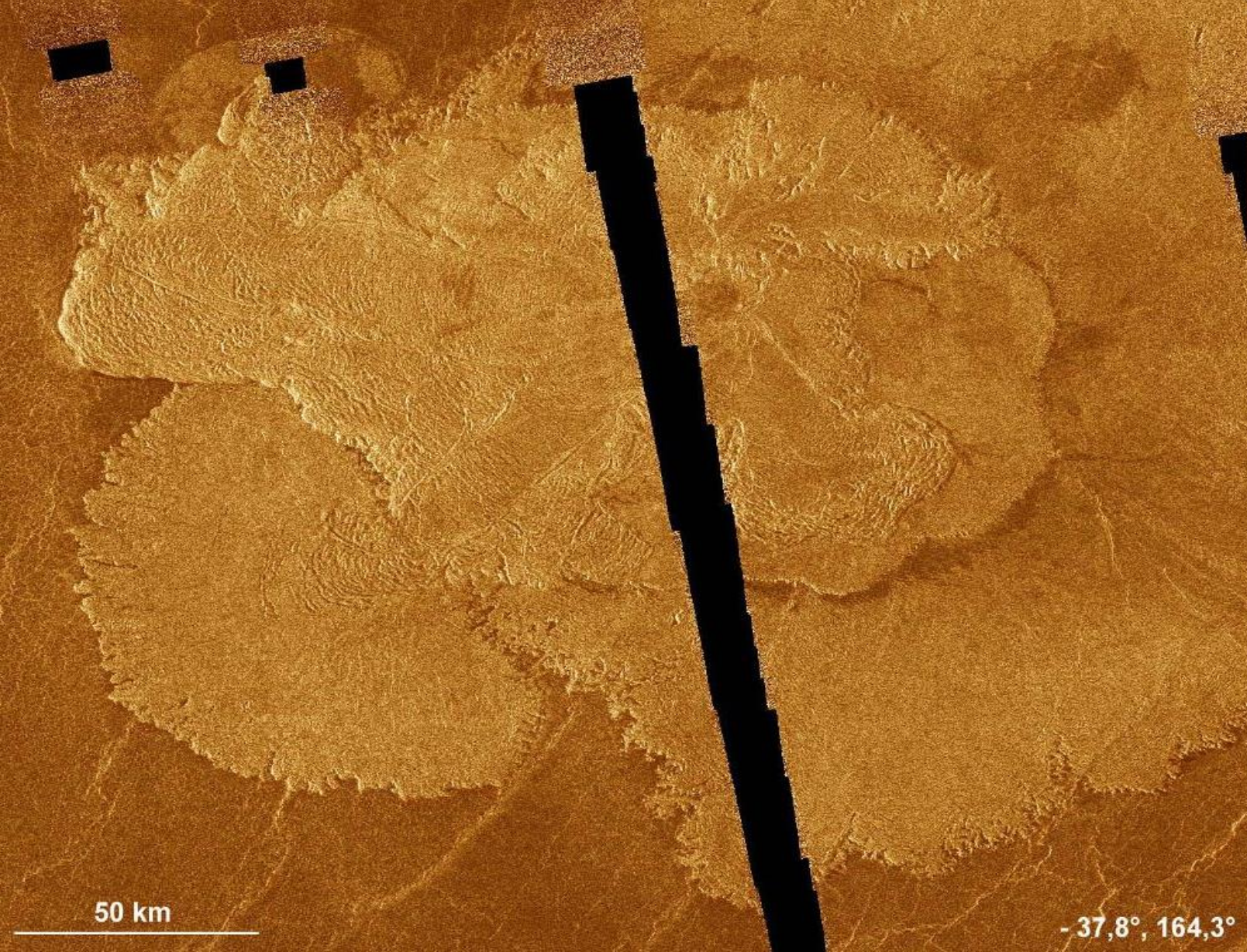
**Probablement l'érosion thermique d'un substrat
(basaltique) par une lave hyper chaude (komatiite ?)**



Caldeira, failles concentriques ...

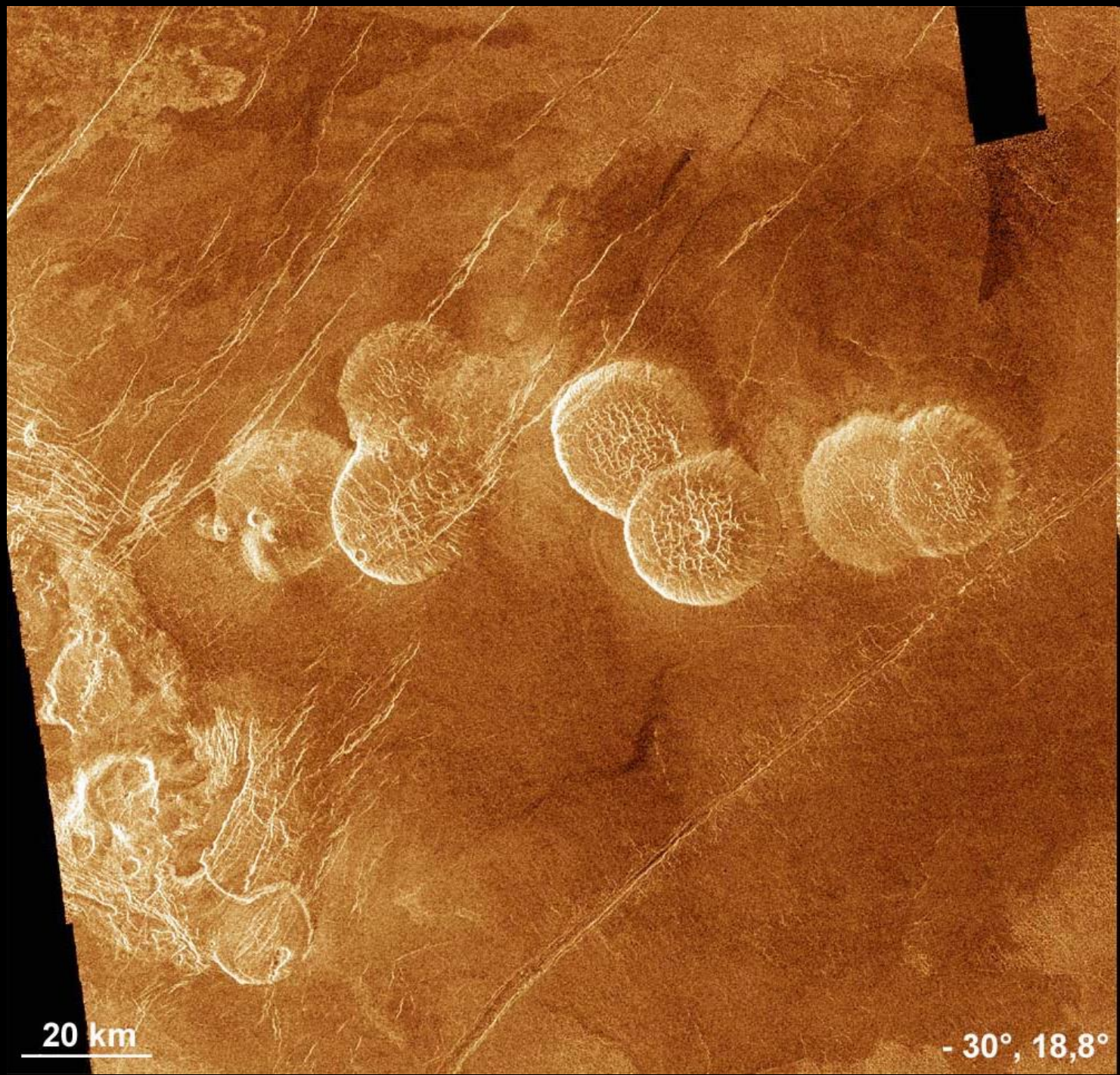


**Fente émissive
ayant émis force
coulées, bordée de
deux lèvres avec
au sommet une
petite colline ...
Cette structure est
le prototype des
structures
appelées
« anémone » par
la Nasa. N'est-ce
pas « mignon » et
suggestif ?**



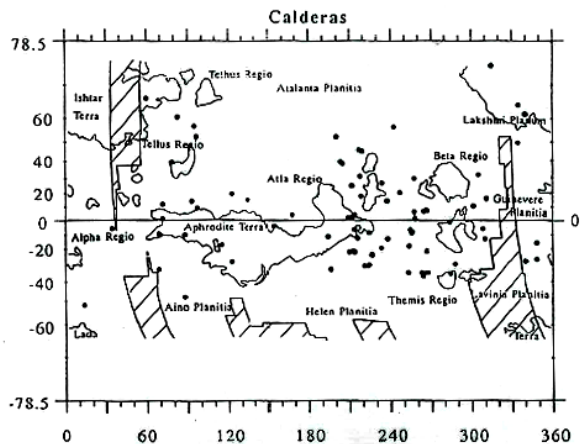
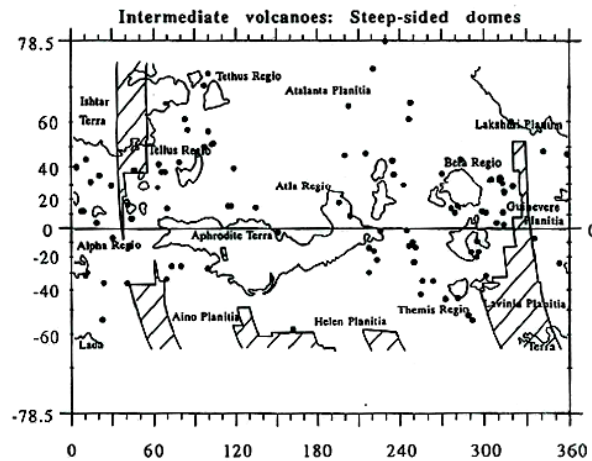
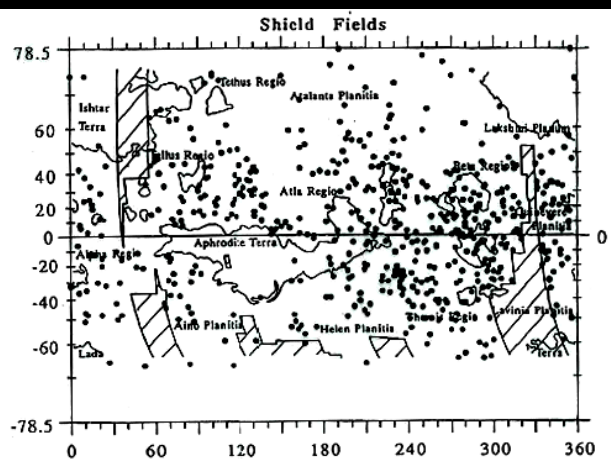
**Parfois la lave est beaucoup plus visqueuse ;
différenciation ?**

... des
« petits »
dômes,



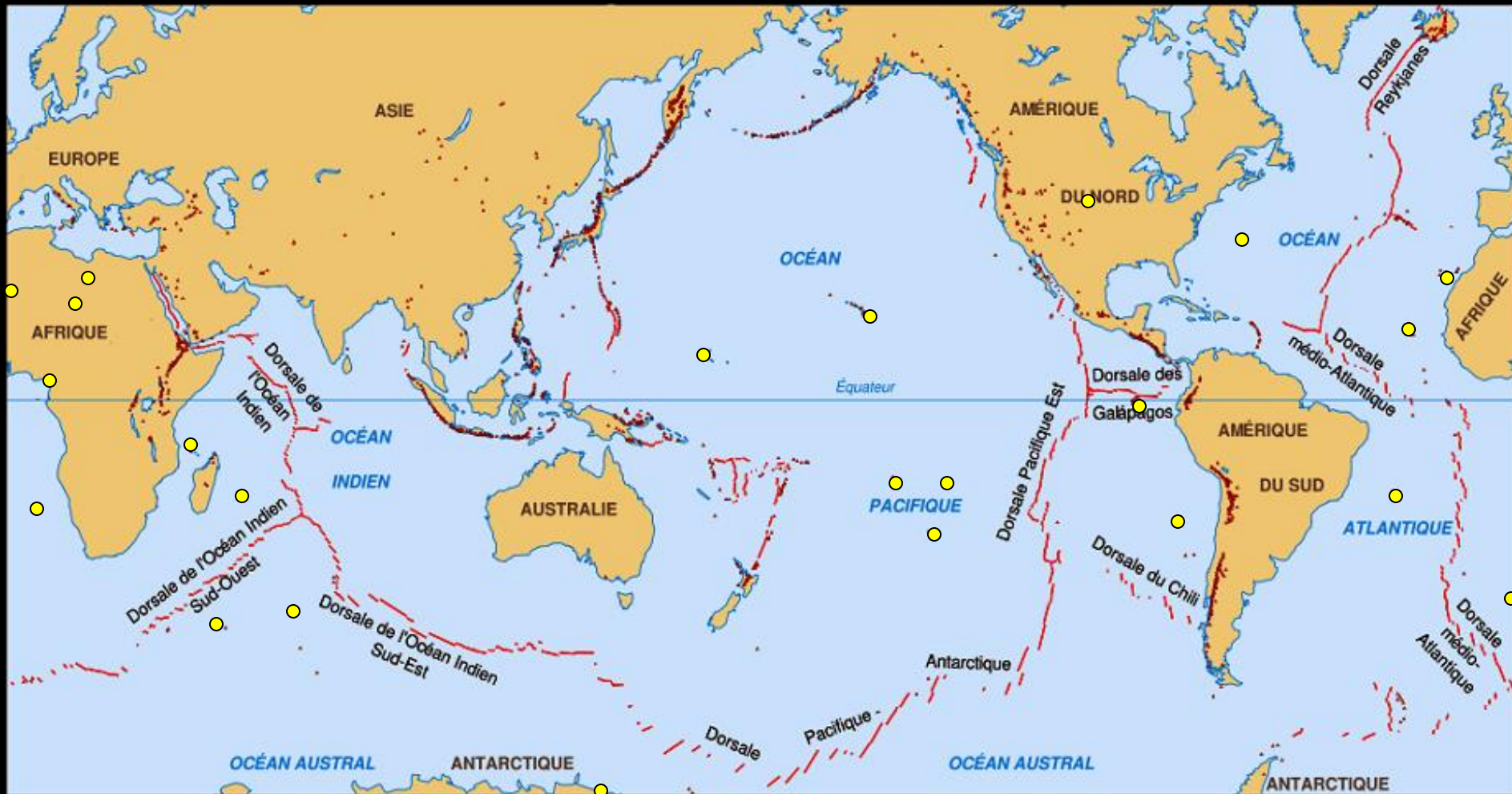


**... comme ce dôme de rhyolite dans la Vallée des
10 000 fumées, Alaska**

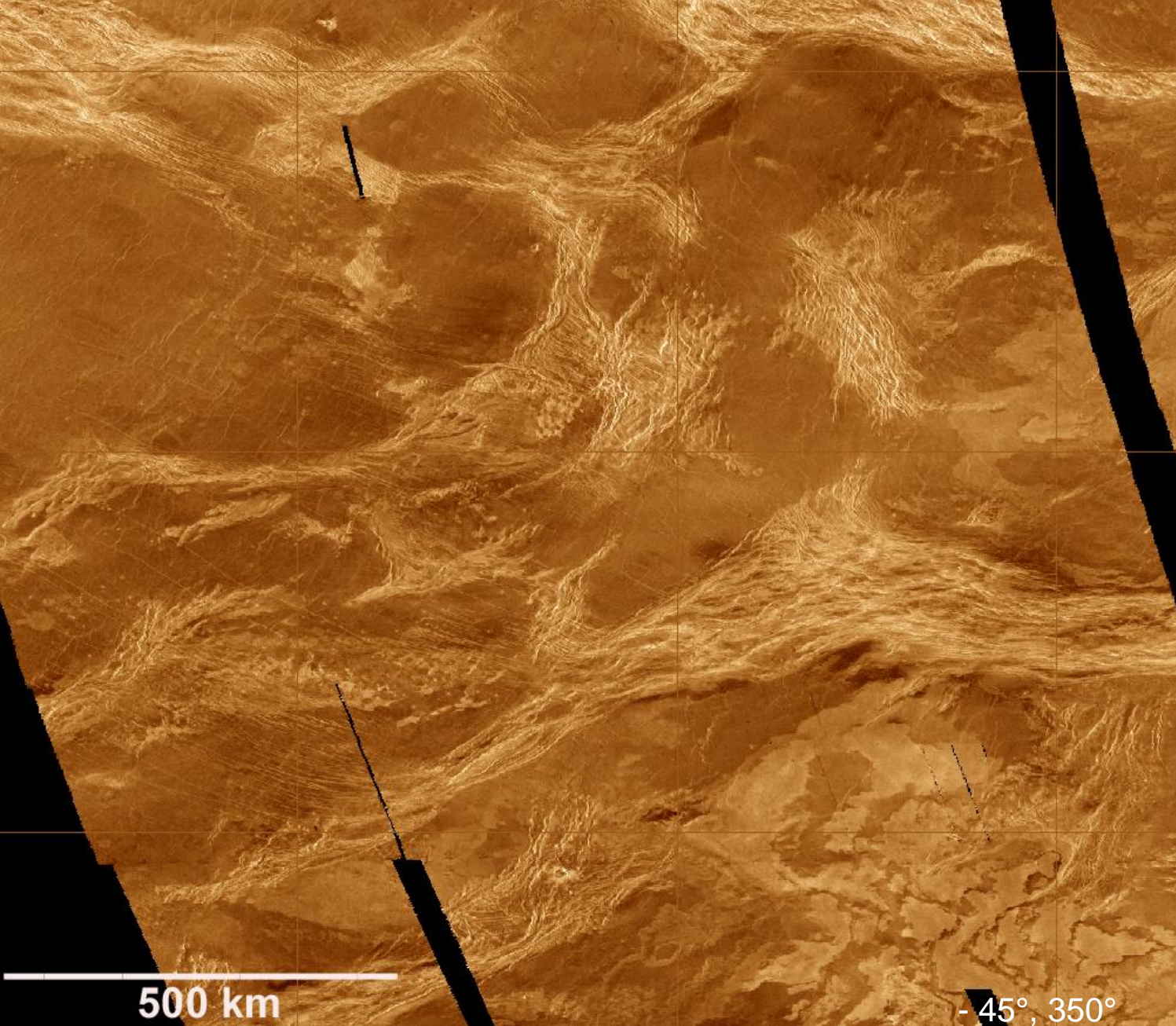


La répartition des volcans vénériens. Il y en a partout, sans groupement particulier.

... et celle des volcans terrestres actifs ou récents



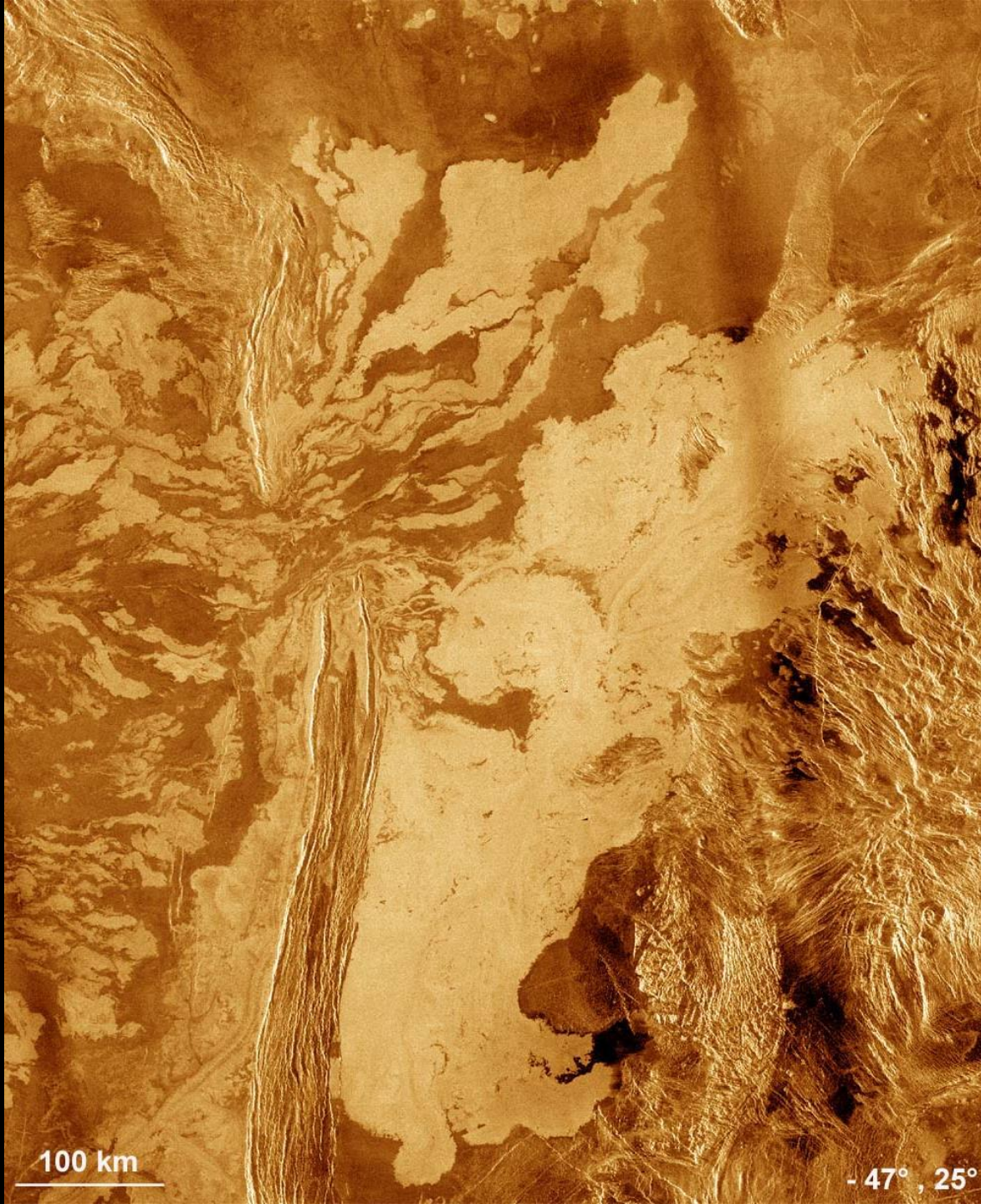
Sur Terre, la majorité des volcans forment des alignements ou des regroupements (petits points ou traits rouges), signature volcanique de la tectonique des plaques (seuls quelques uns sont « hors logique plaque »). Rien de tout ça sur Vénus → pas de tectonique des plaques.



500 km

-45°, 350°

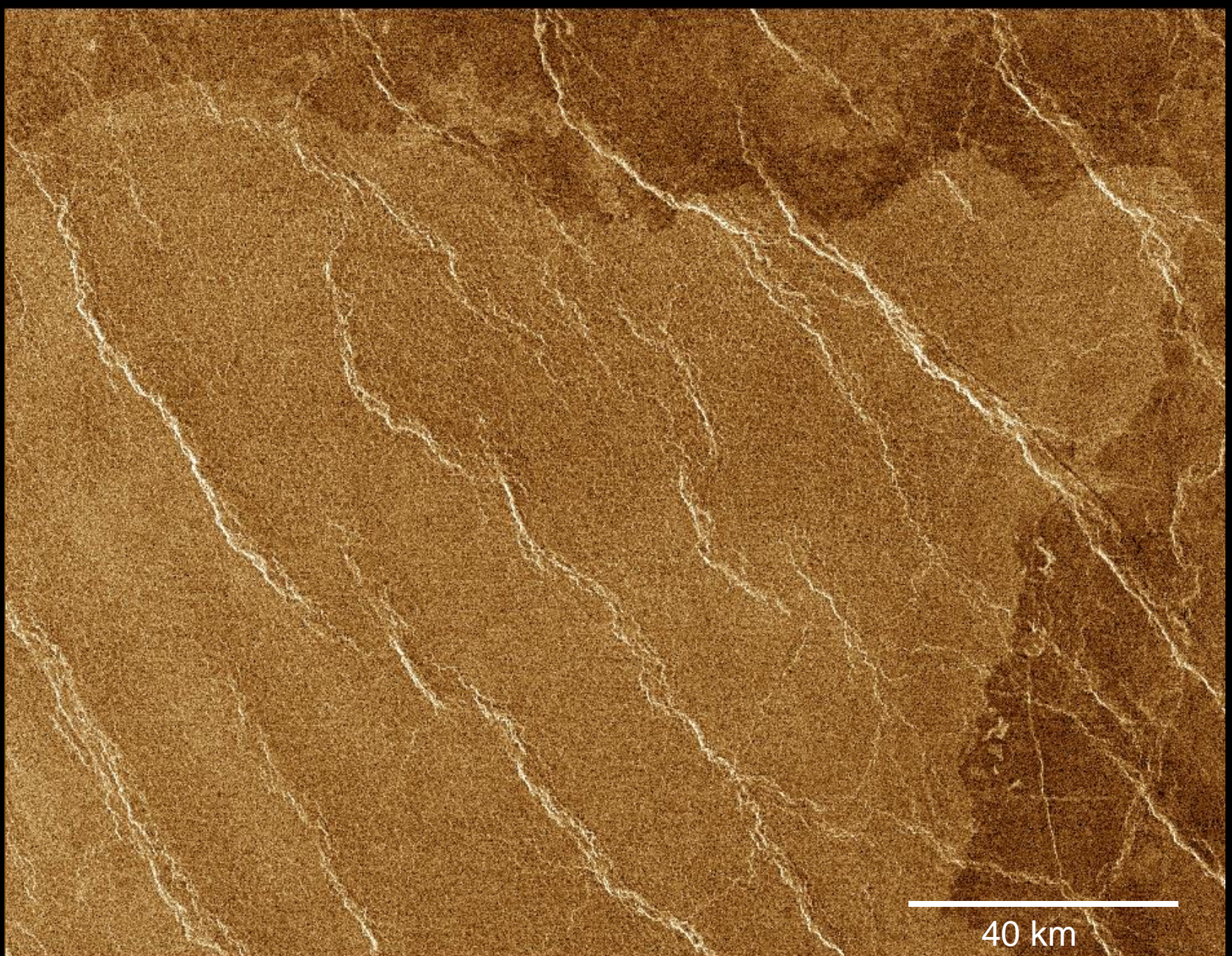
La tectonique vénérienne : plaines et « fouillis » tectonique



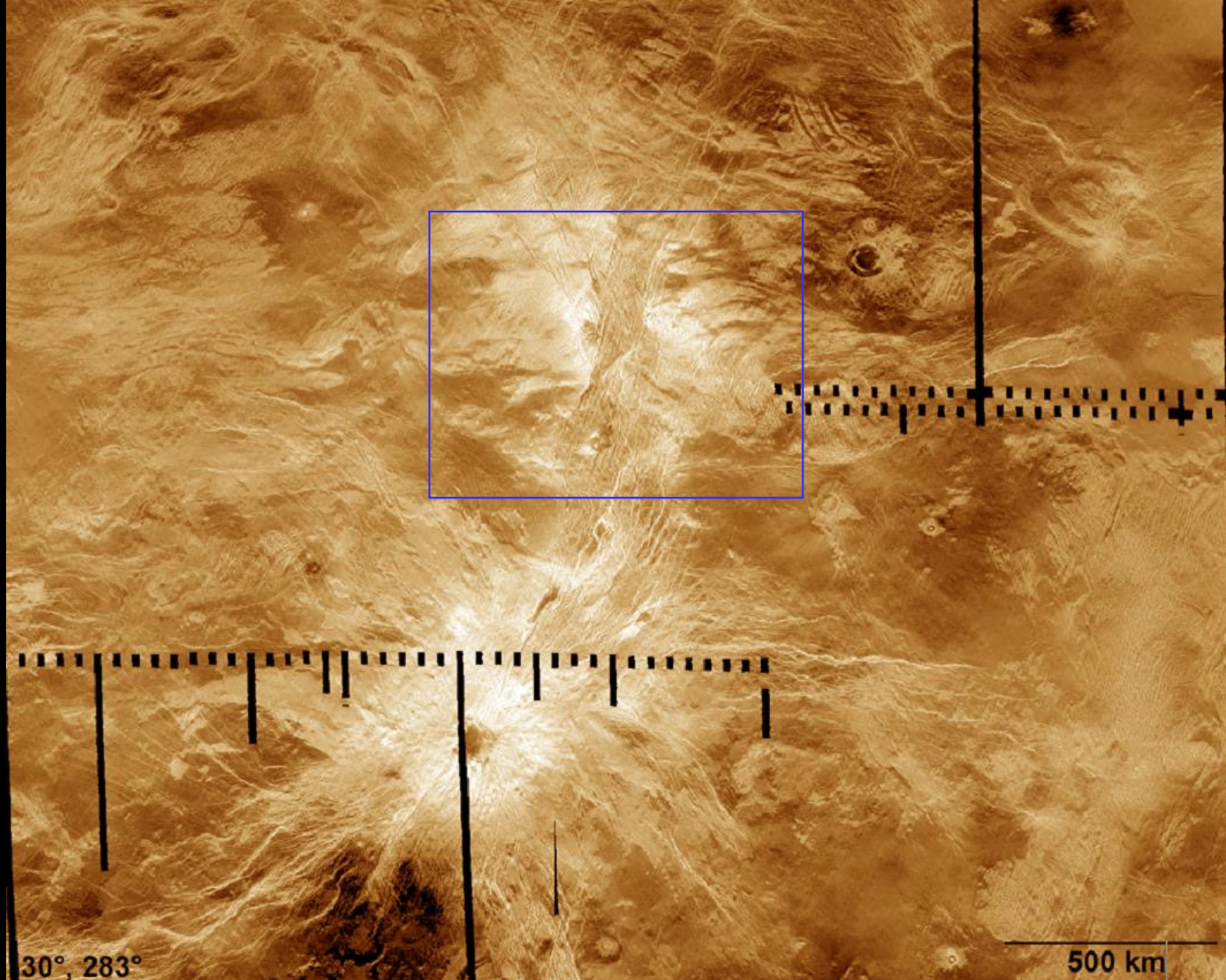
Une chaîne de montagne (plis ?) partiellement recouverte de flots de laves

100 km

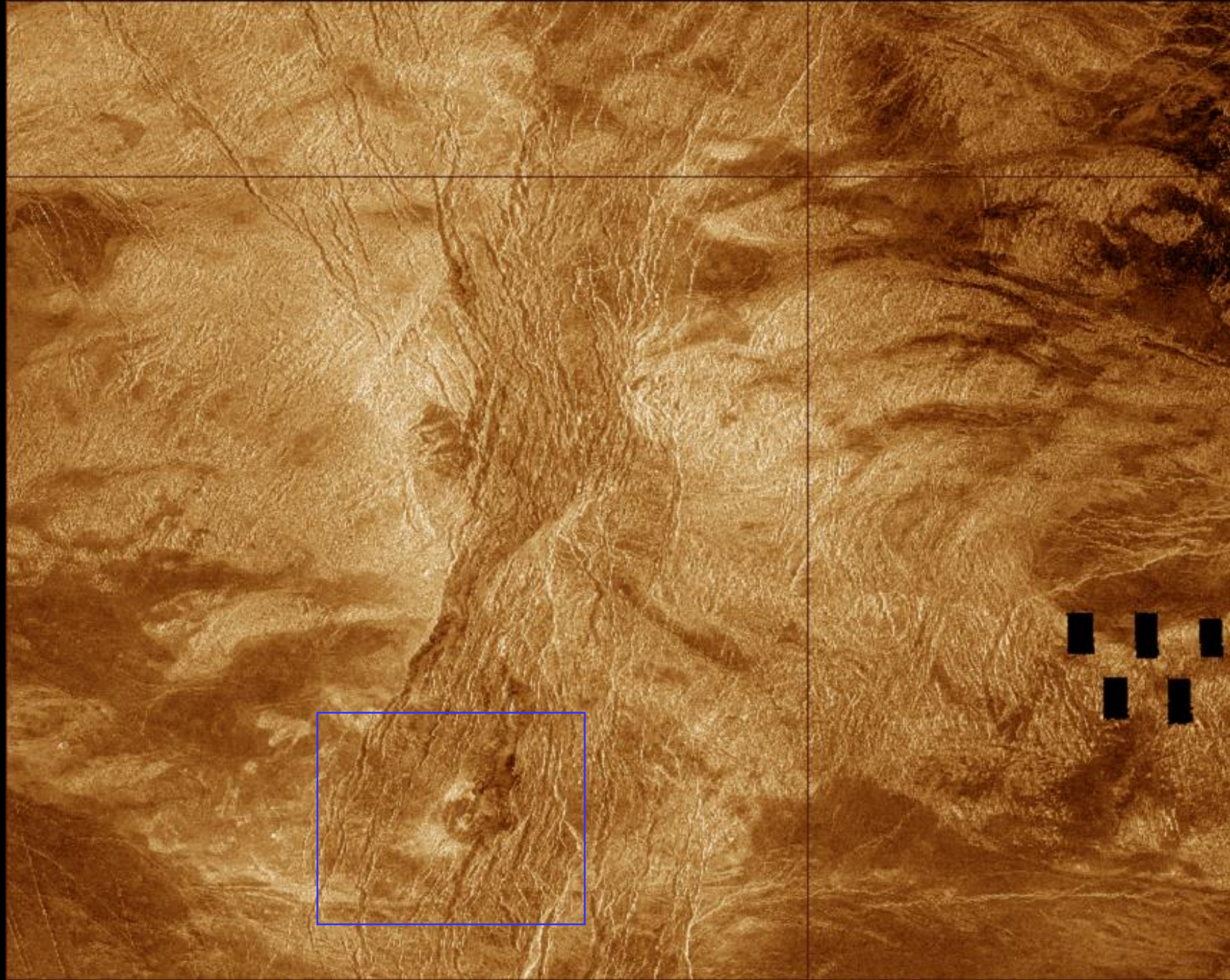
- 47° , 25°

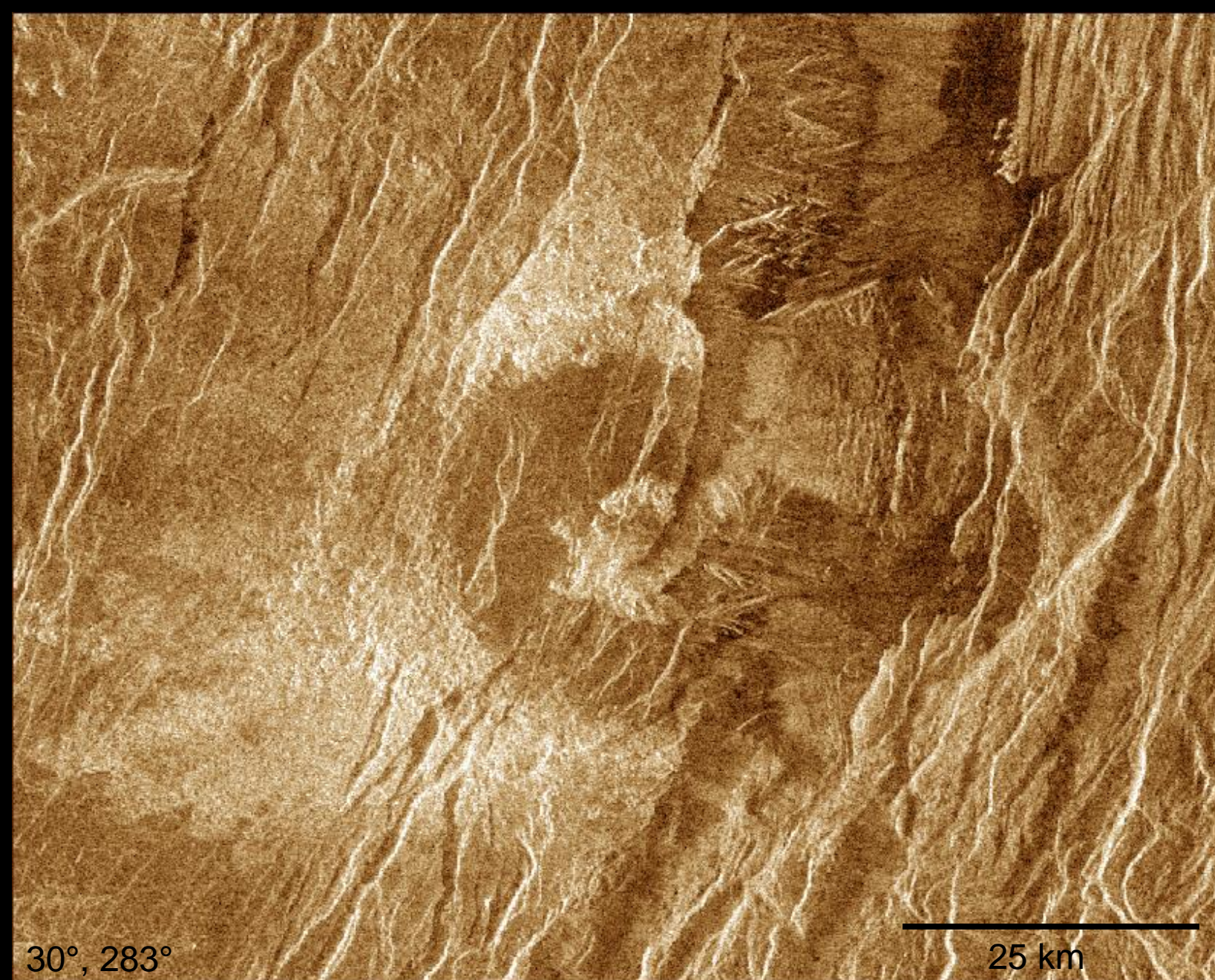


Même les plaines (Rusalka Planitia) sont « ridées »

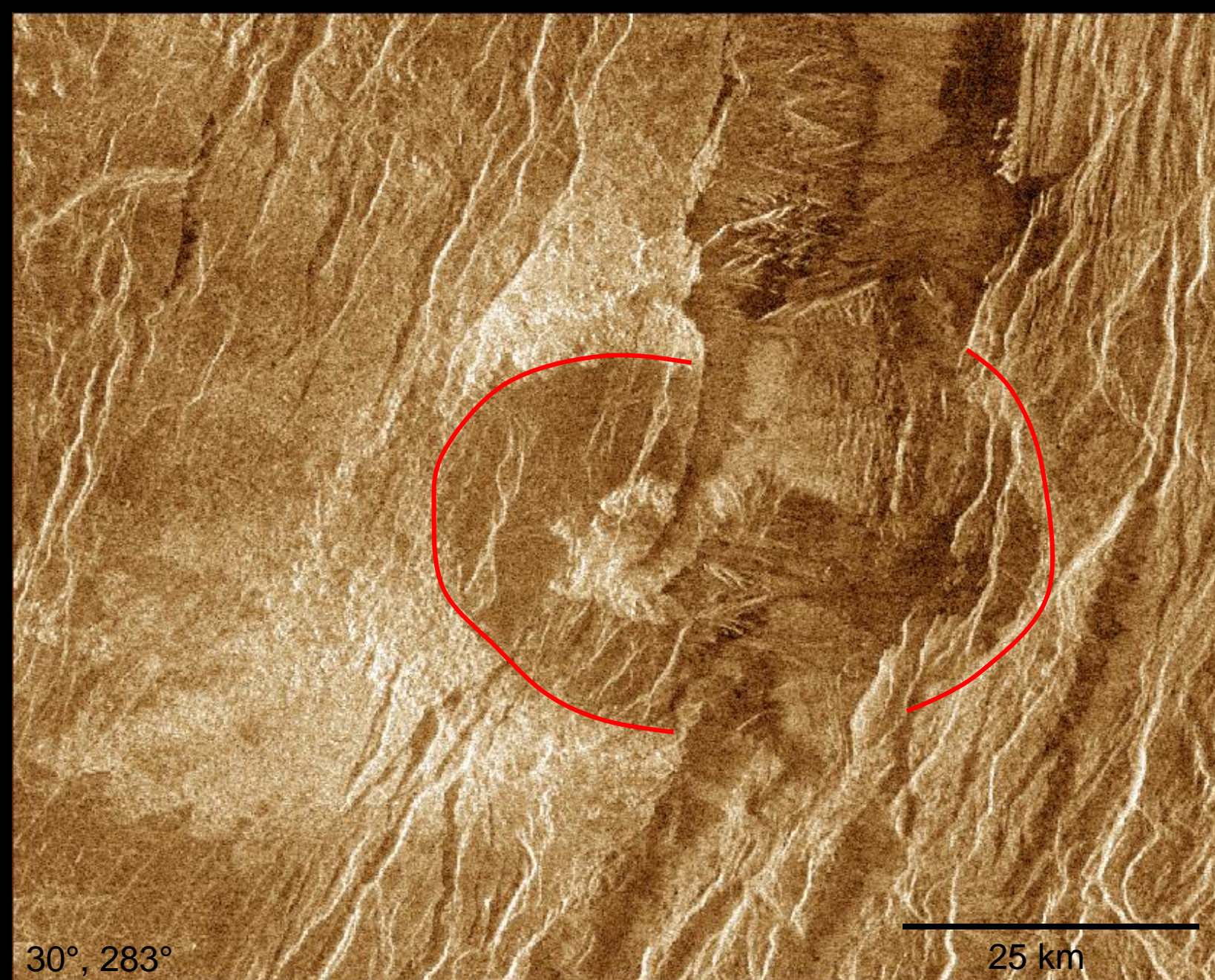


Quelque chose qui ressemble à un grand rift dans Beta Regio. On va en voir deux zooms successifs

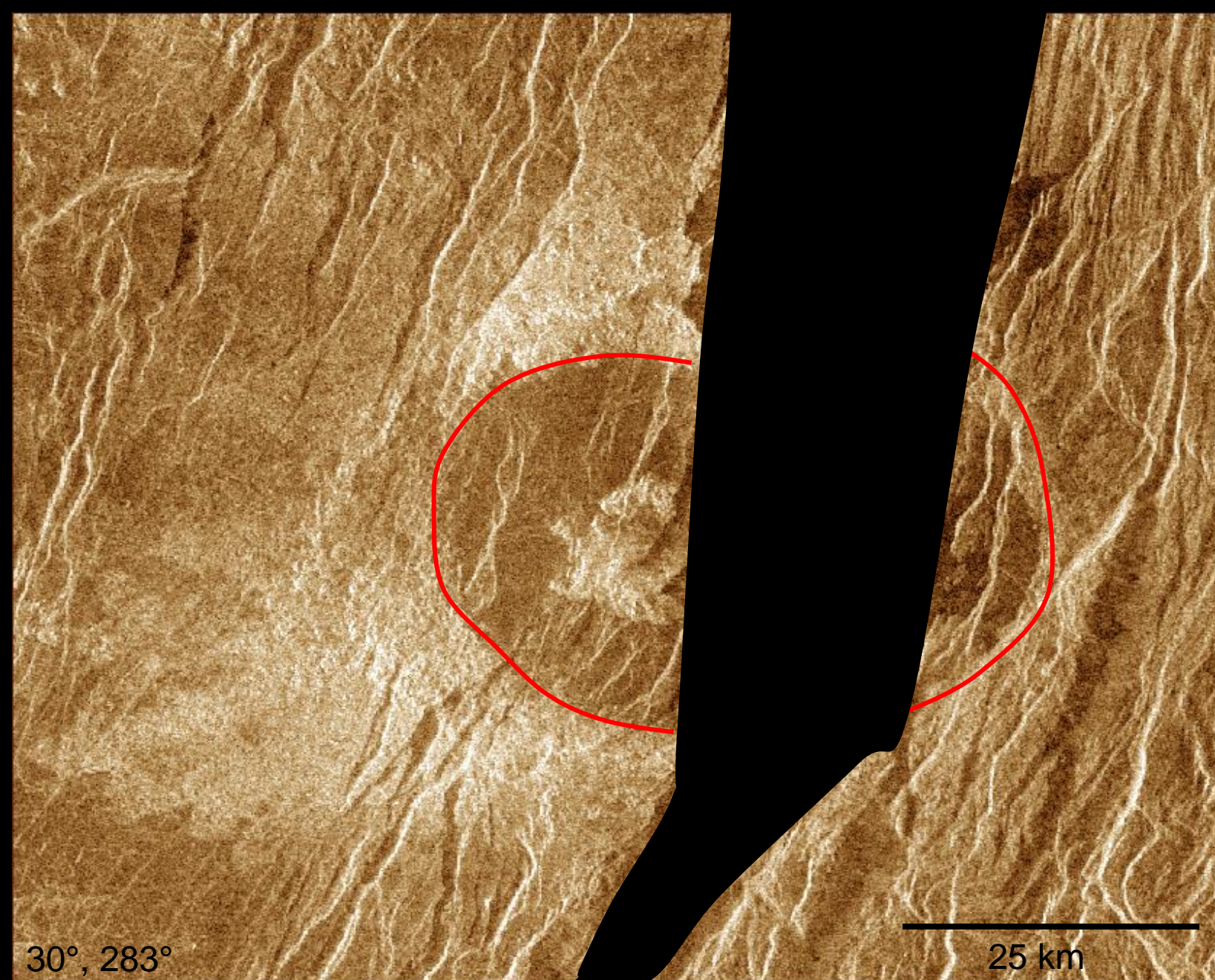




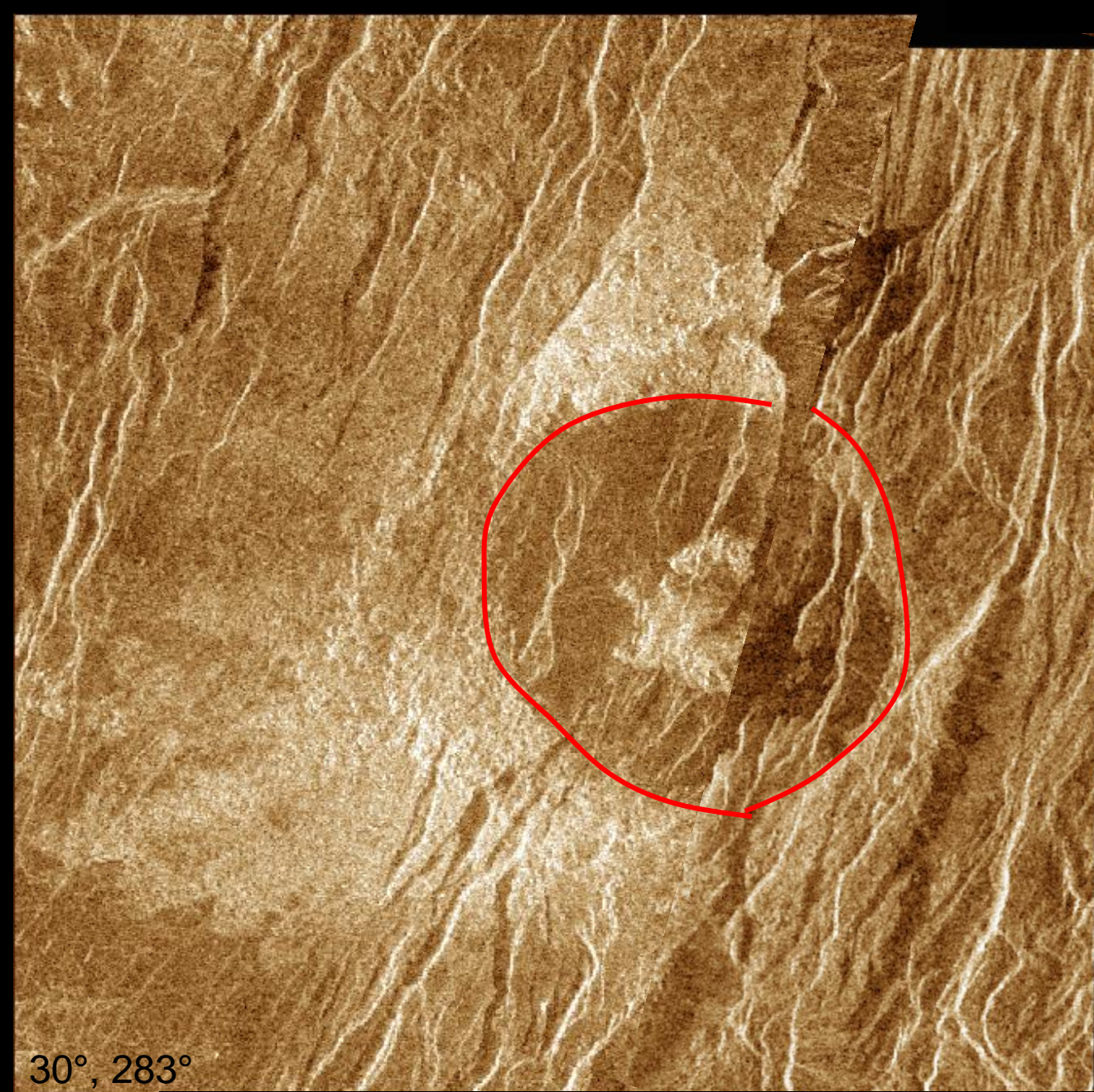
Un cratère affecté par cette extension



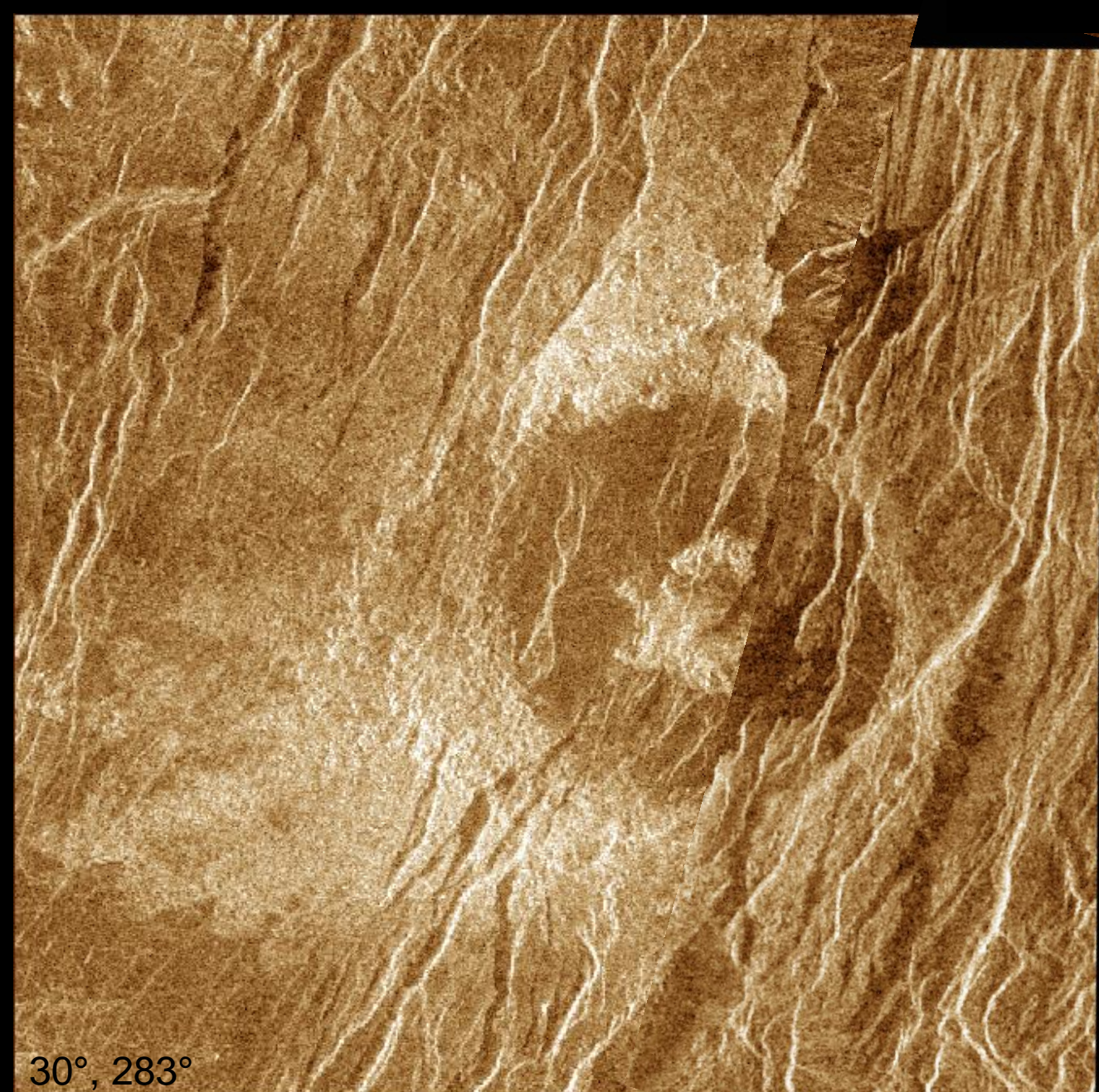
Un cratère affecté par cette extension



Un cratère affecté par cette extension

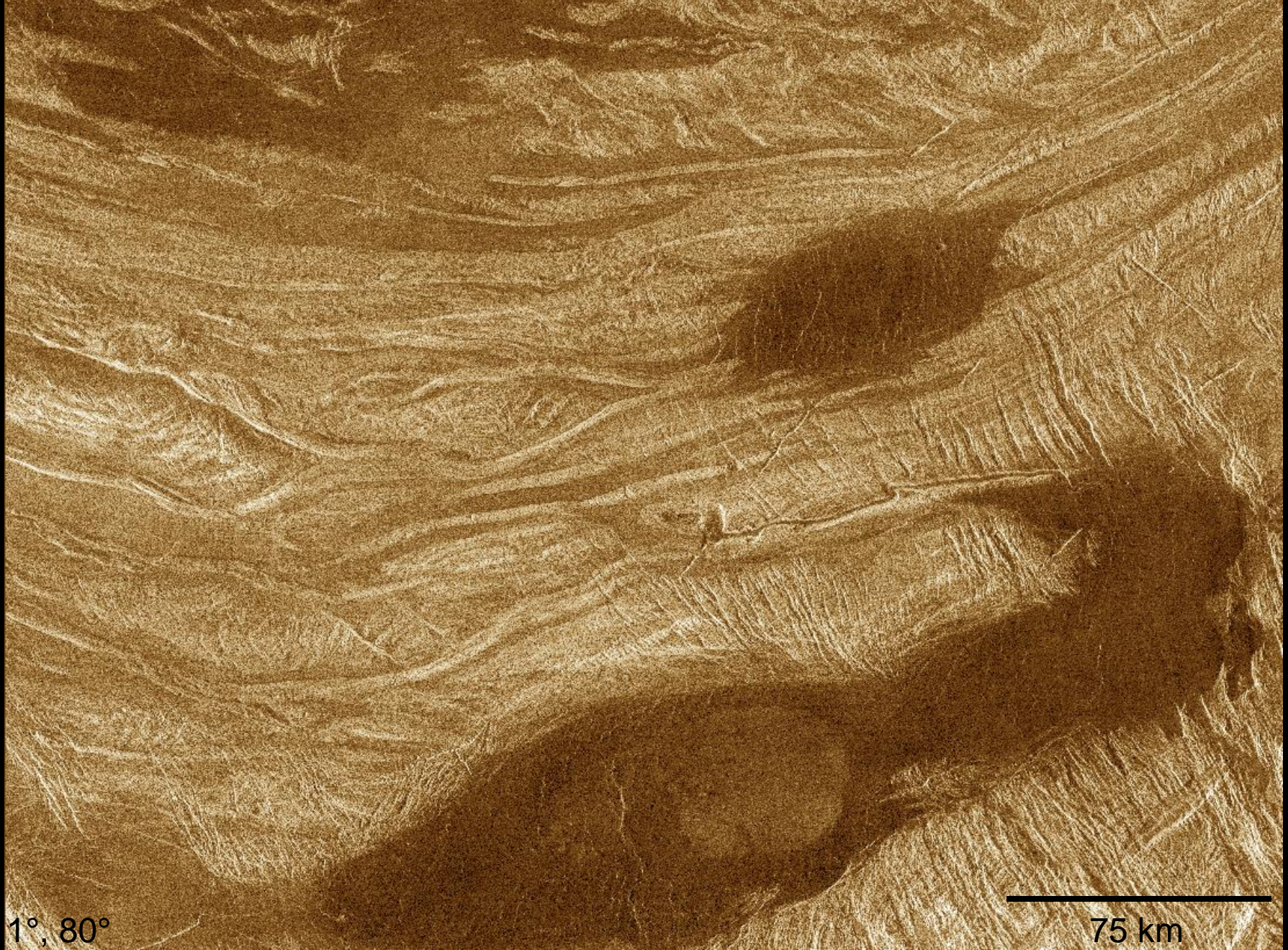


Un cratère affecté par cette extension



30°, 283°

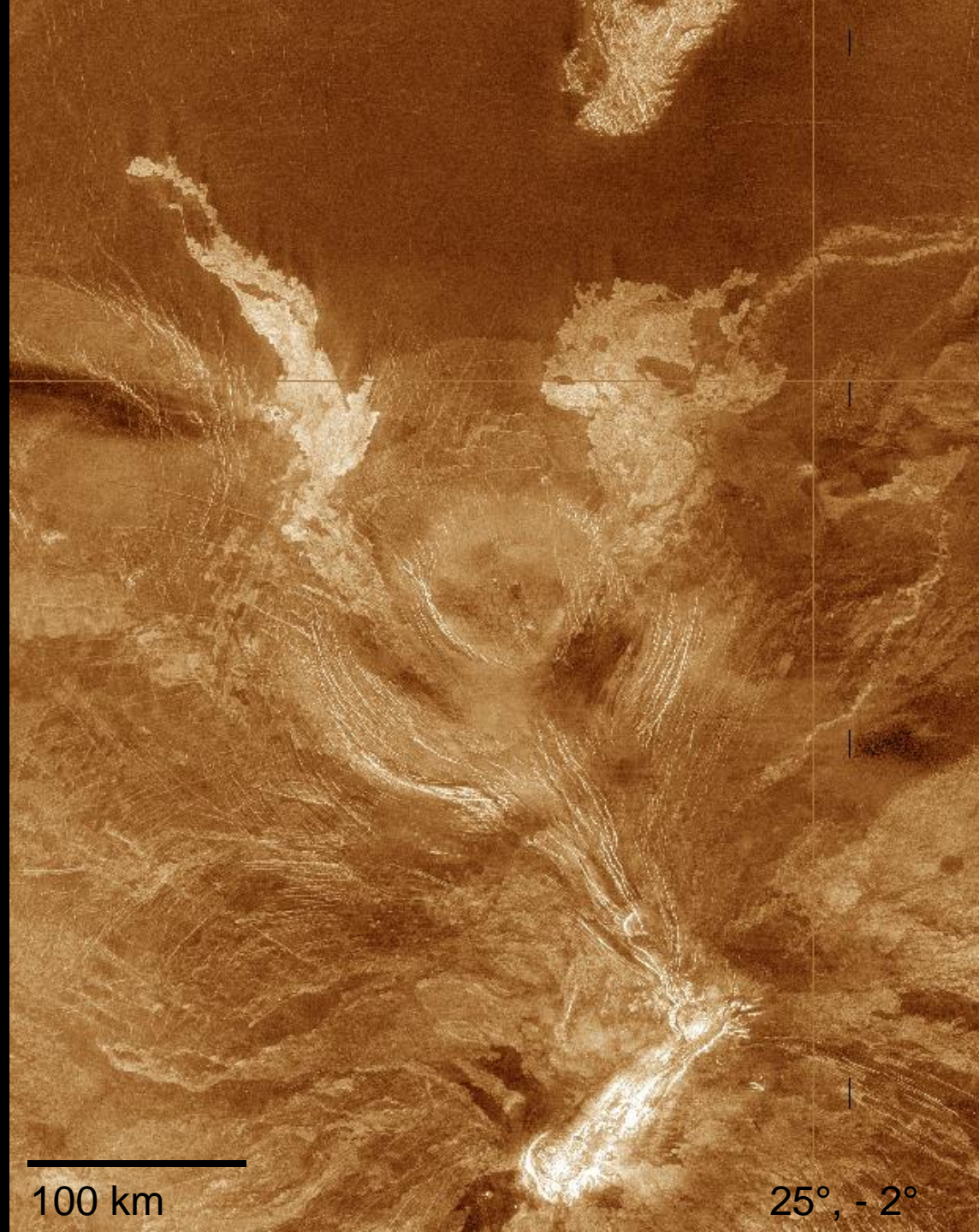
Un cratère affecté par cette extension



Ca (Ovda Regio), ça ressemblerait à une chaîne plissée



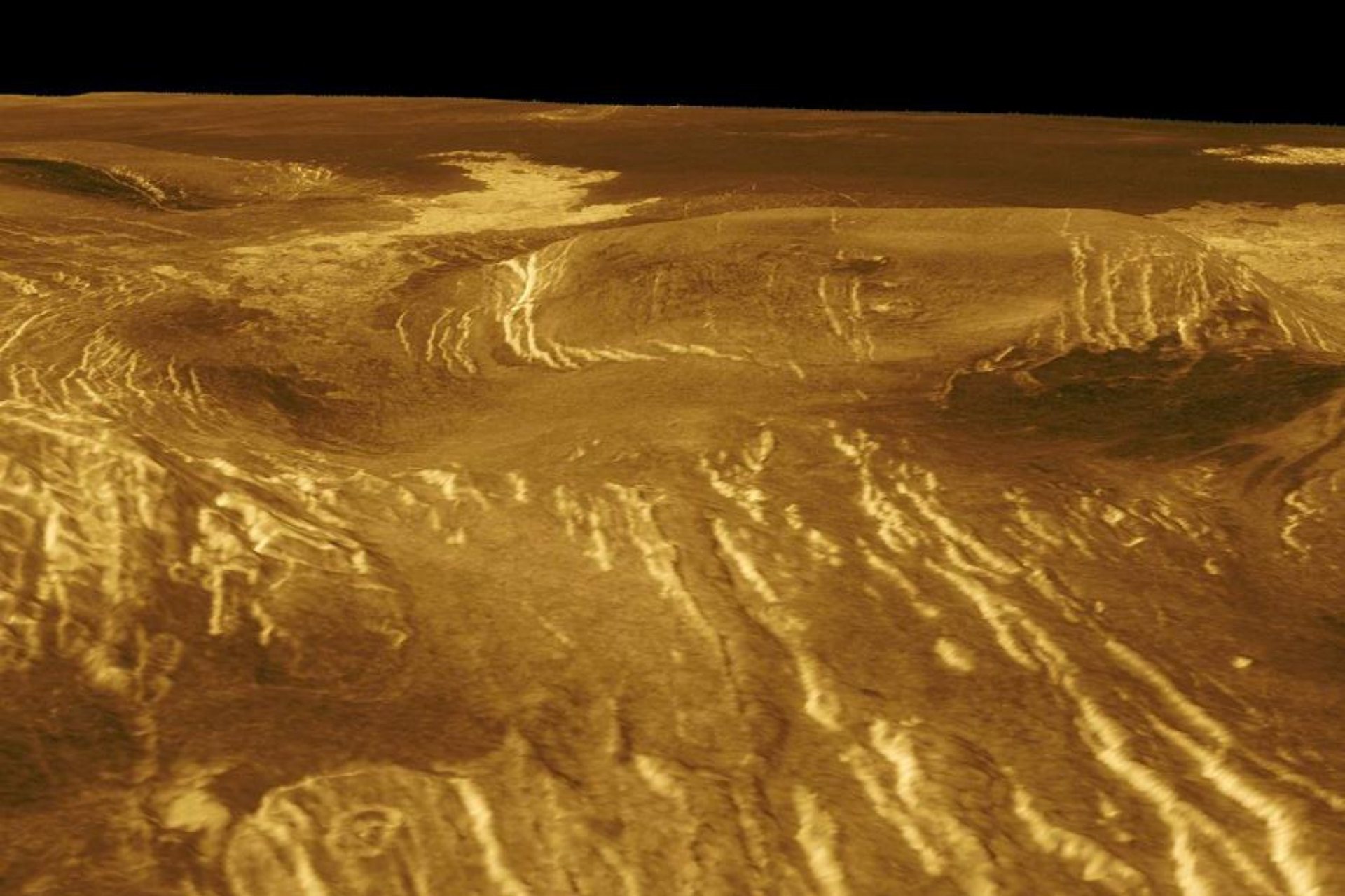
Et ça (dans Phoebe Regio) c'est n'importe quoi !



**Il y a très souvent
association
volcanisme et
tectonique
« circulaire », ce
qui forme ce qu'on
appelle « corona »
(ici Idem Kiva)**

100 km

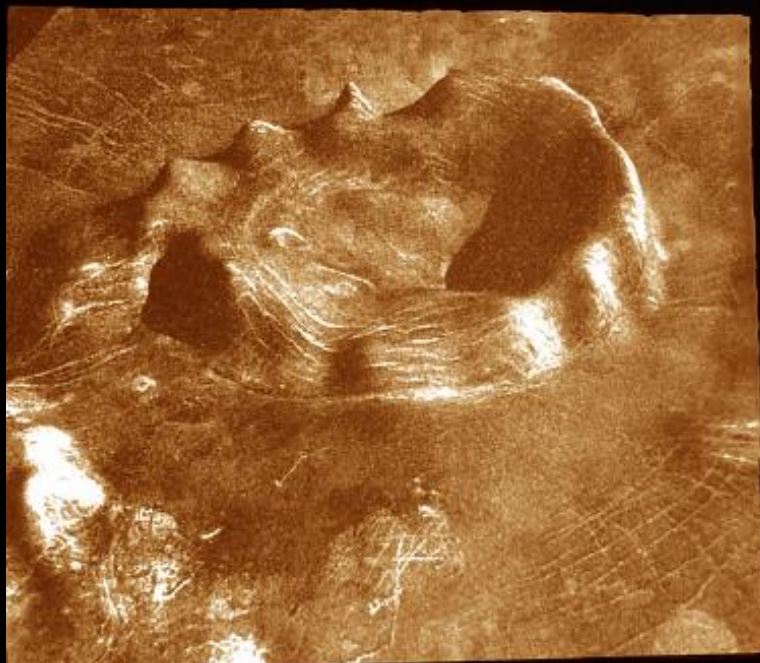
25° - 2°

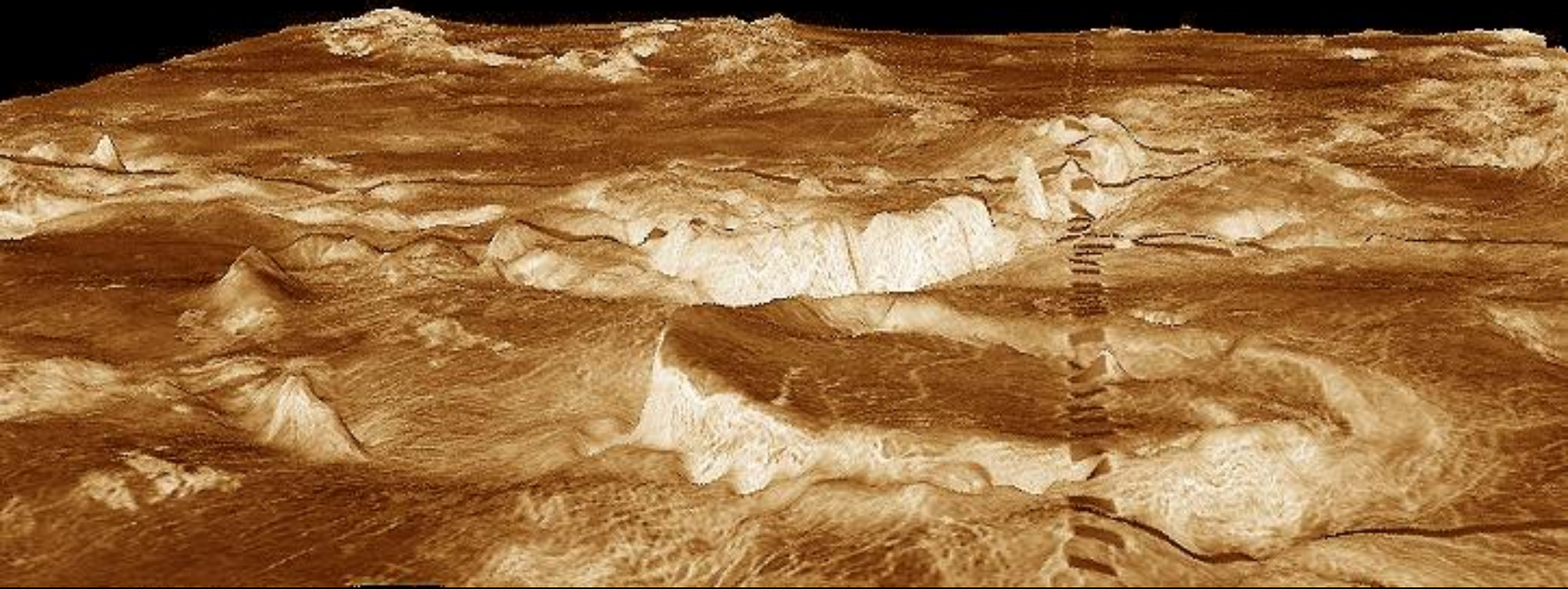


La même en vue rasante

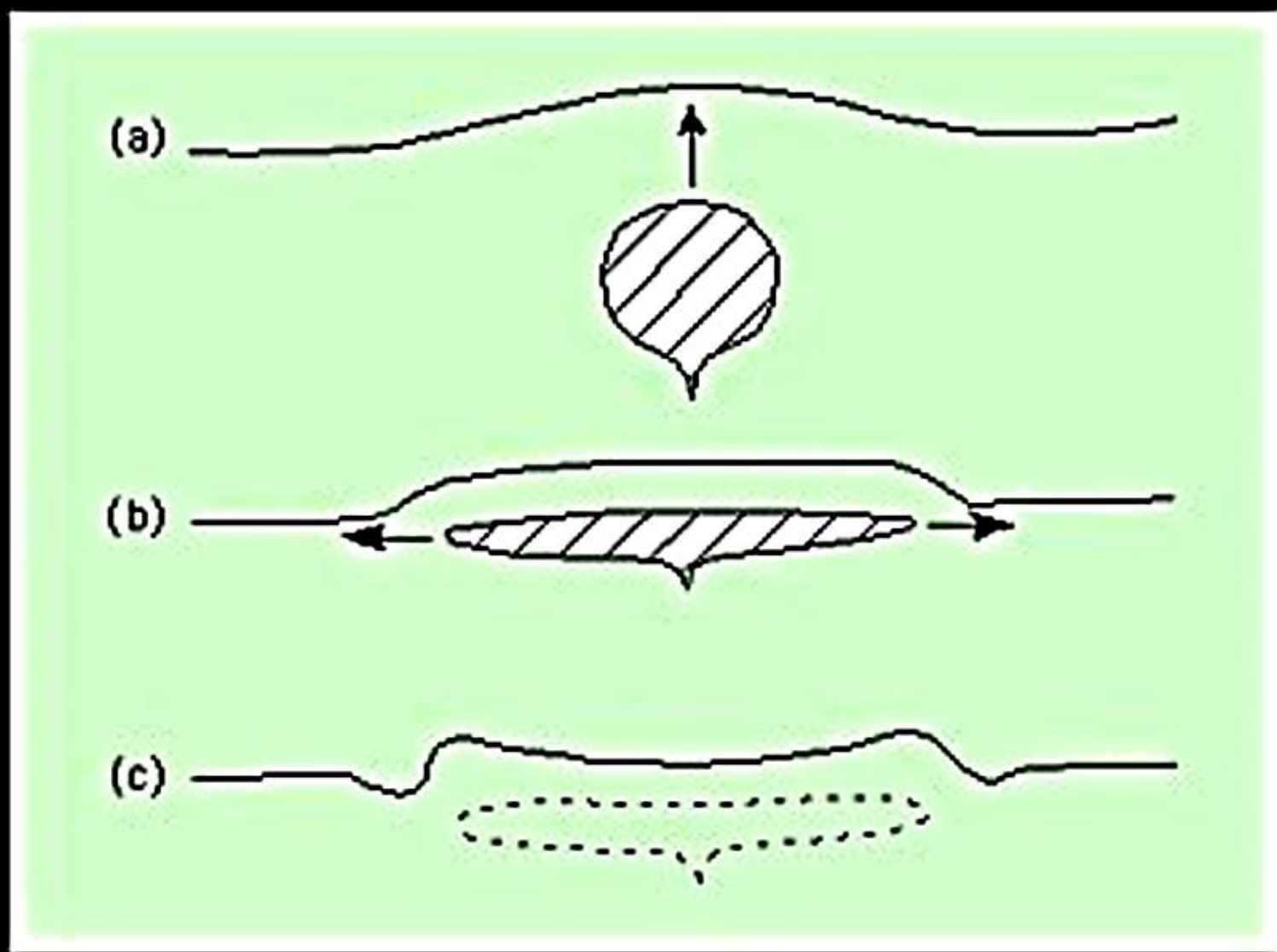


Deux coronae (Fatua, $D = 300$ km) et Bhumi Devi ($D = 200$ km), avec relief exagéré



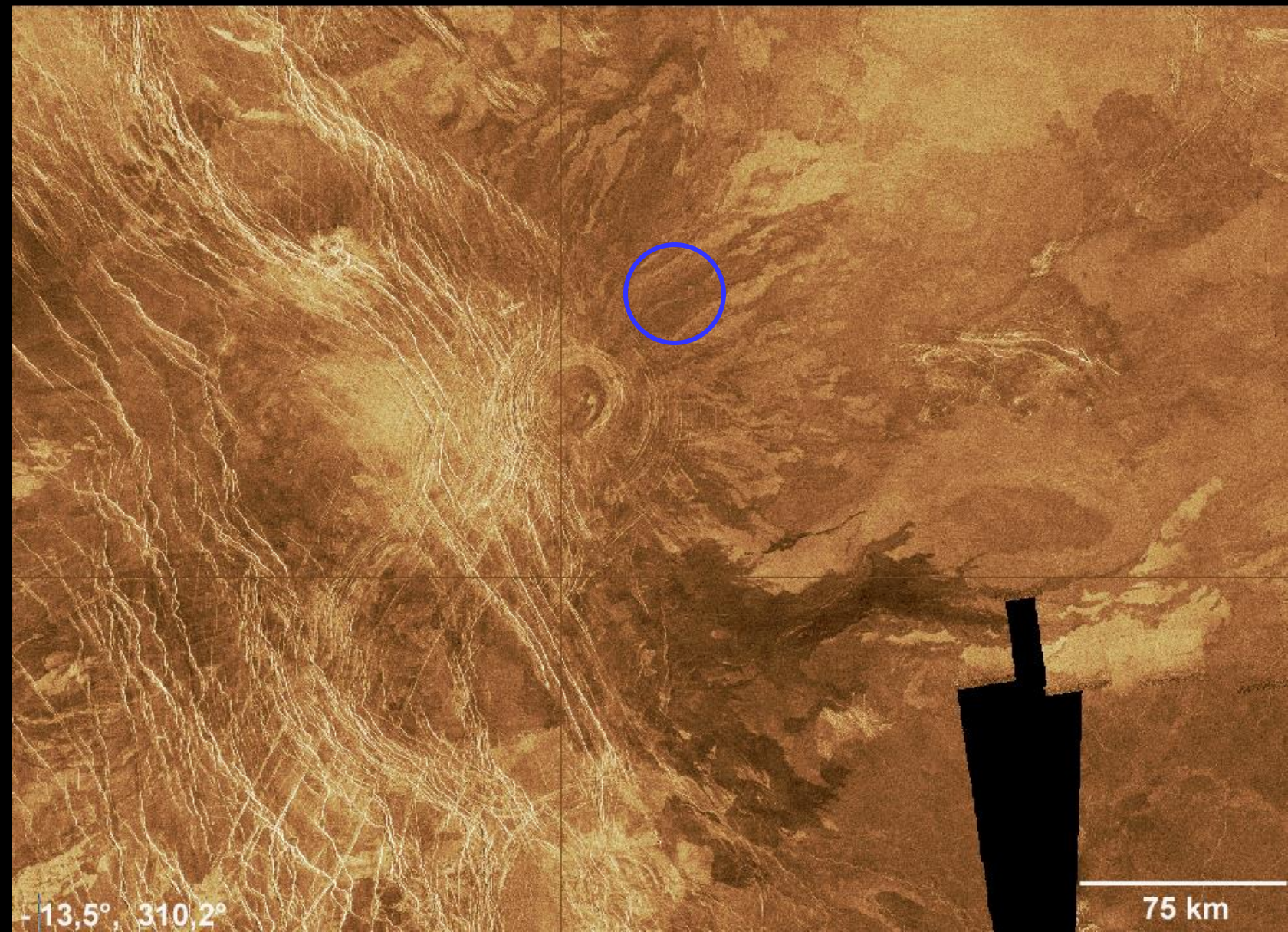


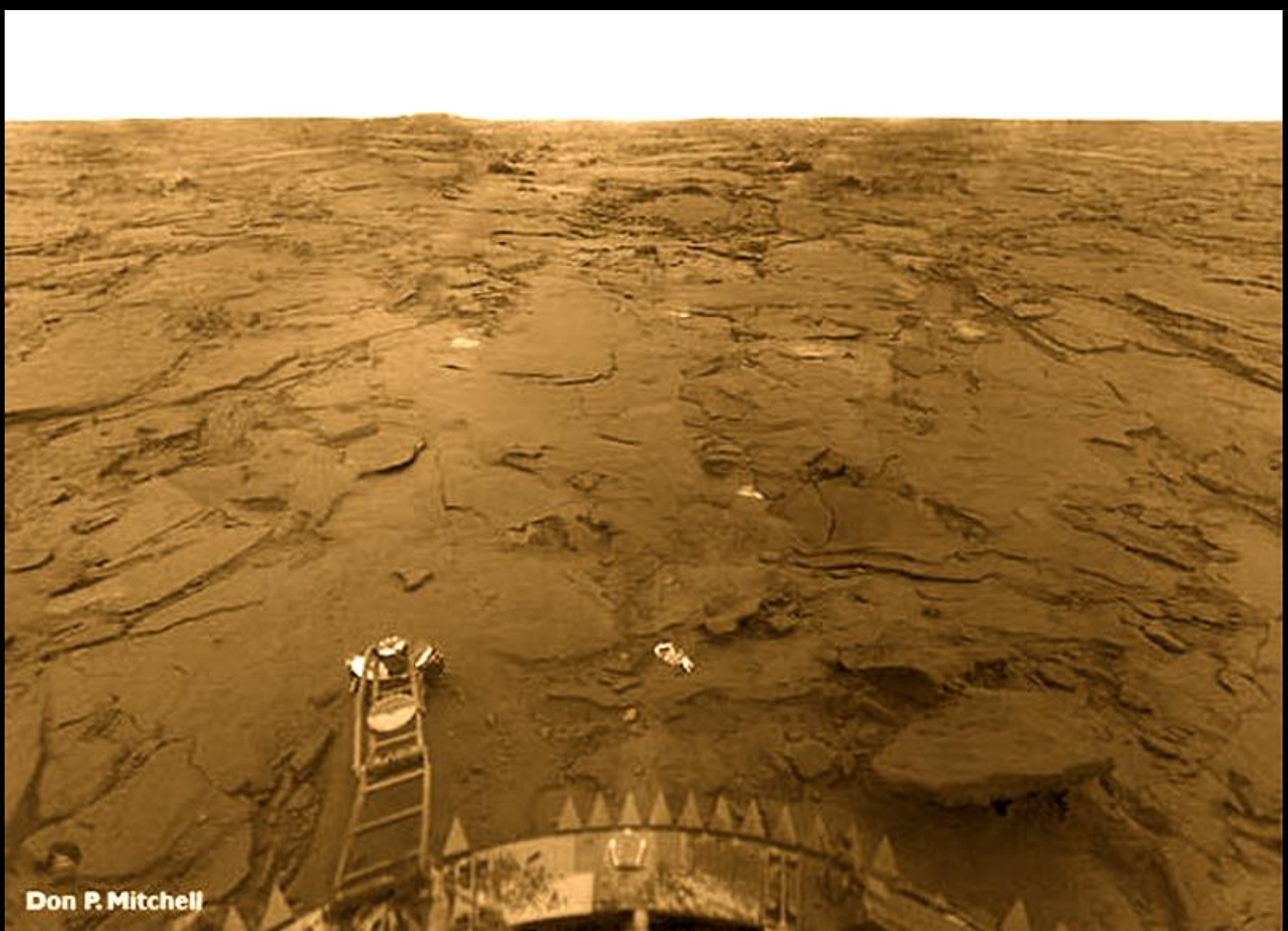
Deux coronae (Fatua, $D = 300$ km) et Bhumi Devi ($D = 200$ km), avec relief exagéré



Un mécanisme très (trop) qualitatif pour expliquer les coronae : sans doute des espèces de points chauds (énorme et nombreux) à la mode vénérienne

La sonde soviétique Venera 13 s'est posée en 1982 sur des coulées au flanc d'une corona





Don P. Mitchell

Et voici le paysage vénérien autour de Venera 14, qu'on peut comparer avec ...

qu'on peut comparer avec ...

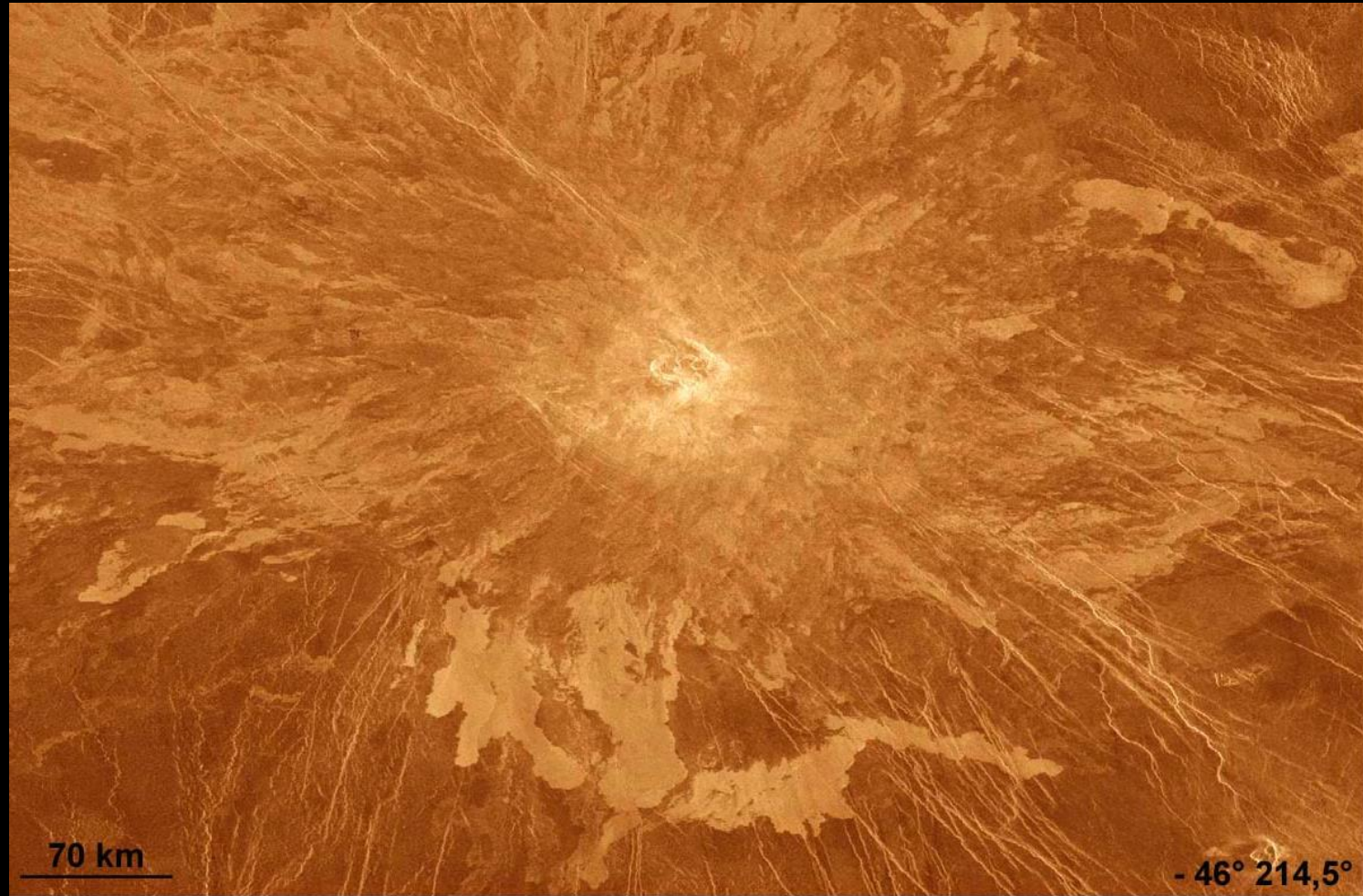


Vénus.
Et cela a une
chimie de
basalte
tholéïtique



Islande

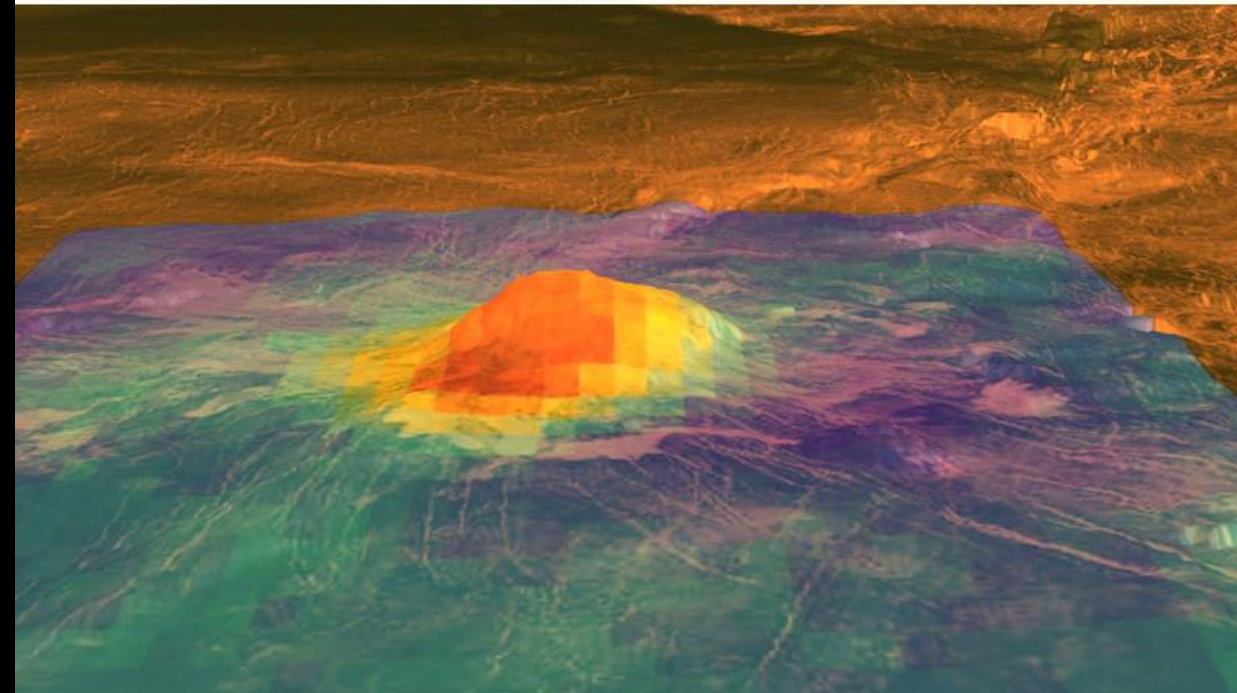
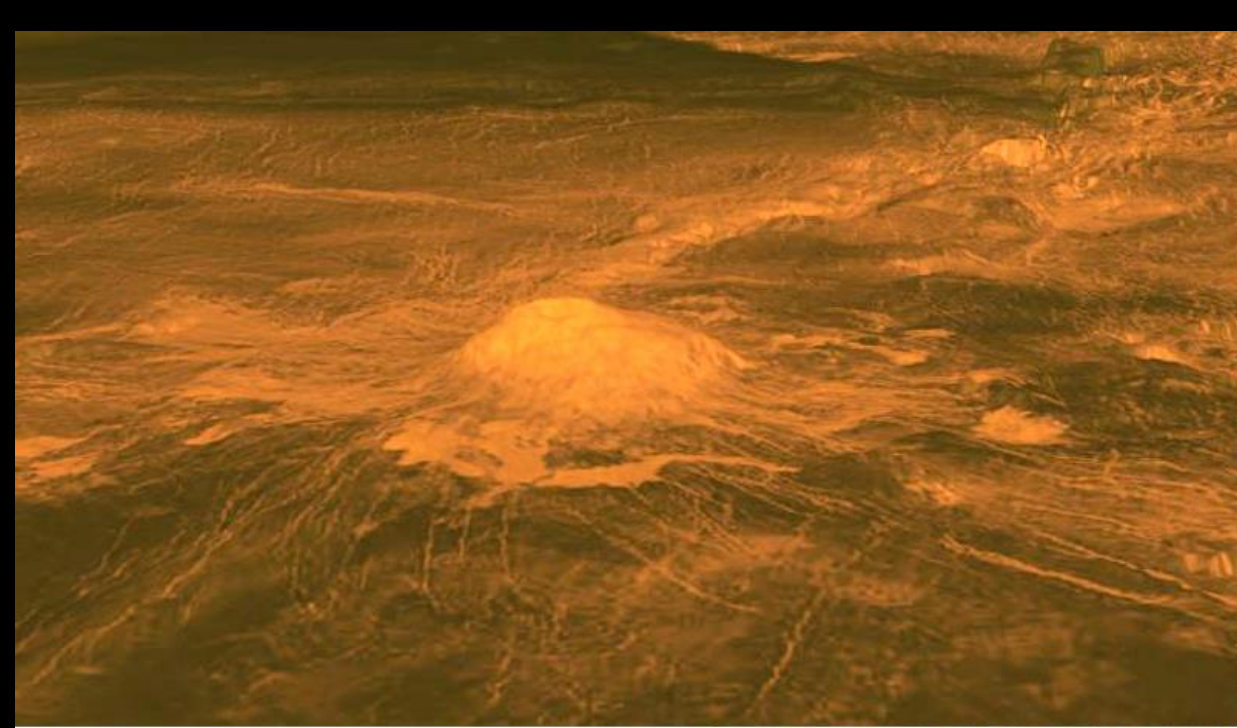
Tectonique et volcanisme sont très récents. Sont-ils encore actifs ? Oui, d'après Suzanne E. Smrekar *et al* (ESA-NASA) dans *Science* 30 avril 2010



Vue Magellan du volcan Idunn Mons (-46° lat., 214.5° long.) dans la région Imdr

**Vue oblique,
(relief x 30)**

**Image « colorisée »
en fonction de
l'émissivité Infra-
Rouge (corrigée
des effets
d'altitude).**



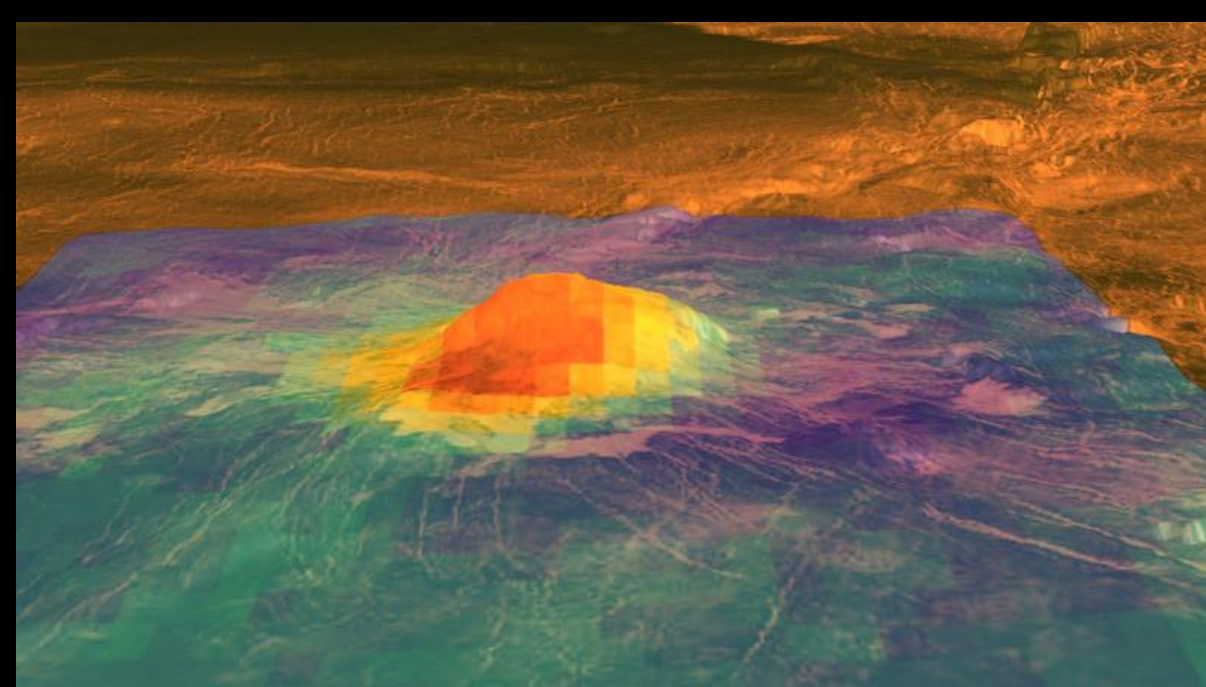
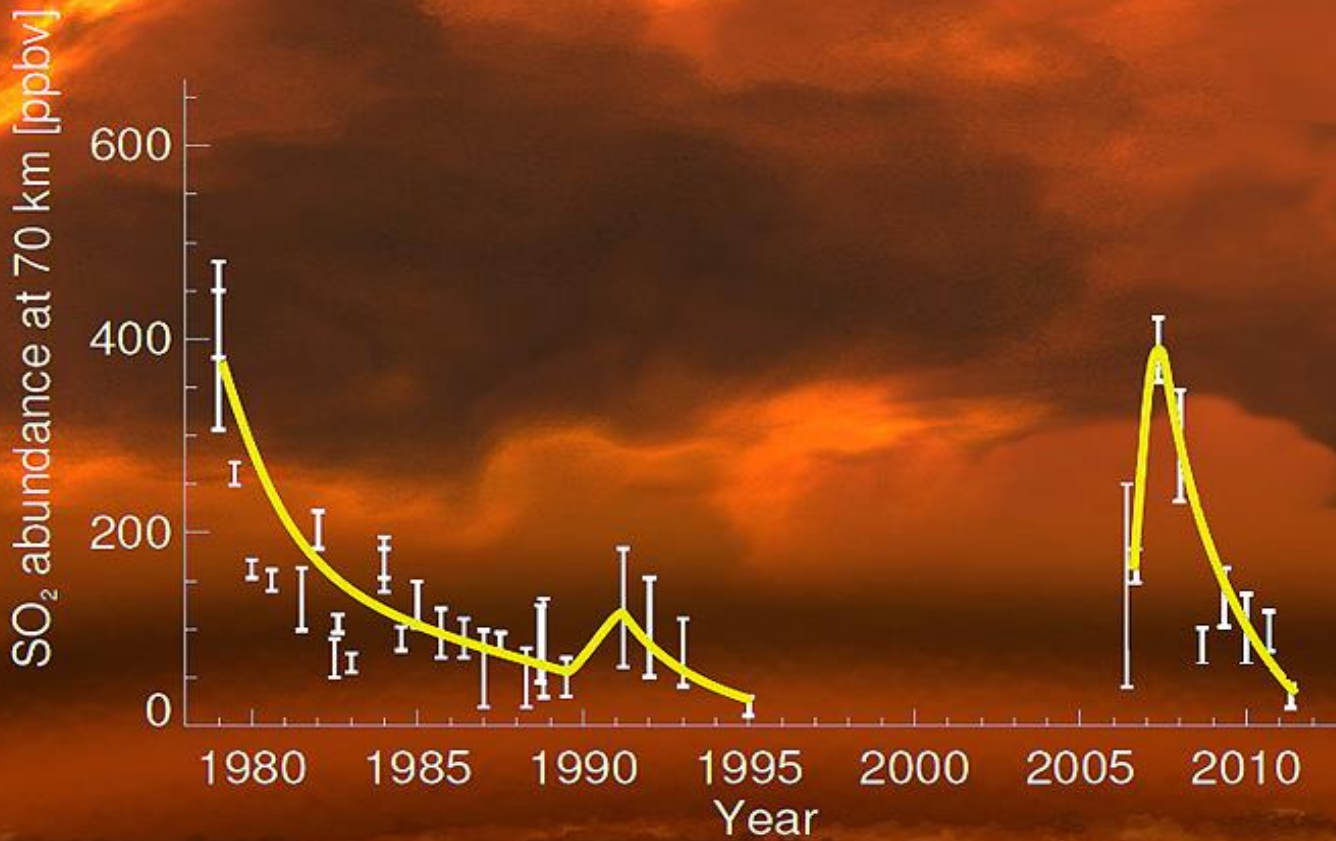


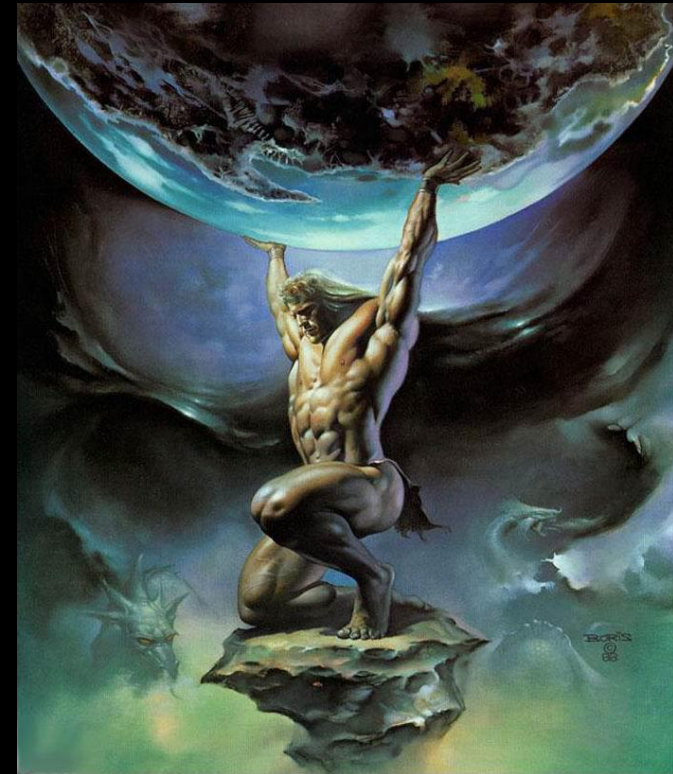
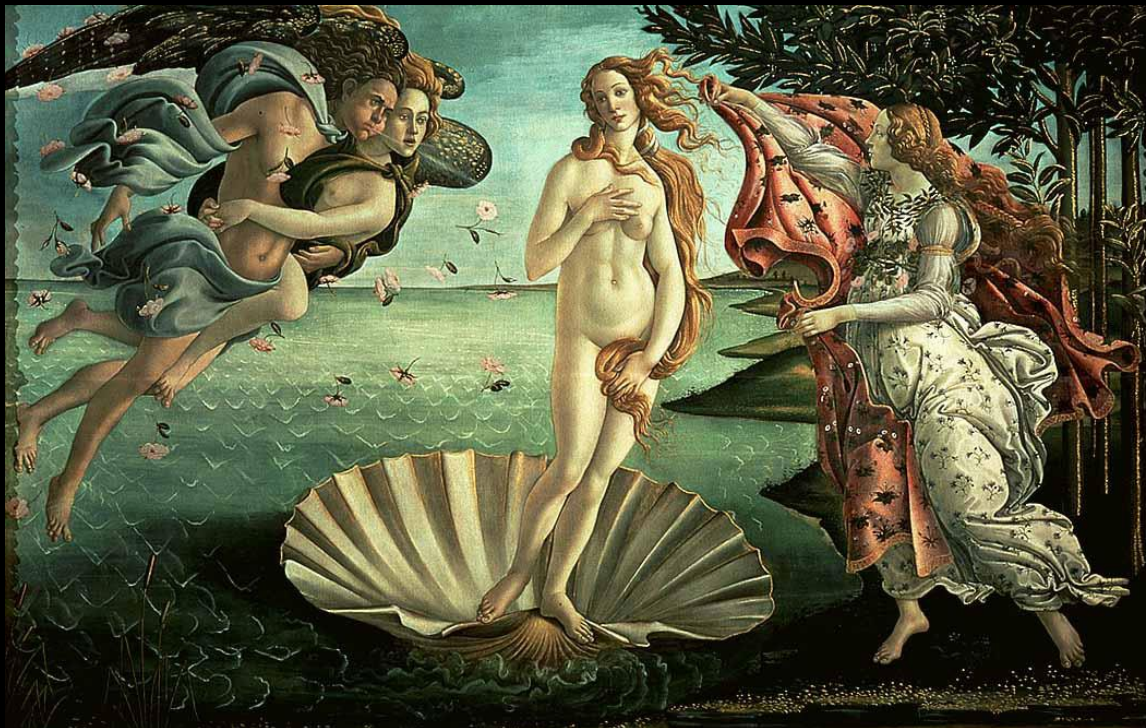
Image « colorisée » en fonction de l'émissivité Infra-Rouge (corrigée des effets d'altitude). Les zones rouges-orangées correspondent aux zones les plus chaudes (et/ou les moins altérées), c'est-à-dire les plus jeunes, avec un âge « nul » ($< 2,5$ Ma). Les zones bleues et vertes correspondent à des régions plus anciennes, plus froides (et/ou plus altérées).



http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Venus_Express/Data_Venusian_volcanoes_have_cooled_the_Air
<http://www.nasa.gov/journal/2007/01/01/venus0701.html>

Dernière nouvelle (janvier 2013) : confirmation des «bouffées» d'oxyde de soufre (SO₂) dans l'atmosphère de Vénus. Des éruptions volcaniques géantes sont une des explications possibles.

Concluons. Sur Vénus, il y a une activité volcanique et tectonique intense, actuelle ou sub-actuelle, mais sans le style « tectonique des plaques » de la Terre : volcanisme sans doute de type point chaud, et mouvements tectoniques type « anarchie ».
Pourquoi y a t'il de la dynamique « non plaque » sur Vénus et « des plaques » sur Terre ?

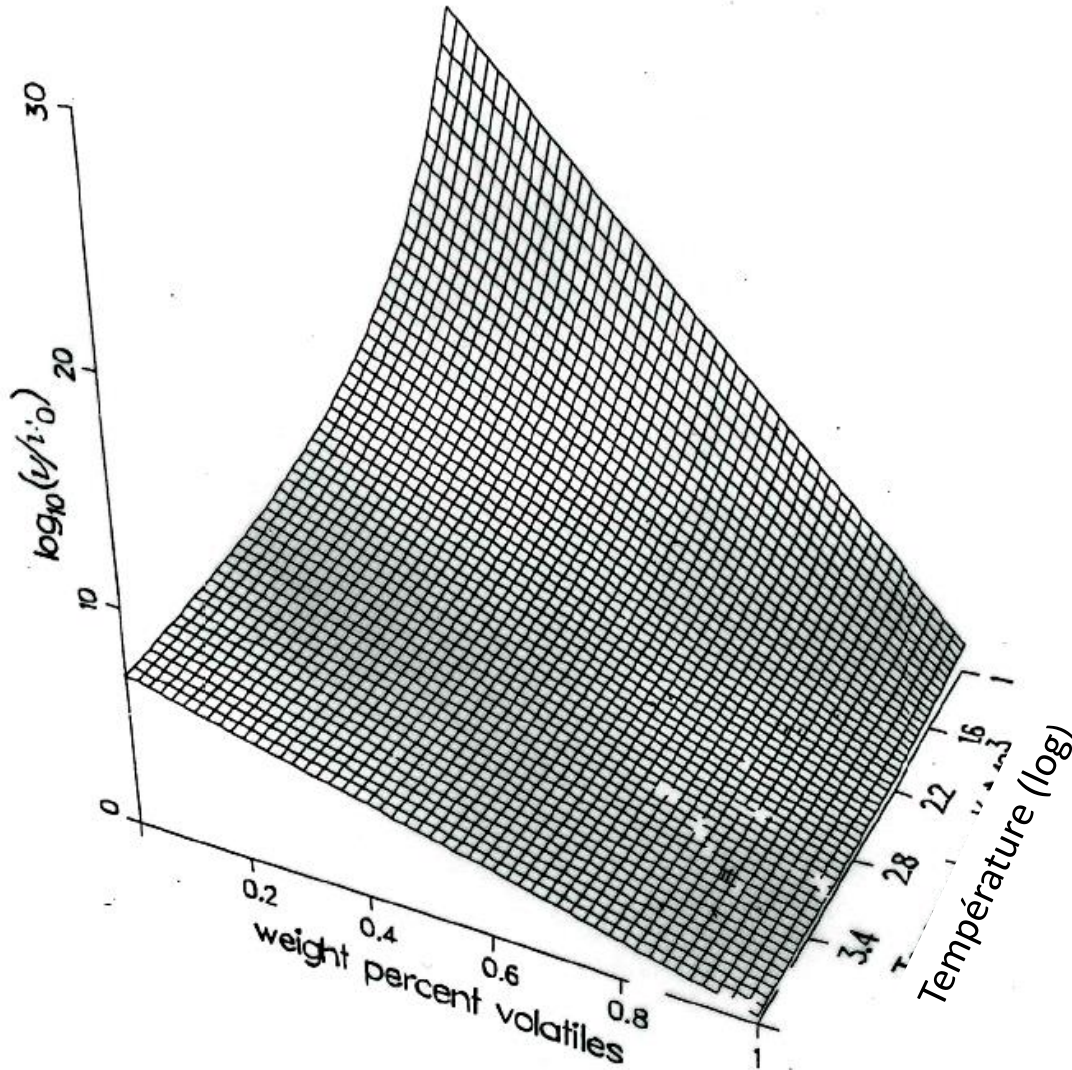


Ce qui fait l'originalité de la convection « type plaque », c'est que la lithosphère a une « individualité et une continuité mécanique » par rapport à l'asthénosphère. Il y a un saut « brutal » de viscosité entre lithosphère et asthénosphère (facteur 10^4). Cela permet à la lithosphère de « glisser facilement » sur l'asthénosphère, et de transmettre les forces sur de longues distances, comme le font des câbles. La traction des subductions peut s'exercer au niveau de dorsales, situées à des milliers de km.

Ce « style » de convection est conditionné par ce saut de viscosité



VISCOSITY VS T AND F
ANITA DUNITE



La viscosité d'une péridotite dépend au 1^{er} ordre de la température et aussi, au 2^{eme} ordre, de sa teneur en H₂O, qui abaisse considérablement cette viscosité. Sur Vénus, le toit de la litho. est à 460° (0° sur Terre), et de plus ...

Dimensionless viscosity v/v_0 versus temperature T and wt. % F based on the relation $v/v_0 = \exp(A_0 - A'F/T)$, where $A_0 = 64.4 \times 10^3 \text{K}$ and $A' = 61.1 \times 10^3 \text{K}$. The values of A_0 and A' are from deformation data on Anita Bay dunite (Chopra and Paterson 1984).

... Outre ce fort écart de Température entre T superficielle et T de « ductilité », ce saut de viscosité serait aussi dû au fait que le manteau est hydraté, ce qui abaisse considérablement sa viscosité : le manteau terrestre contient approximativement 0,1% d'H₂O (la masse d'eau mantellique est du même ordre de grandeur que la masse d'eau des océans).

Les volcans crachent $\sim 2 \cdot 10^{12}$ kg/an d'H₂O (2 GT/an) ; or la subduction introduit $\sim 2 \cdot 10^{12}$ kg/an d'H₂O dans le manteau. Malgré le volcanisme qui déshydrate le manteau terrestre, la présence d'H₂O dans l'océan cause sa réhydratation, par les branches descendantes de la convection



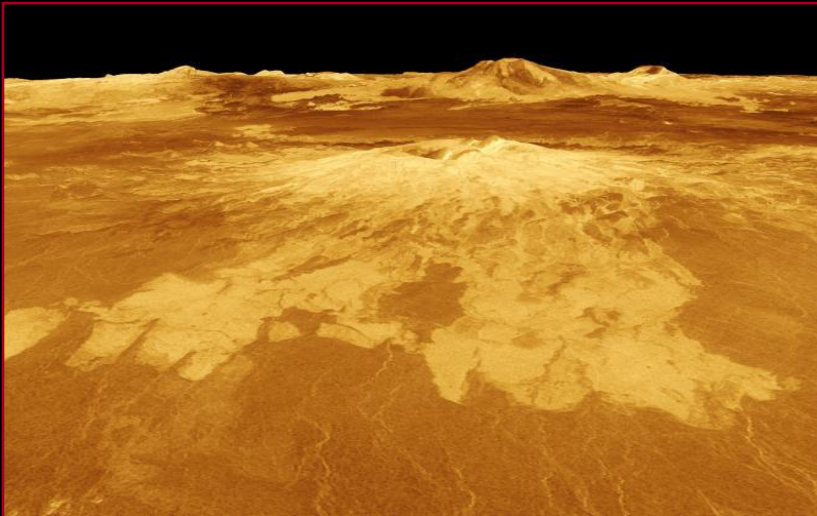
Sur Vénus, pas d'océan liquide, donc pas de ré-introduction d' H_2O dans le manteau, alors que le volcanisme le déshydrate.

→ Le manteau ne contient pas (plus) d'eau, et Δt plus faible

→ Faible contraste de viscosité entre lithosphère et asthénosphère

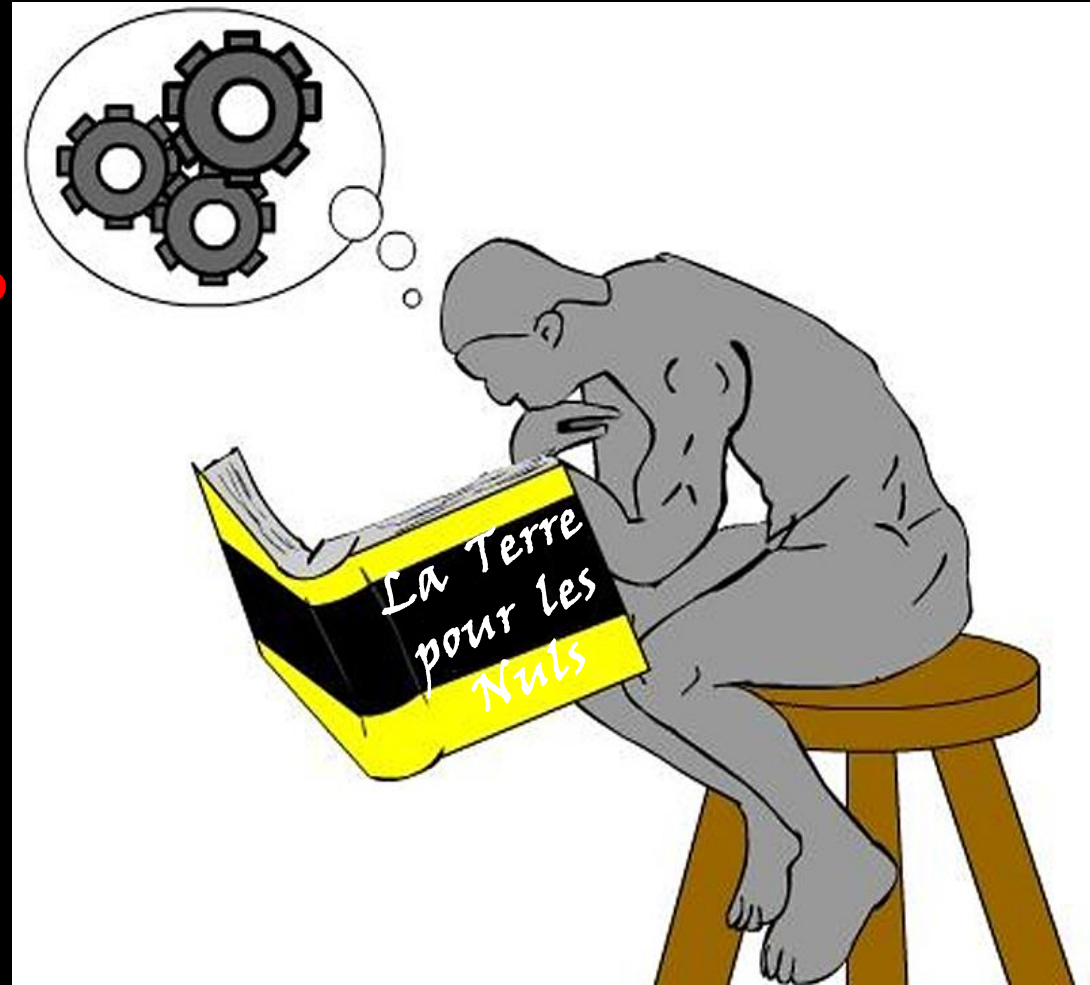
→ Convection d'un autre type que le type « plaque »

→ De l'influence des conditions externes sur la dynamique interne (cela fera plaisir aux écologistes)



D'où quelques questions

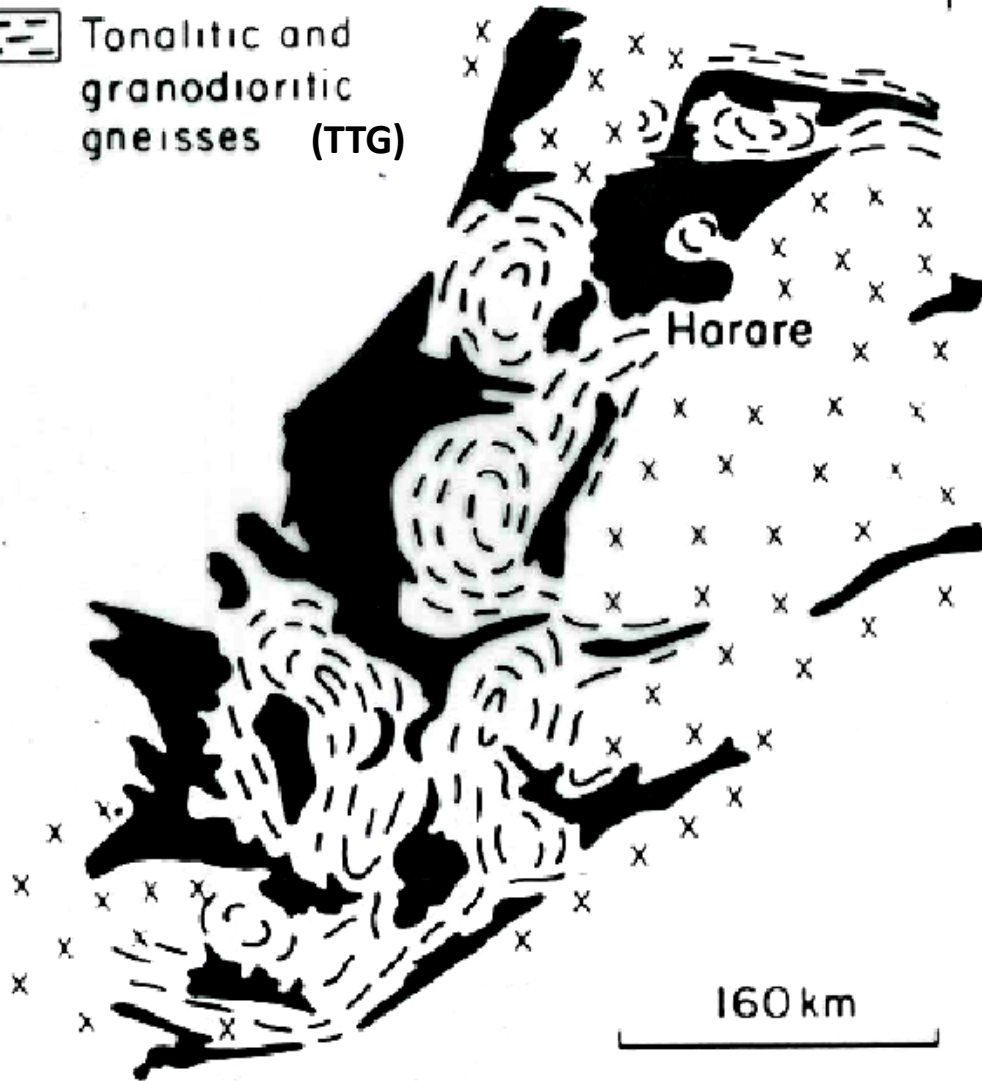
- La Terre est-elle le seul corps du SS à avoir ce type de dynamique interne ?
- Depuis quand la Terre a-t-elle cette dynamique ?
- Y-a-t-il un (des) lien(s) entre cette dynamique interne et les conditions externes ?



x x Granites and adamellites (« récents ») N

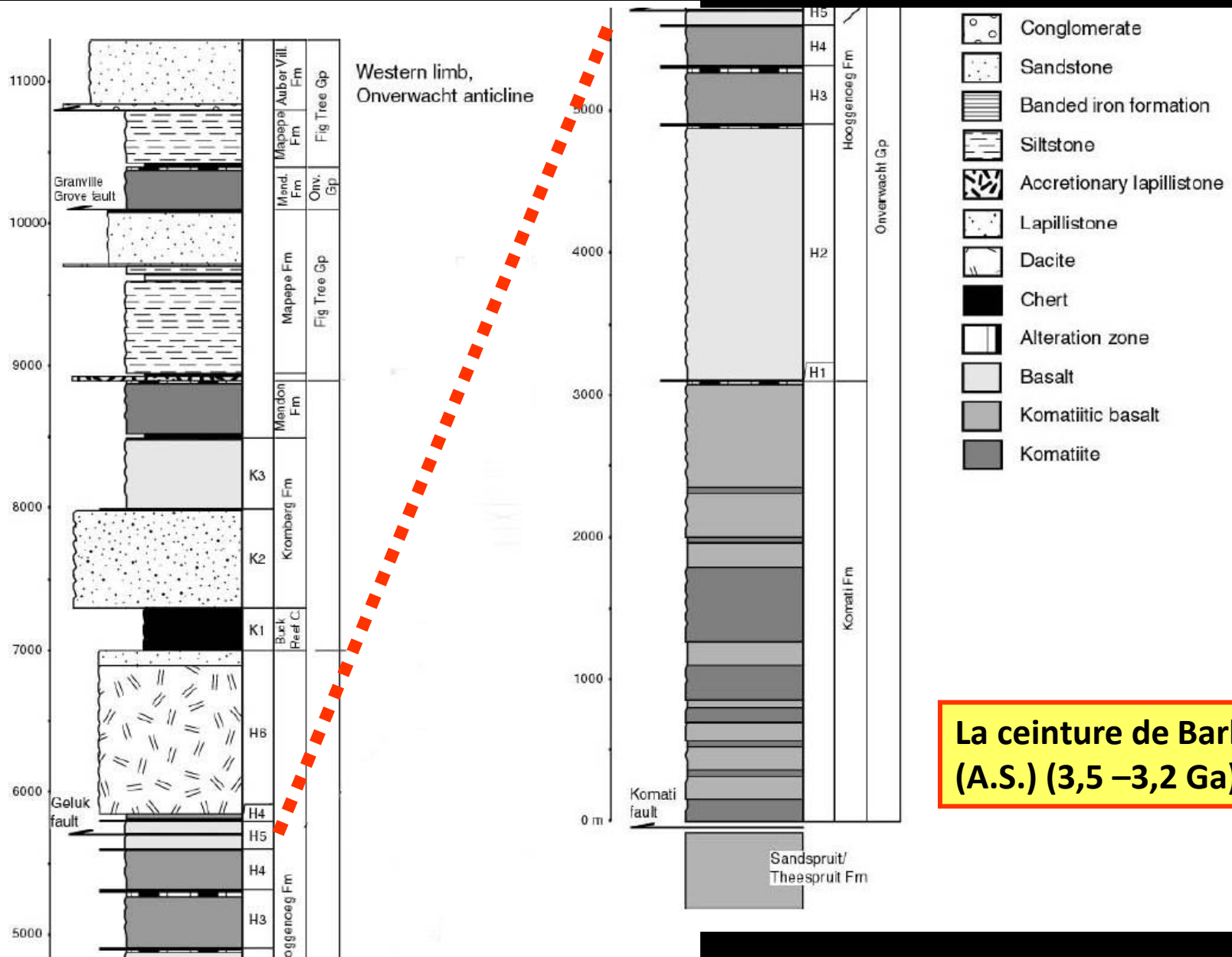
Greenstone belts

Tonalitic and granodioritic gneisses (TTG)



Un résumé de la géologie (la plus vieille) des boucliers archéens (ici le bouclier du Zimbabwe) :

- 1) Des « ceintures vertes »**
- 2) Des TTG (avec une tectonique en dômes et cuvettes).**



La ceinture de Barberton (A.S.) (3,5 –3,2 Ga)

Exemple de colonne litho-stratigraphique dans une ceinture verte : (1) sédiments normaux mais beaucoup de précipitation chimique de silice et d'oxyde de fer (2) beaucoup de laves « normales », mais encore plus laves ultra-basiques, les fameuses komatiites.

Des laves ultrabasiques : les komatiites





Ces laves forment parfois des pillows



Ces laves forment souvent des coulées minces (grande fluidité)

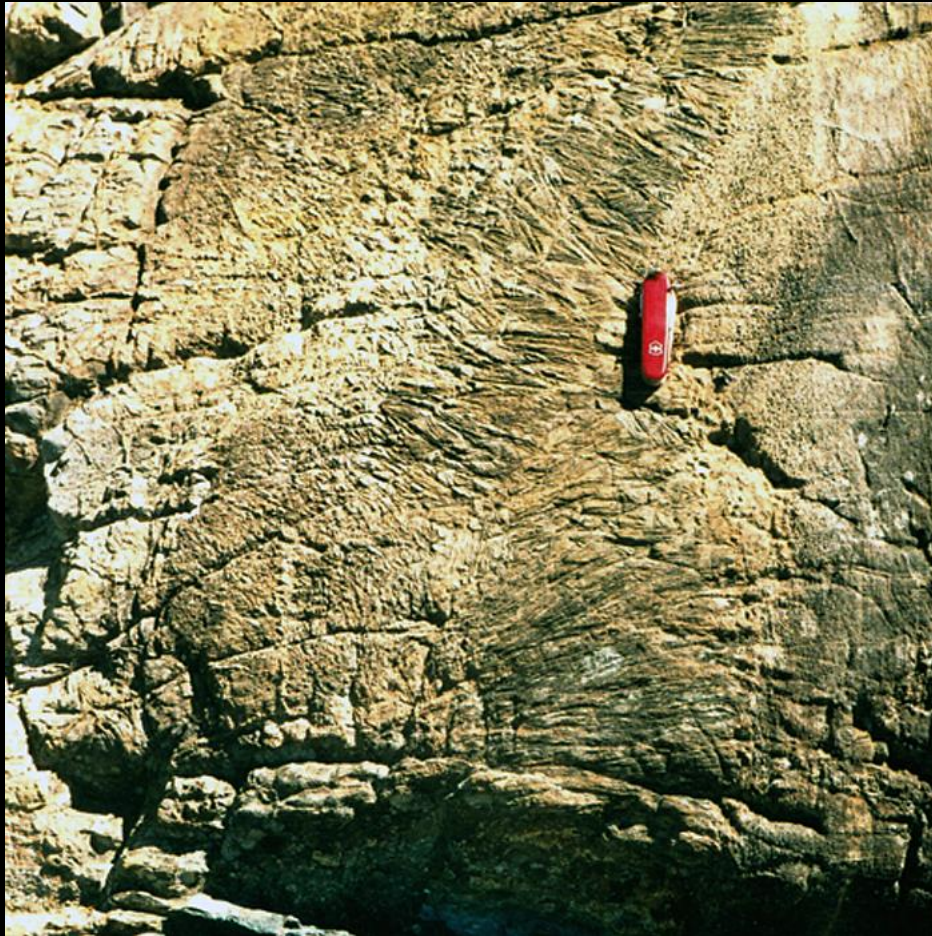


Une coulée

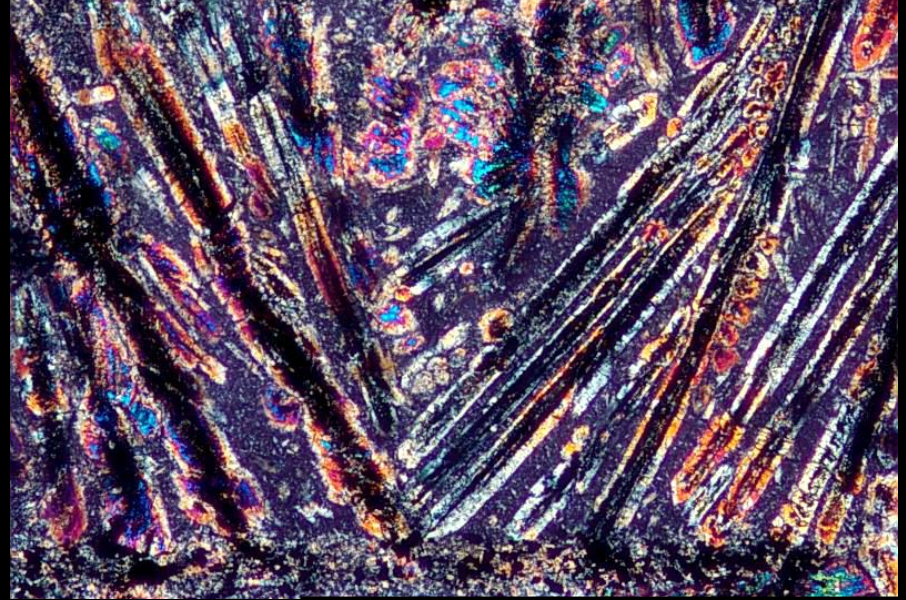
On y trouve des cristaux géants d'olivine et/ou de pyroxène, en aiguille ou en tablette ; c'est la structure dite « spinifex »



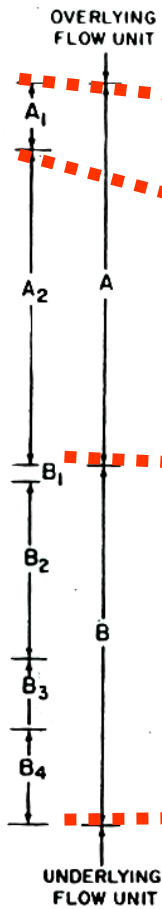
On y trouve des cristaux géants d'olivine et/ou de pyroxène, en aiguille ou en tablette ; c'est la structure dite « spinifex »



**Le dénomination
« spinifex » vient du
nom d'une plante
australienne**



La structure théorique d'une coulée komatiitique



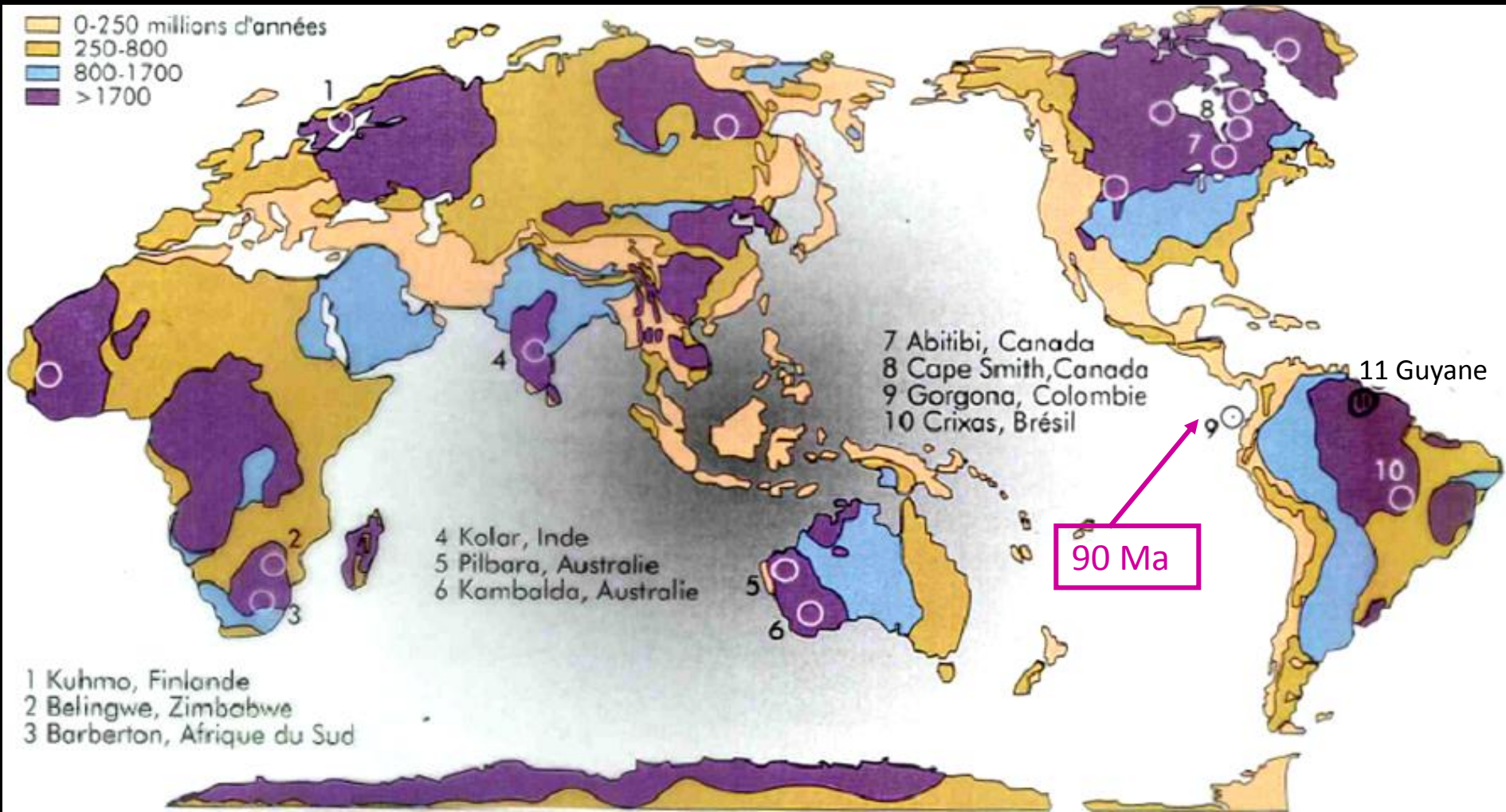
UPPER PART OF FLOW UNIT
A₁ Chilled and fractured flow top
A₂ Spinifex

LOWER PART OF FLOW UNIT
B₁ Foliated skeletal olivine
B₂-B₄ Medium- to fine-grained peridotite
B₃ Knobby peridotite

1 m



Les principales zones à komatiites du monde. Elles sont quasi-exclusives de l'Archéen. On en a en France (en Guyane). A une exception près (île de la Gorgone), elle disparaissent à -2,5 Ga (limite Archéen-Protérozoïque).



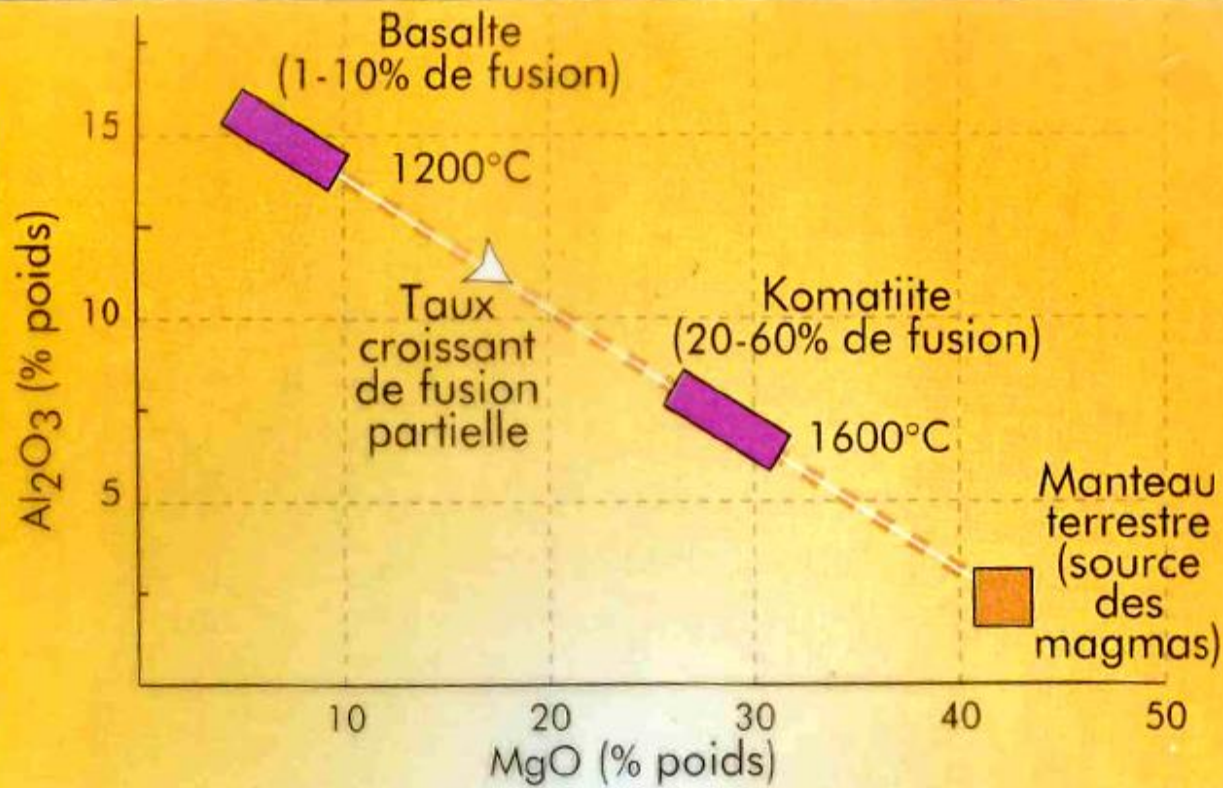
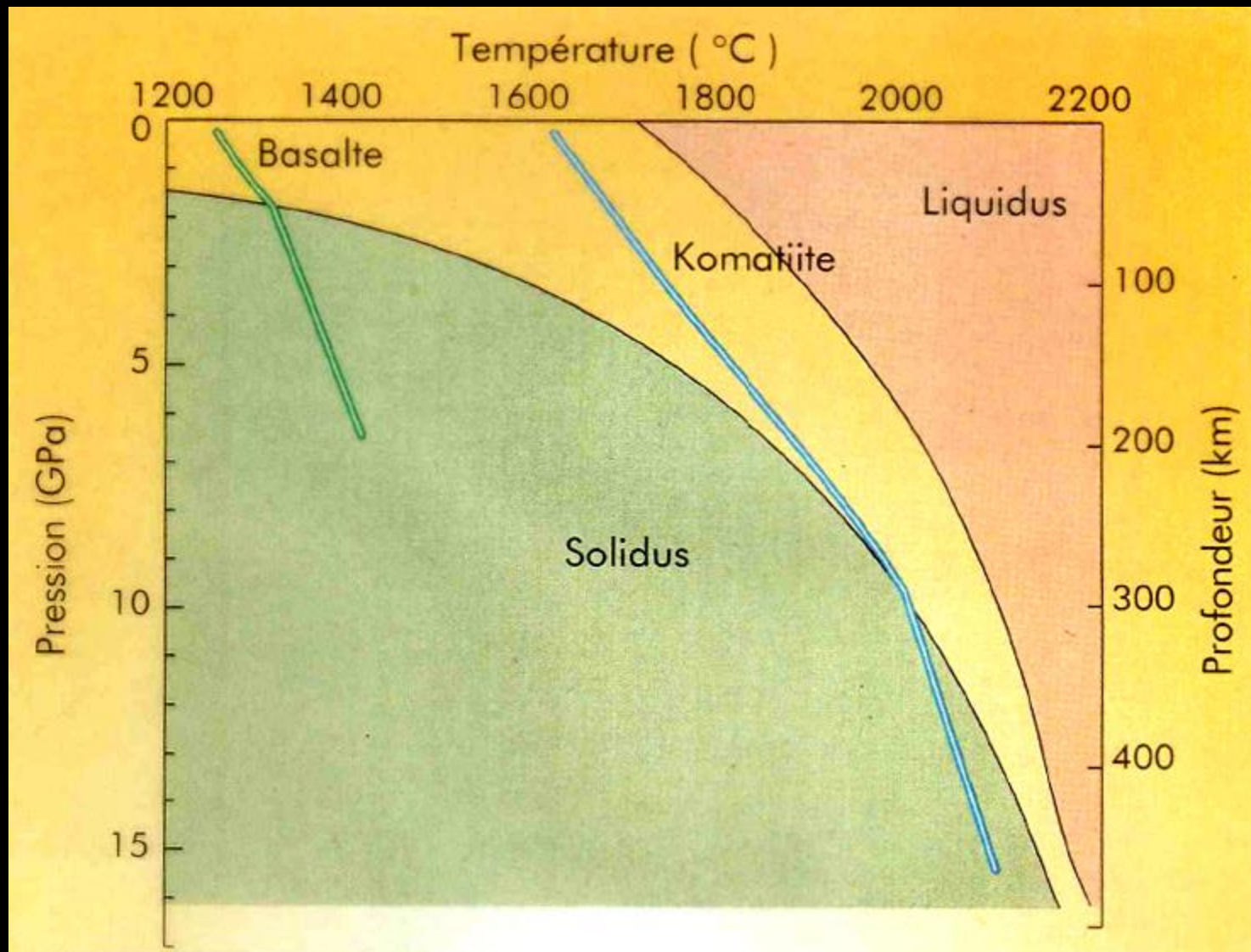


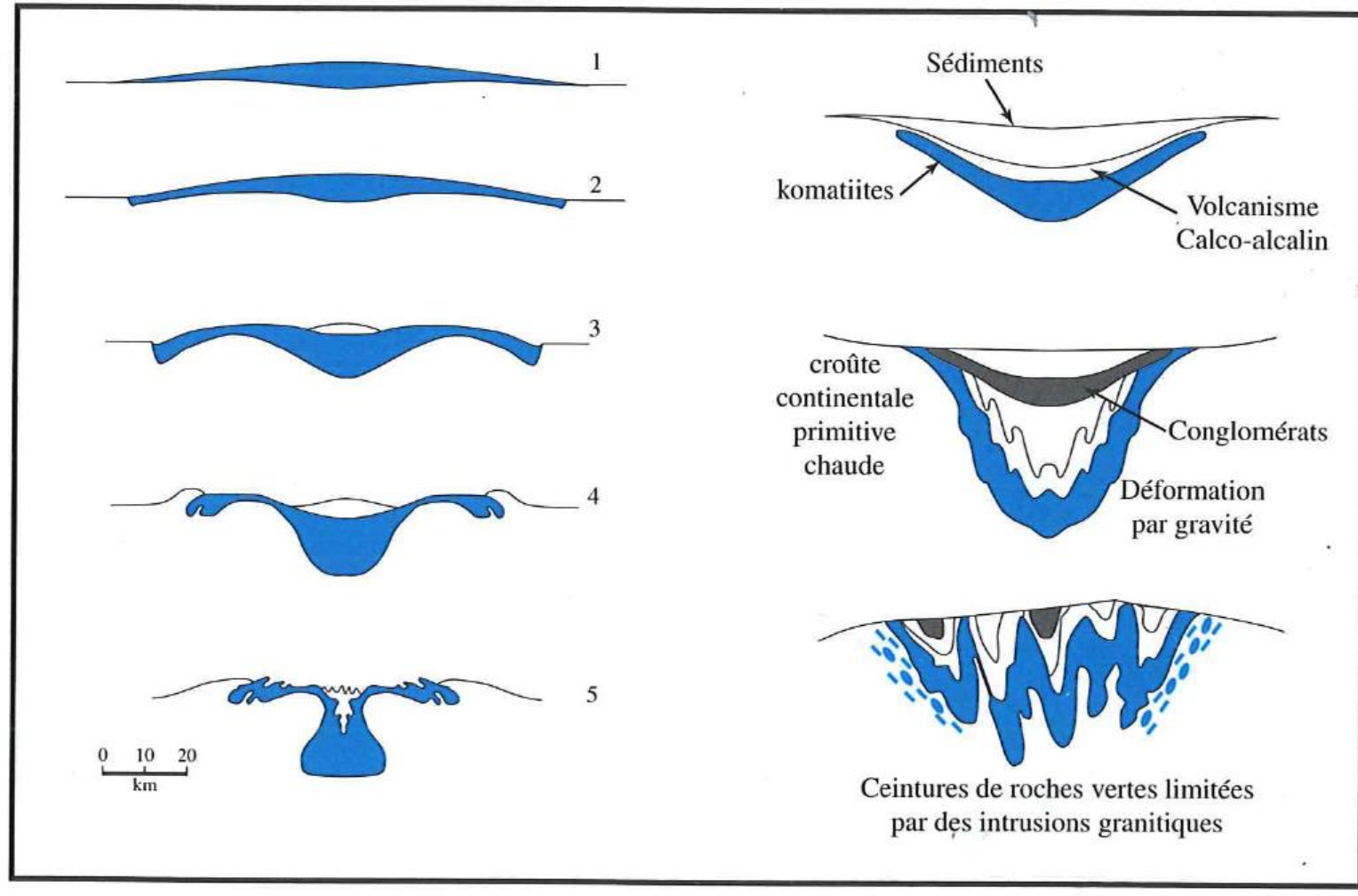
Figure 2. Les concentrations en magnésium et aluminium des laves sont représentatives du degré de fusion partielle du manteau terrestre. Plus la fusion sera poussée et plus le liquide résultant sera riche en magnésium et pauvre en aluminium.

Comment faire des magma si riche en olivine, donc ultra-basiques ?

Il faut fondre partiellement le manteau, mais beaucoup plus que quand on fait du basalte.

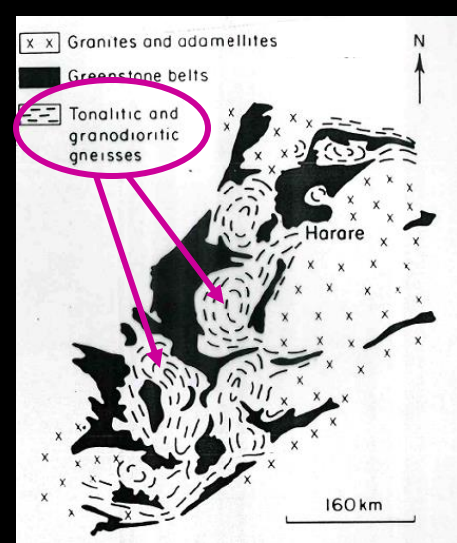


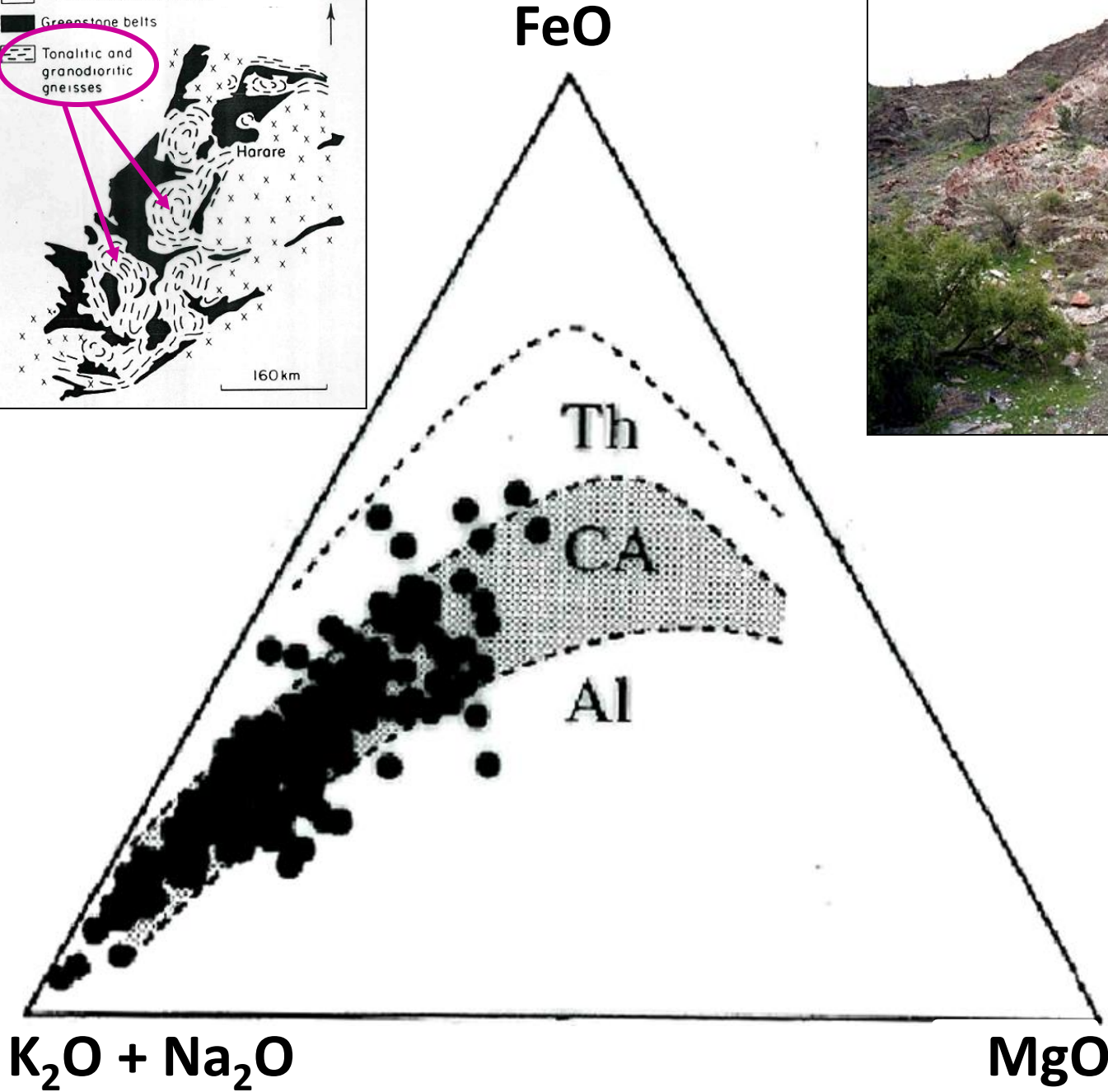
Et pour fondre autant le manteau, il faut qu'il ait 200° à 400°C de plus qu'aujourd'hui



Comment accumuler jusqu'à de 20 km de sédiments + laves komatiitiques ? Deux propositions historiques (1978-1979) de modèle, expliqué au moins partiellement par la forte densité des komatiites. .

Les TTG (Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite gneisses), ici au contact avec des roches d'une ceinture verte de la ceinture de Barberton (AS)

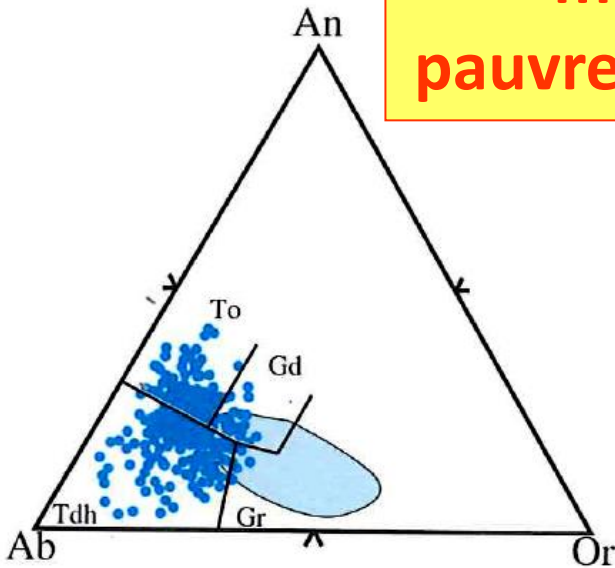




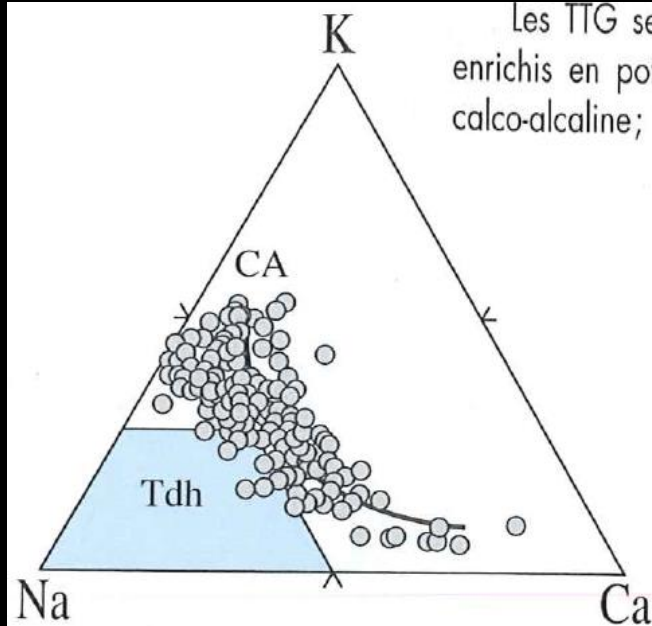
**Les TTG :
Tonalite-
Trondhjemite-
Granodiorite
gneisses : des
roches calco-
alcalines
particulières**

D'après H. Martin dans « Environnement de la Terre primitive »

Des triangles, encore des triangles. Tout ça pour montrer que les TTG sont très riches en Na et pauvre en K. Des (méta)granitoïdes sans orthose !



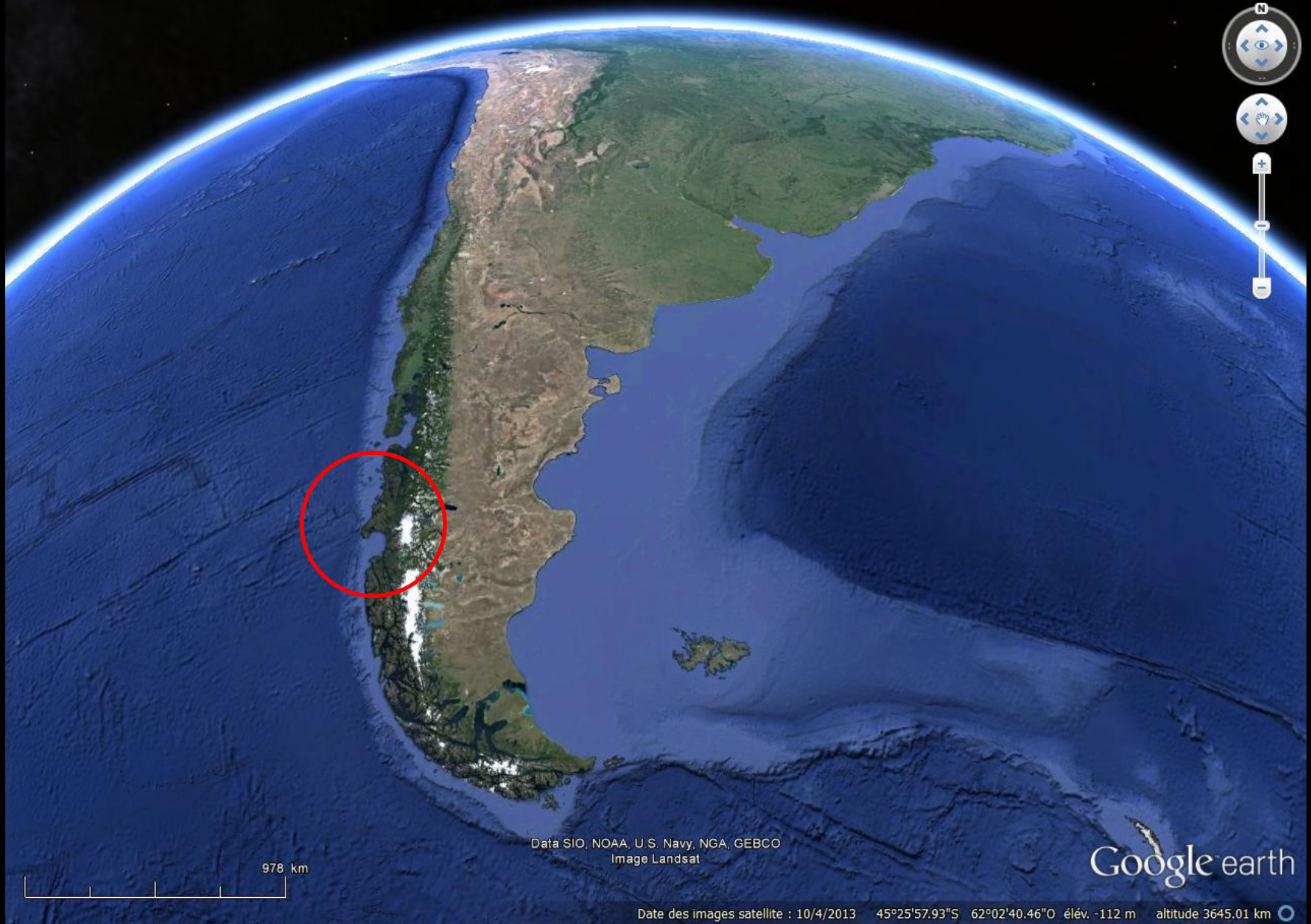
Triangle normatif An-Ab-Or (Anorthite $[\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$ - Albite $[\text{NaAlSi}_3\text{O}_8]$ -Orthose $[\text{KAlSi}_3\text{O}_8]$ d'après O'Connor (1965) et Barker (1979). To = tonalite; Tdh = trondhémite; Gd = granodiorite; Gr = granite; le domaine en bleu clair est celui de la croûte continentale moderne.



Les TTG se disposent dans le domaine trondhémite alors que leurs équivalents modernes sont enrichis en potassium et suivent une lignée de différenciation calco-alcaline classique. (CA) = lignée calco-alcaline; (Tdh) = champ des trondhémites (Martin, 1995).

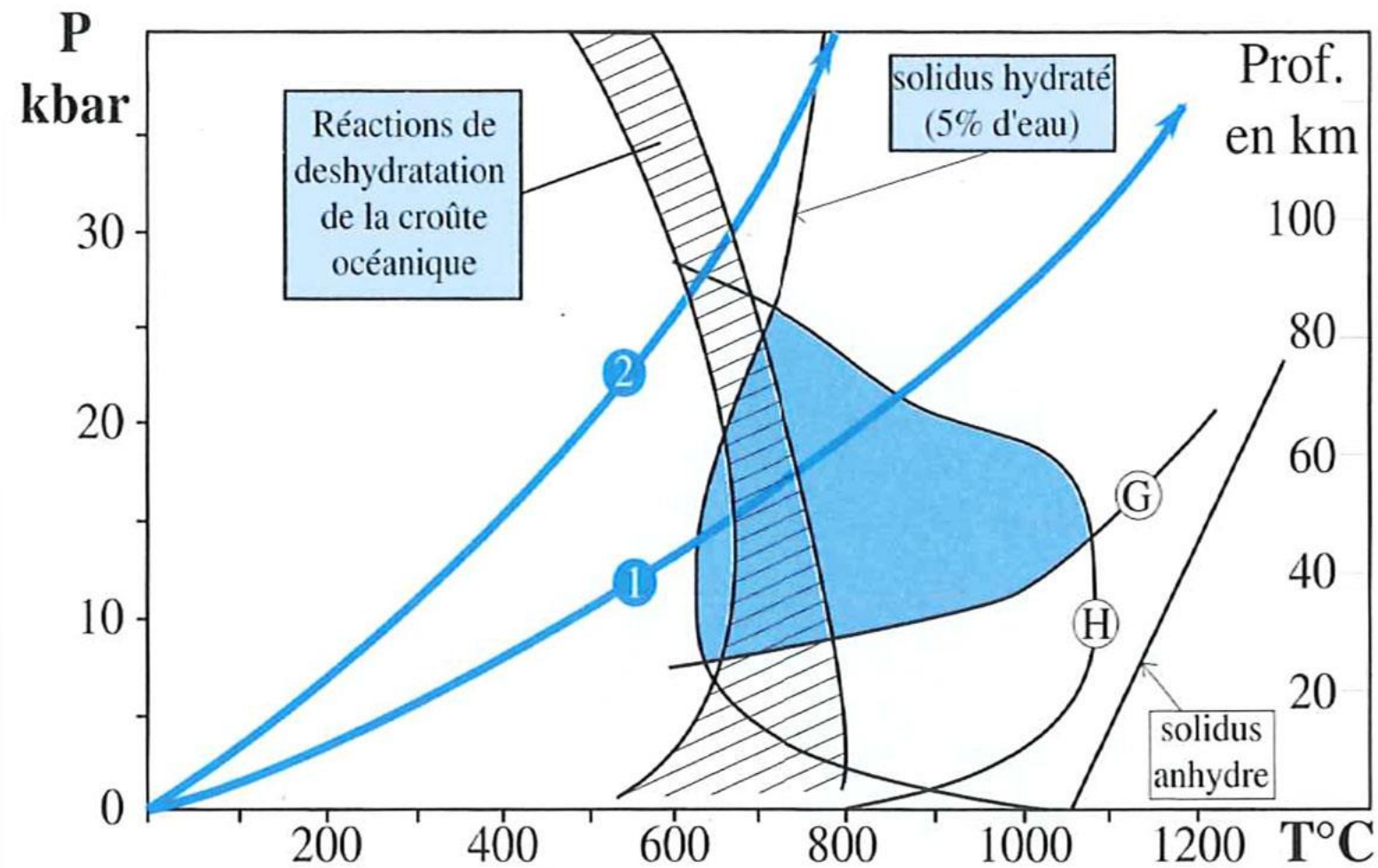
De telles roches se fabriquent de nos jours : les adakites

Où trouve-t-on des adakites actuelles ou récentes ? Là où une dorsale subducte !





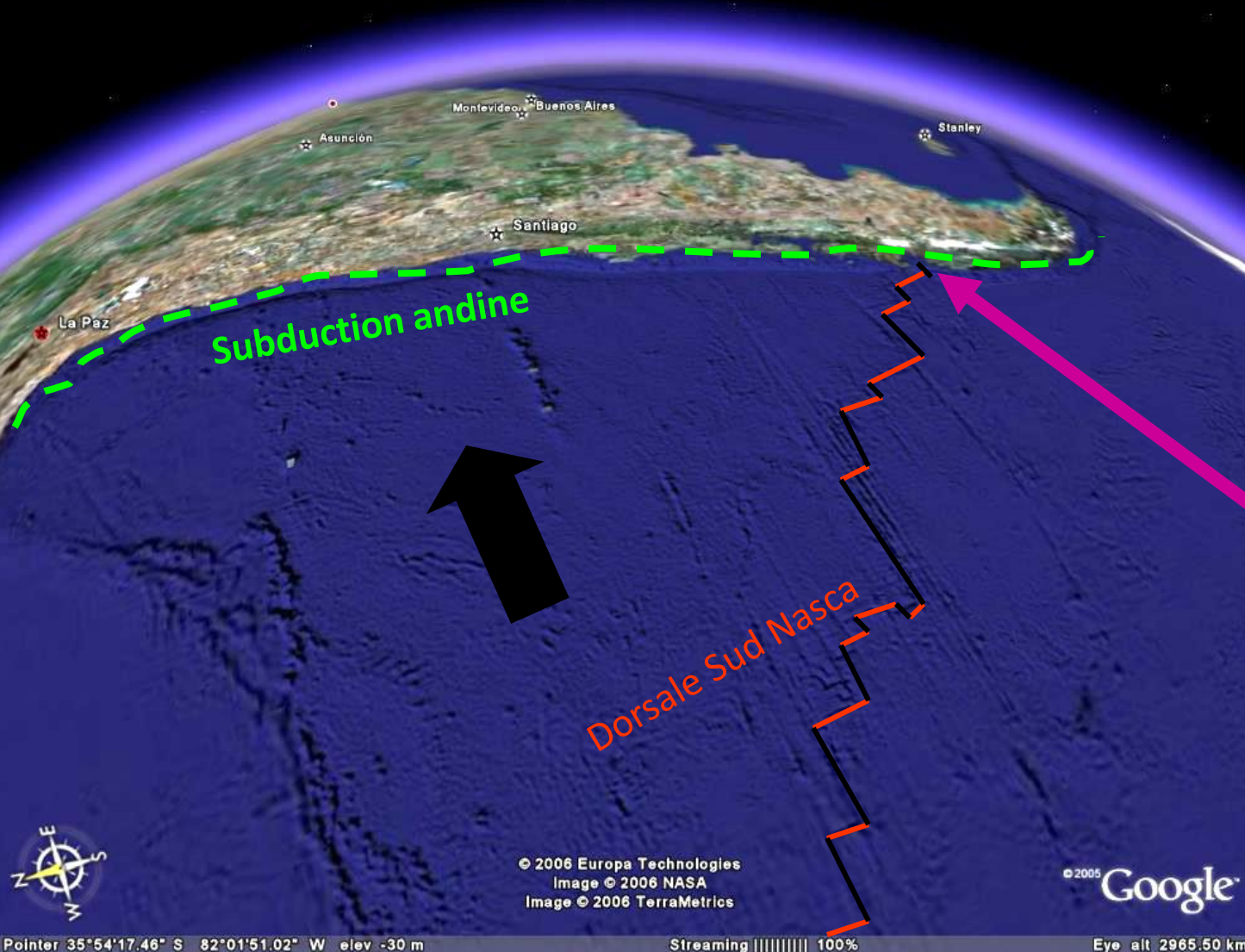




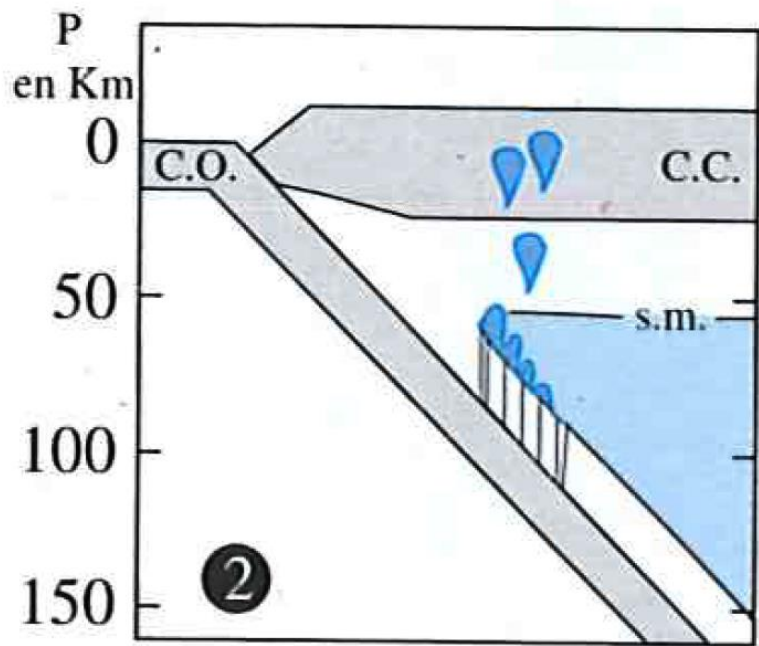
Solidus de
basaltes,
anhydre ou
hydraté

Comment faire des roches ayant cette chimie et cette minéralogie ? Il faut fondre (partiellement) du basalte hydraté à 900°C et 1,5 Gpa (45 km)

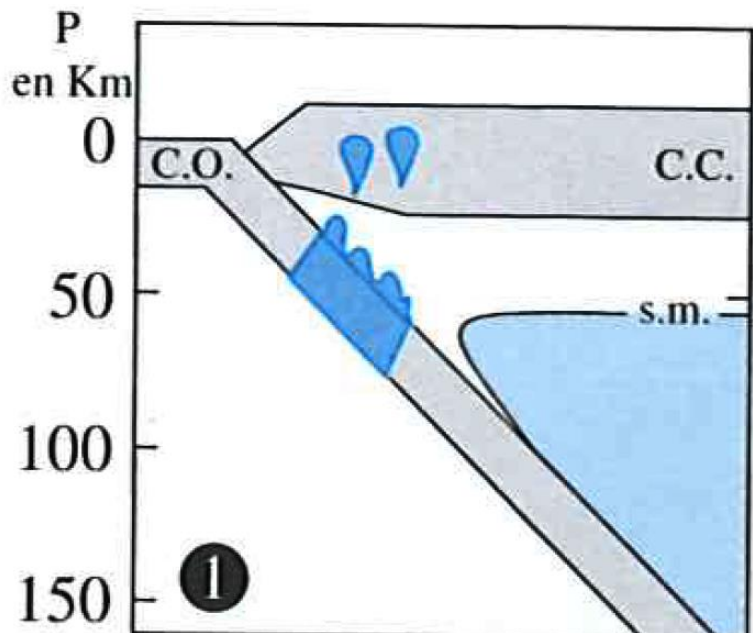
Comment porter aujourd'hui du basalte à 700°C à 45 km de profondeur ? Il faut subduire une lithosphère jeune, mal refroidie, ce qui est très rare aujourd'hui.



Ici, on subduite une dorsale, dont une lithosphère (et sa croûte) jeune, donc encore chaude



La situation actuelle : les lithosphères qui subduisent sont froides (sauf exceptions) → Magmatisme calco-alcalin classique



La situation archéenne (ou moderne exceptionnellement) : les lithosphères qui subductaient étaient moins froides → TTG et magmatisme adakitiques

s.m. = Solidus du manteau hydraté

Récapitulatif des différences dans les processus subducto-magmatiques à l'archéen et actuellement.

	Croûte continentale primitive	Croûte continentale moderne
Age de la croûte océanique subductée	Jeune (≤ 25 Ma)	Vieille (≥ 25 Ma)
Température de la croûte subductée	Elevée = croûte chaude	Faible = croûte froide
Gradient géothermique le long du plan de Benioff	25 à $30^{\circ}\text{C.km}^{-1}$	$\leq 10^{\circ}\text{C.km}^{-1}$
Déshydratation de la plaque subductée	Non	Oui
Source des magmas	Croûte océanique transformée en amphibolite à grenat	Coin de manteau métasomatisé
Résidu de fusion	Grenat + Hornblende	Olivine + Pyroxènes
Composition des magmas	TTG	Calco-alcalin classique
Yb_N	Bas : ($0.3 < Yb_N < 8.5$)	Elevés : ($4.5 < Yb_N \leq 20$)

Tab. 2 : Résumé des relations entre les régimes thermiques dans la croûte océanique subductée, les sources des magmas et les spectres de terres rares de ces mêmes magmas.

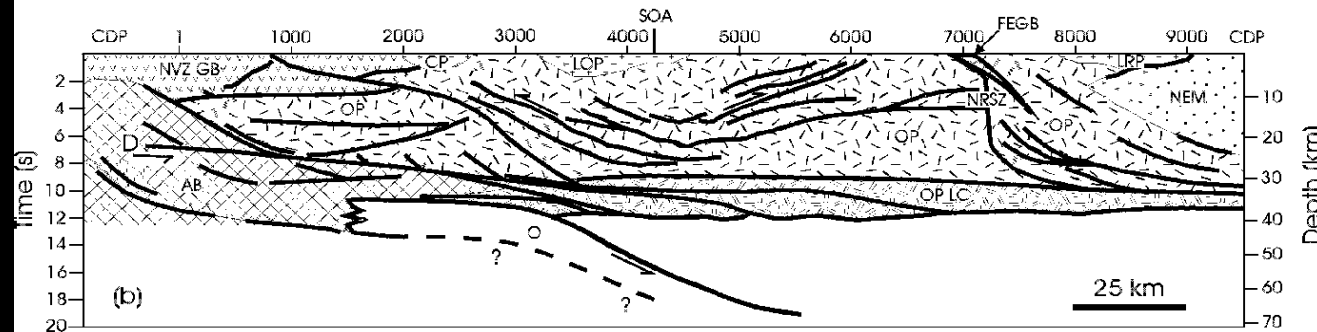
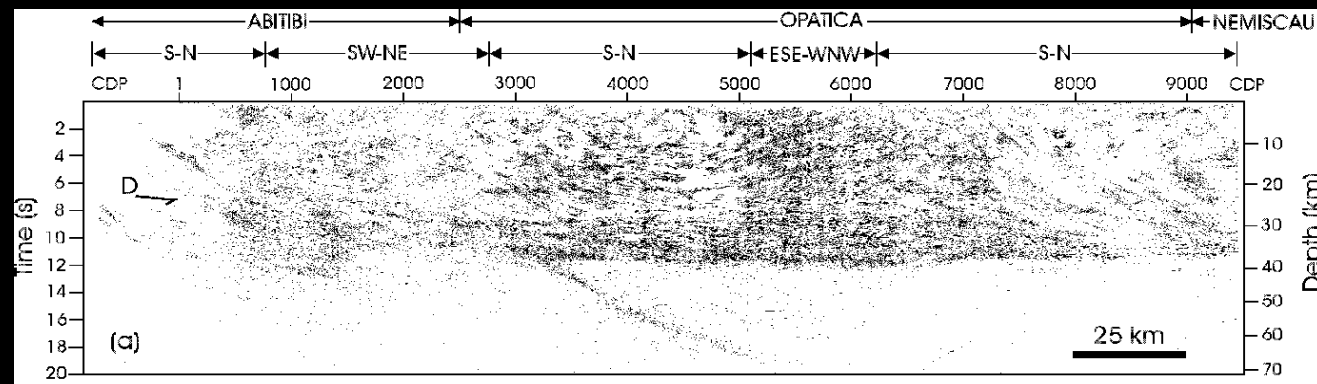
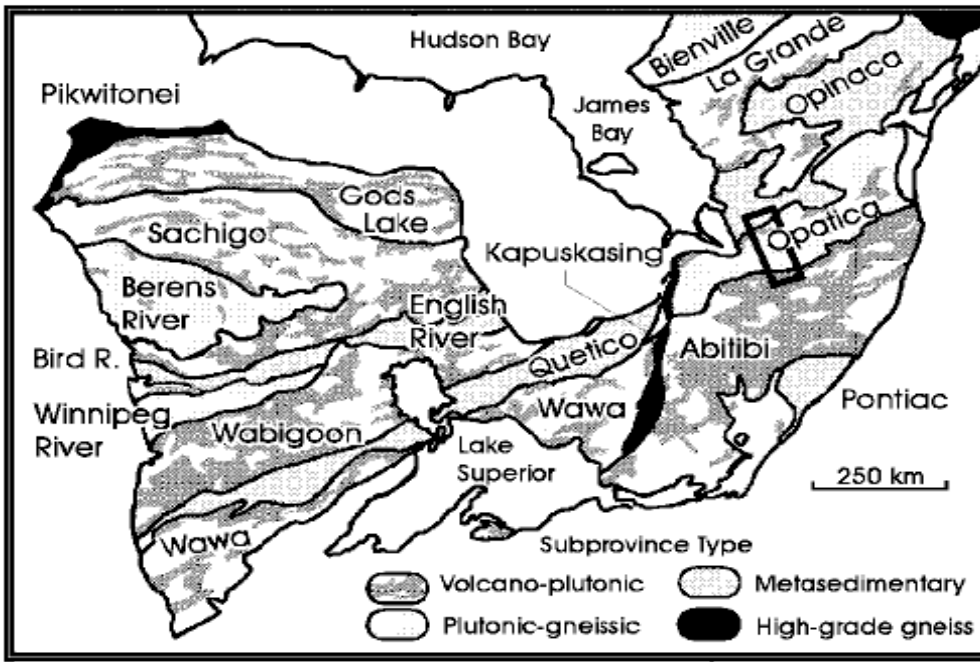
La transition se fait vers -2,5 Ga, au même moment où « disparaissent » les komatiites. C'est le moment d'une transition entre une Terre à manteau (et croûte océanique) chauds et froids

La tectonique archéenne.

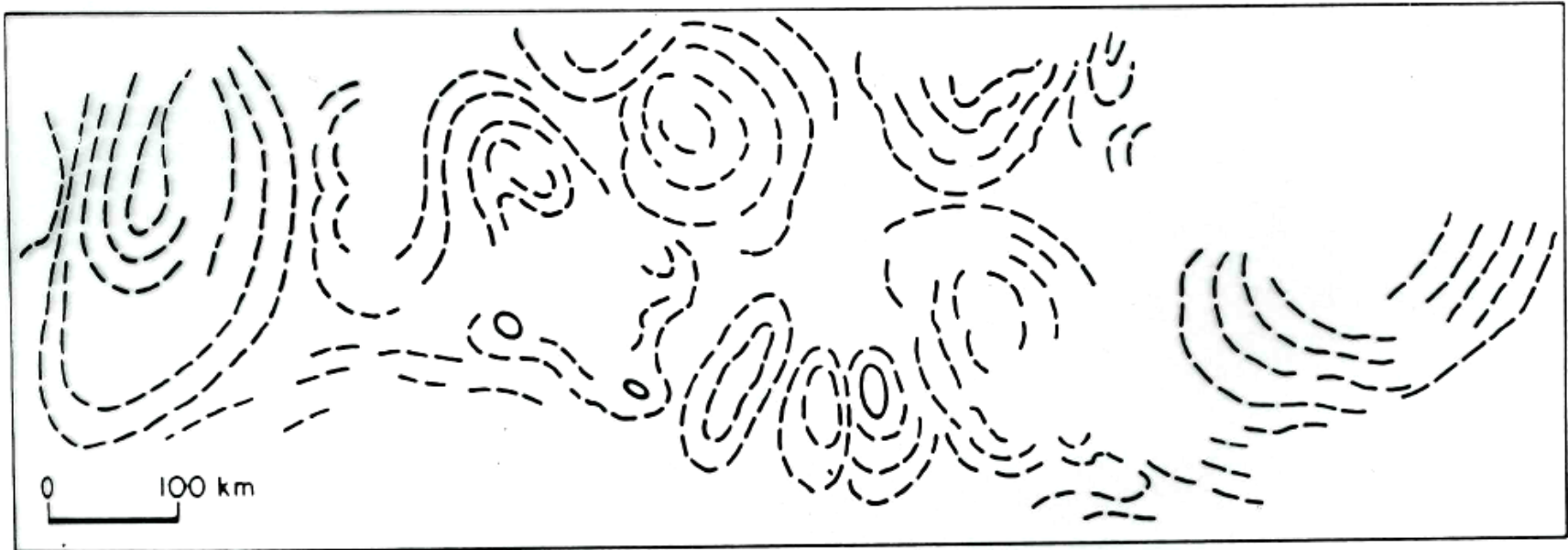


Dans quelques rares endroits, sur le terrain, en carte, comme en coupe, ou en sismique, on se croirait ...

... dans une chaîne « récente », avec les mêmes marqueurs de grands mouvements horizontaux (charriages ...), le même type de profil sismique



Dans la majorité des cas, les déformations ne forment pas des « chaînes » (de montagnes), mais une géométrie en dômes et cuvettes, comme ici le montre cette « vieille » carte de la trajectoire des foliations dans le Bouclier Sibérien



The deformation pattern of the Archaean of the Aldan Shield, USSR (redrawn from Salop and Scheinmann, 1969; reproduced by permission of L. J. Salop)

Une étude cartographique détaillée d'une telle région (en Inde)

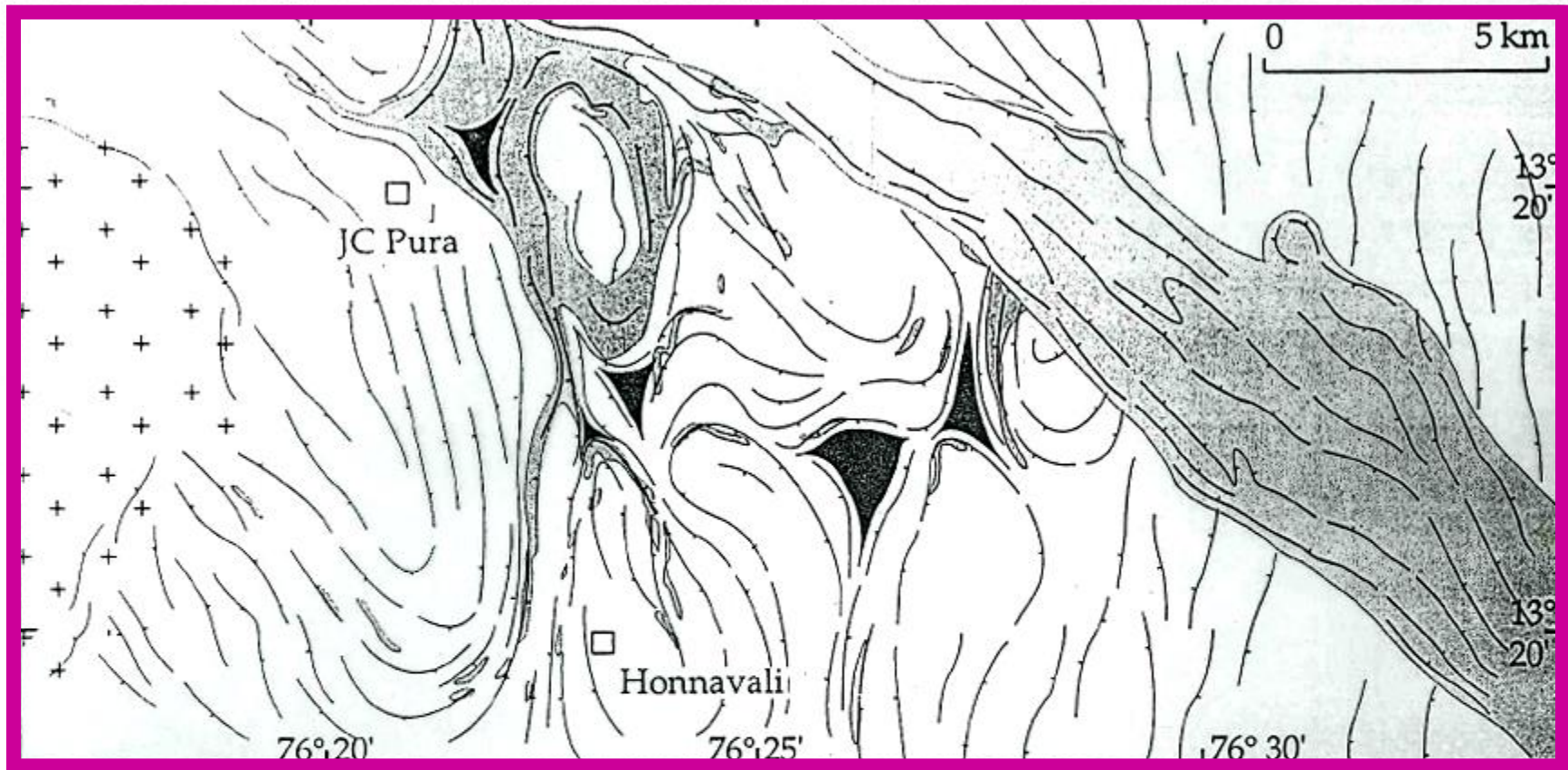
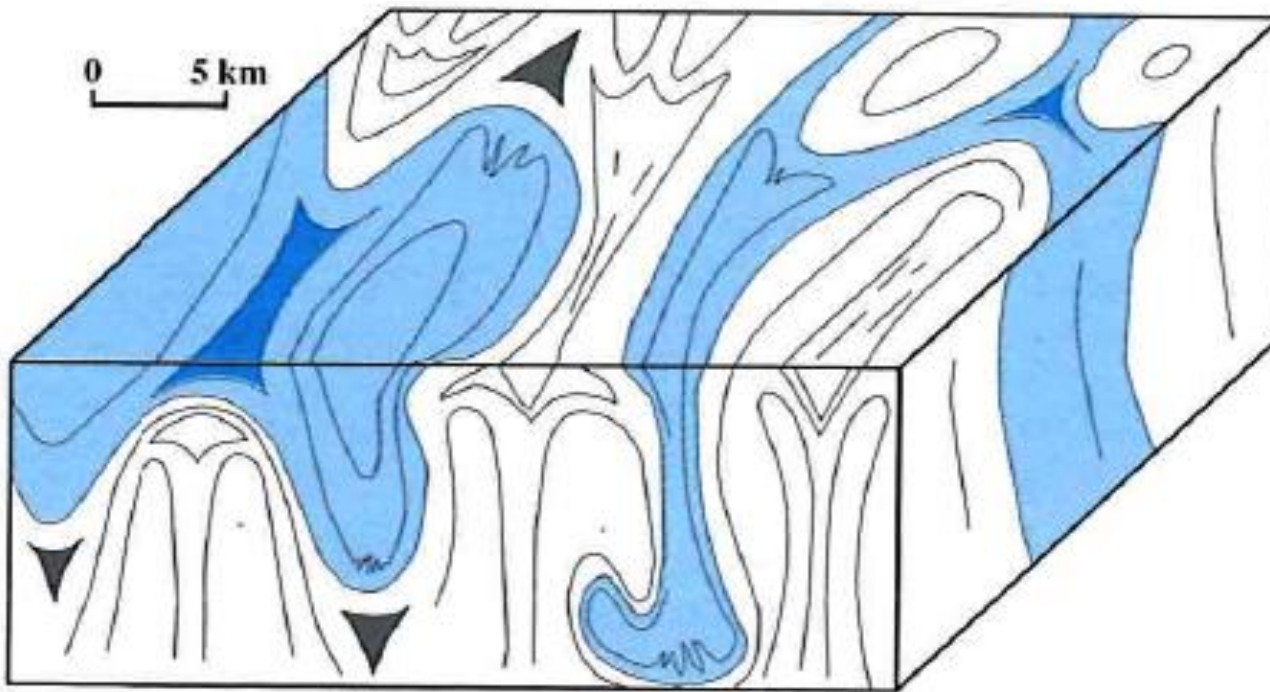


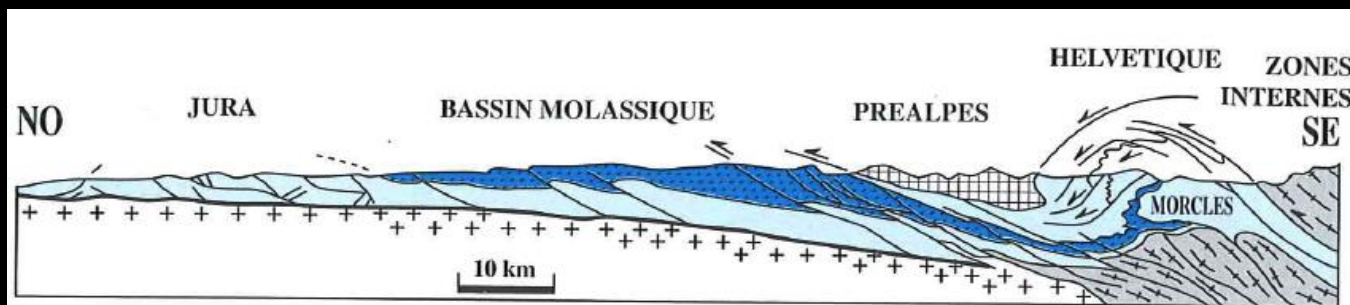
Fig. 6. Detailed foliation maps from (a) JC Pura where two superimposed greenstone series were recognized (the youngest is in light grey) (Chardon 1996), (b) Tuvukere and (c) Kunigal areas (modified after Bouhallier 1995). Greenstones and supracrustal rocks are in grey and gneissic rocks (TTG) in white. Triple points are in black. Areas are located on Fig. 5. Light grey shading indicates supracrustal rocks.

En carte



**En bloc
diagramme
ou en coupe**

**La région d'Holenarsipur en Inde du Sud
(en haut), à comparer avec les Alpes
occidentales (en bas)**



Un tel type de déformation de la croûte continentale implique une croûte beaucoup plus ductile (plus « molle ») donc beaucoup plus chaude que maintenant



L'histoire de la Terre en une seule figure, ici l'histoire interne

Super Novae, nucléosynthèse

Condensation accretion

différenciation

Bombardement tardif

Cristallisation du manteau

Formation de la Lune

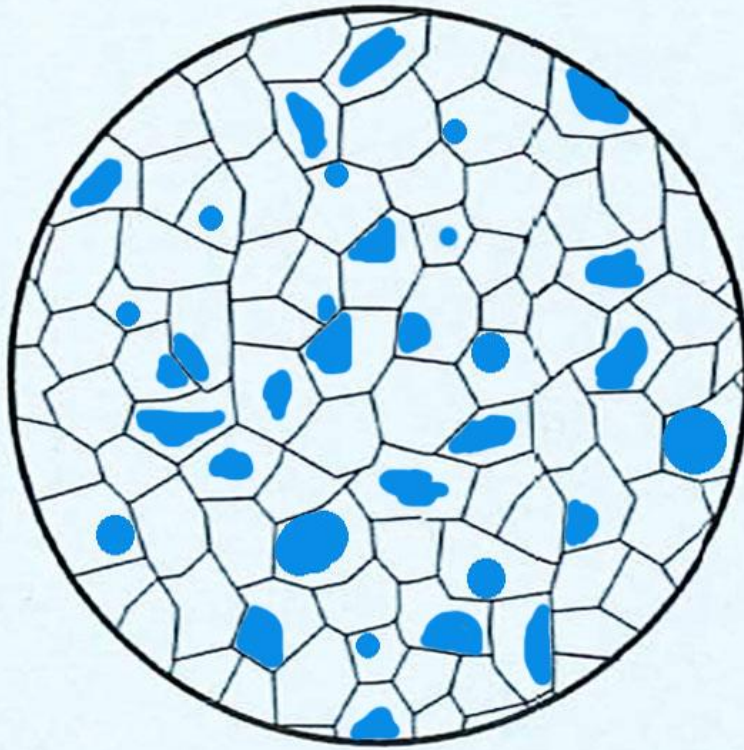


L'Archéen : premier équilibre dynamique. Manteau très chaud, convection mantellique vigoureuse, lithosphère peu épaisse et très déformable, magmatisme très abondant, dont komatiite et TTG, croûte continentale très ductile

La transition

Archéen / Phanérozoïque

Le Protérozoïque et le Phanérozoïque : deuxième équilibre dynamique (la dynamique actuelle). Manteau moins chaud, convection mantellique ample et lente (la tectonique des plaques), lithosphère épaisse et peu déformable, magmatisme « faible », volume continental stable et important, croûte continentale beaucoup moins ductile



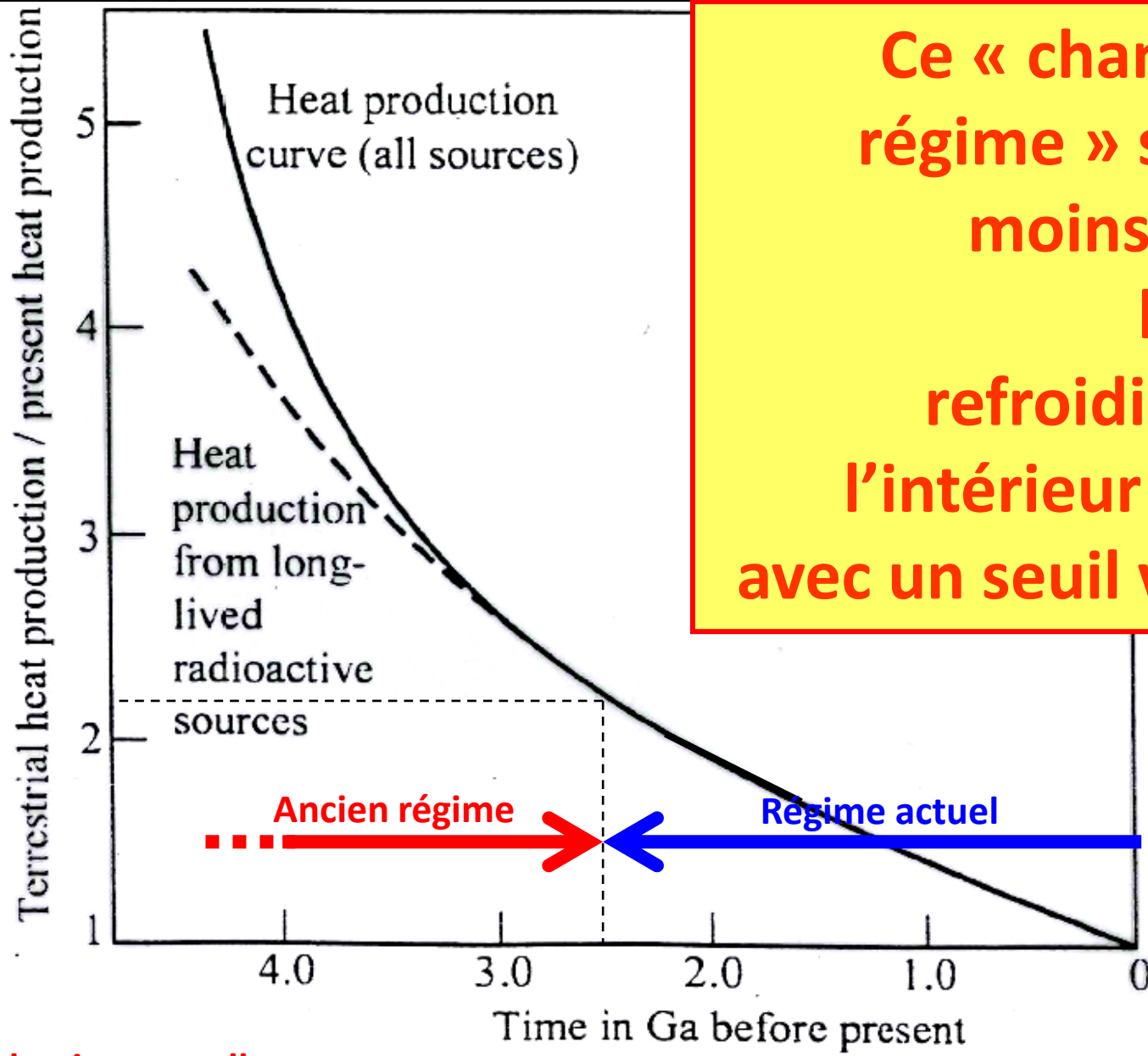
ARCHEEN



AUJOURD'HUI

Schéma comparant la taille des plaques actuelles (à gauche) à celle supposée des plaques archéennes (à droite). A l'Archéen, la plus grande production de chaleur interne était évacuée par une longueur de ride plus importante, résultant en une mosaïque de plaques beaucoup plus petites que celles de la Terre actuelle (d'après De Wit et Hart, 1993).

Les deux périodes de l'histoire interne de la Terre

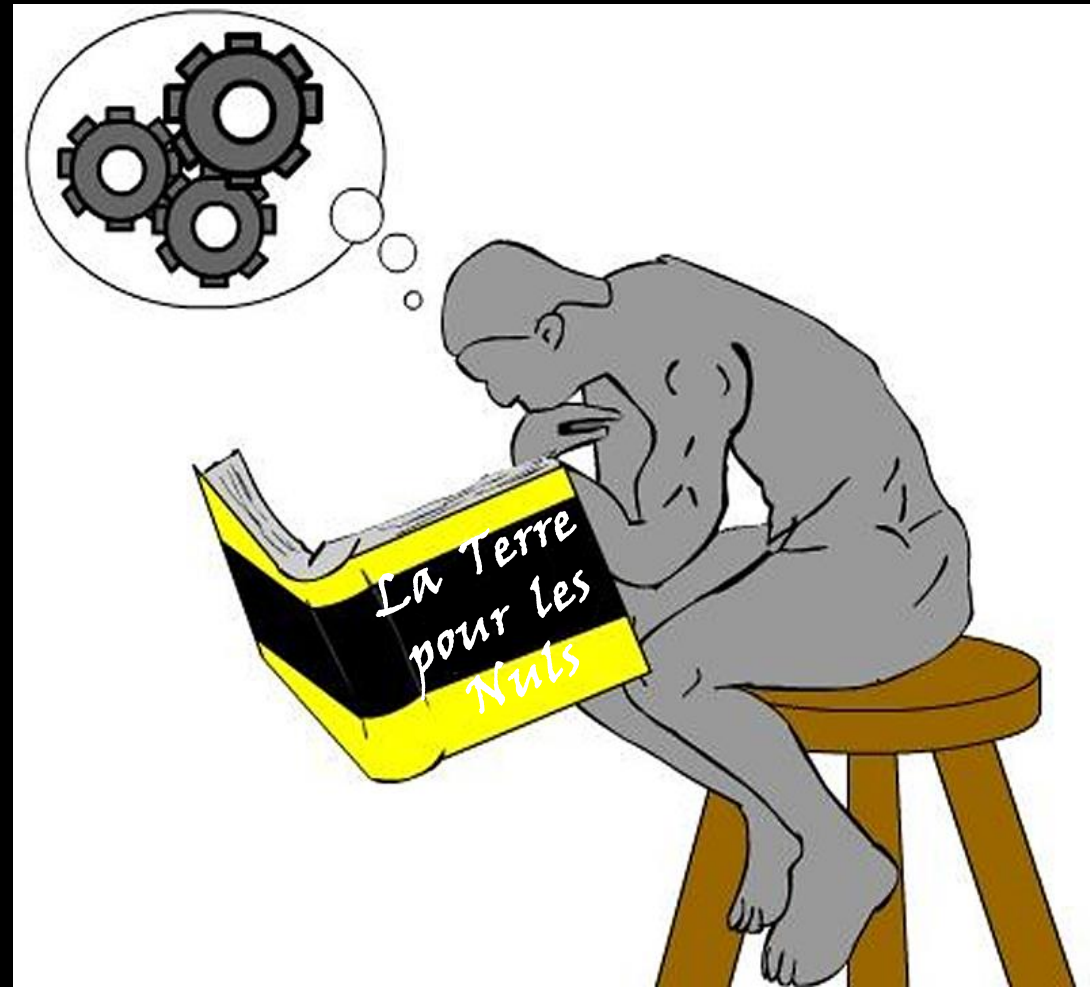


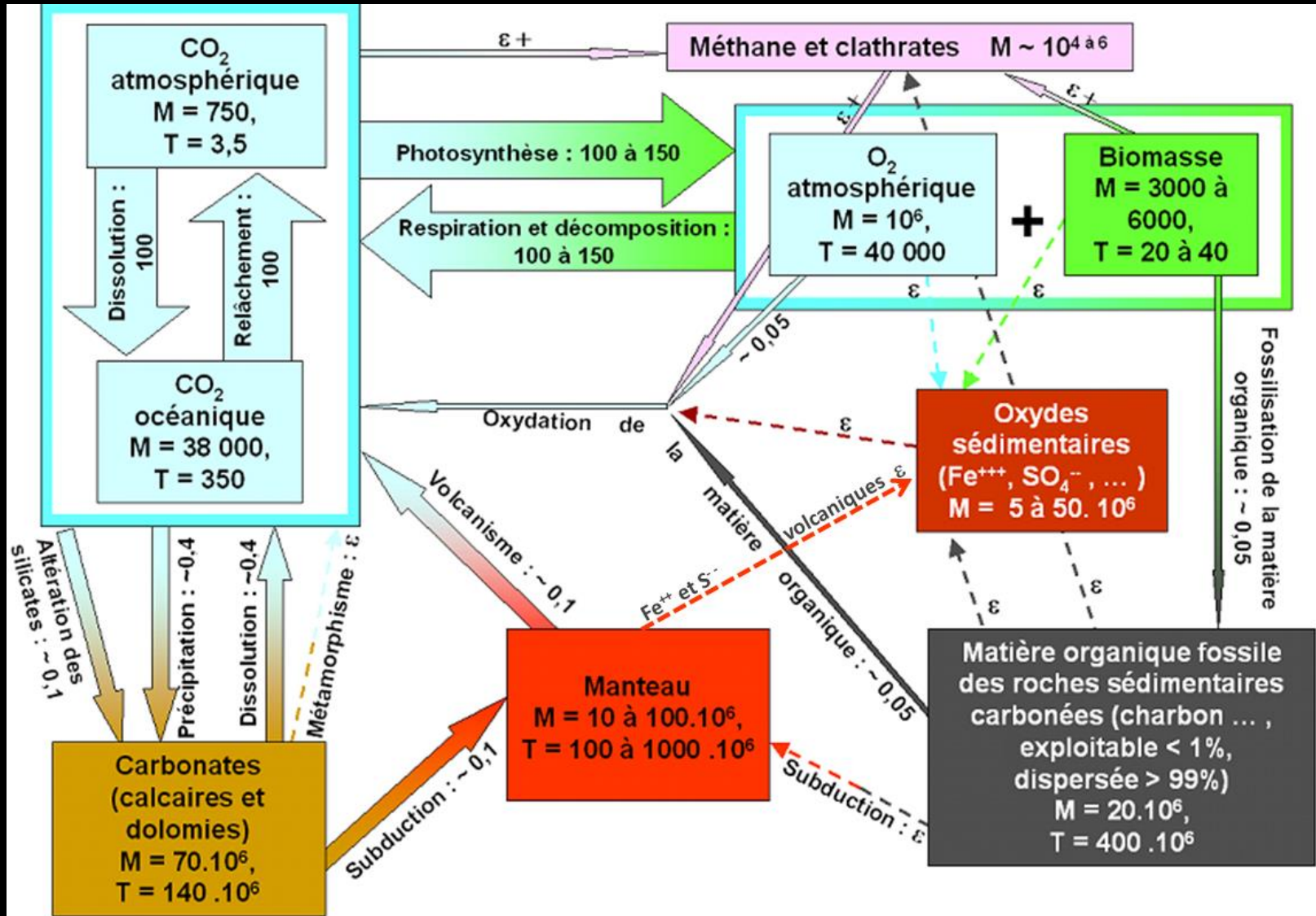
Ce « changement de régime » serait dû au moins en partie à l'inexorable refroidissement de l'intérieur de la Terre, avec un seuil vers -2,5 Ga

Production actuelle :
 $40. 10^{12} \text{ W}$

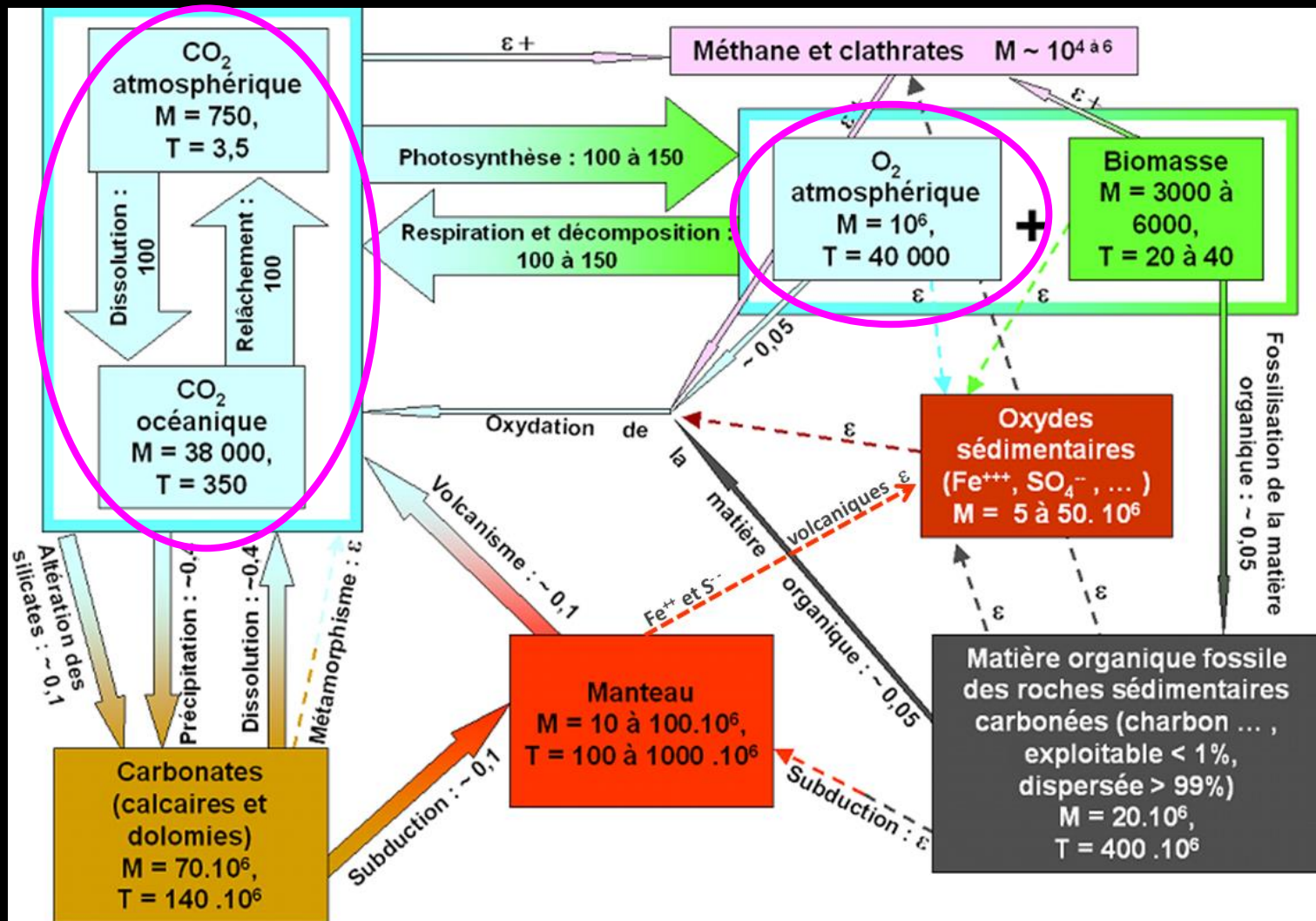
D'où quelques questions

- La Terre est-elle le seul corps du SS à avoir ce type de dynamique interne ?
- Depuis quand la Terre a-t-elle cette dynamique ?
- Y-a-t-il un (des) lien(s) entre ces dynamiques internes et les conditions externes ?

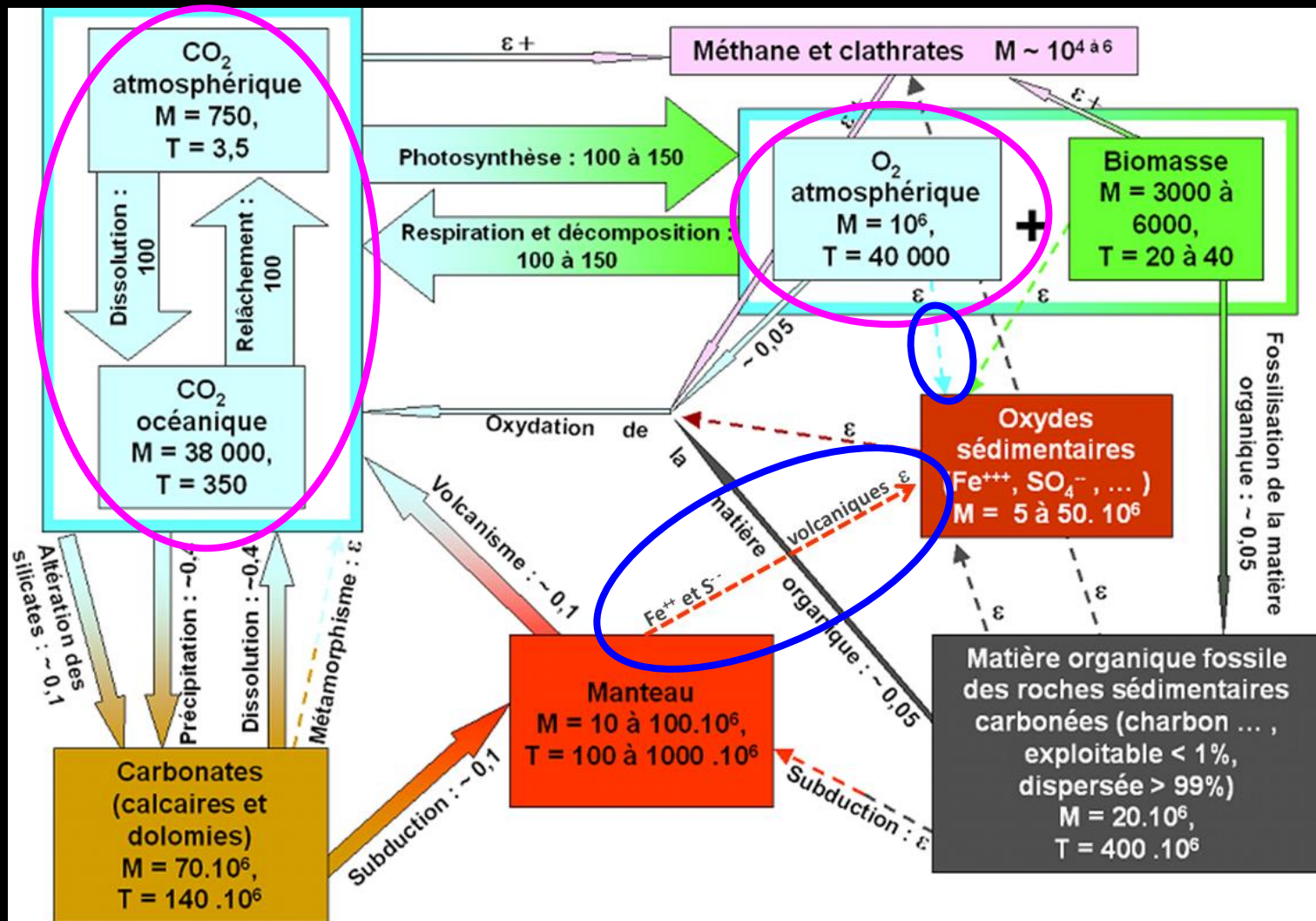




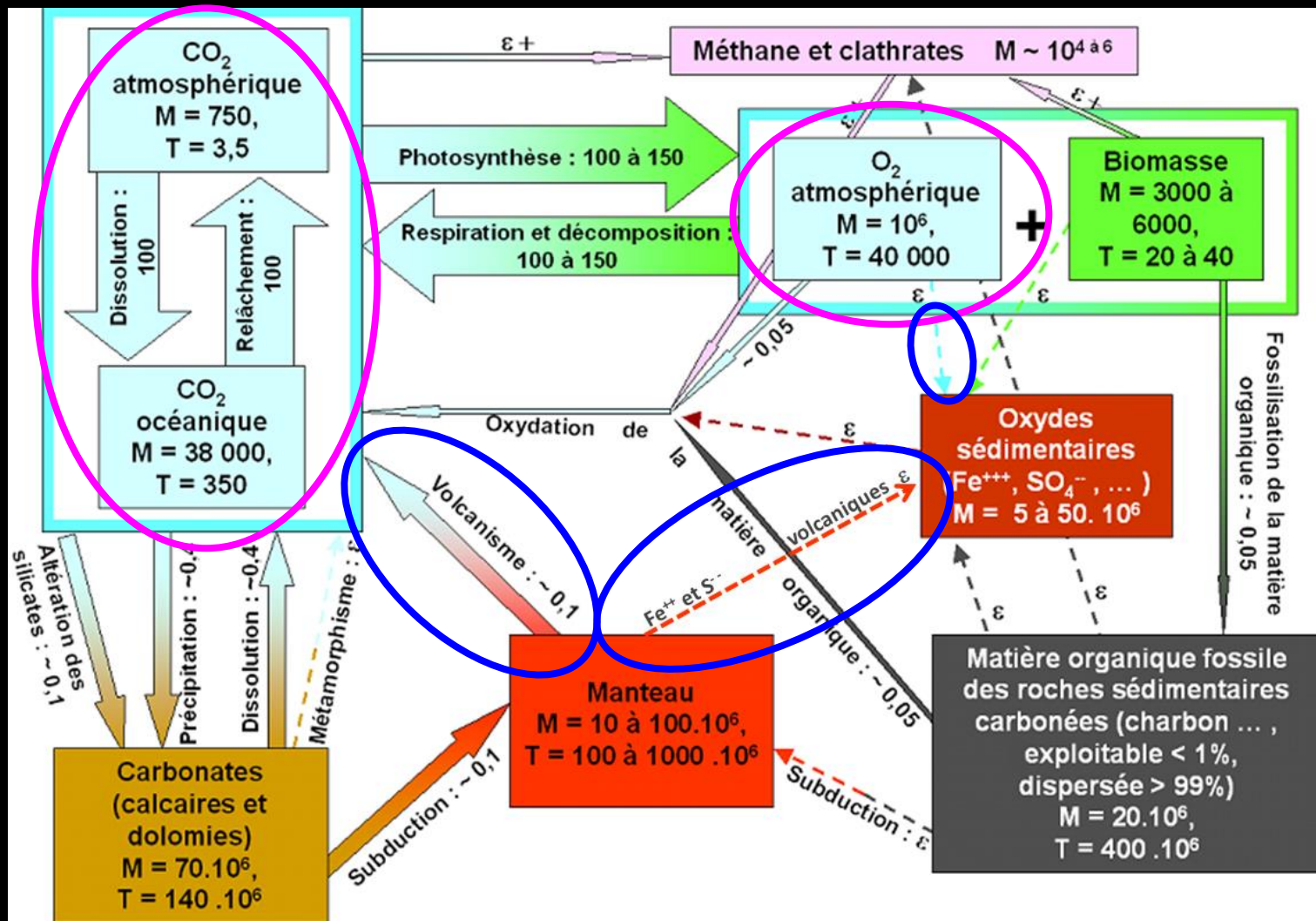
Voici un cycle du carbone (et du dioxygène) très simplifié, le «vrai» (pas celui des biologistes) cycle que devrait parfaitement maîtriser toute personne prétendant s'occuper de climat, de géologie et de Terre globale. Un cycle complet tel que celui qu'on imagine en 2013 est « indessinable » !



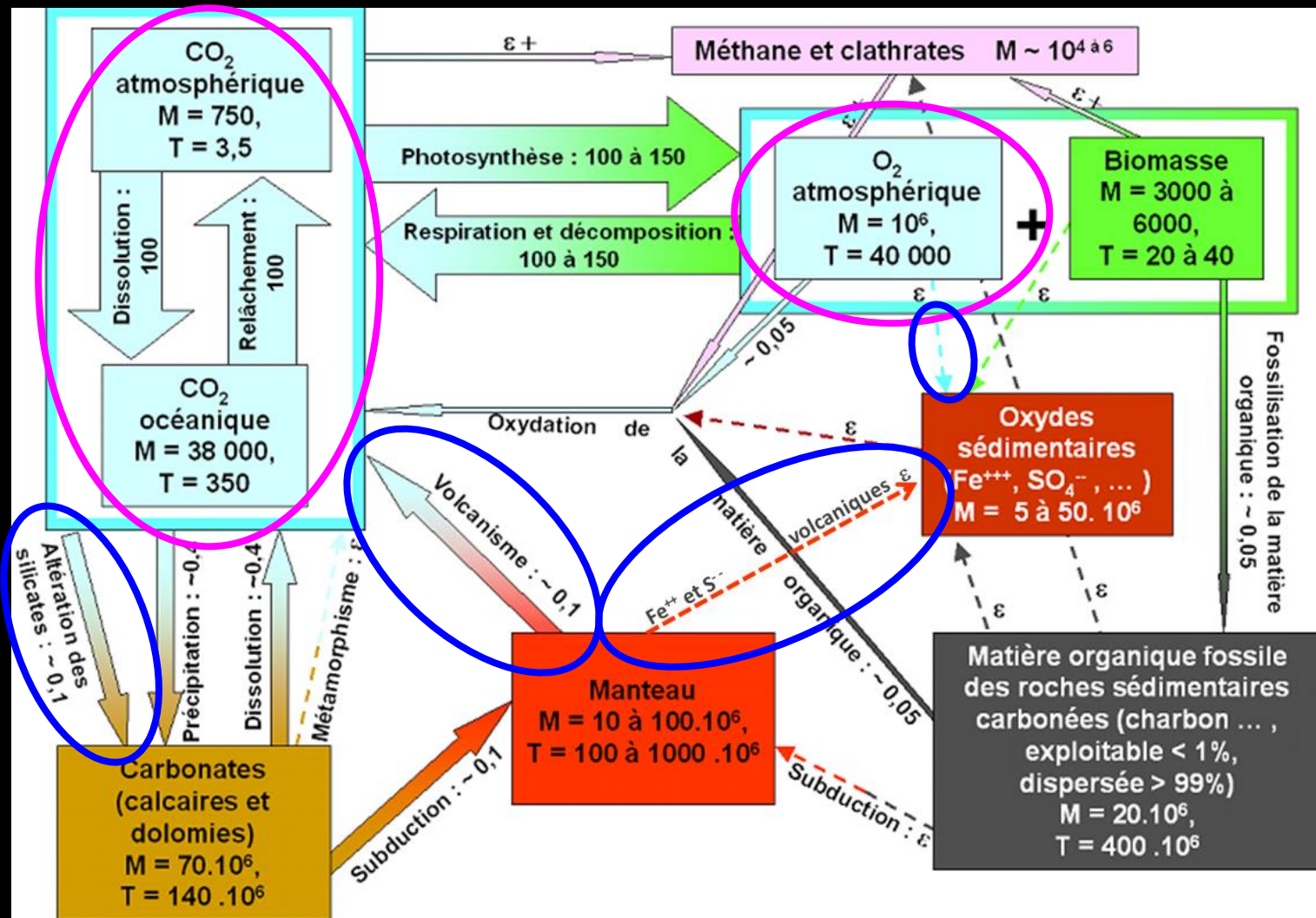
Dans un tel cycle, comment la dynamique interne peut influencer deux des composants majeurs de l'atmosphère : O₂ et CO₂ ?



Dans un tel cycle, comment la dynamique interne peut influencer deux des composants majeurs de l'atmosphère : O₂ et CO₂ ? Il y a au moins 3 façons pour le magmatisme d'influencer l'atmosphère :



Dans un tel cycle, comment la dynamique interne peut influencer deux des composants majeurs de l'atmosphère : O₂ et CO₂ ? Il y a au moins 3 façons pour le magmatisme d'influencer l'atmosphère :



Dans un tel cycle, comment la dynamique interne peut influencer deux des composants majeurs de l'atmosphère : O_2 et CO_2 ? Il y a au moins 3 façons pour le magmatisme d'influencer l'atmosphère. On va voir ça de plus près.



**Comment connaître
l'atmosphère
pré-phanérozoïque ?
On étudie les sédiments
protérozoïques et archéens.
Contrairement à une
croyance largement
répandue, il existe beaucoup
de sédiments non
métamorphisés jusqu'à
-3,5 Ga (principalement en
Australie et en Afrique du
Sud). Ici, des fentes de
dessiccation du groupe de
Moodies (3,22 Ga),
Afrique du Sud**



Fentes de dessiccation et ripple marks

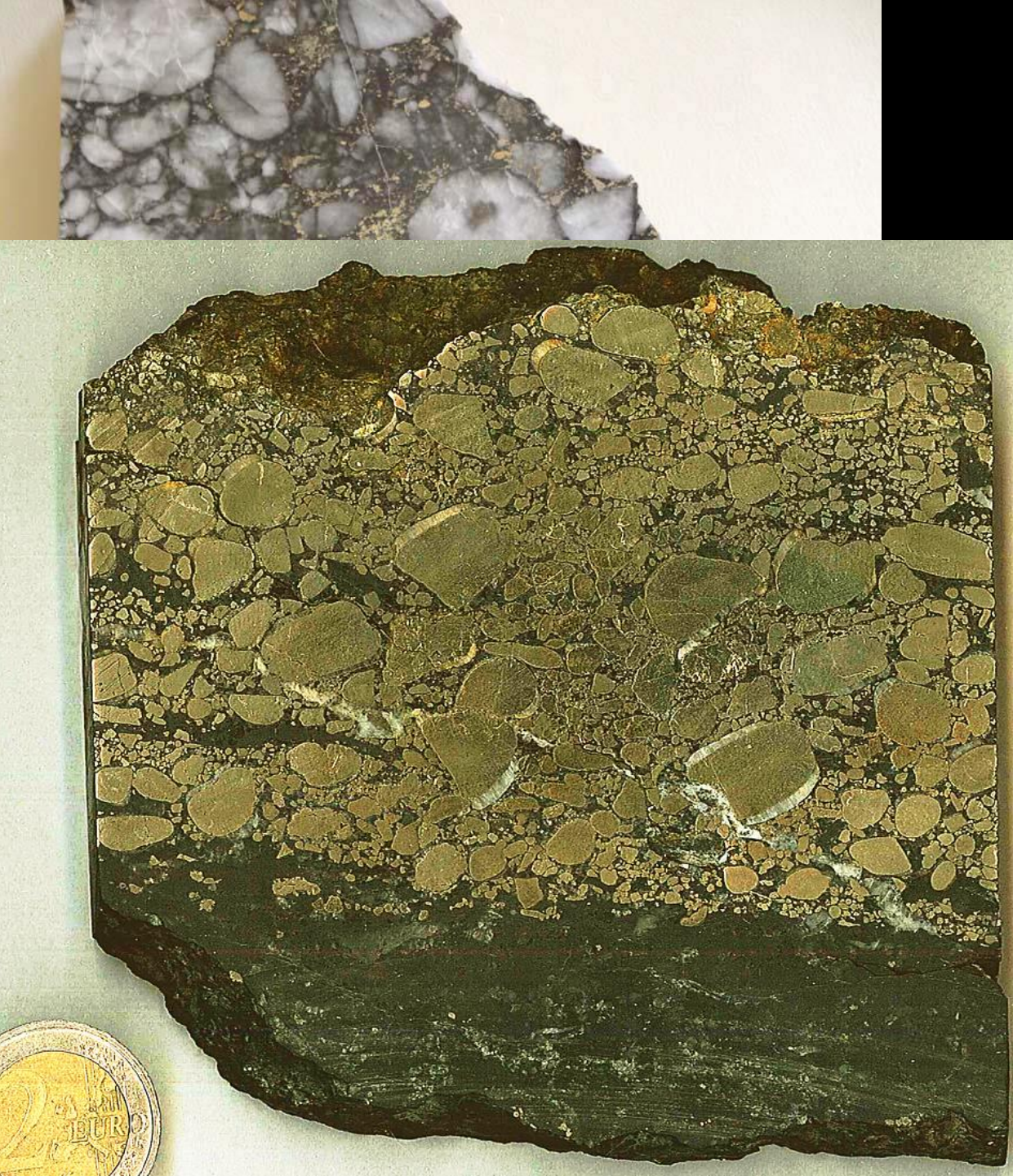


Juste à coté, des conglomérats fluvio-deltaïques (-3,22 Ga)



A 200 km de là,
dans le
Witswatersrand
(-2,9 Ga), il y a
aussi des
conglomérats,
contenant des
galets de quartz
(banal) mais
aussi de pyrite
(FeS_2) ce qui n'est
pas banal.

5 cm



A 200 km de là,
dans le
Witwatersrand
(-2,9 Ga), il y a
aussi des
conglomérats,
contenant des
galets de quartz
(banal) mais
aussi de pyrite
(FeS_2) ce qui n'est
pas banal.



La pyrite (FeS_2) n'est pas stable en présence d' O_2 .

Alors dans un torrent bien aéré ...

→ Il n'y avait pas d' O_2 atmosphérique à l'Archéen.



Toujours dans le même secteur (A.S.) et à la même période (-3,2 Ga), des fers rubanés.



BIF du groupe de Fig Tree (3,25 Ga, Af. du Sud), avec en prime une belle tectonique



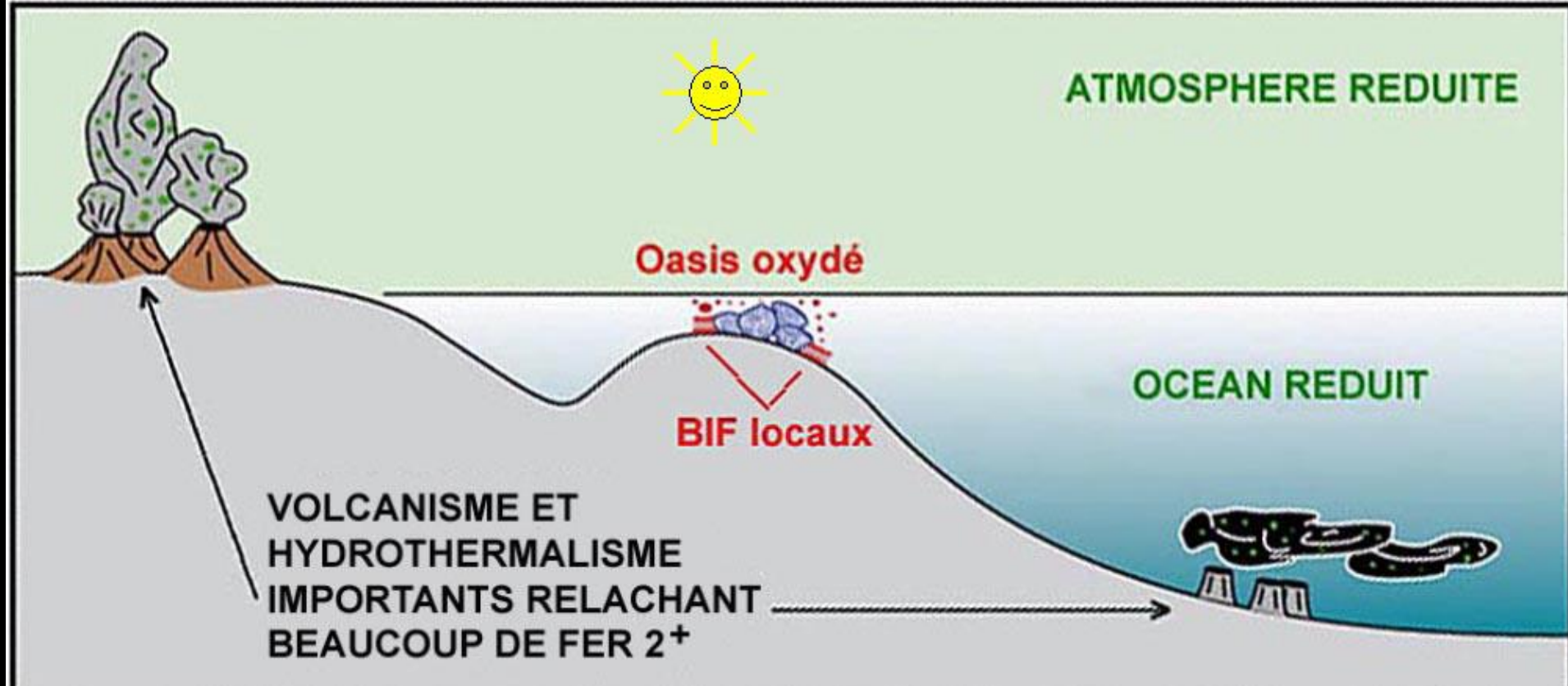
**Gros plan sur les fers rubanés du groupe de Fig Tree
(3,25 Ga, Af. du Sud)**



Hématite (Fe_2O_3) rouge sombre car légèrement hydratée

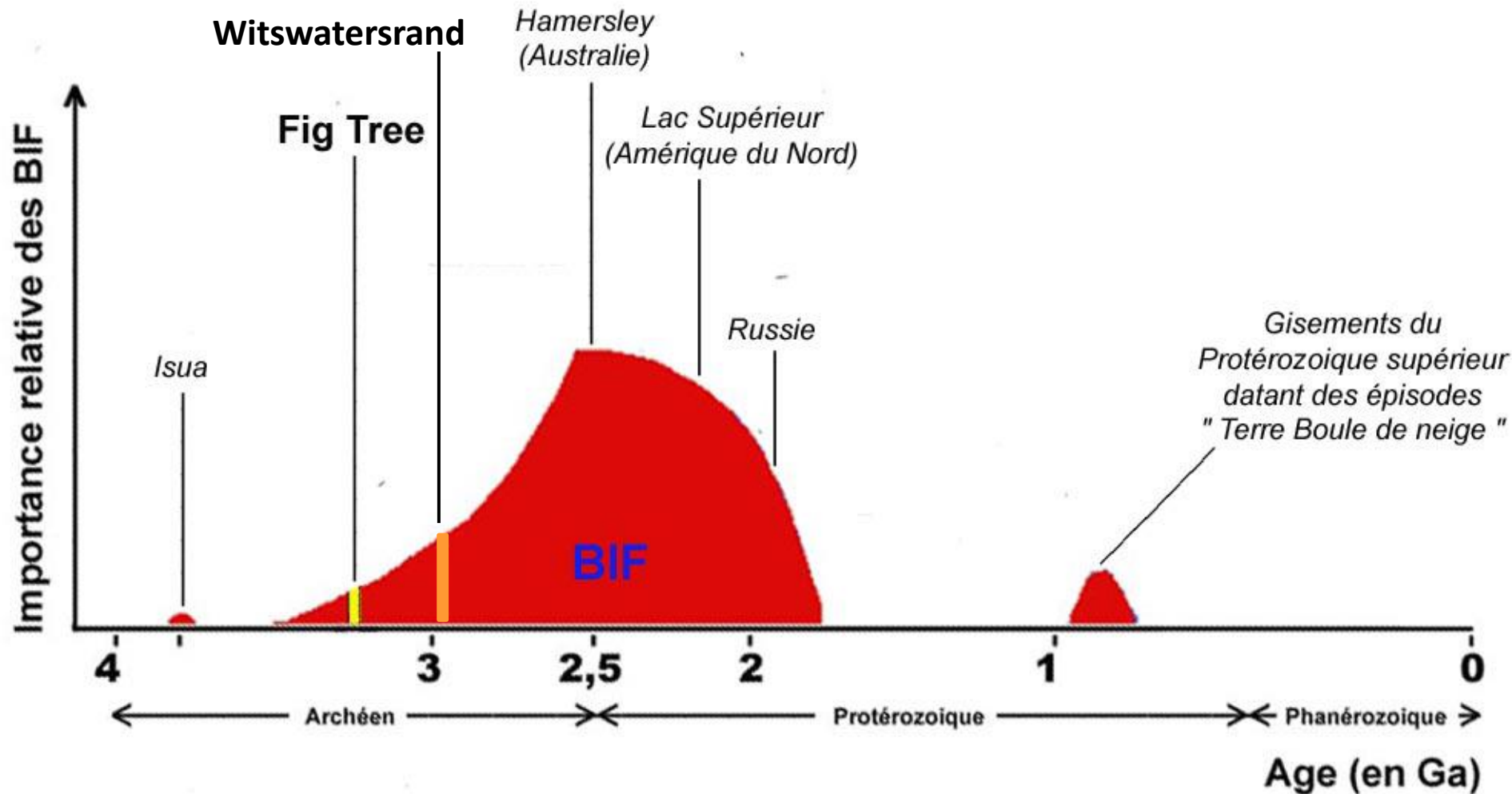
Hématite (Fe_2O_3) grise, sa couleur « normale »

Silice colorée en rose ou rouge par des traces d'hématite

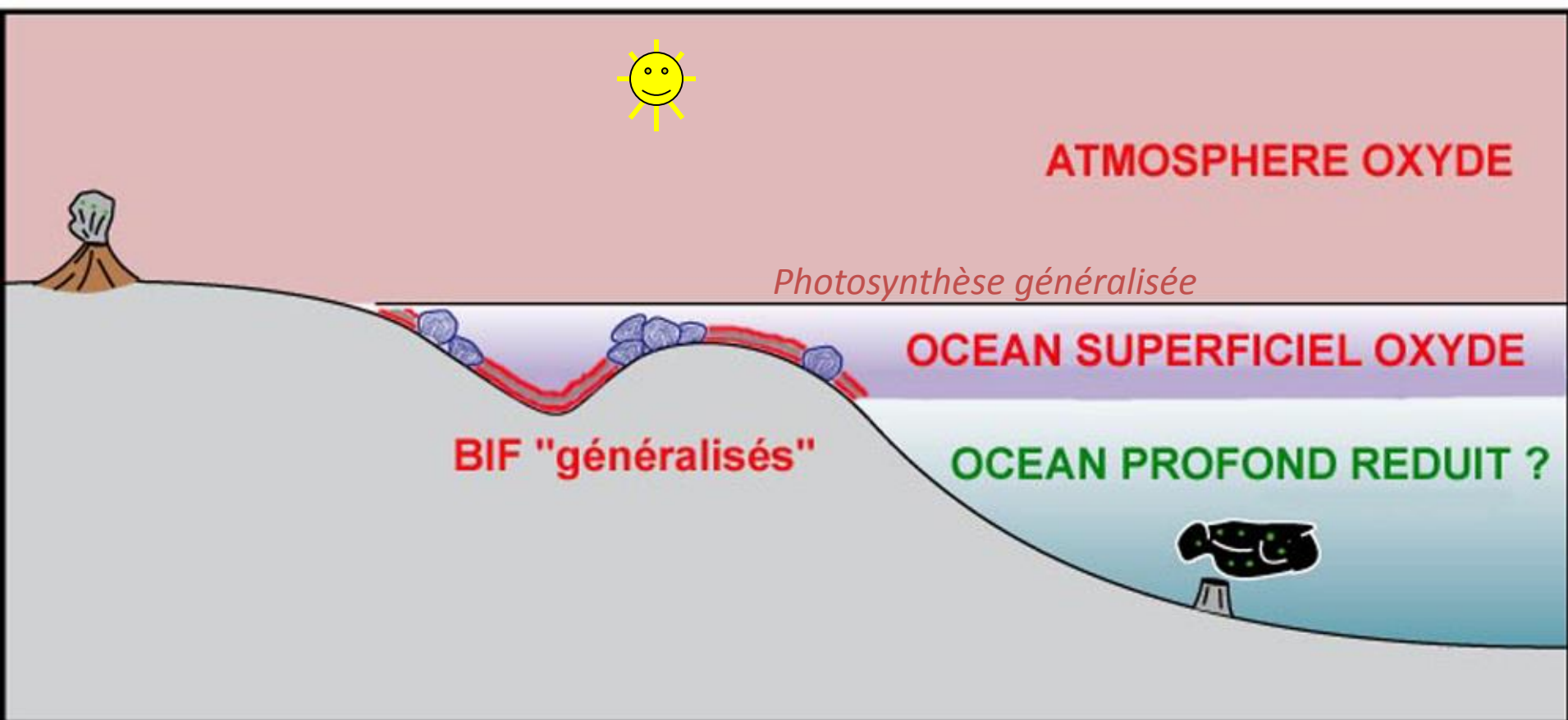


La Terre vers -3,2 ou -2,9 Ga : atmosphère réduite, eau de mer réduite, riche en Fe^{++} dissout (car soluble) et abondant (volcanisme abondant).

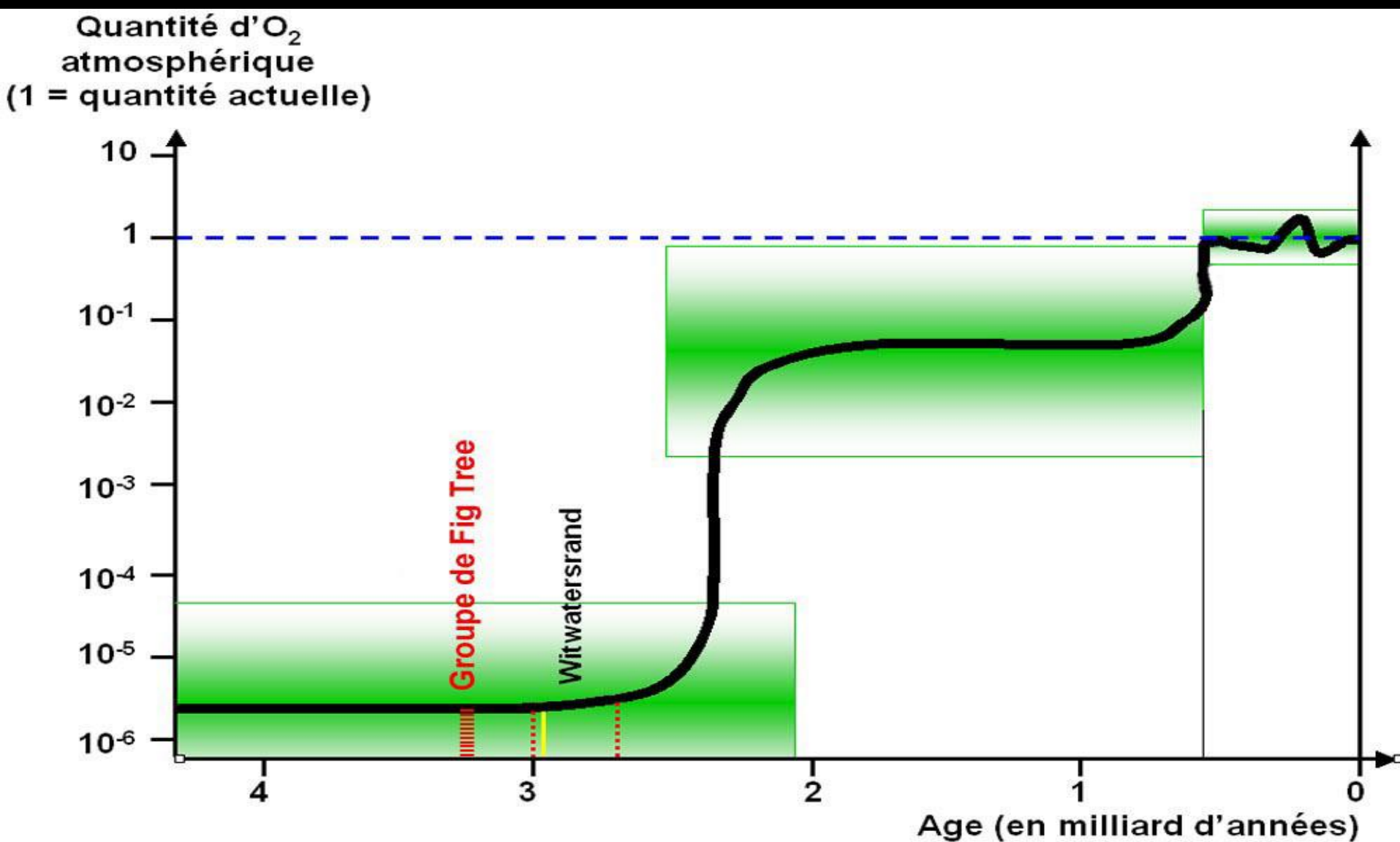
Oasis de vie photosynthétique (photoferrotrophie ?) créant des « ilots » oxydés locaux et isolés où précipite du Fe^{+++} sous forme de Fe_2O_3 , insoluble.



Les BIF « explosent » vers -2,5 Ga, pour disparaître (presque) définitivement vers -1,8 Ga.

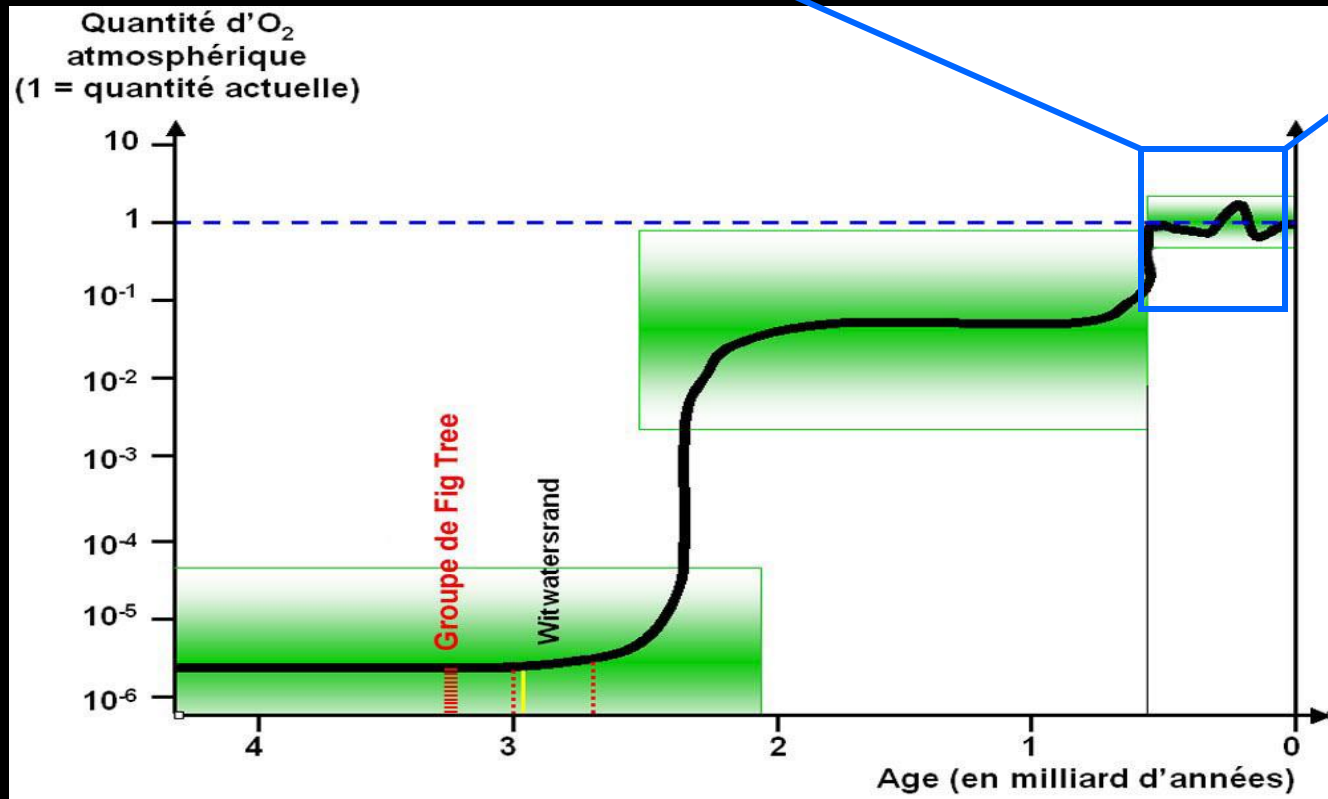
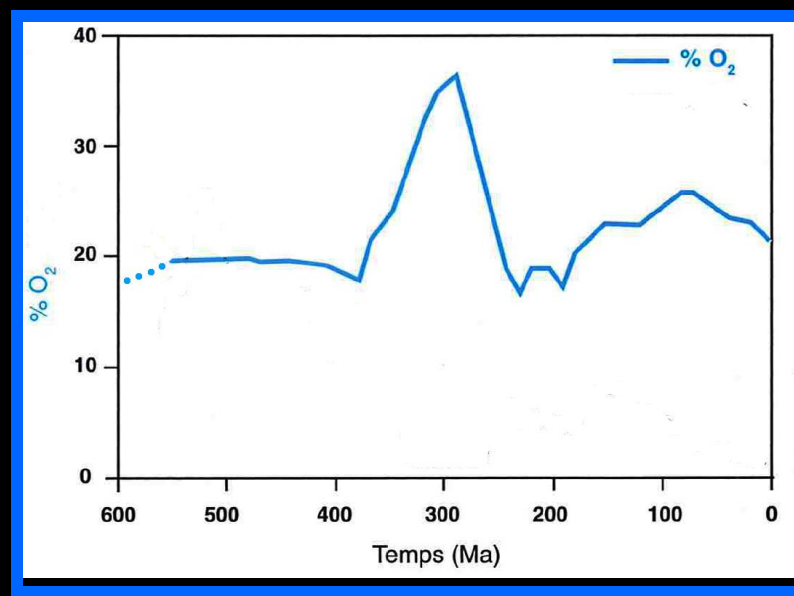


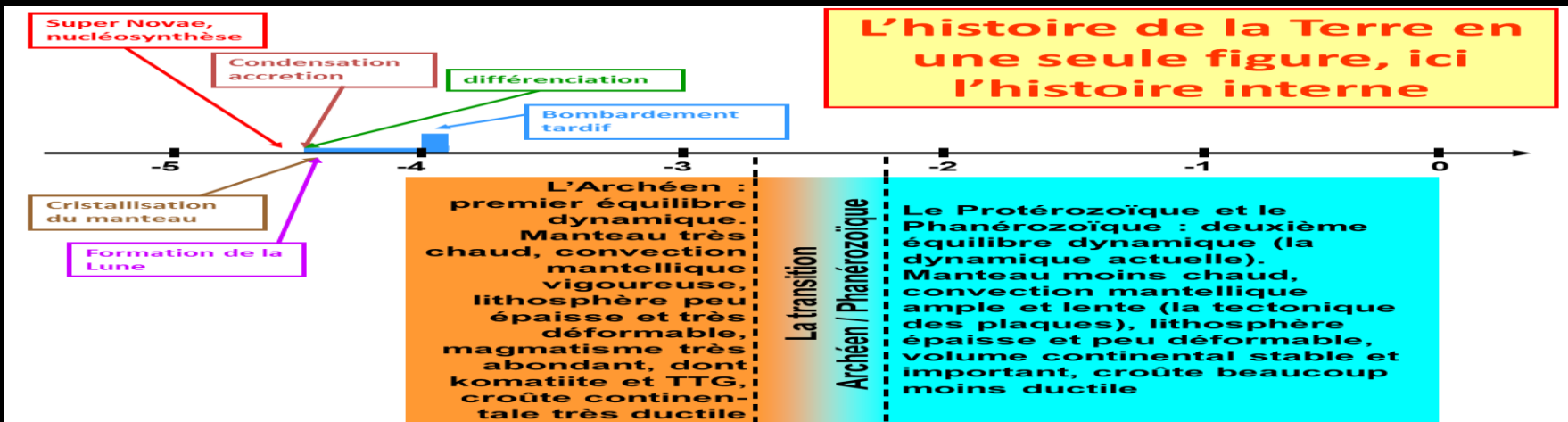
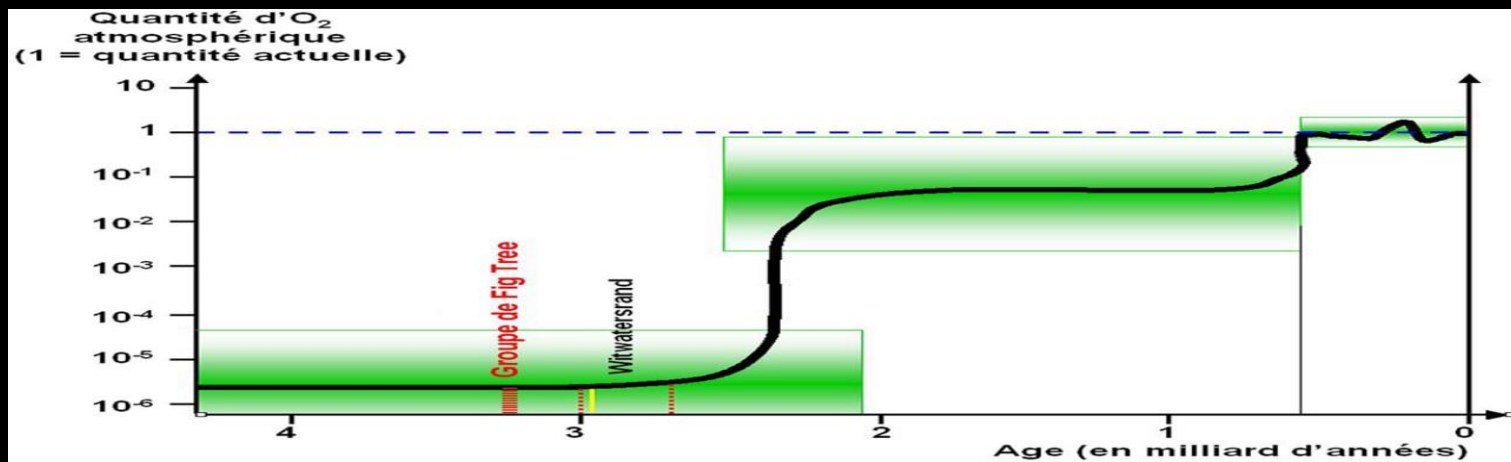
La « révolution » autour de -2,5 Ga. Explosion des BIF. L'atmosphère et l'océan (d'abord superficiel, puis profond) deviennent oxydés. Tout le Fe^{++} devient Fe^{+++} et précipite sous forme d'énormes niveaux de BIF omniprésents. A la fin, la précipitation cesse, faute de Fe^{++} . N'est-ce dû qu'à des phénomènes biologiques ou superficiels ?



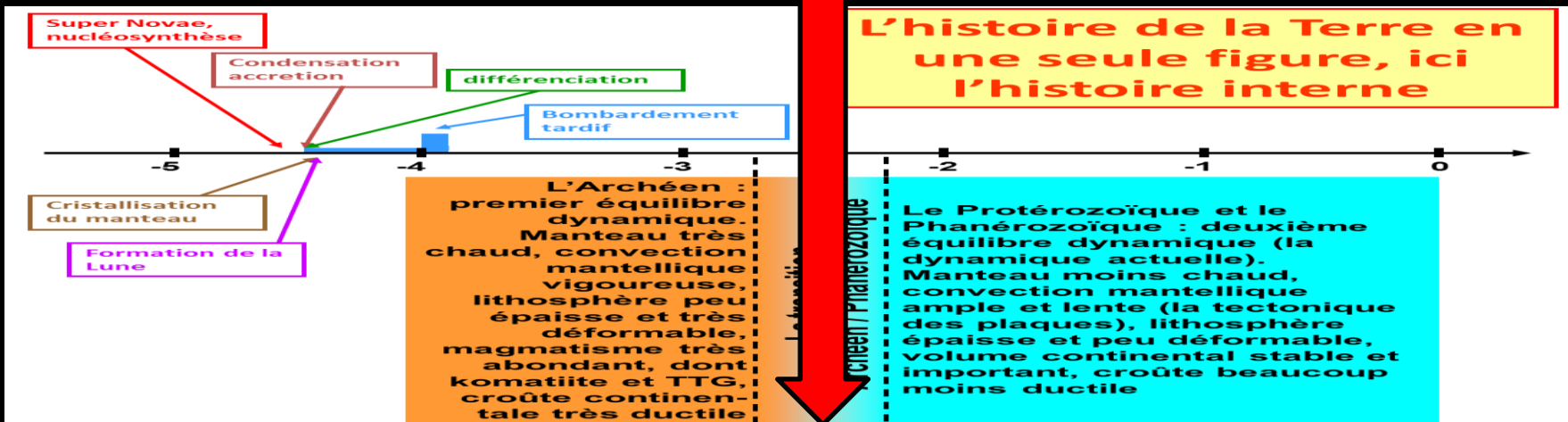
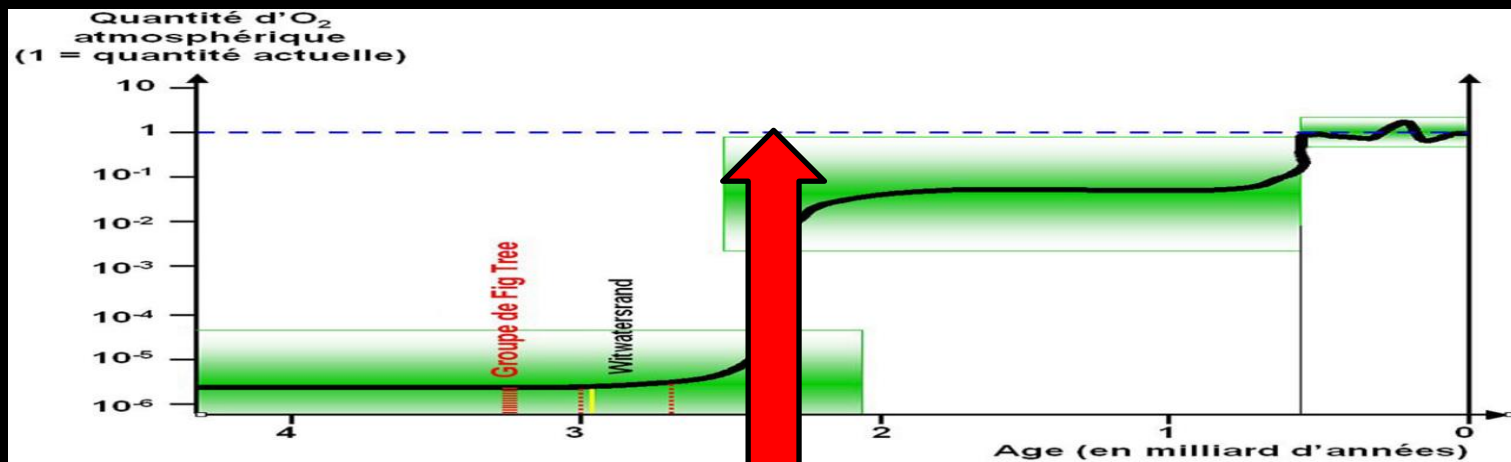
C'est avec de telles données qu'on reconstitue l'évolution de l'O₂ atmosphérique au cours du temps (courbe noire) avec une énorme barre d'erreur (zone verte)

Les variations phanérozoïques de l'O₂ atmosphérique (échelle linéaire) dans l'évolution globale (échelle log)

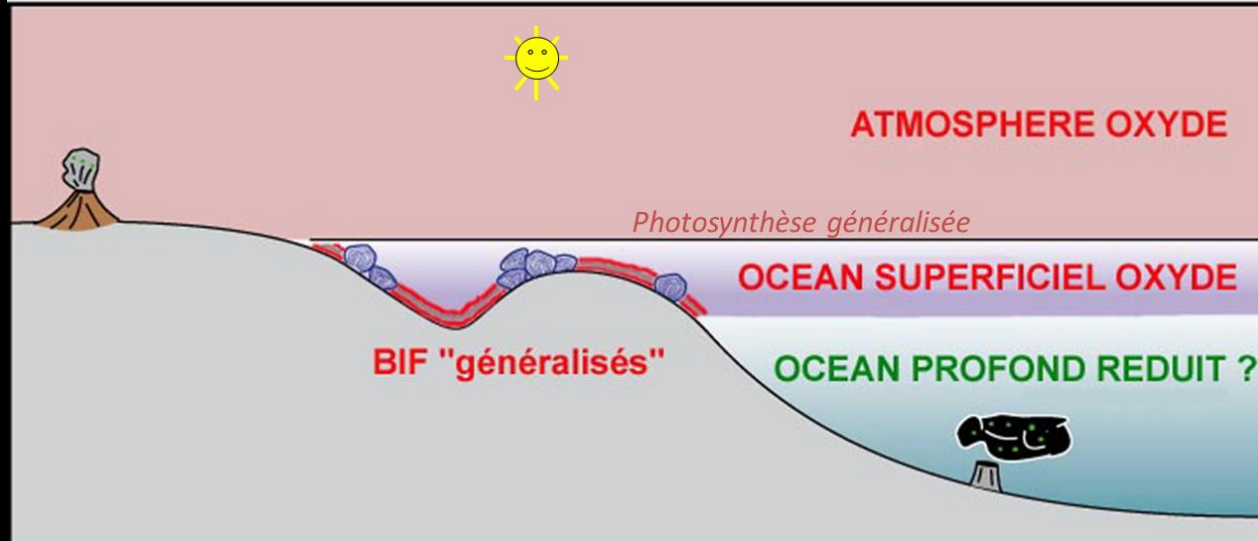
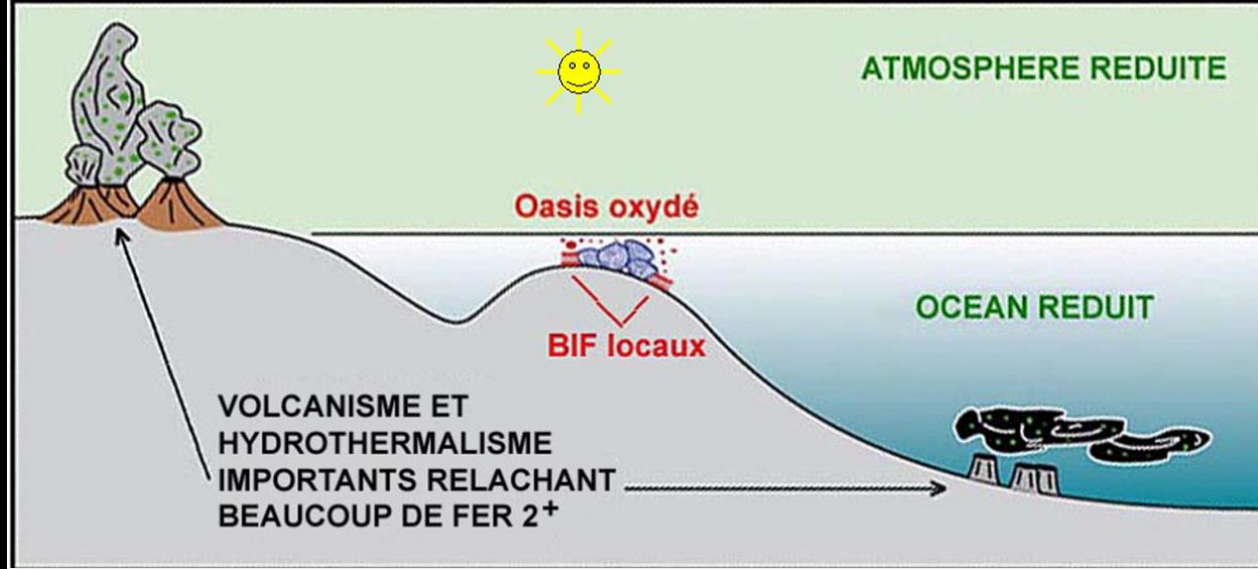




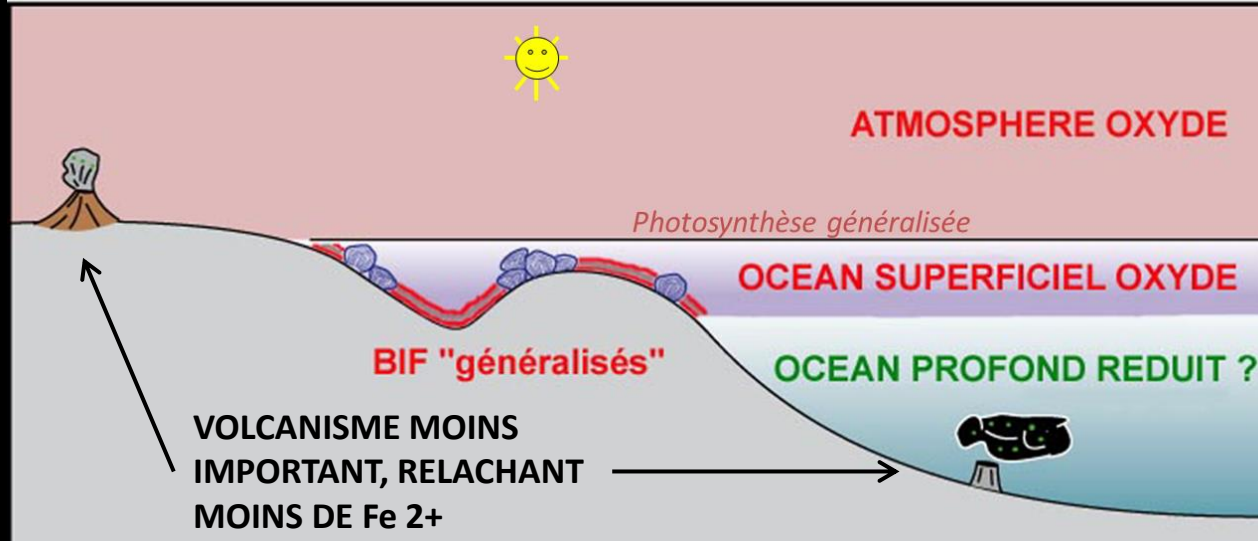
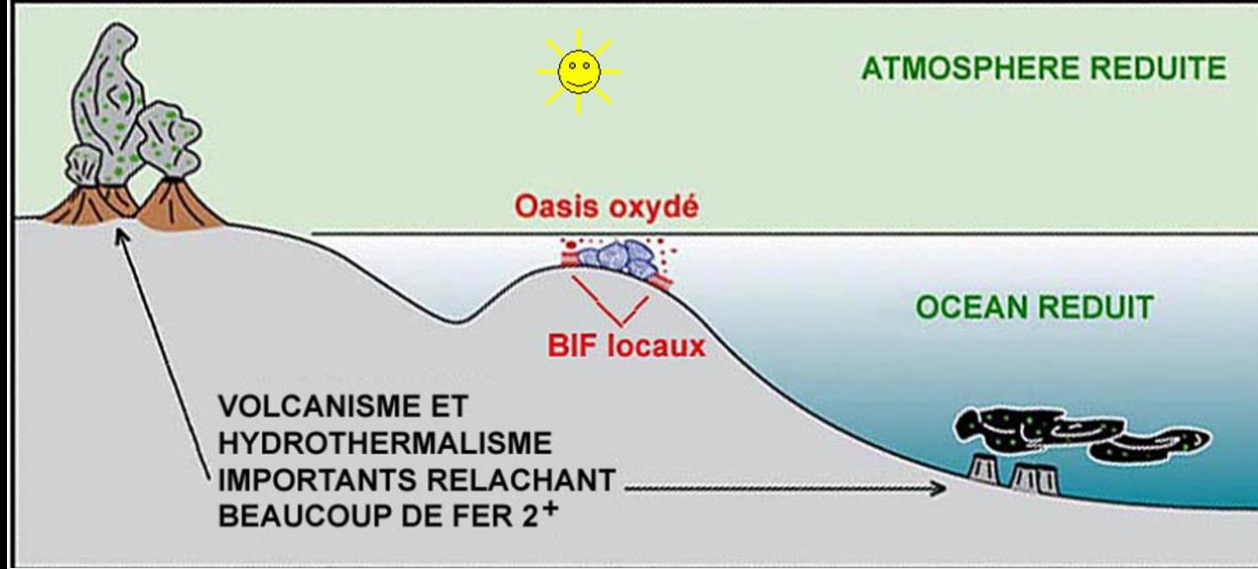
Si on juxtapose les deux figures résumant l'histoire de la dynamique interne (vue il y a quelques mn) et l'histoire de l'O₂ atmosphérique ...



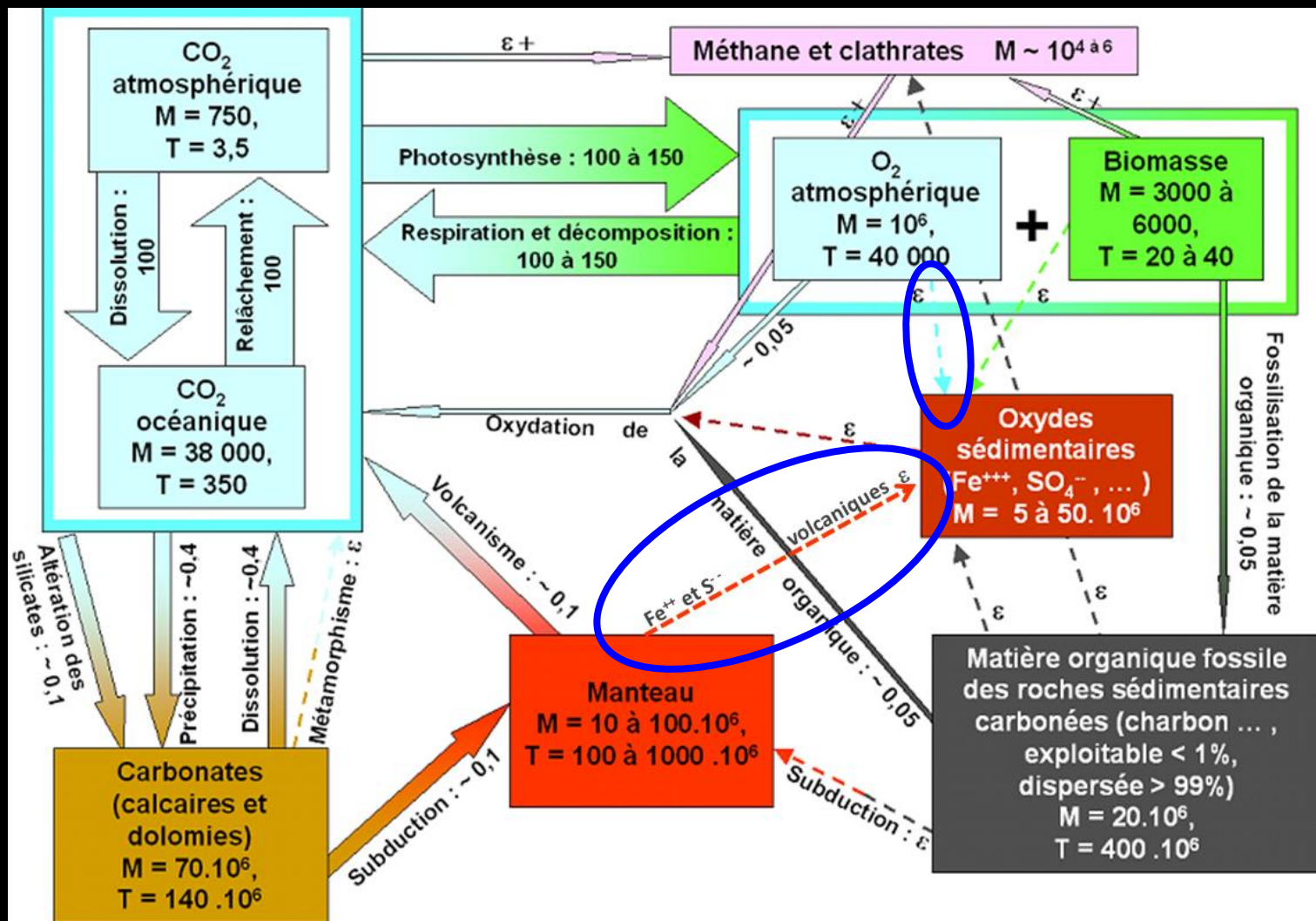
Si on juxtapose les deux figures résumant l'histoire de la dynamique interne (vue il y a quelques mn) et l'histoire de l'O₂ atmosphérique, on voit que les deux révolutions sont simultanées. Est-ce un simple hasard, ou y a-t-il une vraie corrélation ?



Rappelez vous les 2 schémas montrés il y a 5 mn !
Le dessinateur a fait diminuer le volcanisme,
source de Fe⁺⁺

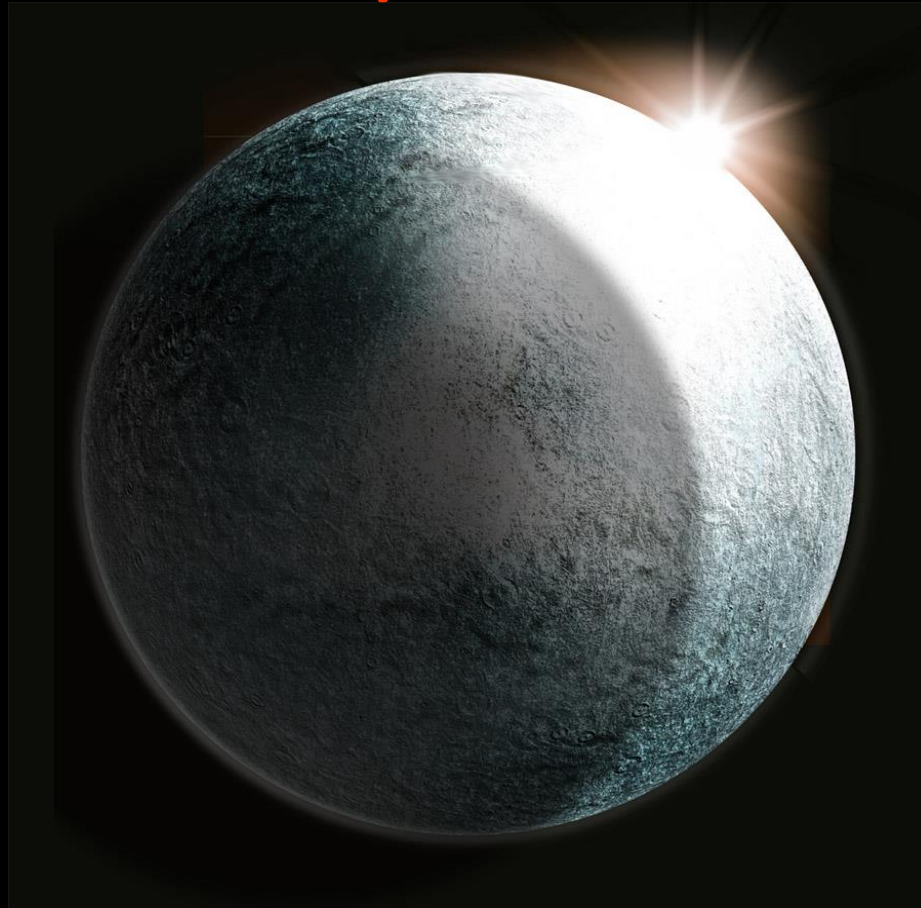


**Rappelez vous les 2 schémas montrés il y a 5 mn !
 Le dessinateur a fait diminuer le volcanisme,
 source de Fe⁺⁺**

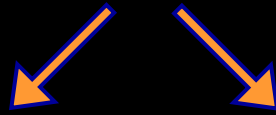


La diminution du volcanisme diminue l'apport de réducteur (Fe⁺⁺ et S⁻), ce qui permet, toutes choses égales par ailleurs, à l'O₂ de s'accumuler. Est-ce la seule cause de l'apparition de l'O₂, une cause majeure, mineure, une simple coïncidence ?

Dernier point développé ce jour si on a le temps : des évènements particuliers : les épisodes « Boule de neige » dont 3 sont « bien » documentées (Sturtienne, 750 Ma, Marinoéenne/Vanranger, 600 Ma et Gaskiers, 580 Ma).



Des indices de glaciations vers – 750 Ma et vers –600/-580 Ma

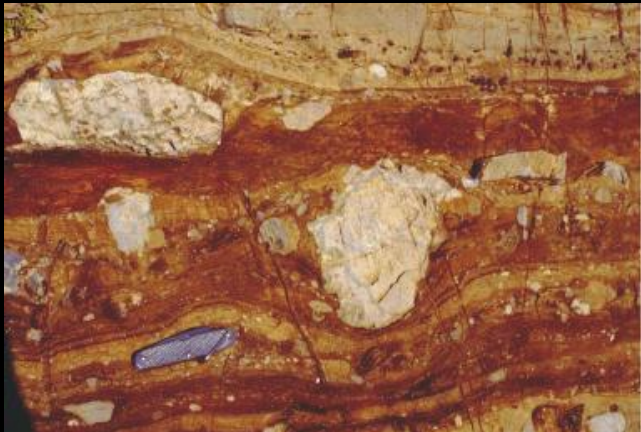
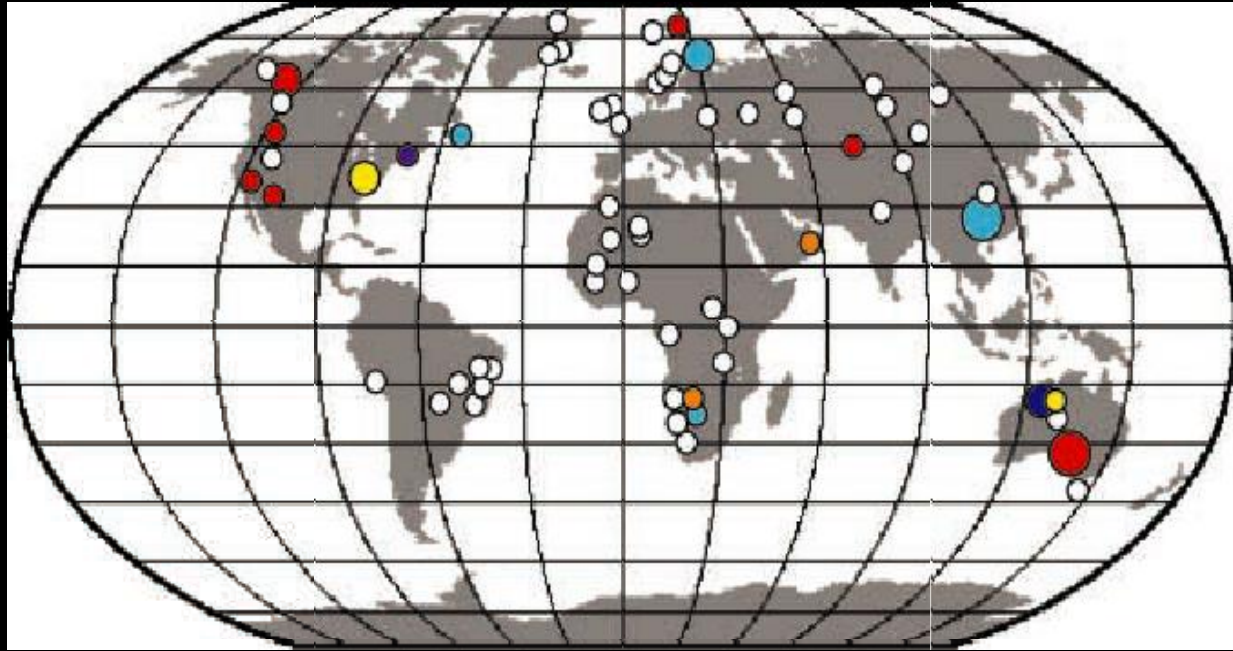


Surfaces striées – Sédiments sans granoclassement avec des clastes de taille diverse (moraines) = mouvement de glaces sur les continents



Lamines du sédiment marin déformées par la chute d'un galet (dropstone) = calottes glaciaires au niveau de la mer libérant des icebergs abondants

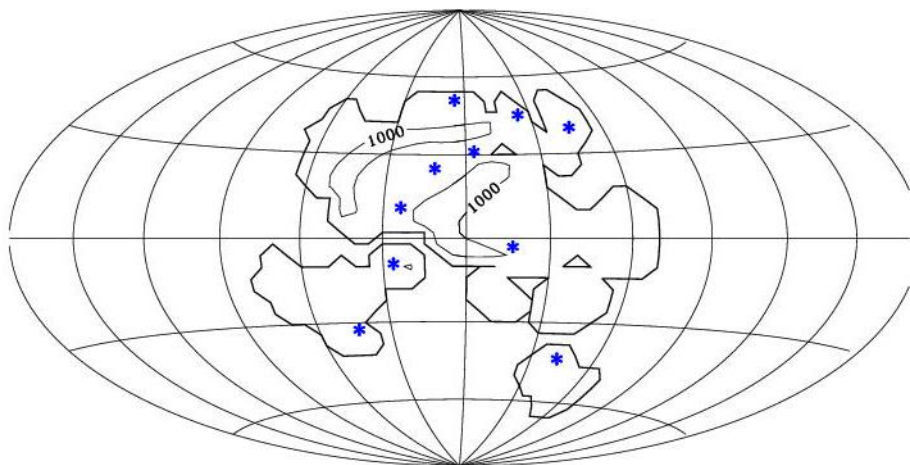
**On en trouve partout, sur toutes les latitudes
actuelles**



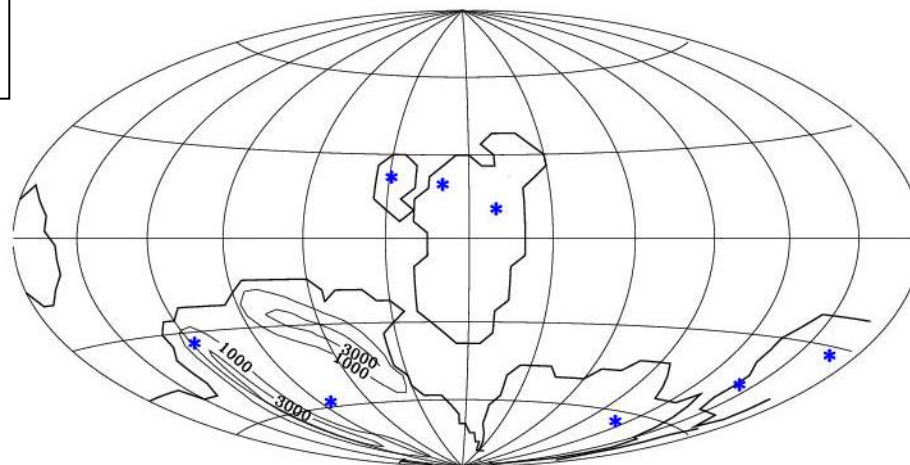
**Présence des formations glaciaires
Néoprotérozoïque
Sur tous les continents**

Quand on replace les continents dans leur position de l'époque, on voit qu'il y avait des glaciers et des icebergs partout, même à l'équateur

750 Ma



580 Ma

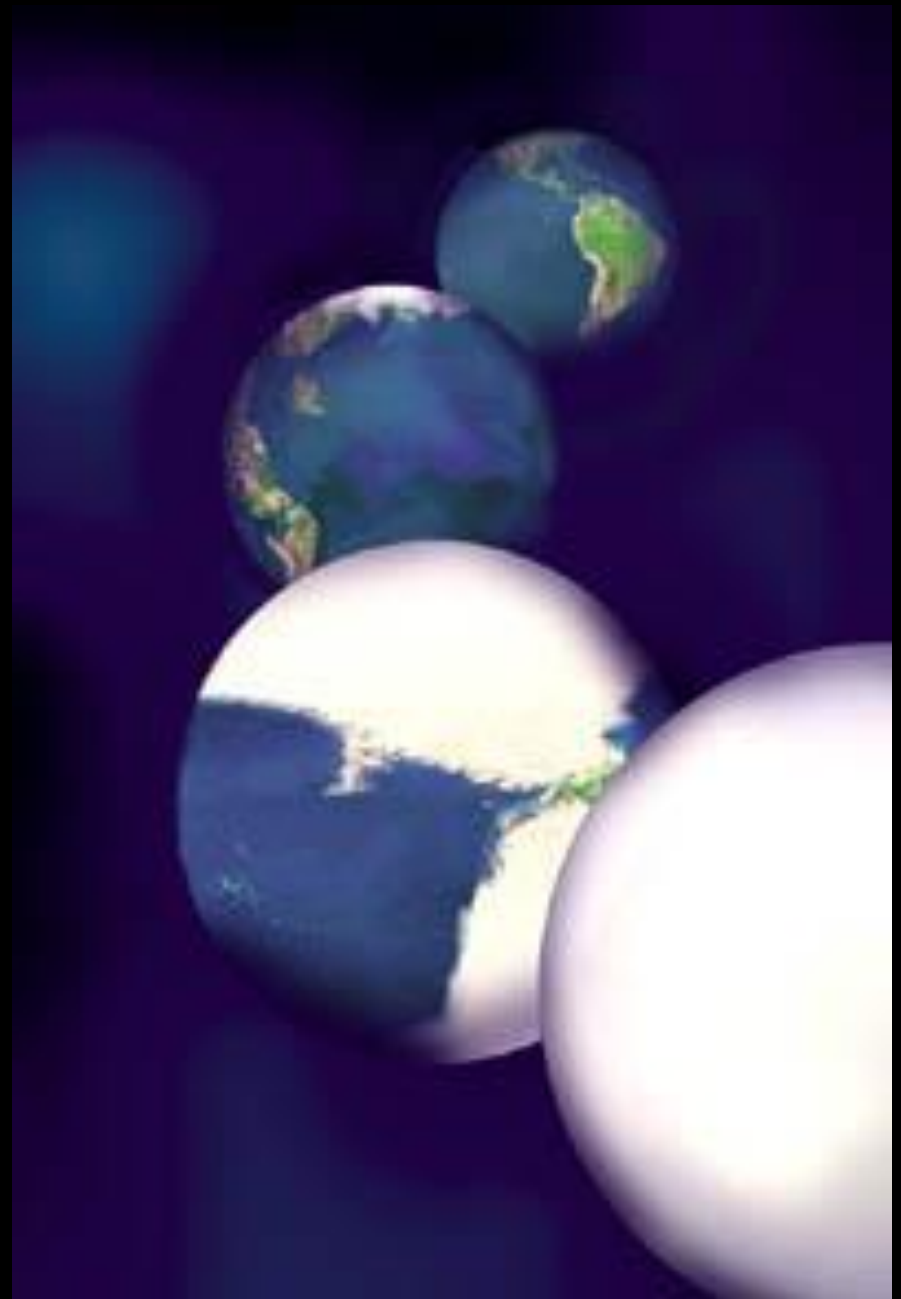


Il y a souvent des BIF, les seuls BIF post 1,8 Ga associés aux sédiments marins (avec dropstone)

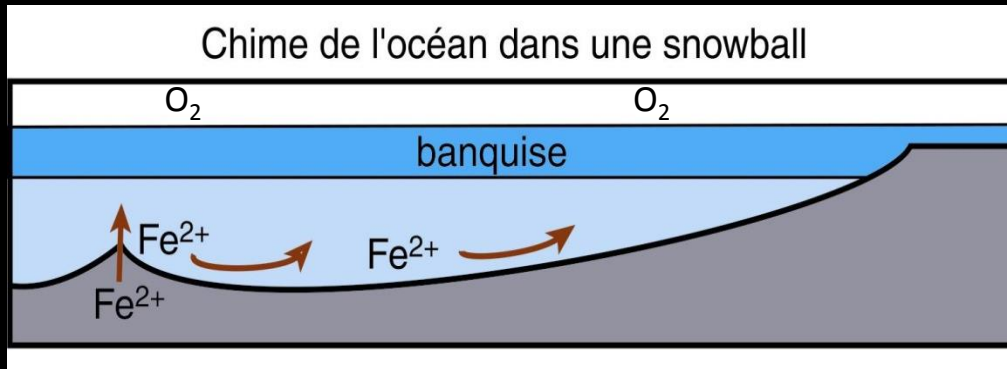
Ces sédiments glaciaires sont très souvent surmontés d'un épais niveau de carbonates (cap carbonates)



**D'ou l'idée d'épisodes
pendants lesquels
(presque) tous les
continents étaient
recouverts de calottes et
(presque) tous les océans
de banquise : les épisodes
« boules de neige »
(snowball earth). Il y a un
relatif consensus pour une
glaciation générale à -750
Ma, moins pour les deux
autres, qui restent
néanmoins « sévères ».**



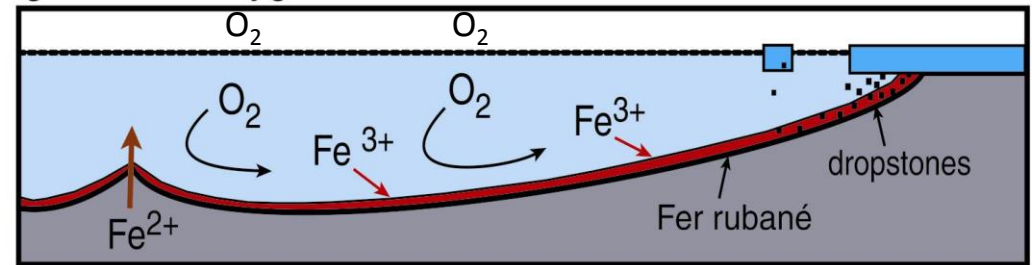
Cela explique les sédiments glaciaires, mais aussi les seuls BIF post 1,8 Ga que l'on trouve à la fin de ces épisodes



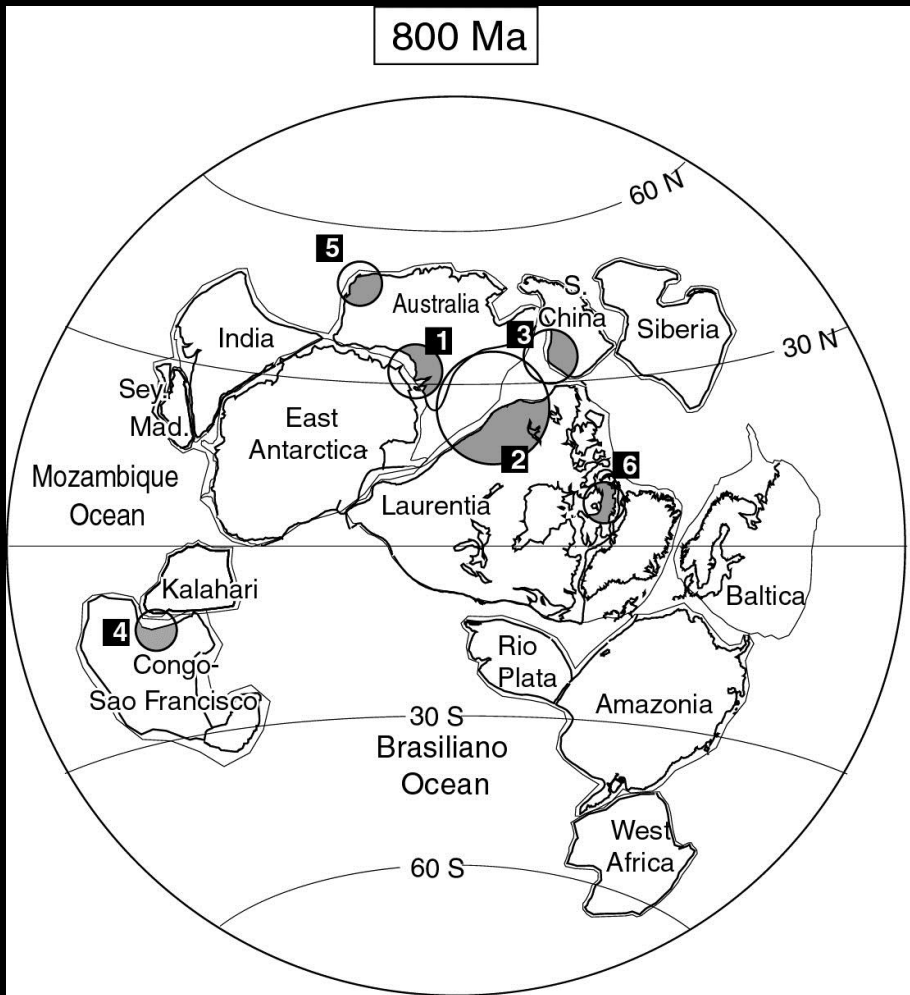
Glaciation globale se traduit par une stagnation et une anoxie des eaux océaniques



Déglaciation : oxygénation de l'océan = remobilisation du fer ferreux



Une proposition de modèle explicatif



1 - La survie du supercontinent Rodinia depuis plus de quelques 200 Ma

2 - Réchauffement de la lithosphère sous-jacente

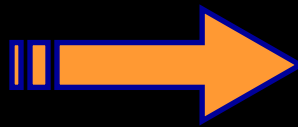
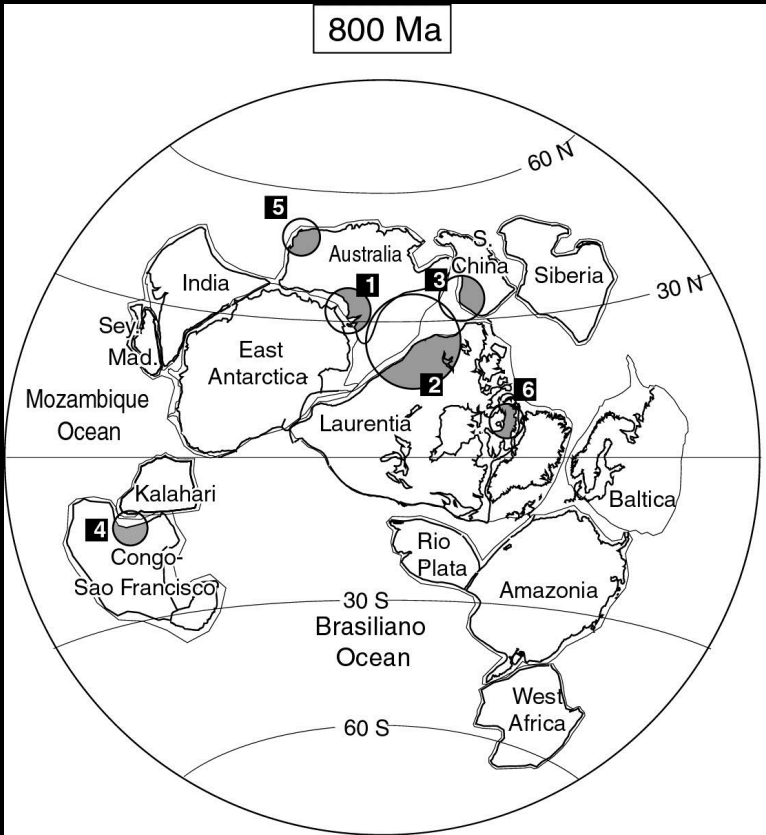
3 - Émissions de basaltes type « tête de point chaud » (giga-traps) 830-780 Ma

L'altération des basaltes consomme 8 fois plus de CO_2 que celle des granites

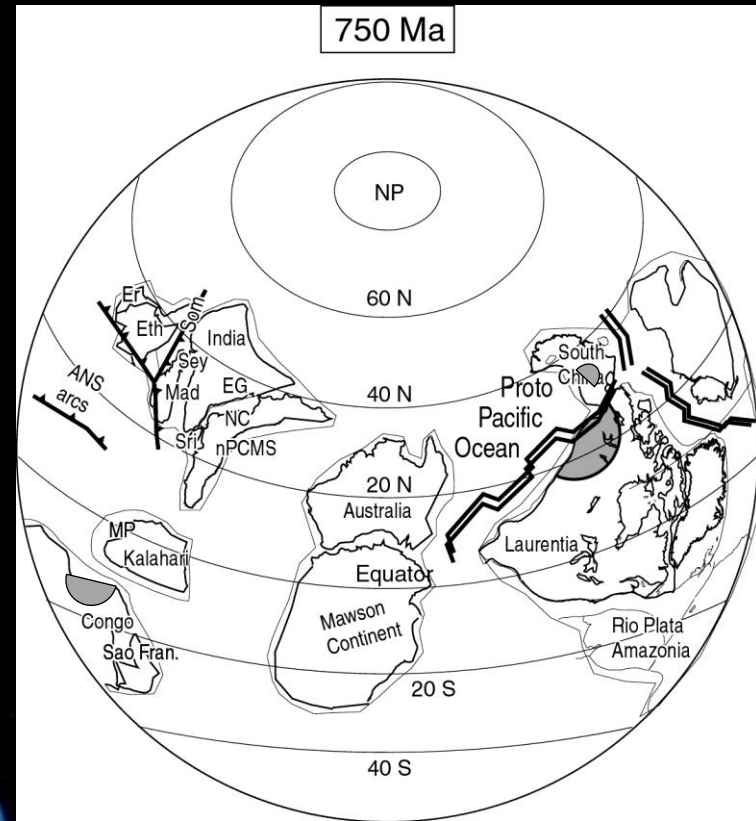


**4 - Dislocation du supercontinent ... Intensification du runoff.
Augmentation de l'altération → augmentation de la pompe à CO₂,
baisse du CO₂ atmosphérique, baisse de l'effet de serre, et le
phénomène s'emballe, car une fois que les glaciations ont dépassé une
certaine ampleur, l'effet albédo prend le dessus**

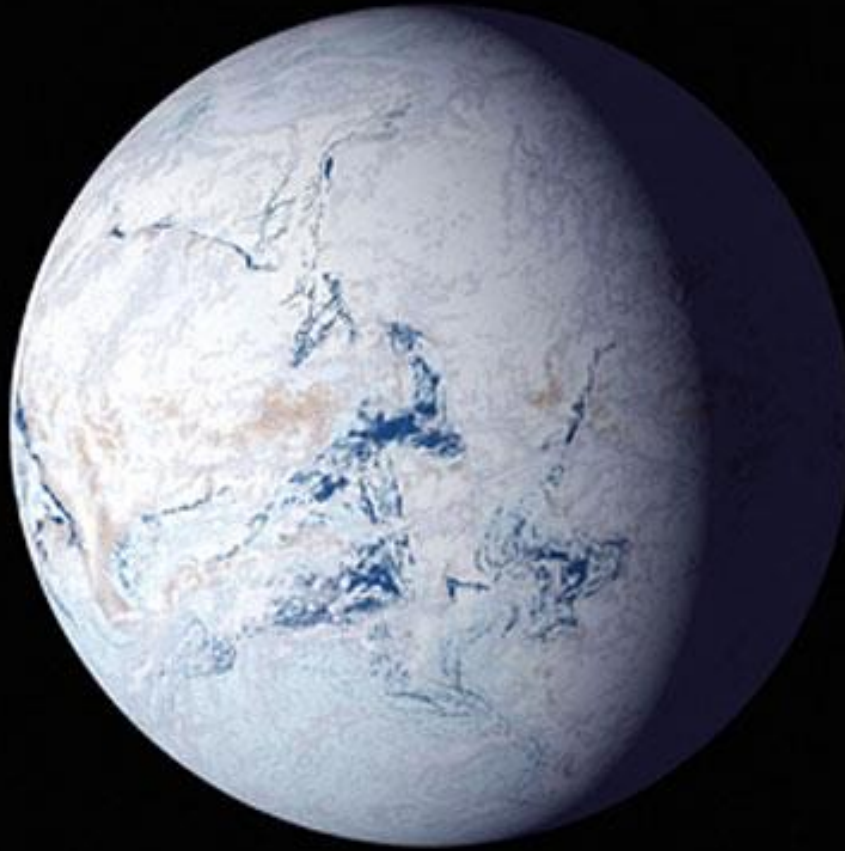
800 Ma



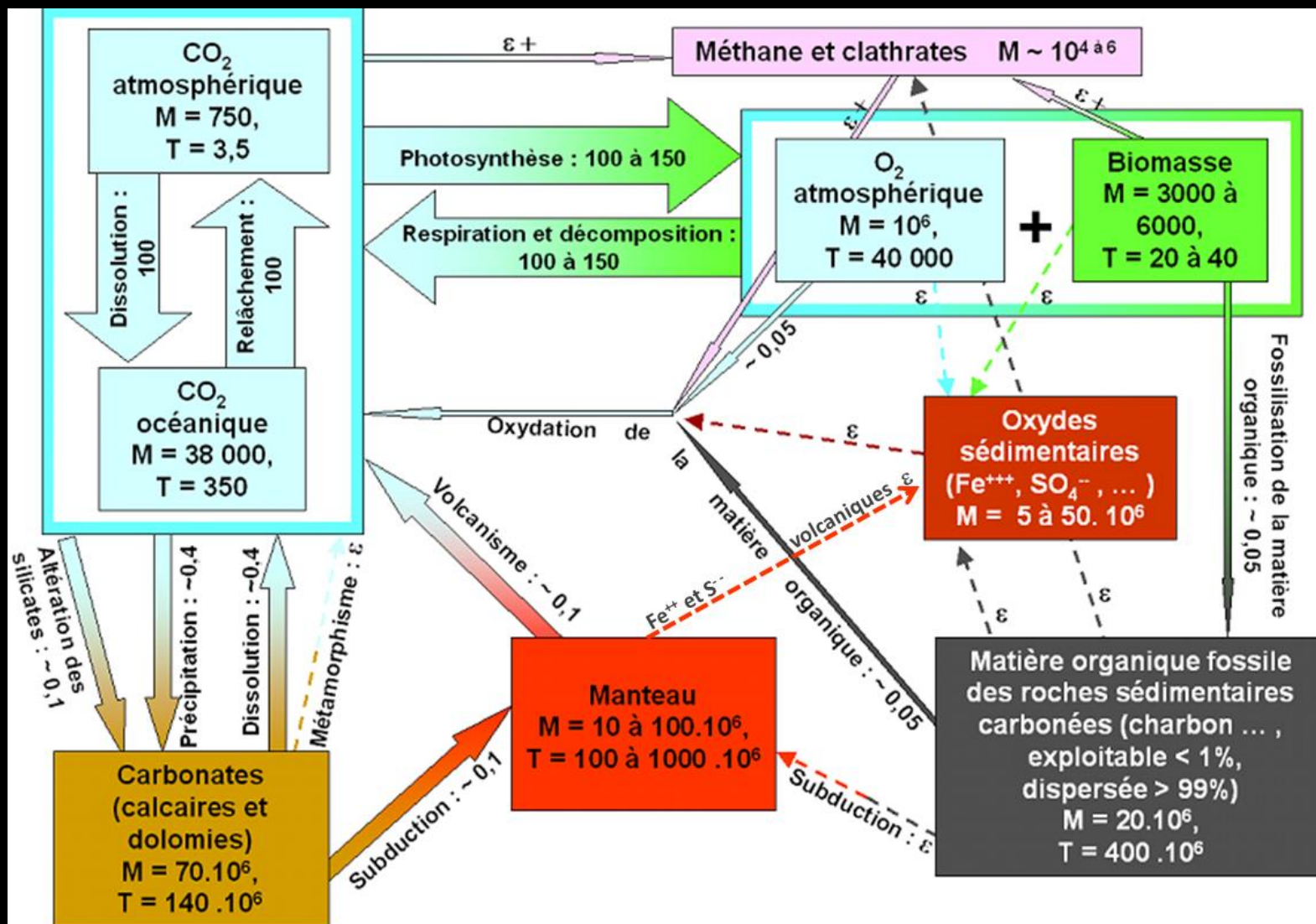
750 Ma



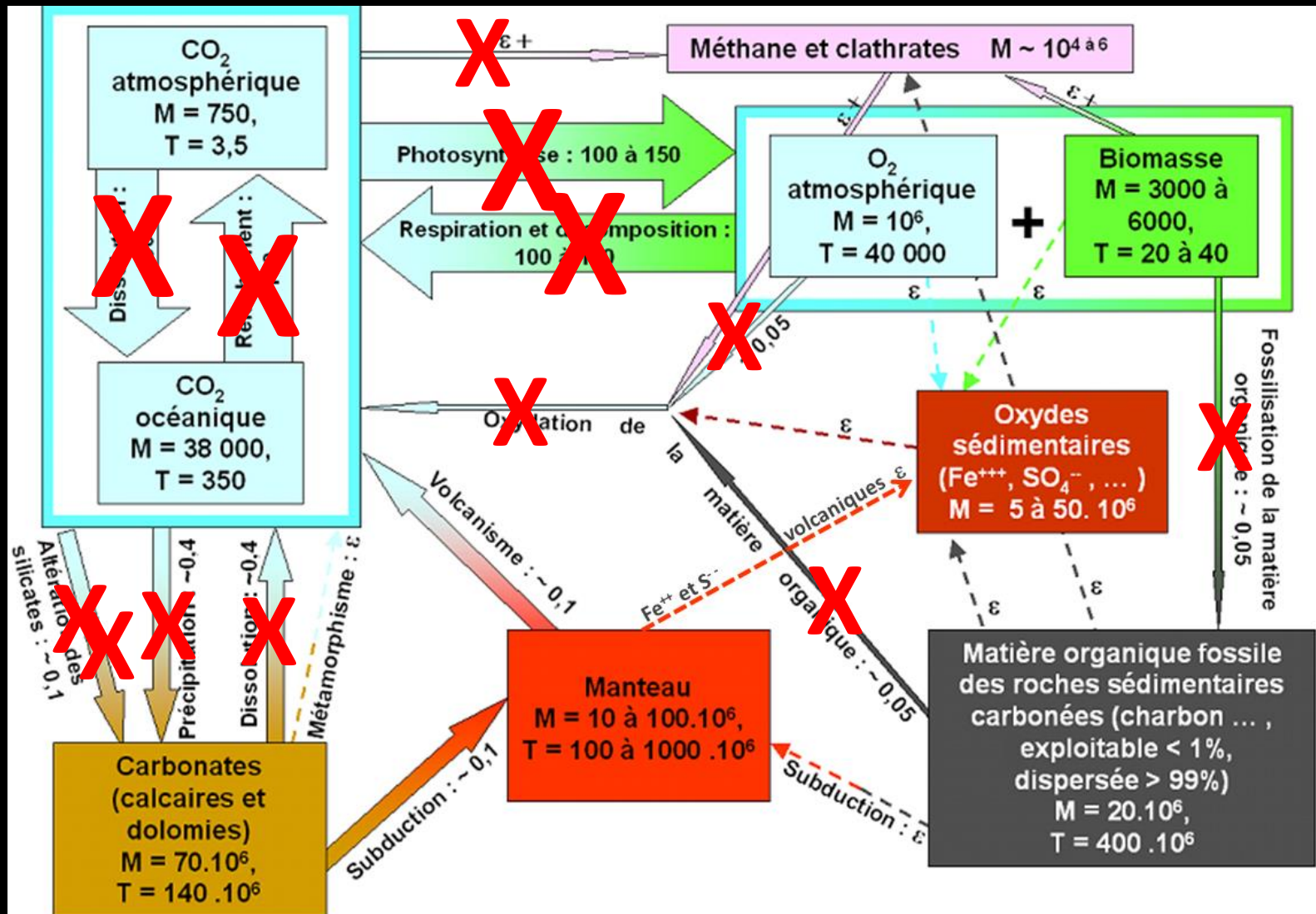
Comment en est-on sorti ? N'importe quel physicien vous démontrera qu'une Terre d'albédo voisin de 1 (Terre blanche) réfléchit quasiment toute l'énergie solaire, et ne peut donc pas se réchauffer.



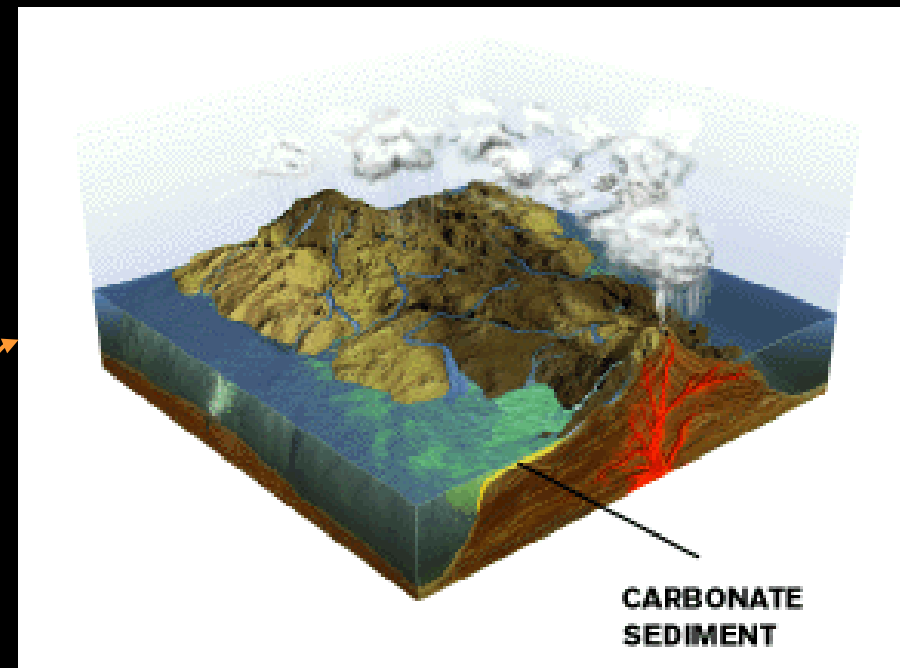
A cette époque, dans le cycle du C, tout était « figés ». Presque toutes les flèches étaient nulles, sauf ...



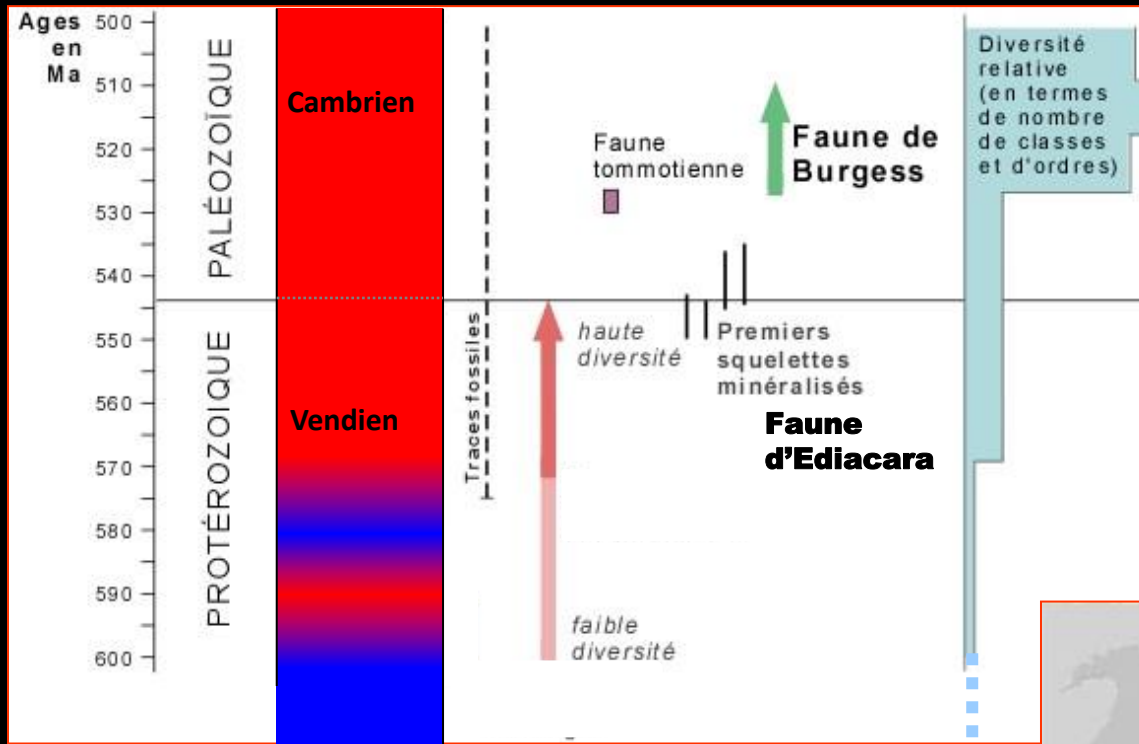
A cette époque, dans le cycle du C, tout était « figés ». Presque toutes les flèches étaient sub-nulles, sauf ...



Le CO_2 est monté ; l'effet de serre a augmenté, la T a augmenté, la déglaciation a commencé, des eaux riches en CO_2 ont altérés les continents, qui ont libéré du Ca, qui a précipité sous forme de carbonates, les fameux « cap carbonates »



Or, 580 Ma, la fin de ces épisodes, partout dans le monde, c'est l'explosion de la diversité des métazoaires avec la faune dite d'Ediacara (à ne pas confondre avec la faune de Burgess)



à ne pas confondre avec la faune de Burgess)





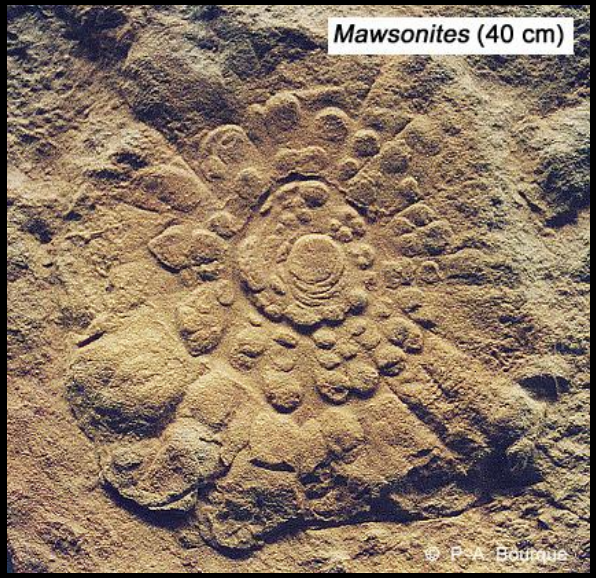
Ediacara, le monde des premiers métazoaires complexes (bien qu'énigmatiques).

Dickinsonia



Spriggina

© P.-A. Bourque



Mawsonites (40 cm)

© P.-A. Bourque



© P.-A. Bourque

Charnia

Helminthopsis



Ediacara

© P.-A. Bourque



Tribrachidium

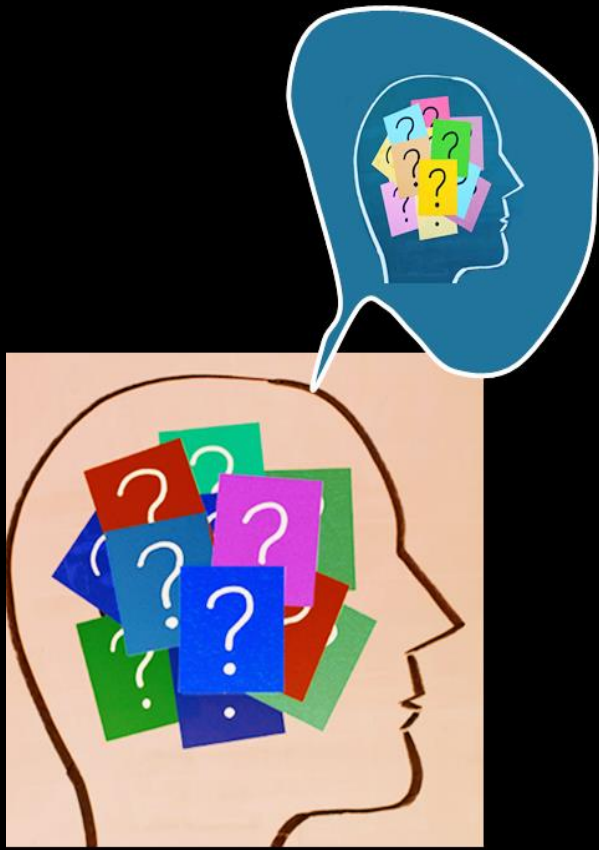
© P.-A. Bourque

Que conclure de cette rapide quadruple étude :

- La Terre est la seule planète à avoir des « plaques » aujourd'hui. Les conditions externes y seraient pour quelque chose.
- La Terre interne a subi une « révolution » il y a 2,5 Ga avec « acquisition » de son mode de fonctionnement actuel (les plaques).
- Cette révolution de la dynamique interne semble être un des acteurs de l'apparition de l'O₂ atmosphérique, avec les conséquences biologiques que cela a dû avoir.
- Mouvements des plaques et points chauds pourraient être à l'origine de catastrophes climatiques (B.d.N. et pas que K.T.), suivies d'explosions de la diversité biologique.



Quelle est la conclusion de cette conclusion ?



Pour vraiment comprendre et faire comprendre la Terre globalement (géosphère et biosphère, qui fait aussi partie de la planète), il faut en avoir une vue la plus globale et complète possible, et non pas simplement quelques données sur ce qui pourrait tomber au bac ou à l'Agreg (la droite isochrone Rb/Sr ou les lymphocytes $T CD4$). C'est tout le challenge et la beauté de notre profession. Je suis extrêmement inquiet quand à cette vision globale et complète des futurs enseignants en fonction de ce que je sais sur le CAPES nouveau qui se profile.

Quelle est la conclusion de cette conclusion ?



Pour vraiment comprendre et faire comprendre la Terre globalement (géosphère et biosphère, qui fait aussi partie de la planète), il faut en avoir une vue la plus globale et complète possible, et non pas simplement quelques données qui pourraient tomber au bac ou à l'oral. On ne parle pas de la datation Rb/Sr ou les

**C'est fini pour aujourd'hui !
Merci de votre attention.**

professionnels de la géologie. Je vous remercie quand à cette vision globale de la Terre et des futurs enseignants en fonction de ce que je sais sur le CAPES nouveau qui se profile.

