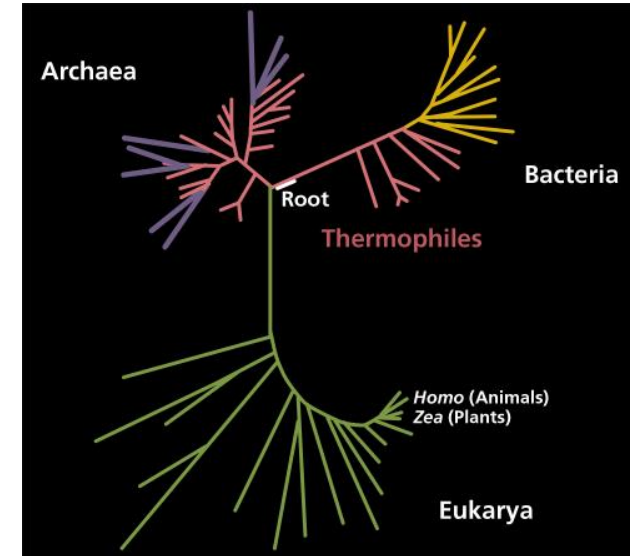




Exobiologie



Sébastien Rodriguez
Université Paris 7 / A.I.M.
sebastien.rodriquez@cea.fr





Habitabilité d'une planète



La Terre

Planète au climat stable, en partie couverte d'eau liquide durant presque toute son existence.

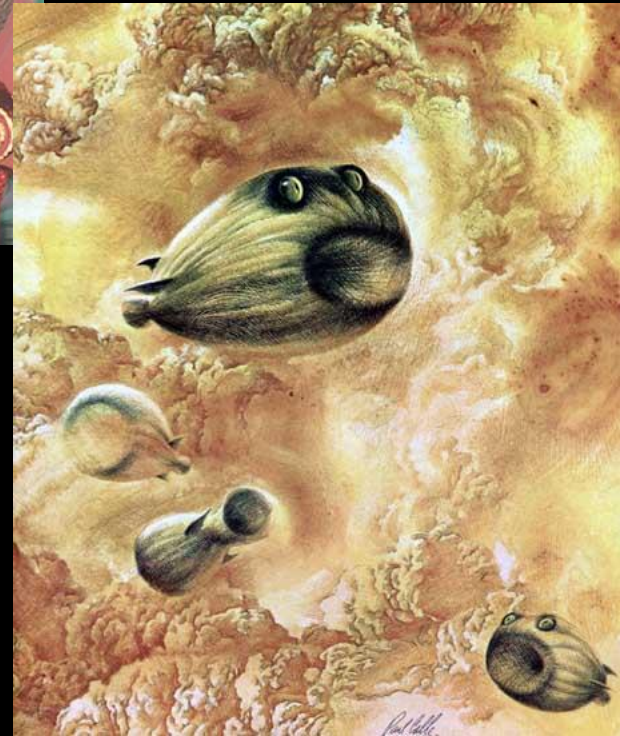
⇒ Planète propice à la vie et à son évolution



Y a-t-il d'autres Terres ailleurs ?

Y a-t-il d'autres planètes
au climat propice ? Ou
environnement aux
conditions favorables ?

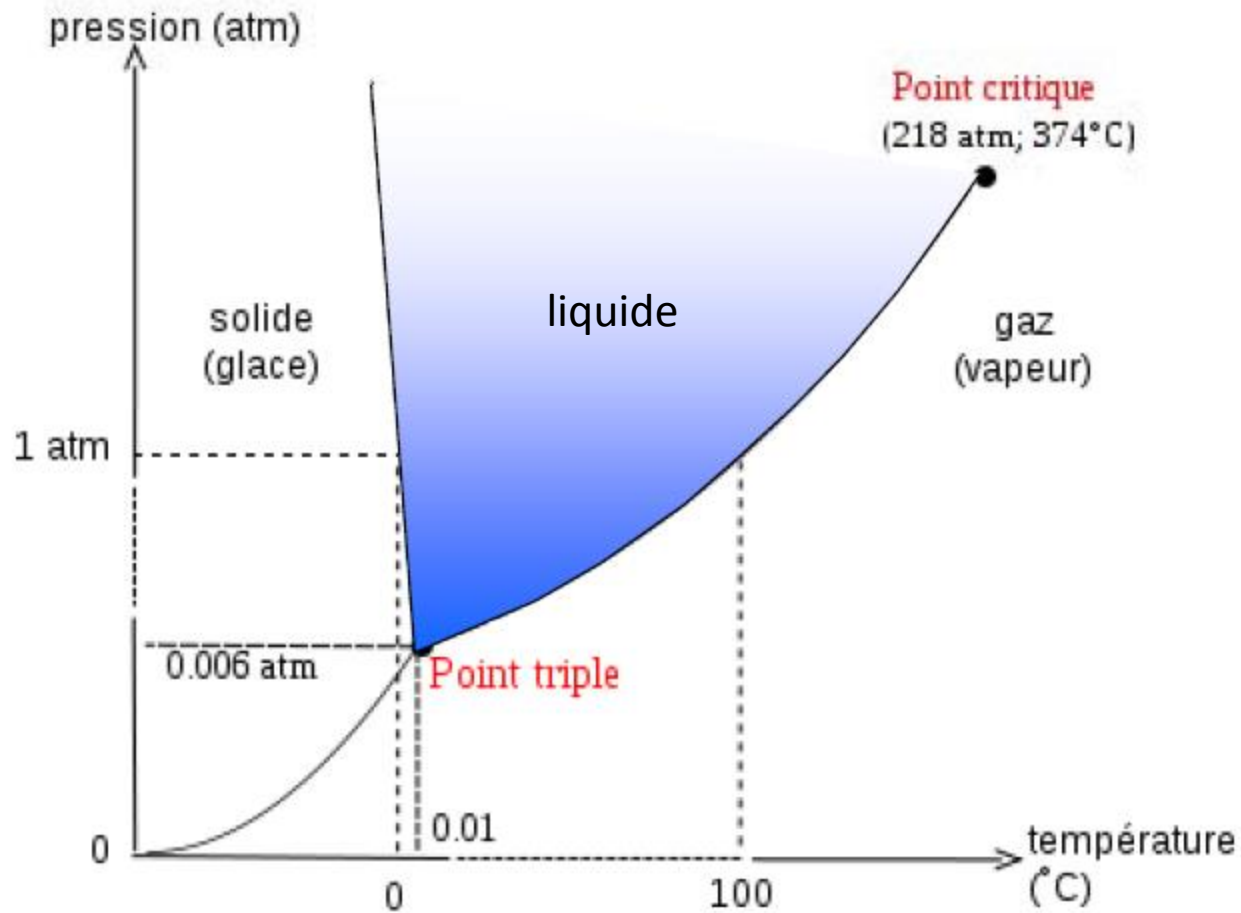
Où a-t-on des chances de
les trouver ? **Mars ?**



[illegible]

-

VIE ↔ **eau liquide**



Pour avoir de l'eau liquide :

- 1) Pression > 6 mbar
- 2) $T > 0^{\circ}\text{C}$
- 3) $T < 374^{\circ}\text{C}$ (selon P_{atm})

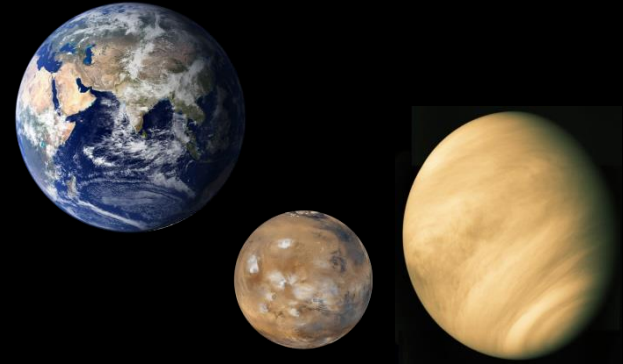
Quels mondes habitables ?

d'après Lammer et al., A&AR (2009)

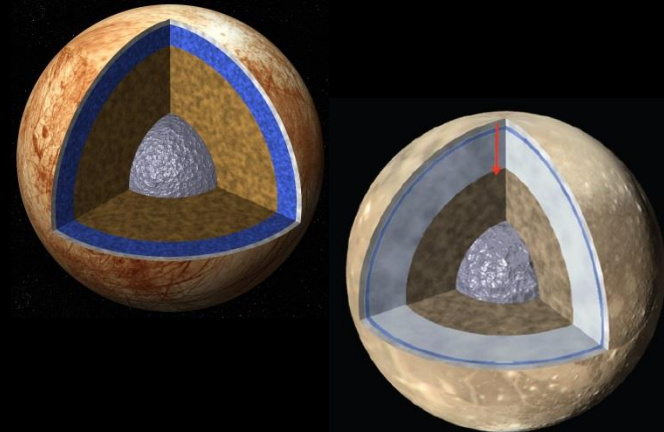
- **Classe I** : Corps avec de l'eau liquide durablement stable en surface (**TERRE**)
- **Classe II** : Corps temporairement propice à l'eau liquide en surface, mais qui ont perdu cette capacité : perte de l'atmosphère, perte de l'eau, effet de serre divergent ? (**MARS et VENUS primitifs ?**)
- **Classe III** : Corps avec un océan sous la surface en interaction avec un manteau rocheux (**EUROPE ?**)
- **Classe IV** : Corps avec un océan sous la surface entre deux couche de glace (**GANYMEDE, CALLISTO, TITAN ?**)

Archétypes

Habitabilité en surface



Habitabilité en sous-sol



La Zone Habitable (ZH) « de surface » [Classes I-II] d'un système planétaire ?

Définition romantique : La ZH est une région de l'espace où les conditions de surface sont favorables à la vie.

La ZH autour d'une étoile a été définie par Hart (1979) comme la région dans laquelle de l'eau peut exister à l'état liquide à la surface d'une planète.

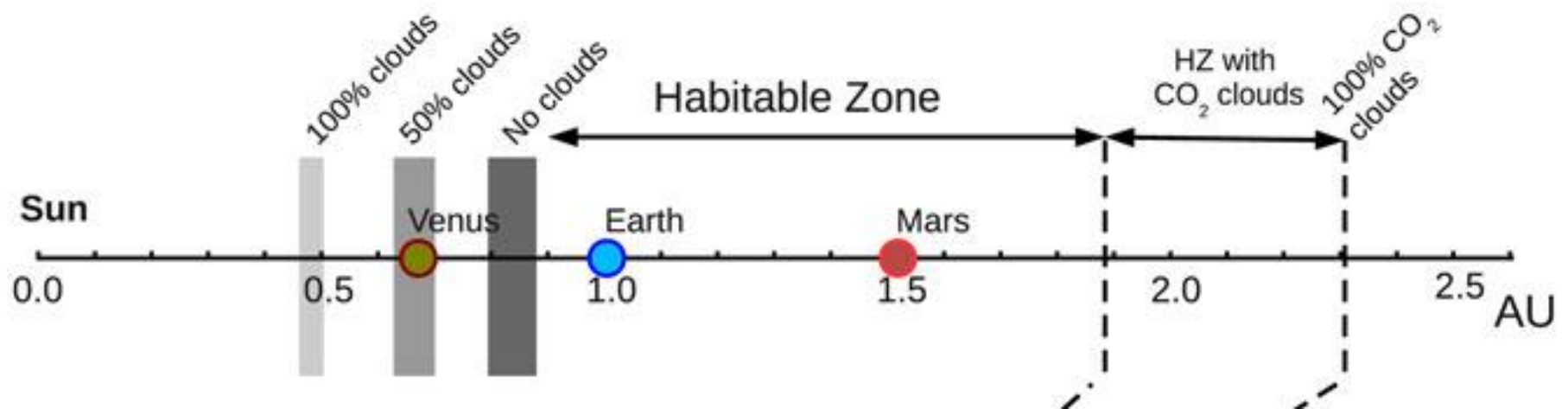
(autrement dit, région circumstellaire où une surface planétaire peut avoir une température moyenne supérieure à 0°C)



T_{surface} dépend de :

- l'énergie stellaire incidente et de sa distribution spectrale,
- distance de la planète,
- propriétés réfléchissantes de sa surface (albedo),
- des propriétés radiatives de son atmosphère (absorption, diffusion, émission) [gaz, nuages, aérosols...].

Où se situe la ZH [Classes I-II] théorique du système solaire, aujourd'hui ?



Anglada-Escudé (ApJL, 2012), inspiré de Selsis et al. (A&A, 2007)

Où se situe la ZH [Classes I-II] théorique du système solaire, aujourd'hui ?

Flux solaire ↓

Température ↓

Le Flux solaire est réfléchi

Glace et neige ↑

Terre avec atmosphère actuelle : **glaciation globale** si éloignée de 1 à 10% de son orbite

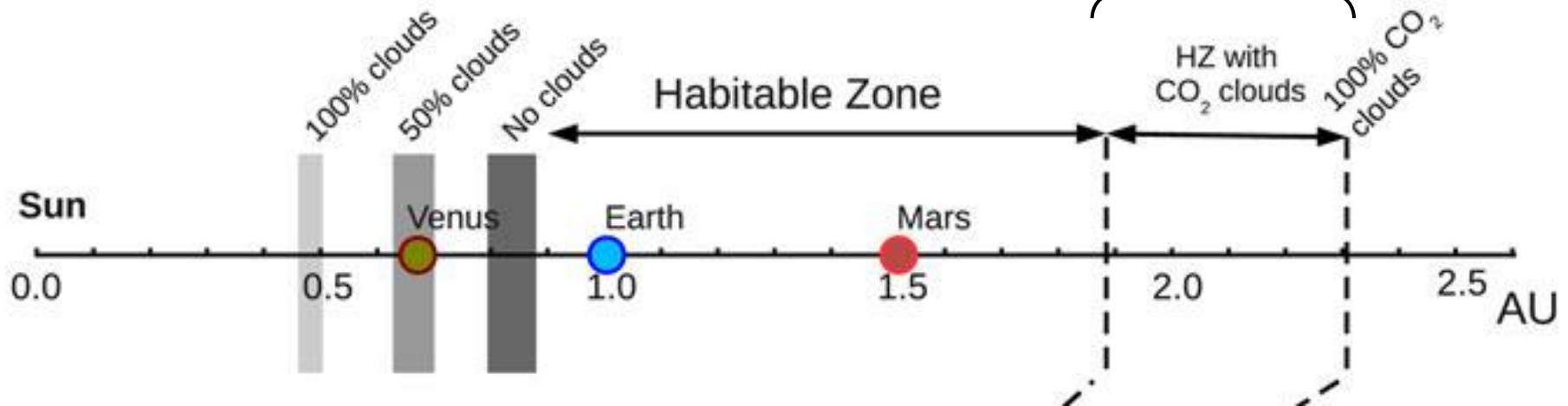
Limite externe :

Glaciation « galopante »

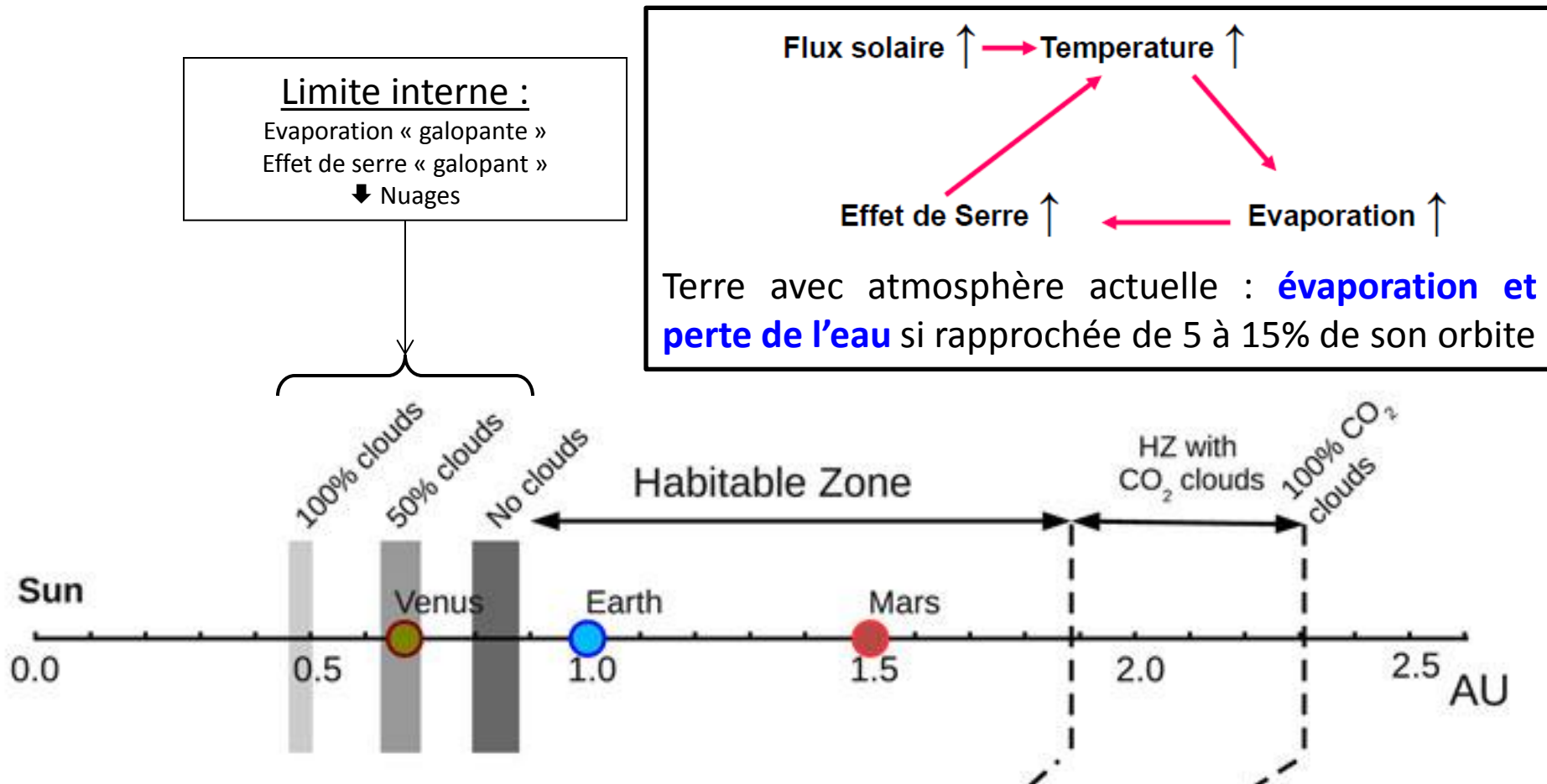
↓ Effet de serre + nuages (CO_2)

Tectonique des plaques

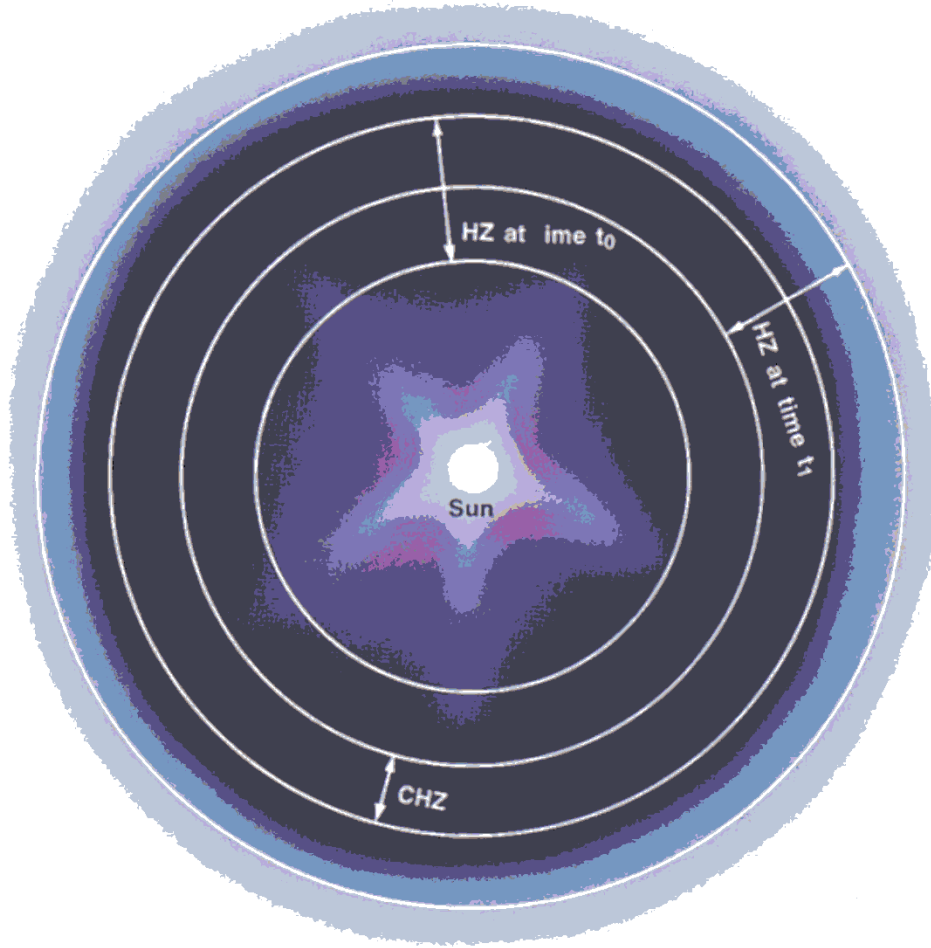
Forget and Pierrehumbert, Science (1997)



Où se situe la ZH [Classes I-II] théorique du système solaire, aujourd'hui ?

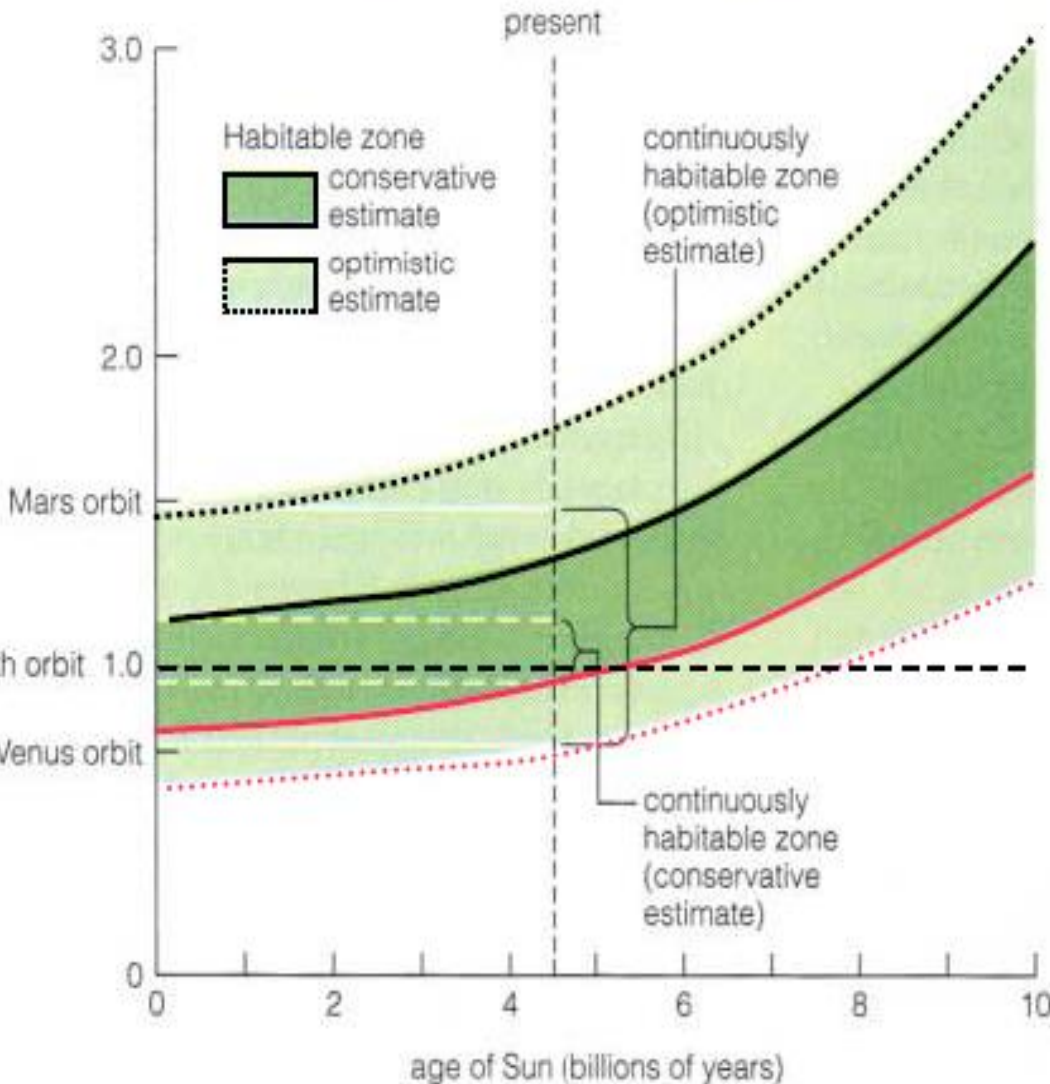


Zone continûment habitable (CHZ)



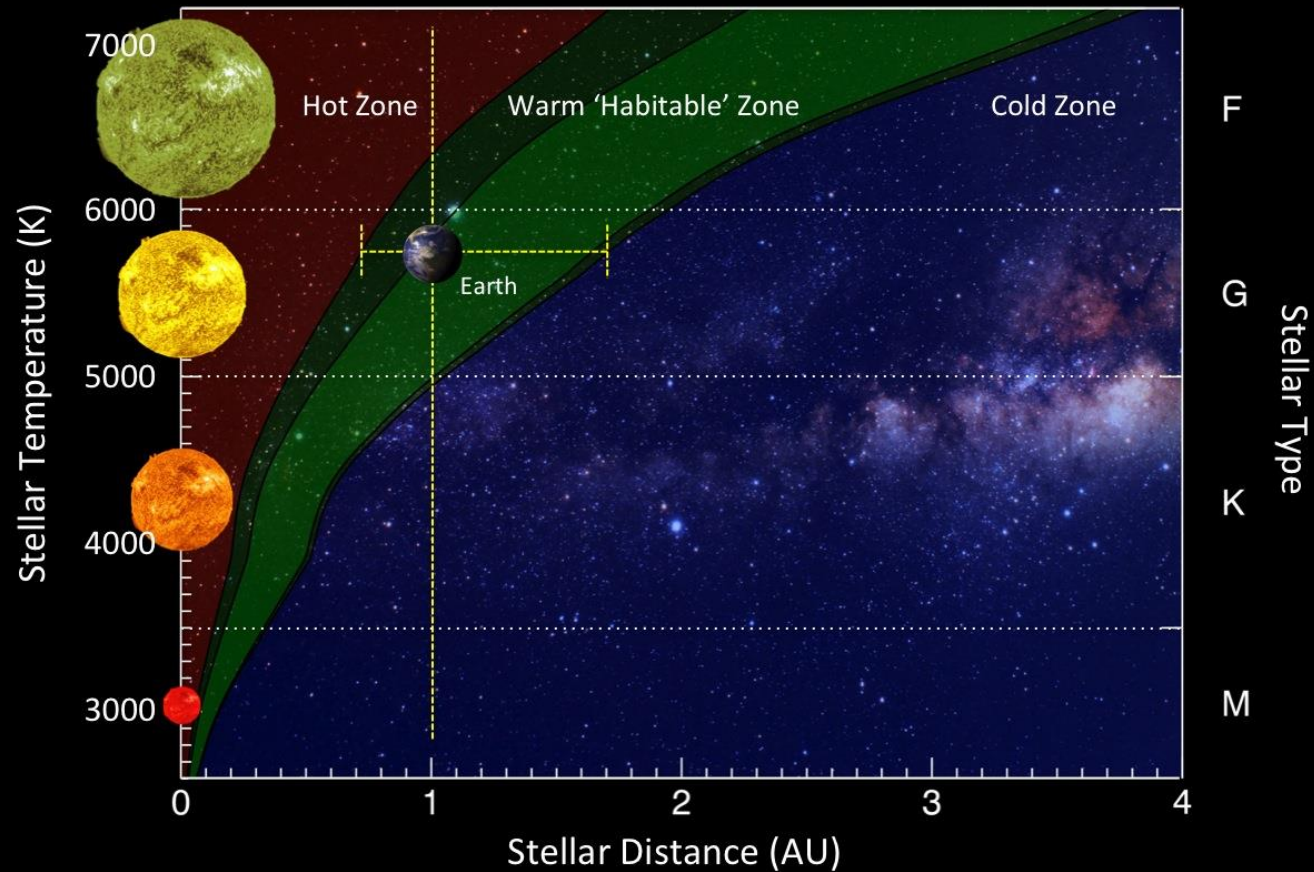
- *La Zone Continûment Habitable (ZCH)*: la région dans laquelle une planète peut rester habitable pour une durée spécifique donnée (expl: 4.6 milliards d'années),
- Si on veut que la vie se développe, il faut que la planète soit habitable pendant un certain tps

The Sun's Habitable Zone Over Time



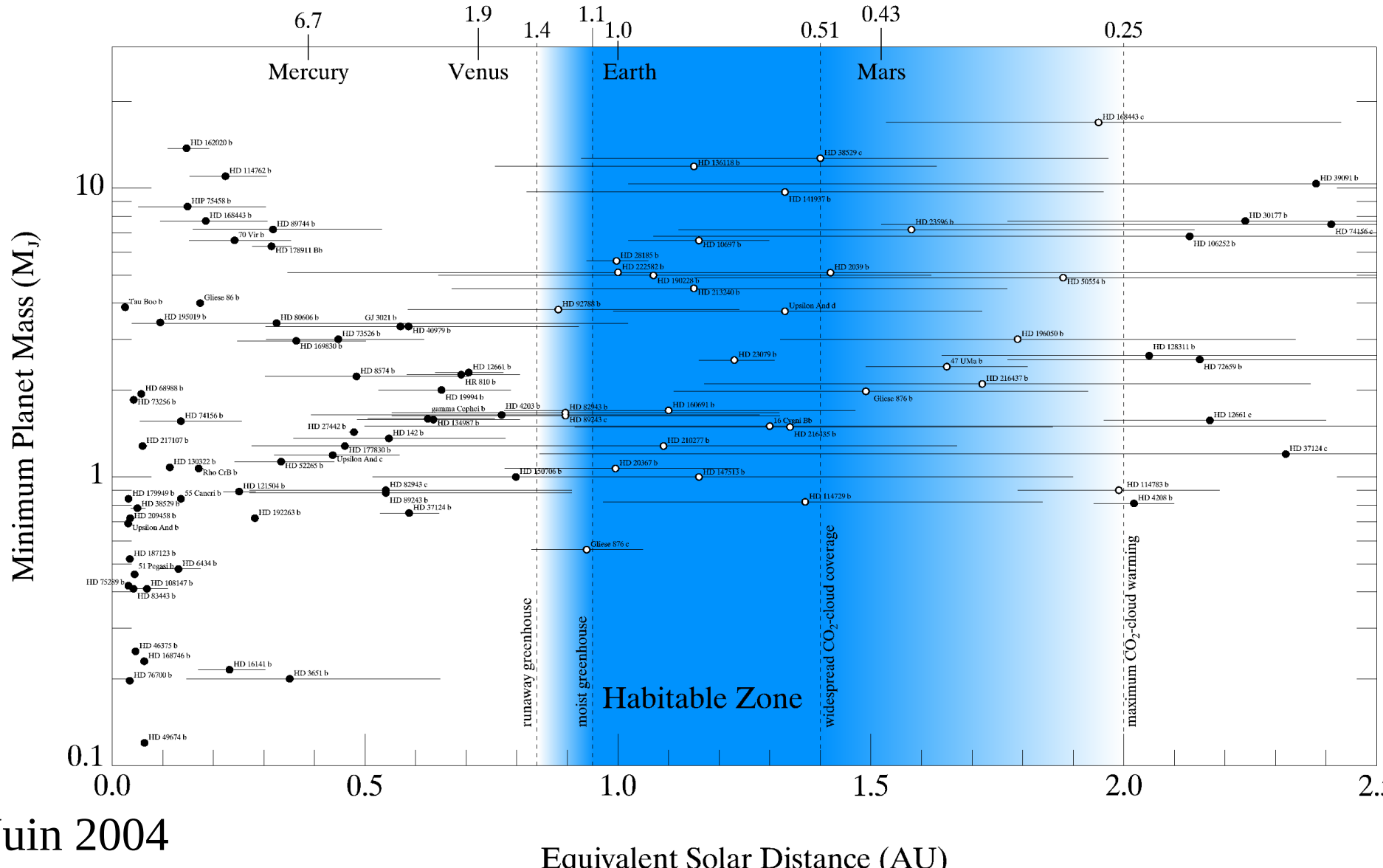
- La luminosité du Soleil augmente depuis la naissance du syst. sol.
→ la ZH se déplace vers l'ext du syst. sol.
- La Terre quittera la ZH ds 0.5 à 3 Gy.
- + Evolution du Soleil en géante rouge
- Dans 4.5 Gy, le Soleil quittera la seq principale ⇒ sous-géante, 1.5 Gy ⇒ géante rouge ($10 R_{\odot}$, $2 L_{\odot}$), Branche asymptotique géante (AGB: $100 R_{\odot}$, $10^4 L_{\odot}$)
- Évolution des limites et de la largeur de la ZH
- Étoile + massive ⇒ évolution + rapide

Habitable Zone of Main Sequence Stars



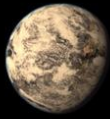
Planètes extrasolaires dans la ZH

Stellar Flux (Q_0)

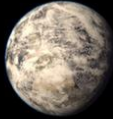


Planètes extrasolaires dans la ZH

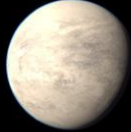
Potentially Habitable Exoplanets



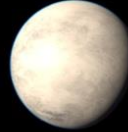
01. Gliese 667C c



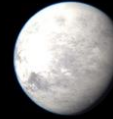
02. Kepler-62 e



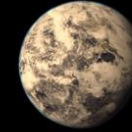
03. Kepler-283 c



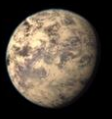
04. Kepler-296 f



05. Tau Ceti e*



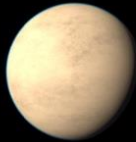
06. Gliese 180 c*



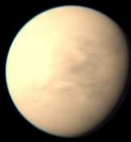
07. Gliese 667C f



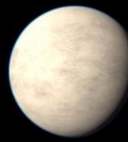
08. Gliese 581 g*



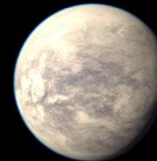
09. Gliese 180 b*



10. Gliese 163 c



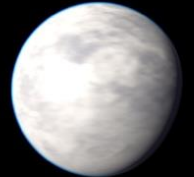
11. HD 40307 g



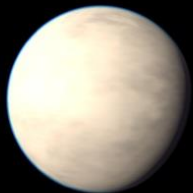
12. Kepler-61 b



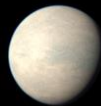
13. Gliese 422 b*



14. Kepler-22 b



15. Kepler-298 d

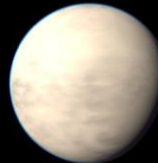


16. Kepler-62 f

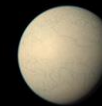


NEW

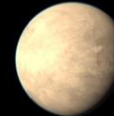
17. Kepler-186 f



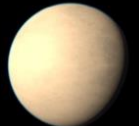
18. Kepler-174 d



19. Gliese 667C e



20. Gliese 682 b*



21. Gliese 581 d

*planet candidates

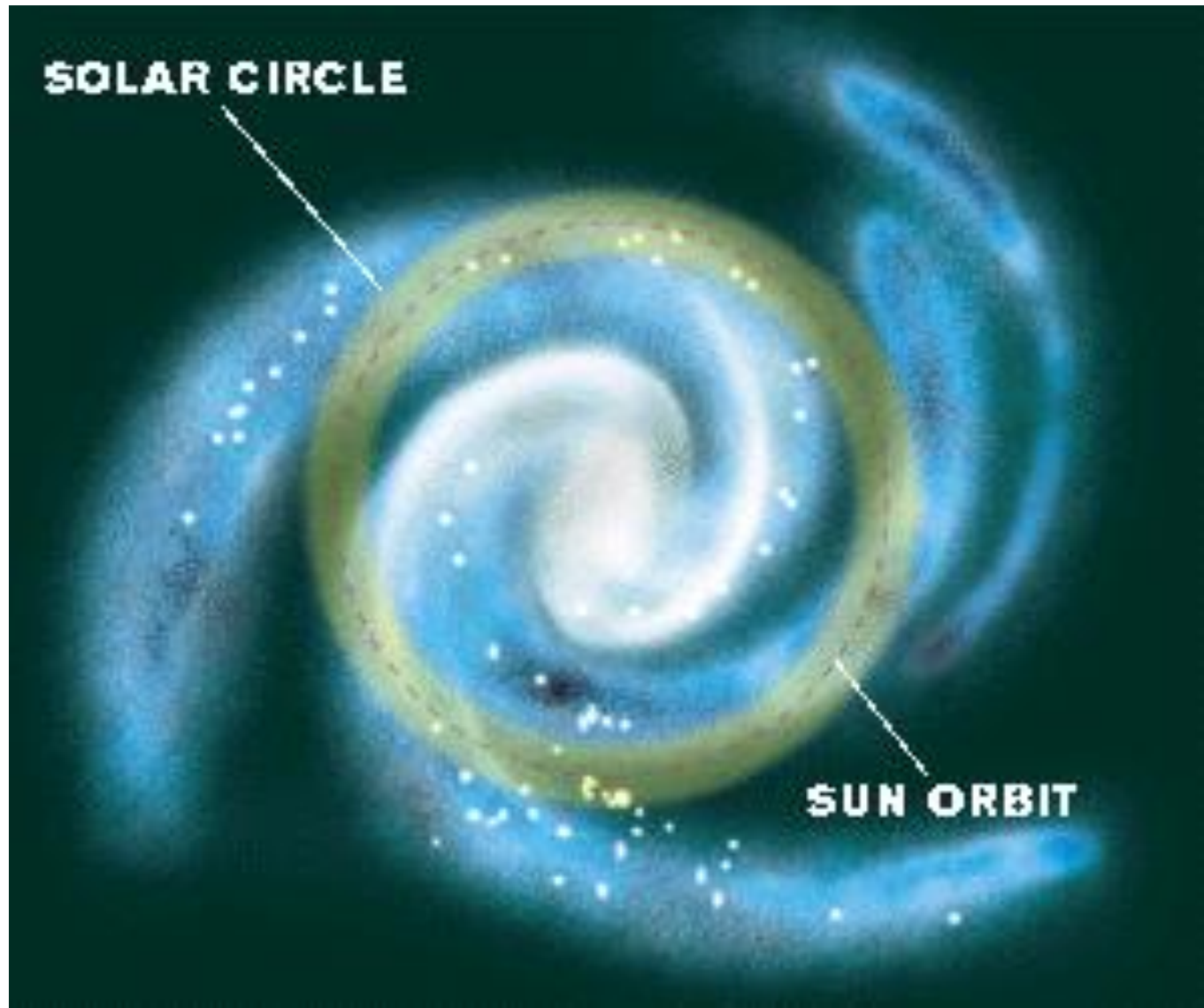
CREDIT: PHL @ UPR Arecibo (phl.upr.edu) April 17, 2014

Autres éléments influant sur l'habitabilité d'une planète (ou sur limite ZH)

- Orbite planétaire circulaire : cf. orb elliptique $\Rightarrow$ variation de la distance étoile – planète $\Rightarrow$ variat T_s
- Source de chaleur additionnelle : force de marée, radioactivité, volcanisme, chimique : un astre peut éventuellement être habitable en dehors de la ZH : Europe, îlot de vie ?
- Étoiles en système binaire $\Rightarrow$ 2 orbites possibles, mais attention à la stabilité dynamique du système
- Pb si étoile = astre compact (pulsar, ...)
- Rayonnement UV $\Rightarrow$ zone habitable galactique ?

SOLAR CIRCLE

SUN ORBIT



Obliquité de la Terre

- Formation de la Lune par un énorme impact
- Rôle important dans la stabilisation du climat terrestre $\Rightarrow$ stabilisation de l'obliquité de la Terre
- Sans la lune et avec un jour = 24h, l'obliquité de la T varierait de façon chaotique entre 0° et 85° $\Rightarrow$ changement climatique majeur fréquent $\Rightarrow$ conditions + difficiles pour le maintien de la vie
- La Lune ralentit aussi la rotation de la T (cf. force de marée).
- Chaque système planétaire est probablement unique

Le système solaire : visite (rapide) et recherche de la vie

Niches d'habitabilité dans le système solaire

Classes I & II

Mercury
Venus
Earth
Mars

Jupiter

Saturn

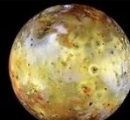
Uranus

Neptune

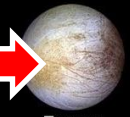
— "Planets"



Ceres



Io



Europa



Ganymede



Callisto

Mimas

Enceladus

Tethys

Dione

Rhea

Titan

Hyperion

Iapetus

Phoebe

Puck

Miranda

Ariel

Umbriel

Titania

Oberon

Proteus

Triton

Nereid

Pluto

2003 UB₃₁₃

— "Dwarf Planets"

Classes III & IV

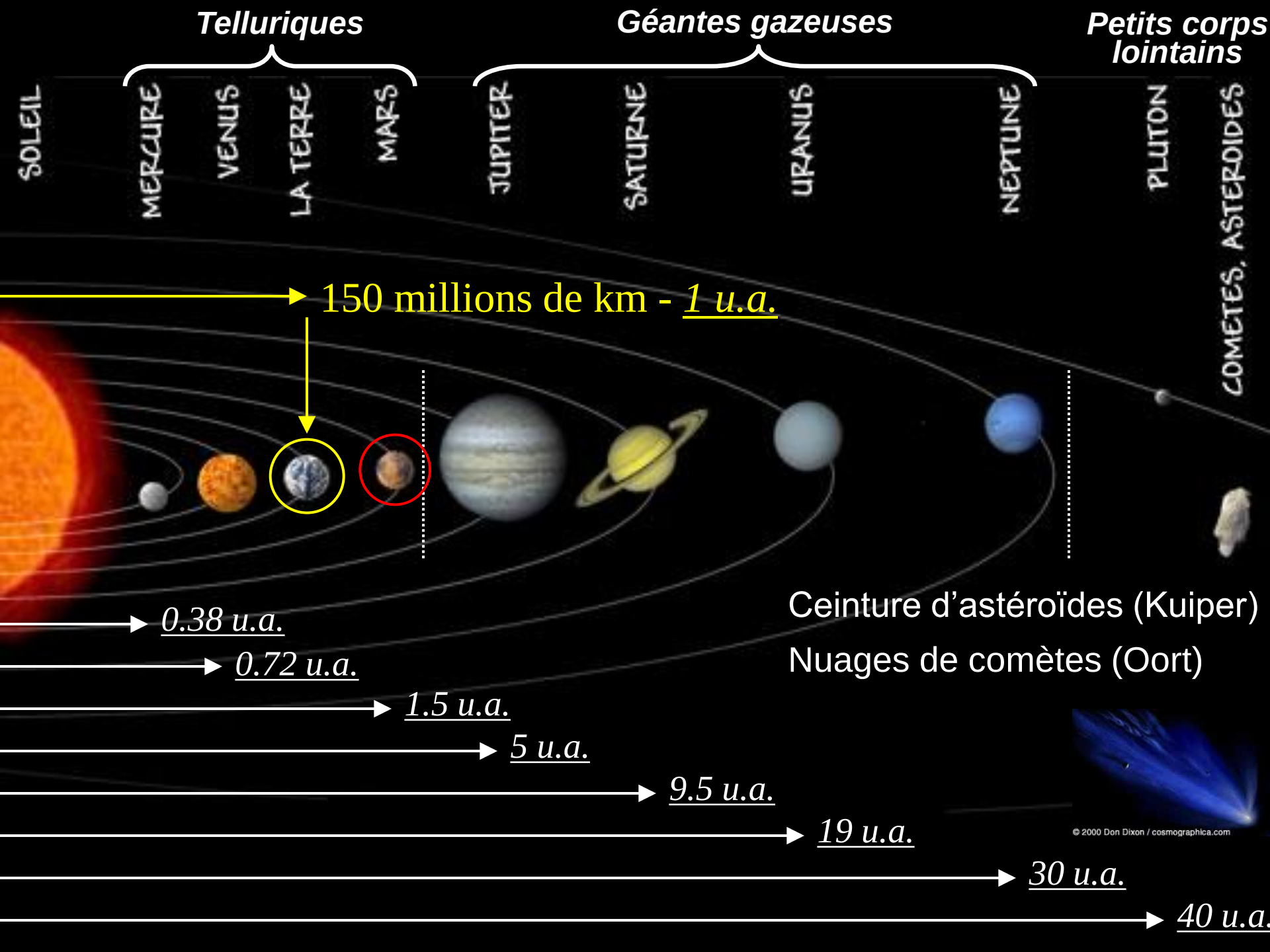


Moons



L'habitabilité de Mars ?





Mars (1.5 UA)

Planète la plus visitée du Système Solaire

Environ 6 mois de voyage

orbite : 227,940,000 km (1.52 AU)

diamètre : 6794 km (% 50 Terre)

masse : $6,4219 \cdot 10^{23}$ kg (% 10 Terre)

Volcanisme éteint mais il était INTENSE

Pas de tectonique

Nombreux signes d'hydrologie-érosion

Atmosphère ténue (7 millibars, 1% Terre)

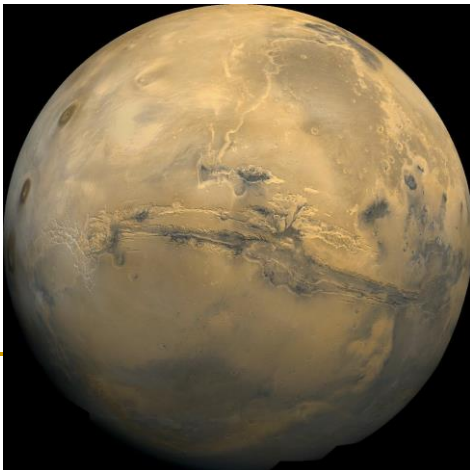
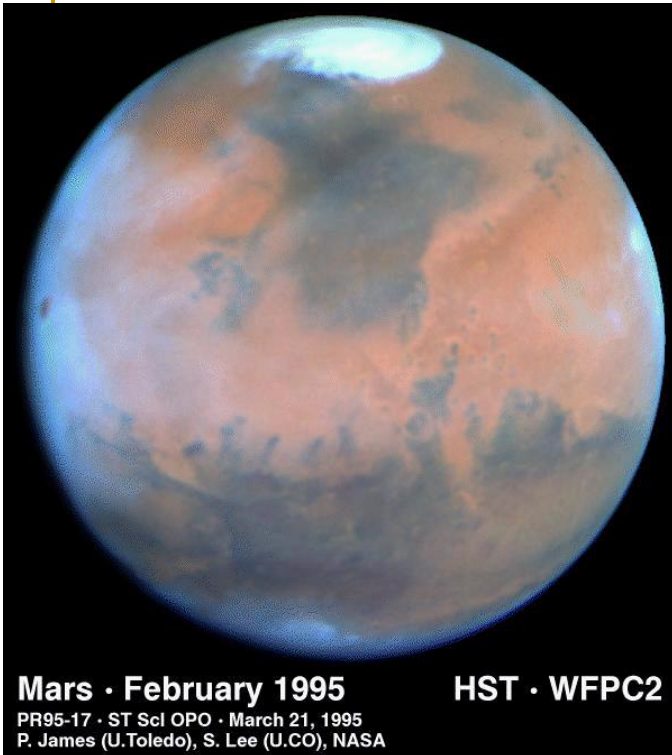
composition : CO₂ principalement

Température :

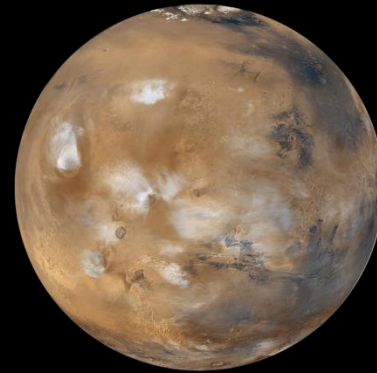
-55°C aux pôles en hiver

+20°C max. en été

MAIS pression trop basse pour avoir de l'eau liquide



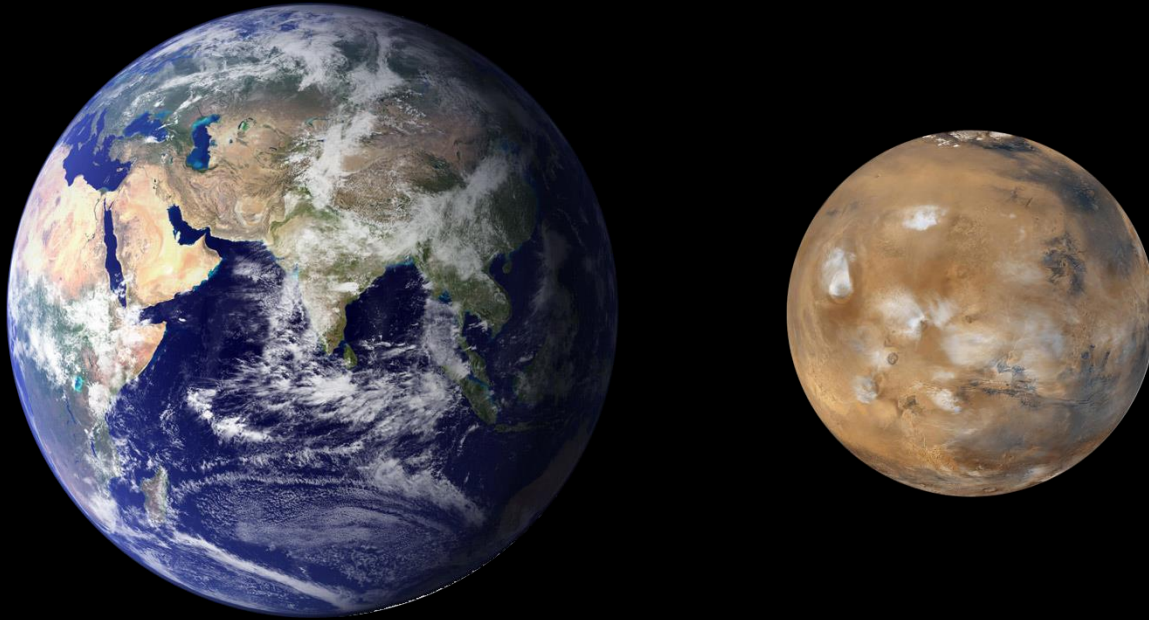
Comparaison Terre-Mars – aujourd’hui



	Terre	Mars
Composition atmosphérique	78% N ₂ 21% O ₂ 1% H ₂ O	95% CO ₂ 3% N ₂ 0,03% H ₂ O
Pression atmosphérique	1015 hPa	6 hPa
Température à la surface	15°C	-60°C

Mars : un désert aride, froid et à l’atmosphère raréfiée

Comparaison Terre-Mars – aujourd'hui



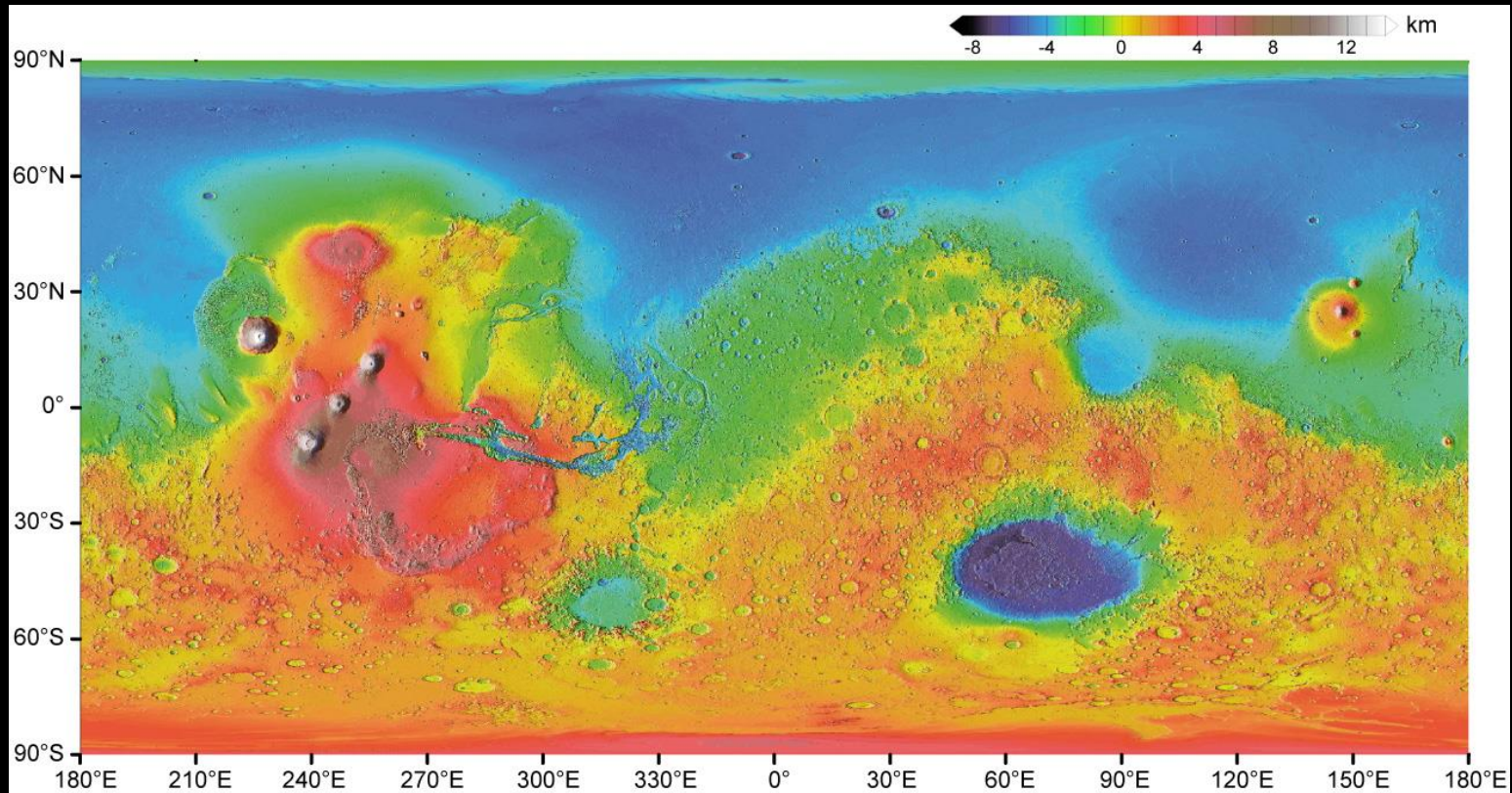
Paradoxe : bien que non « habitable » en surface, Mars se situe à l'intérieur de la Zone Habitable (de surface) du système solaire !

- Pourquoi Mars n'est pas habitable aujourd'hui ?
- Mars a-t-elle pu être habitable à une certaine période de son histoire ? Pendant combien de temps ?

Histoire de la planète Mars

Noachien

Modèle « standard » (Bibring et al., Science, 2006; 2007)



Topographie, géomorphologie, minéralogie : un livre ouvert sur l'histoire de la planète

Histoire de la planète Mars

MGS (1996-2006)



MRO (2006-?)



Phoenix (2008)



Spirit (2004-2010)



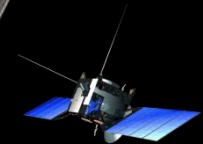
Curiosity (2012-?)



Opportunity (2004-?)



Mars
Odyssey
(2002-?)

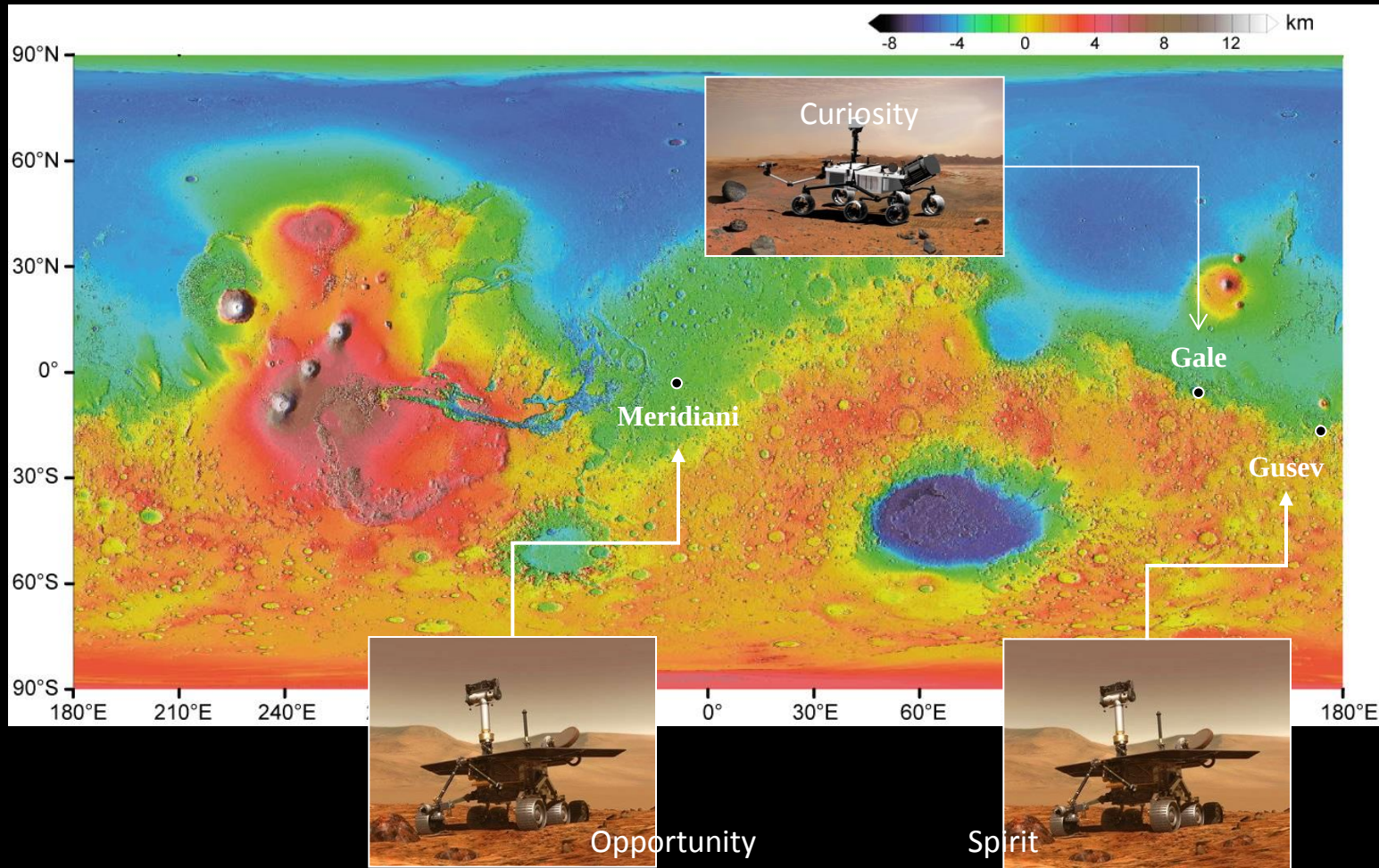


MEX (2004-?)

Histoire de la planète Mars

Noachien

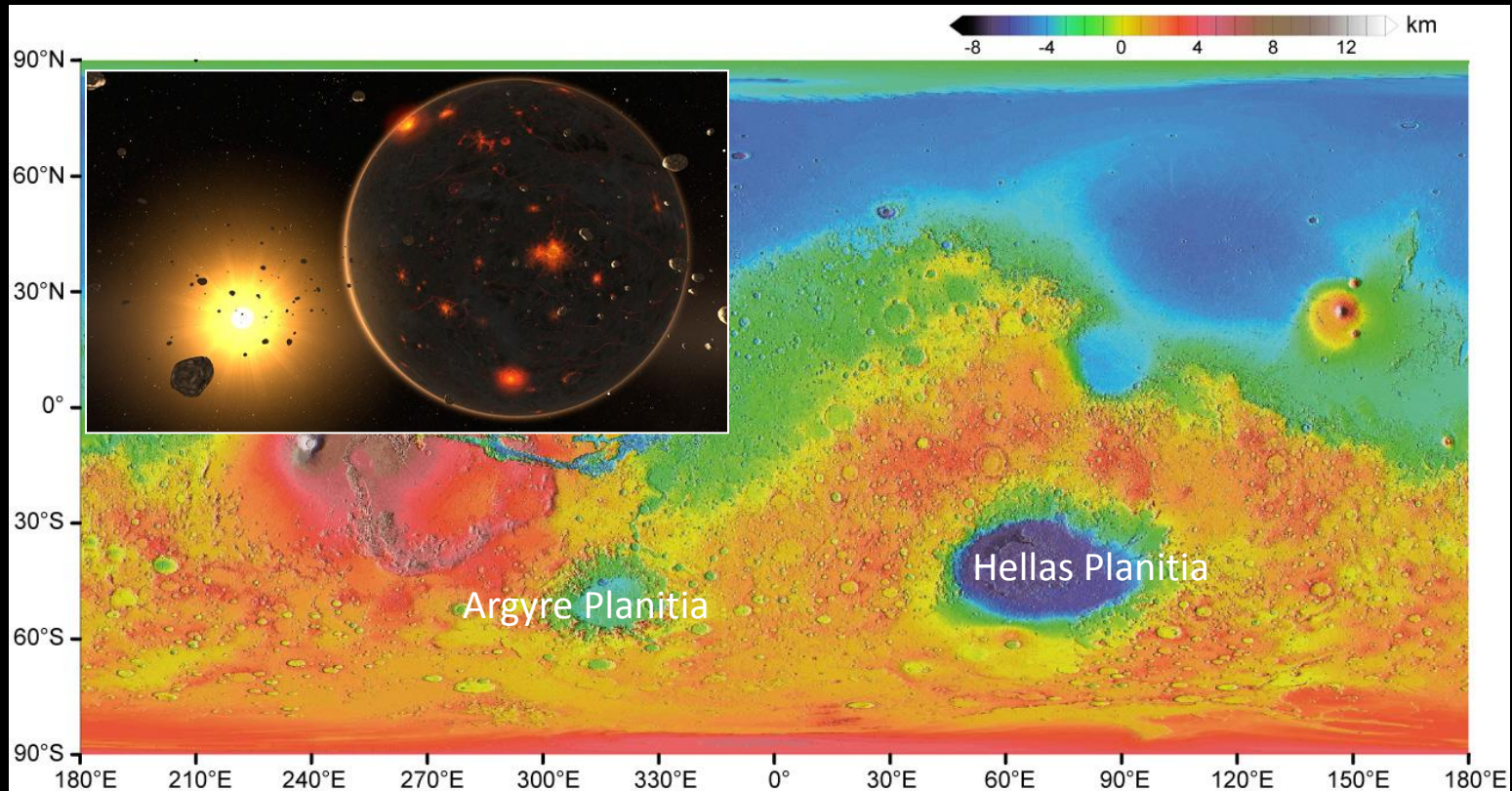
Modèle « standard » (Bibring et al., Science, 2006; 2007)



Histoire de la planète Mars

-4,5 Ga

Noachien



-4,5 à -3,7 milliards d'années : bombardement météoritique intense

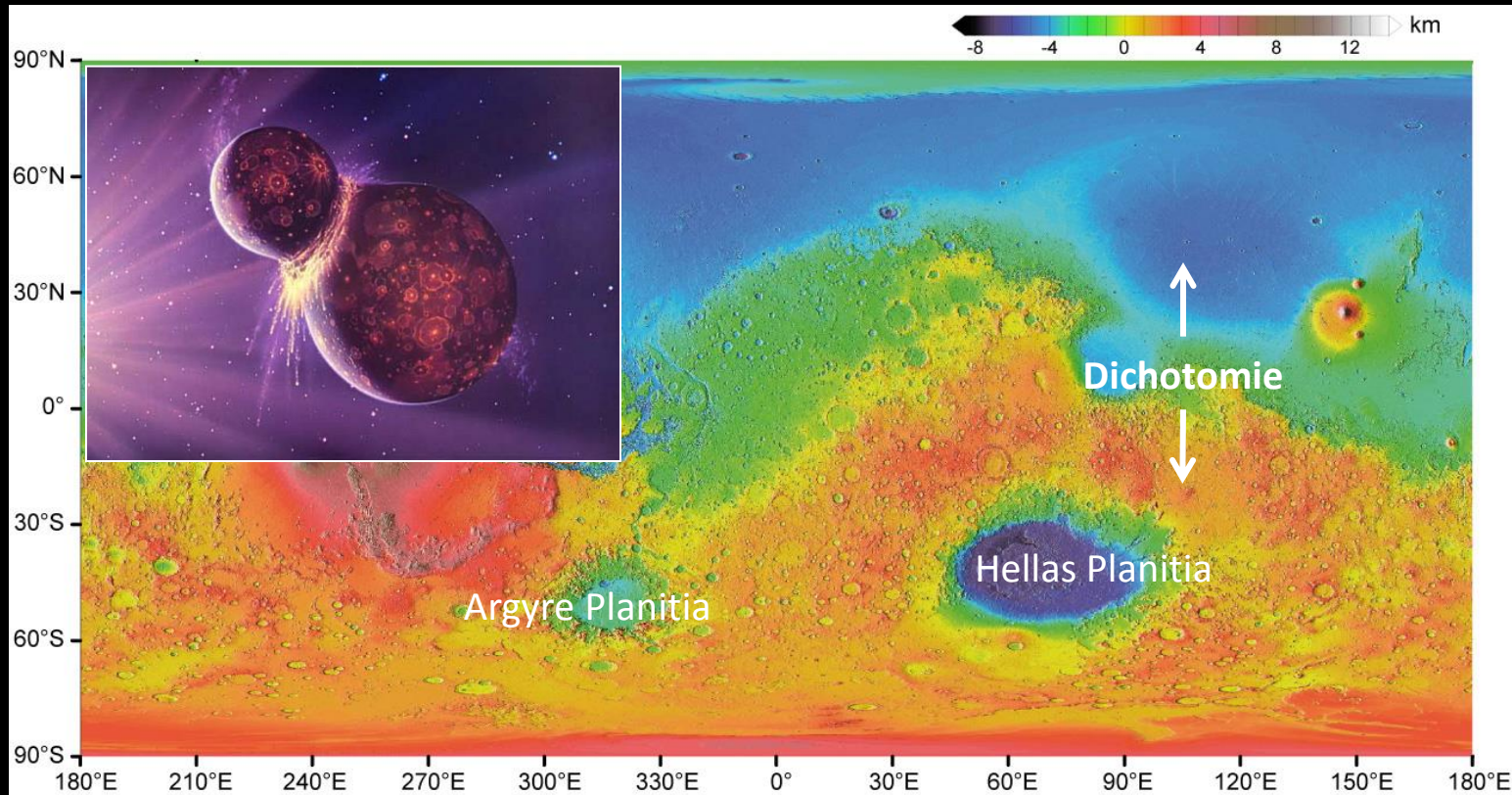
Hellas Planitia : bassin d'impact de **9 km de profondeur**

Hémisphère sud : terrains les plus anciens

Histoire de la planète Mars

-4,5 Ga

Noachien

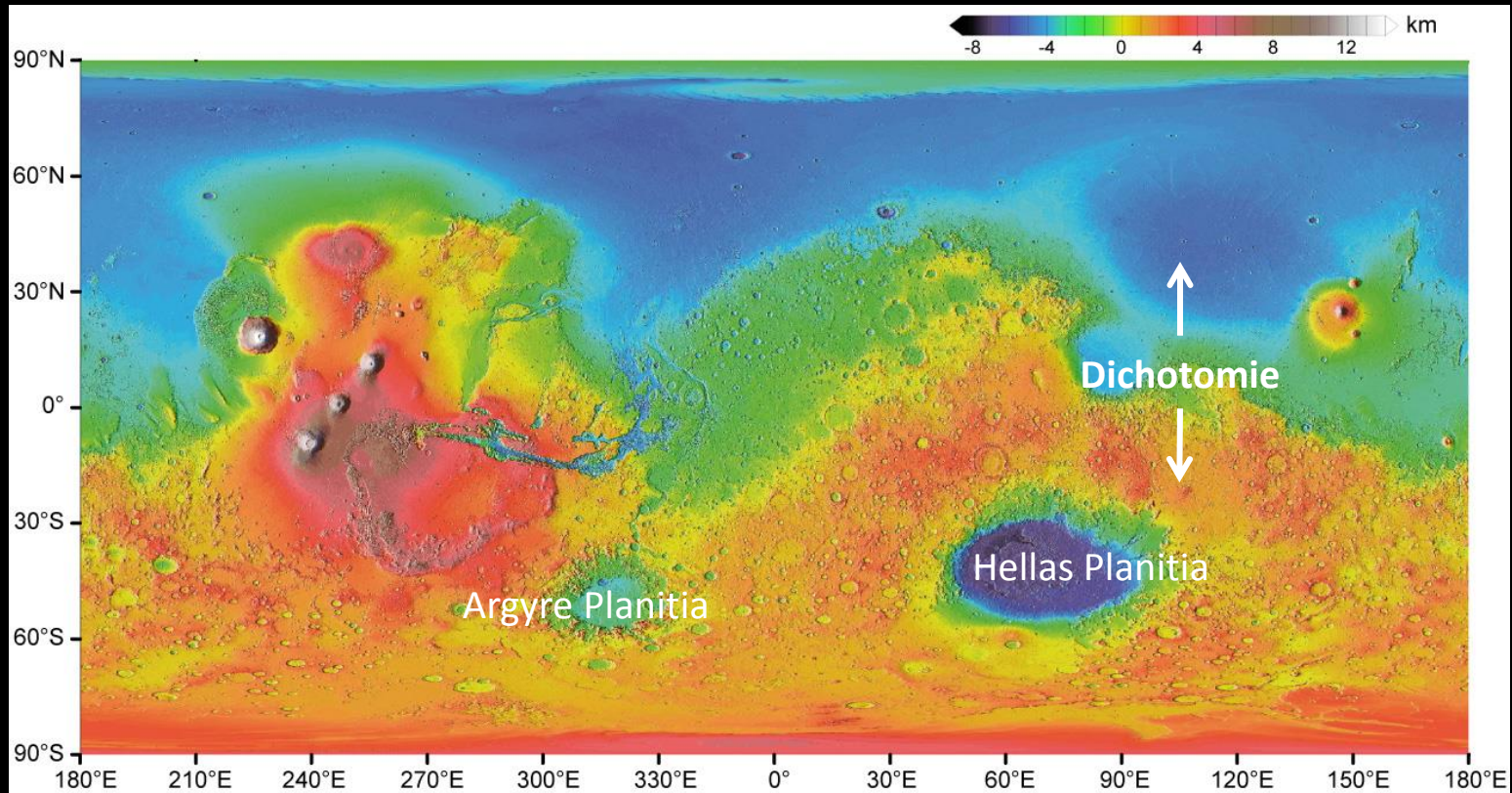


-4,5 milliards d'années : un impact géant arrache la croûte de l'hémisphère nord

Histoire de la planète Mars

-4,5 Ga

Noachien

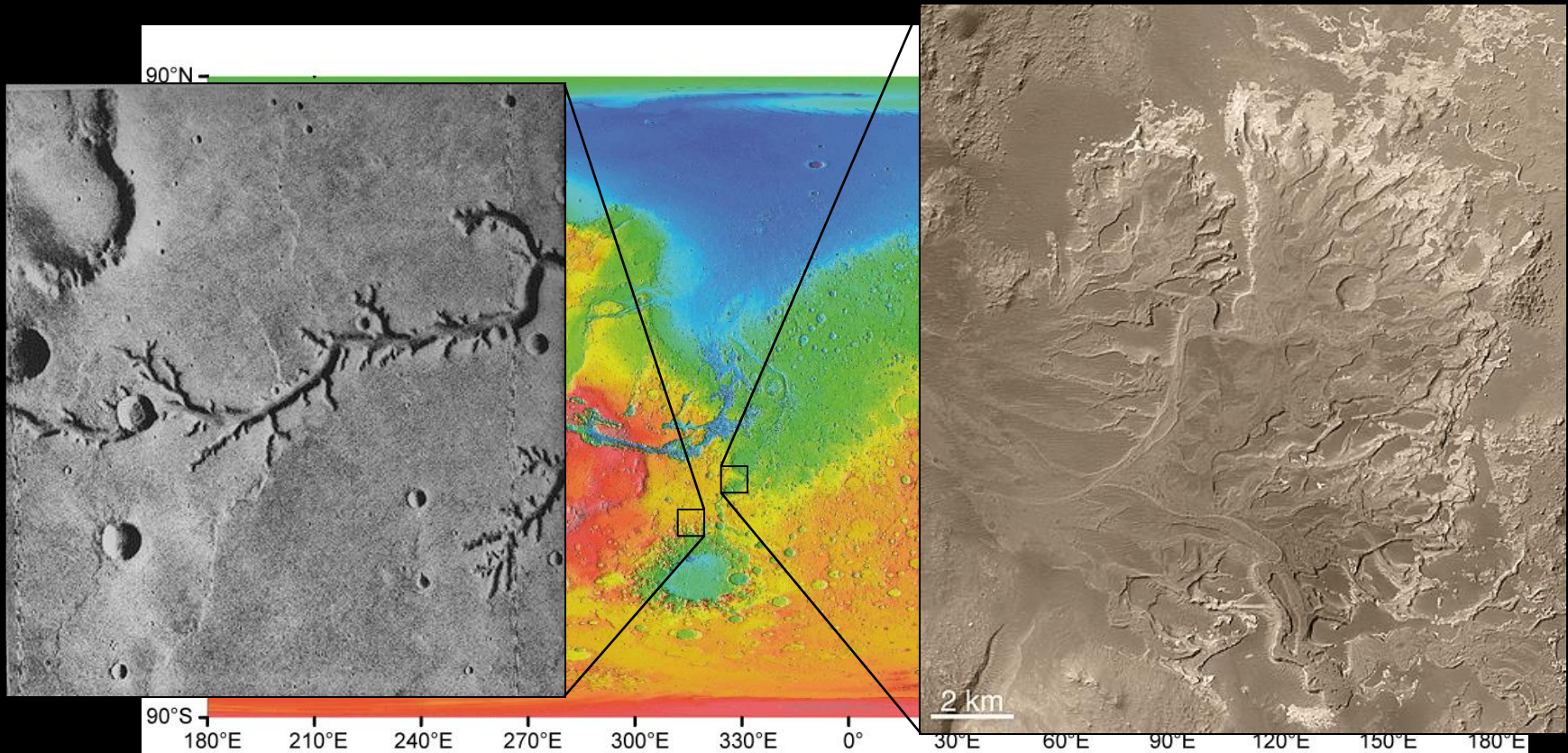


-4,5 milliards d'années : un impact géant arrache la croûte de l'hémisphère nord

Histoire de la planète Mars

-4,5 Ga

Noachien

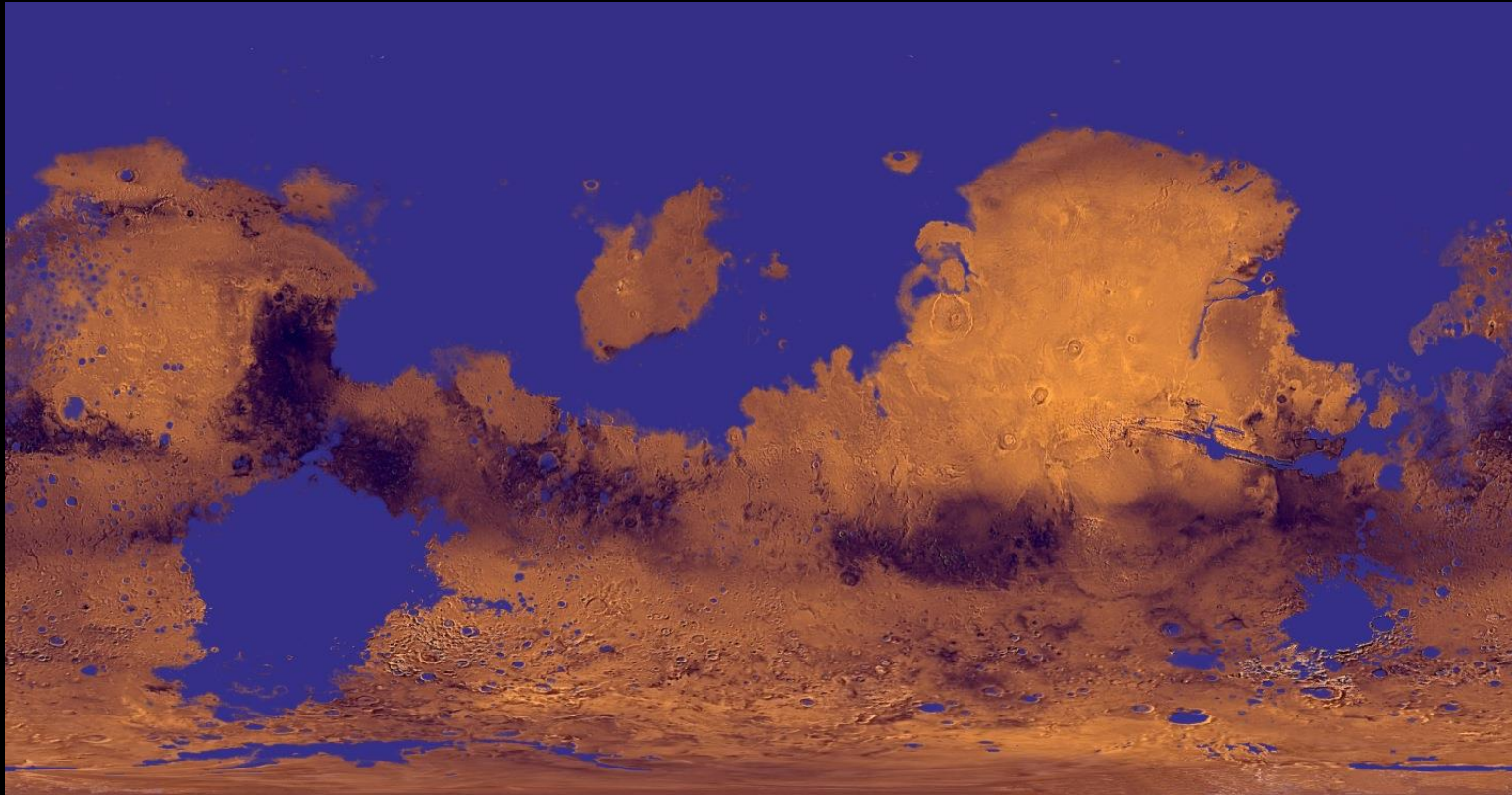


-4,5 à -3,7 milliards d'années : formation de vallées ramifiées et deltas
Climat chaud et humide ?

Histoire de la planète Mars

-4,5 Ga

Noachien

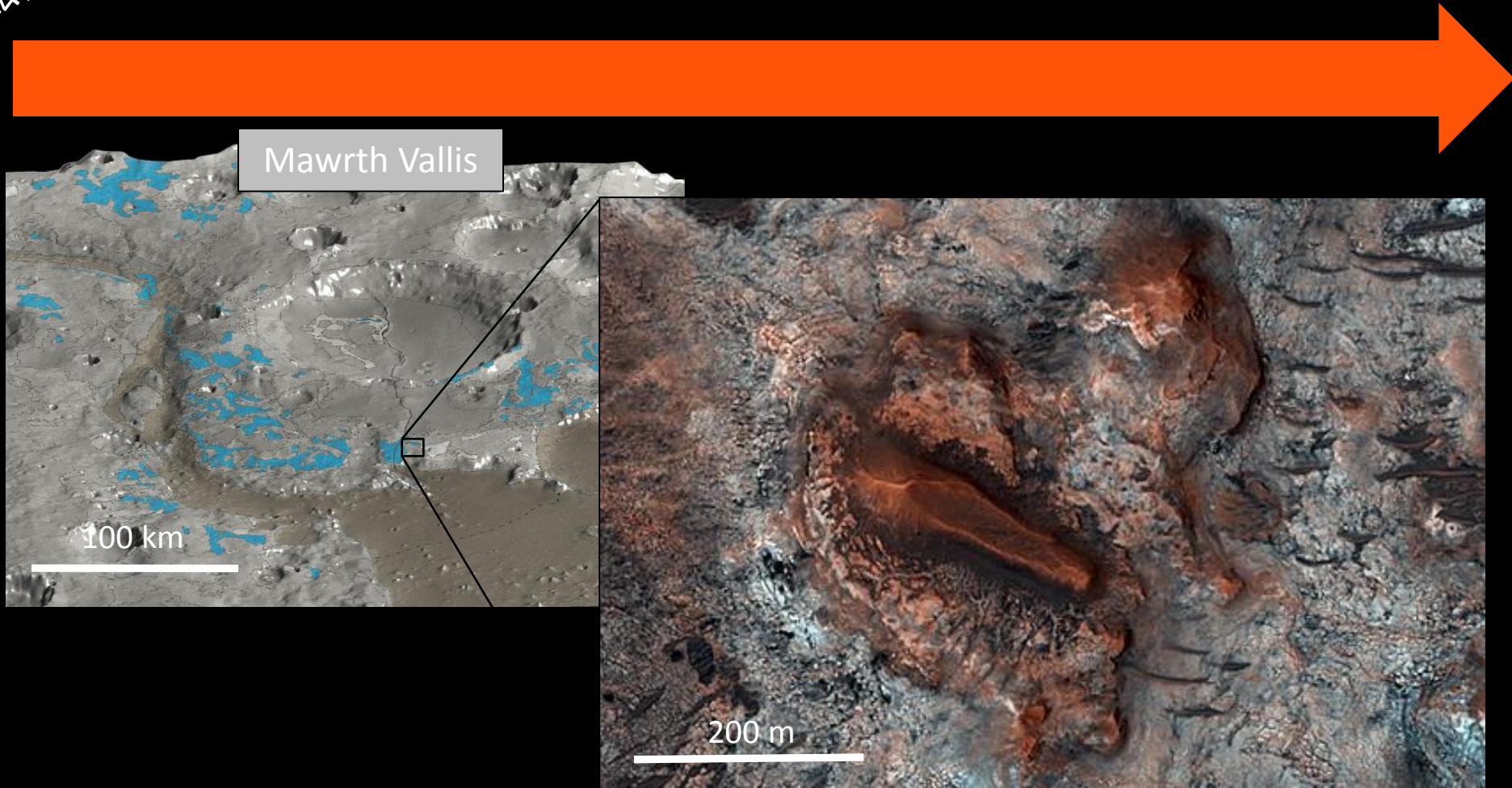


-4,5 à -3,7 milliards d'années : formation de vallées ramifiées et deltas
Climat chaud et humide ?

Histoire de la planète Mars

-4,5 Ga

Noachien



Terrains les plus anciens : détection de phyllosilicates = **argiles**, formés en présence **d'eau liquide stable faiblement basique**

→ **Conditions favorables à l'apparition de la vie ?**

Histoire de la planète Mars

4,5 Ga

Noachien

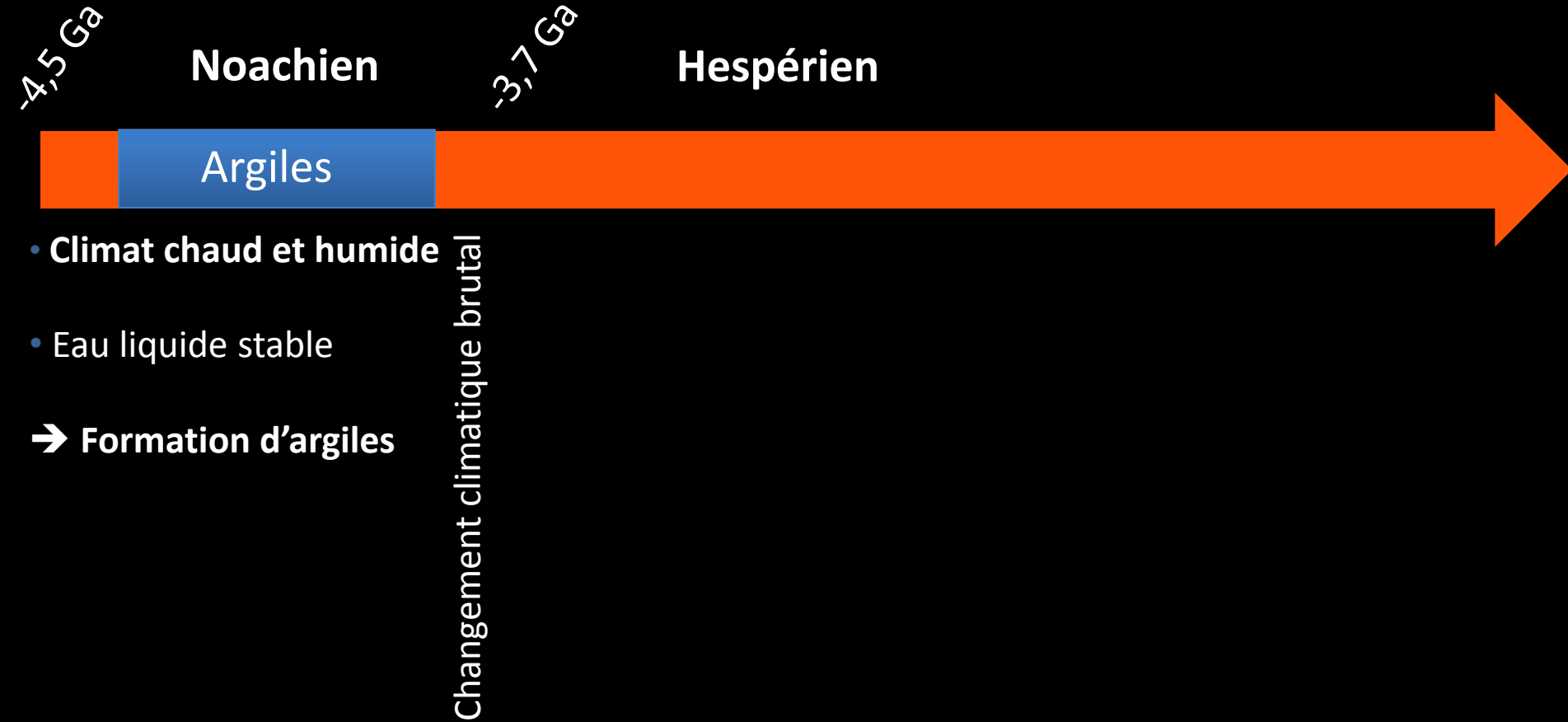
Argiles

- Climat chaud et humide

- Eau liquide stable

➔ Formation d'argiles

Histoire de la planète Mars



Histoire de la planète Mars

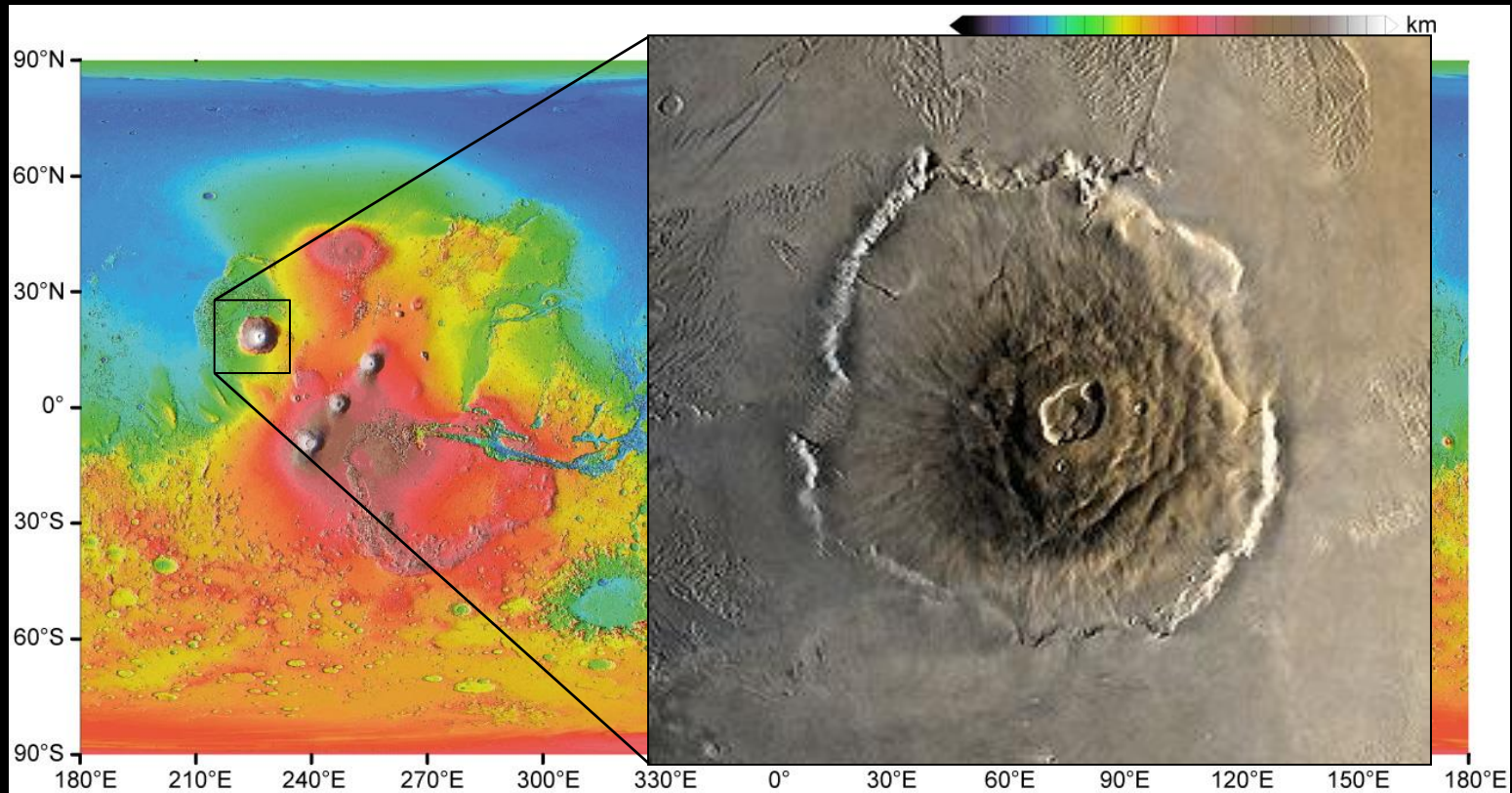
-4,5 Ga

Noachien

-3,7 Ga

Hespérien

Argiles



-4 à -3 milliards d'années : volcanisme actif

Olympus Mons : volcan de **25 km de haut** et 600 km de large

Encore actif il y a 2 millions d'années

Histoire de la planète Mars

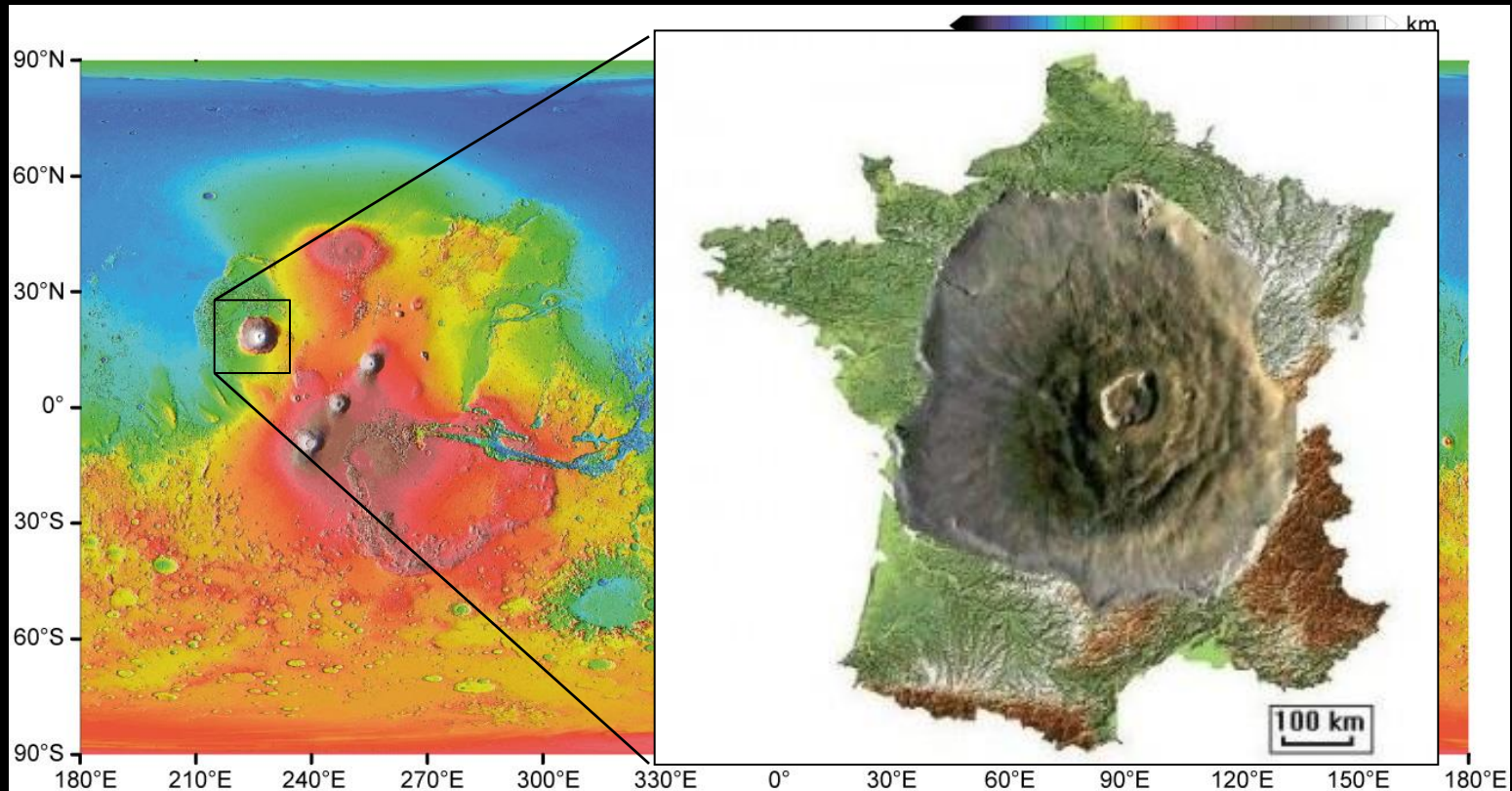
-4,5 Ga

Noachien

-3,7 Ga

Hespérien

Argiles



-4 à -3 milliards d'années : volcanisme actif

Olympus Mons : volcan de **25 km de haut** et 600 km de large

Encore actif il y a 2 millions d'années

Histoire de la planète Mars

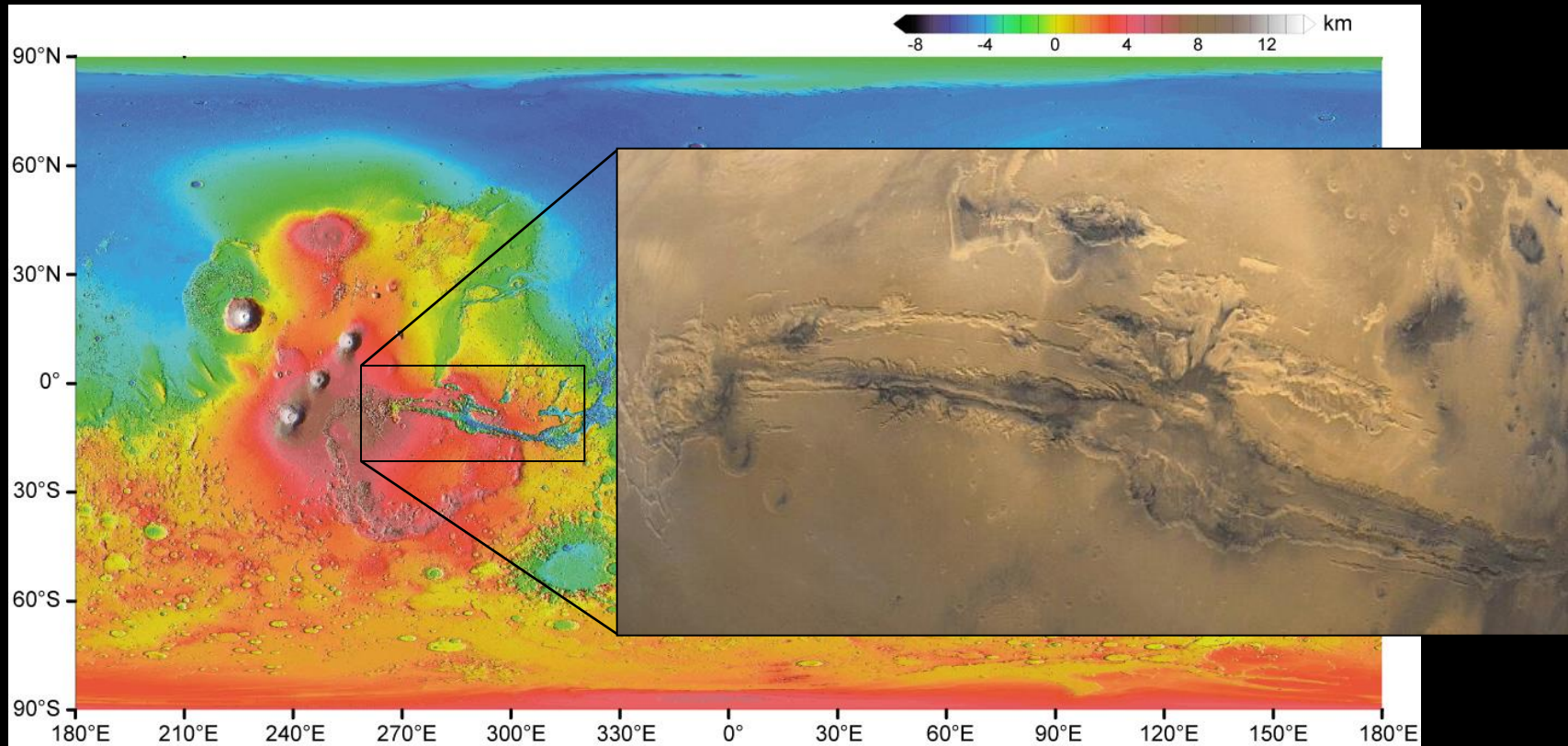
-4,5 Ga

Noachien

-3,7 Ga

Hespérien

Argiles



-3,5 milliards d'années : formation de Valles Marineris (origine tectonique)
Rift de 4800 km de long, 200 km de large et 7 km de profondeur

Histoire de la planète Mars

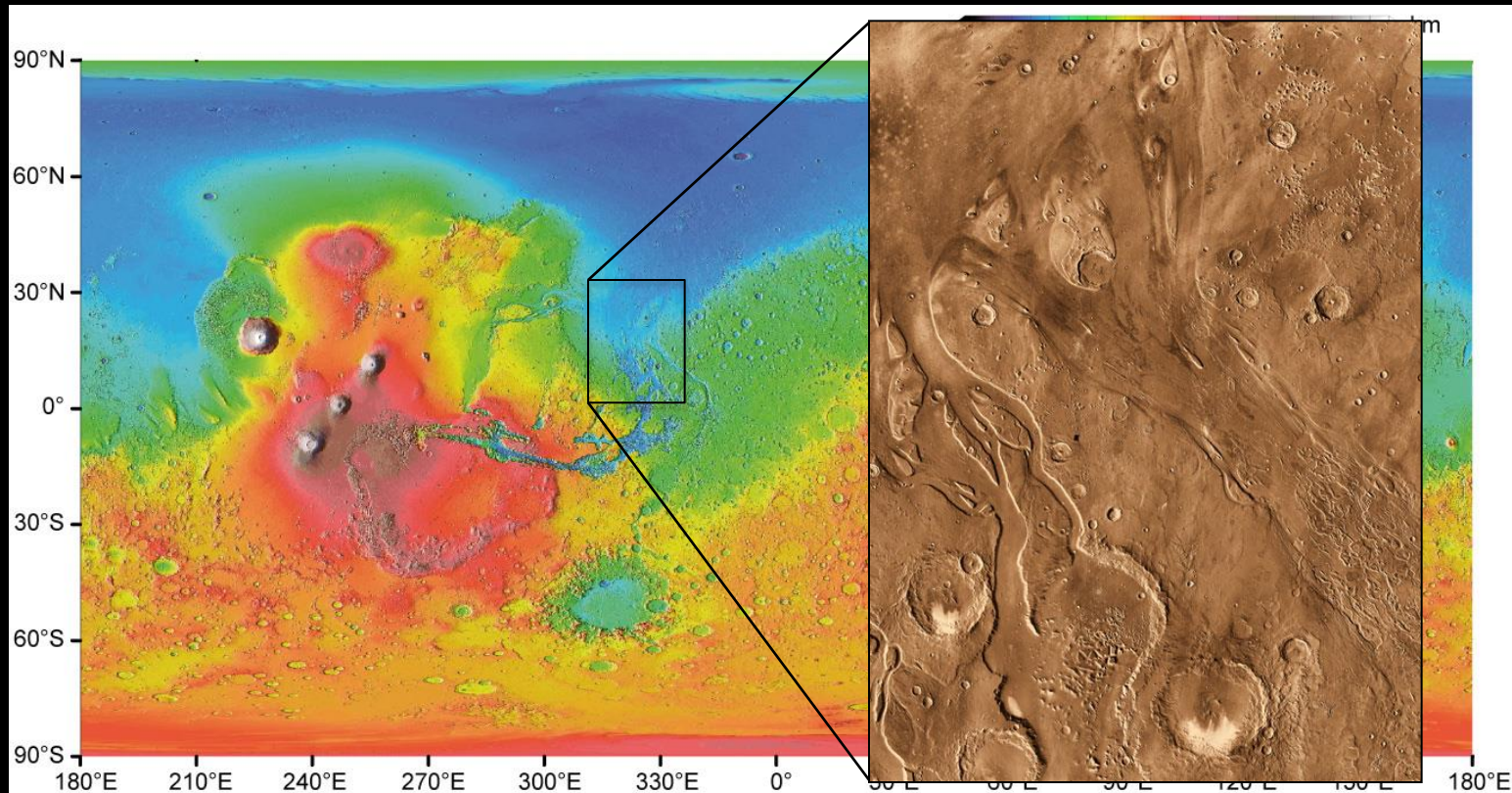
-4,5 Ga

Noachien

-3,7 Ga

Hespérien

Argiles



-3,7 à 3 milliards d'années : formation de vallées de débacle
Ares Vallis, 25 km de large, 1 km de profondeur
Eau liquide de façon épisodique

Histoire de la planète Mars

4,5 Ga

Noachien

3,7 Ga

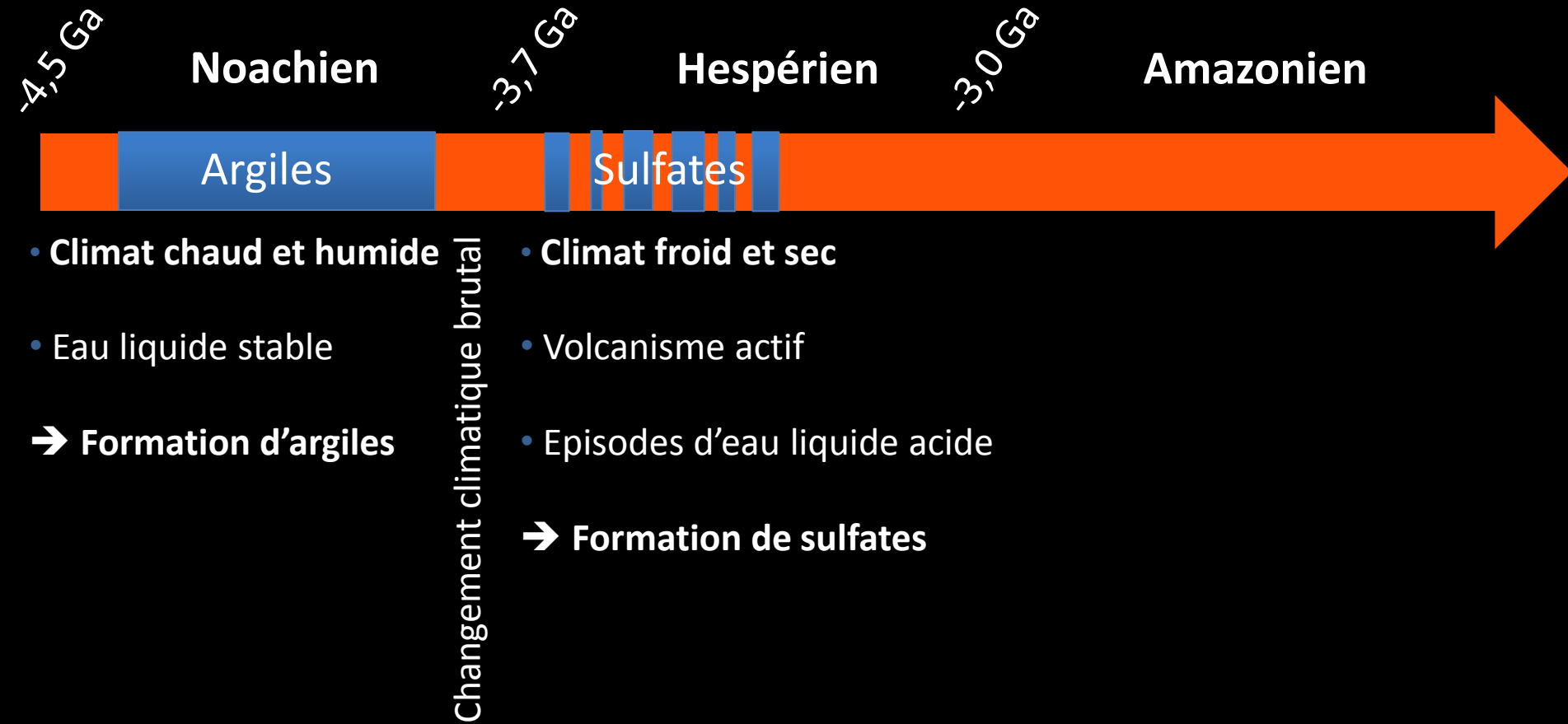
Hespérien

Argiles



Des couches de **sulfates** : minéral formé dans une eau acide

Histoire de la planète Mars



Histoire de la planète Mars

-4,5 Ga

Noachien

-3,7 Ga

Hespérien

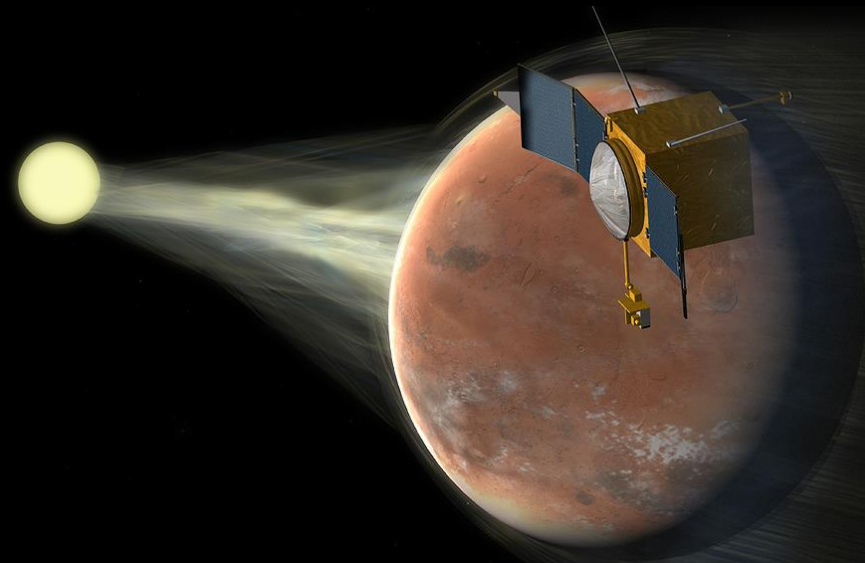
Argiles

- Climat chaud et humide

- Eau liquide stable

➔ Formation d'argiles

Changement climatique brutal

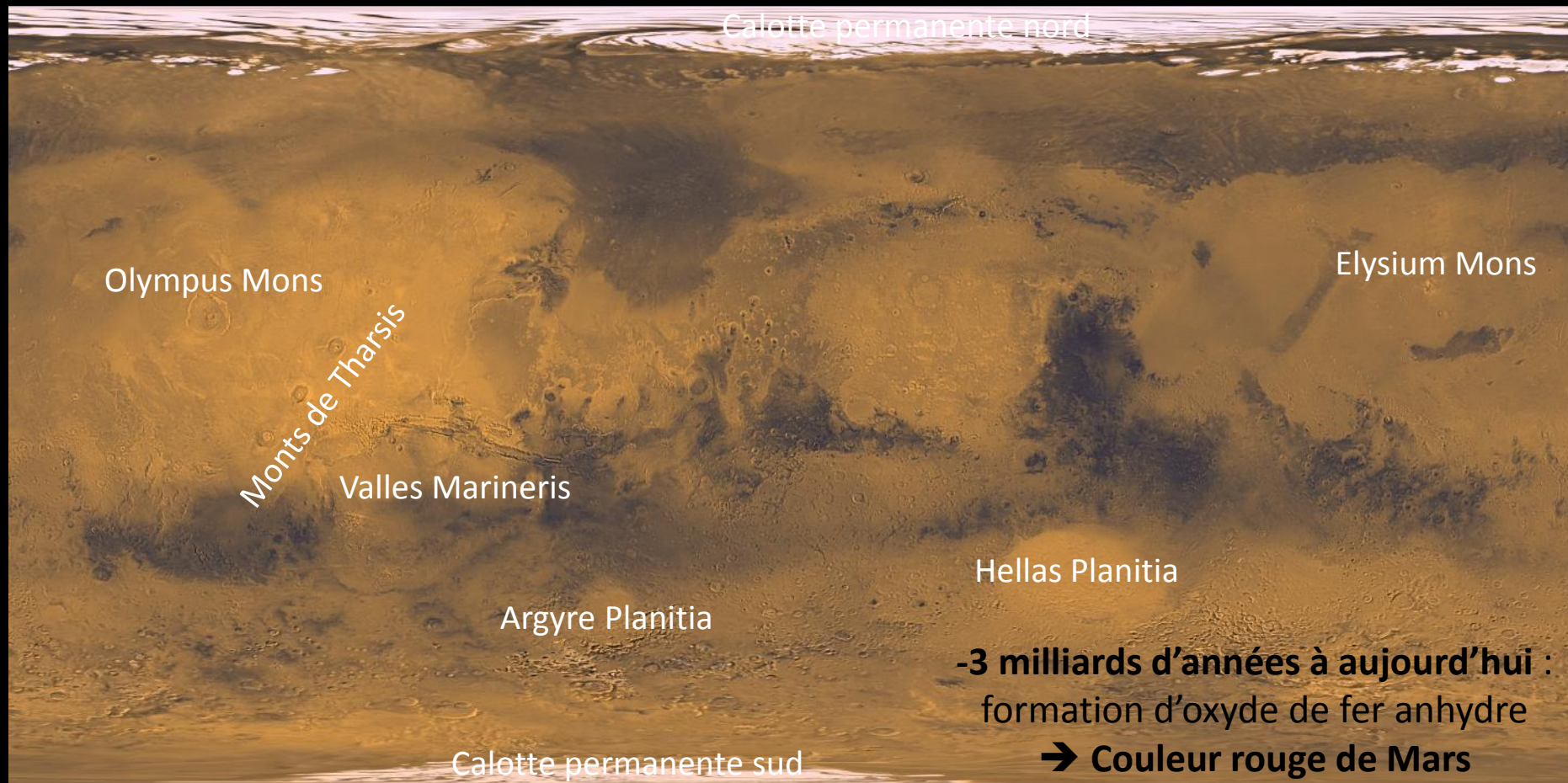


Mars est trop peu massive : flux d'énergie interne trop faible pour maintenir son intérieur « fluide », un volcanisme intense et une tectonique des plaques

⇒ **Vers -3,7 milliards d'années** : arrêt du champ magnétique après seulement ≈800 millions d'années, érosion massive de l'atmosphère et renouvellement en CO₂ atm. quasi-inexistant

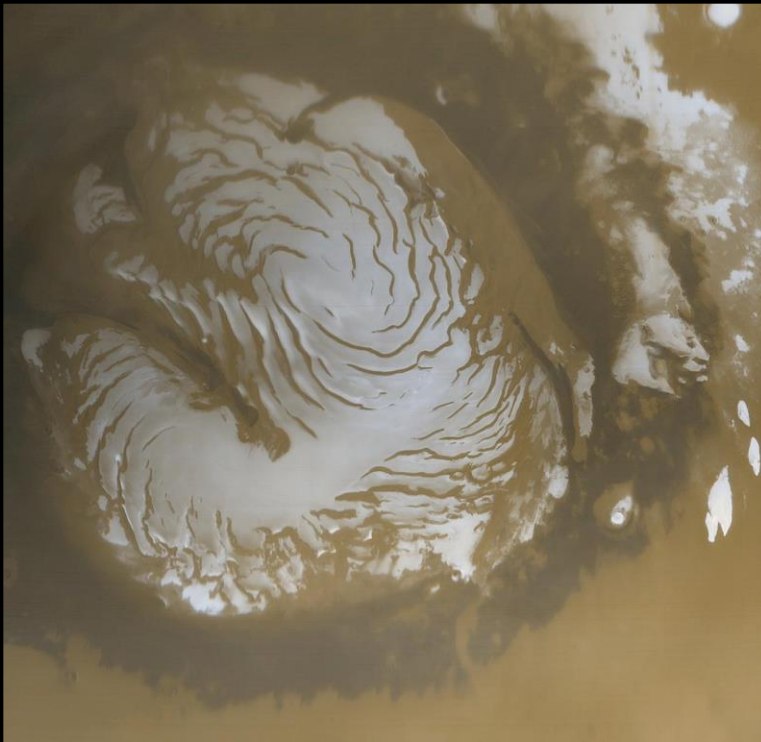
⇒ Changement climatique ➔ **Climat froid et sec**

Histoire de la planète Mars



-3 milliards d'années à aujourd'hui :
formation d'oxyde de fer anhydre
➔ **Couleur rouge de Mars**

Histoire de la planète Mars



**Il y a ≈2 milliards d'années à aujourd'hui : formation des calottes permanentes de
glace d'eau aux pôles**
Environ 3 km d'épaisseur et 1500 km de diamètre

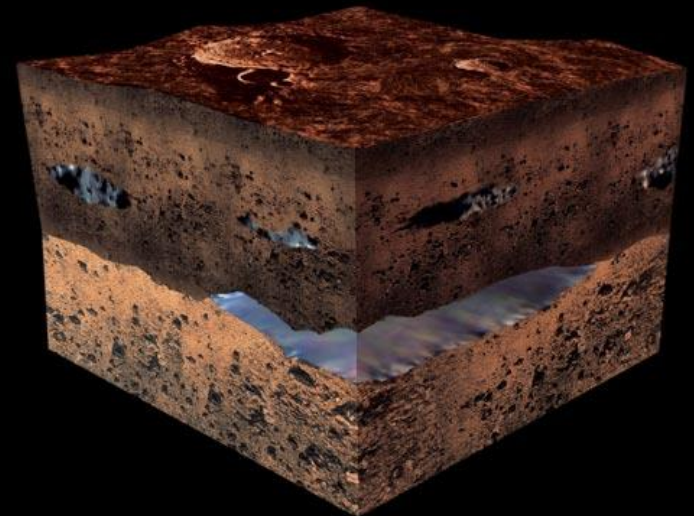
Histoire de la planète Mars



Sol 20

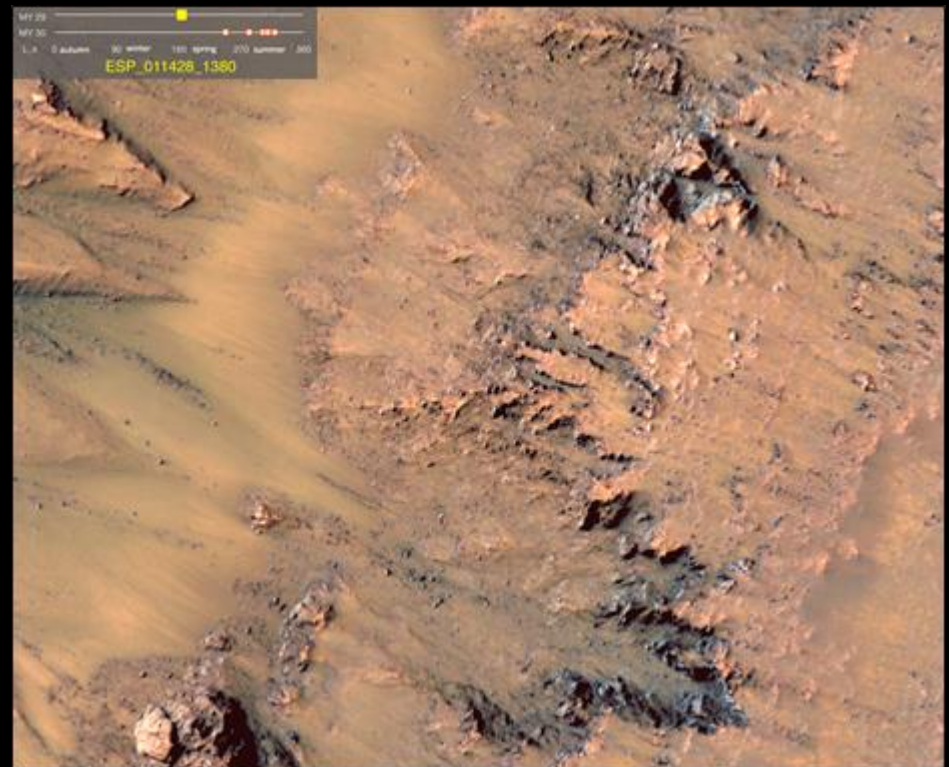
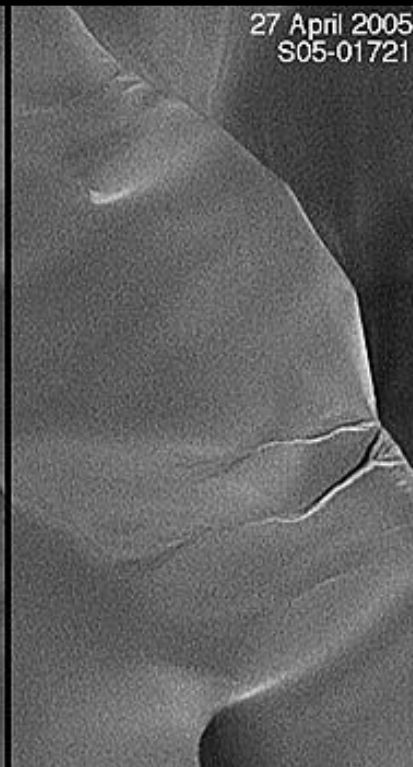
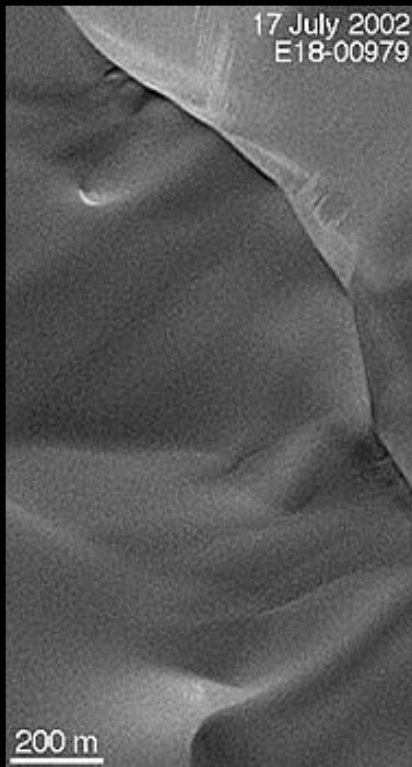


Sol 24



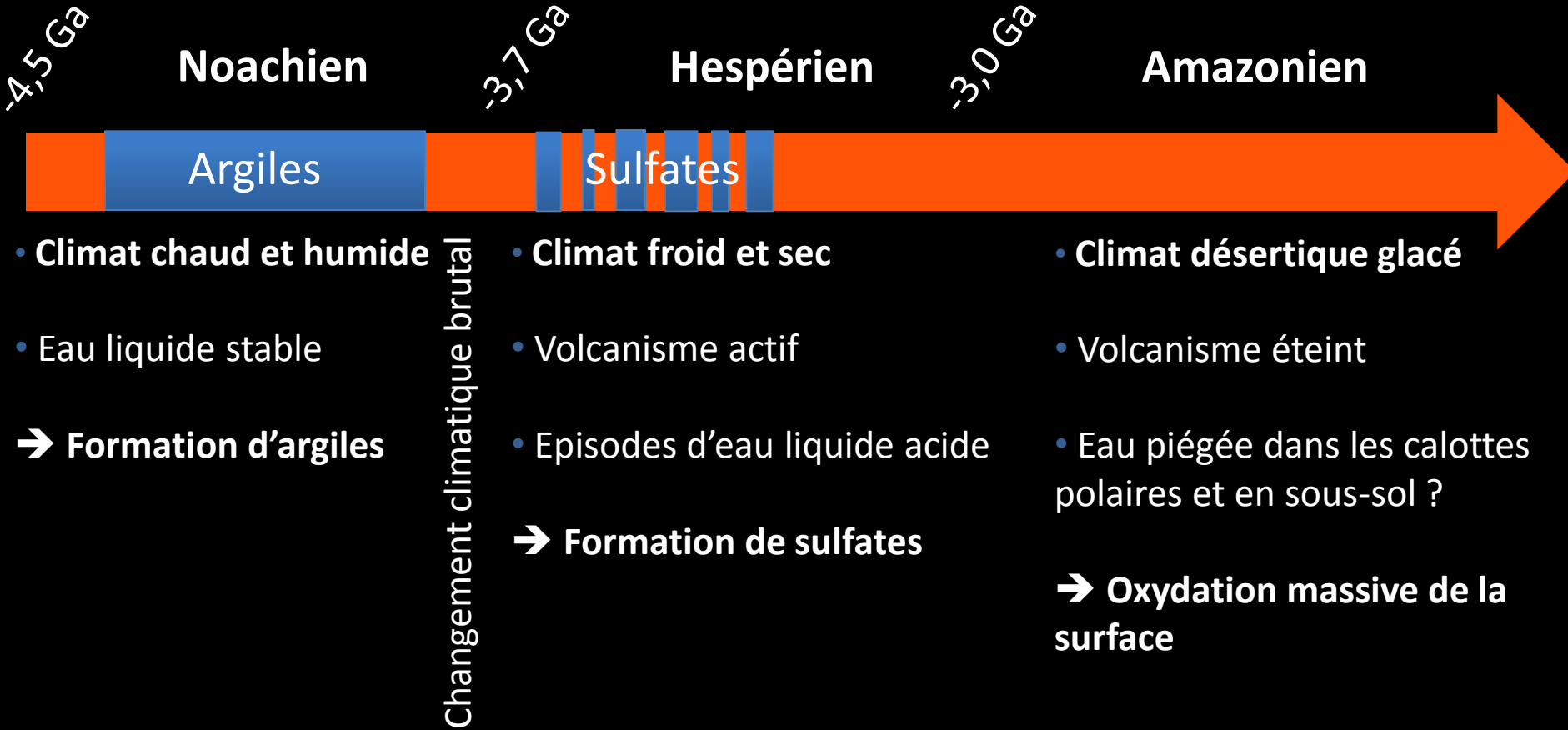
De la glace en sous-sol ? Pergélisol et nappes phréatiques ?

Histoire de la planète Mars

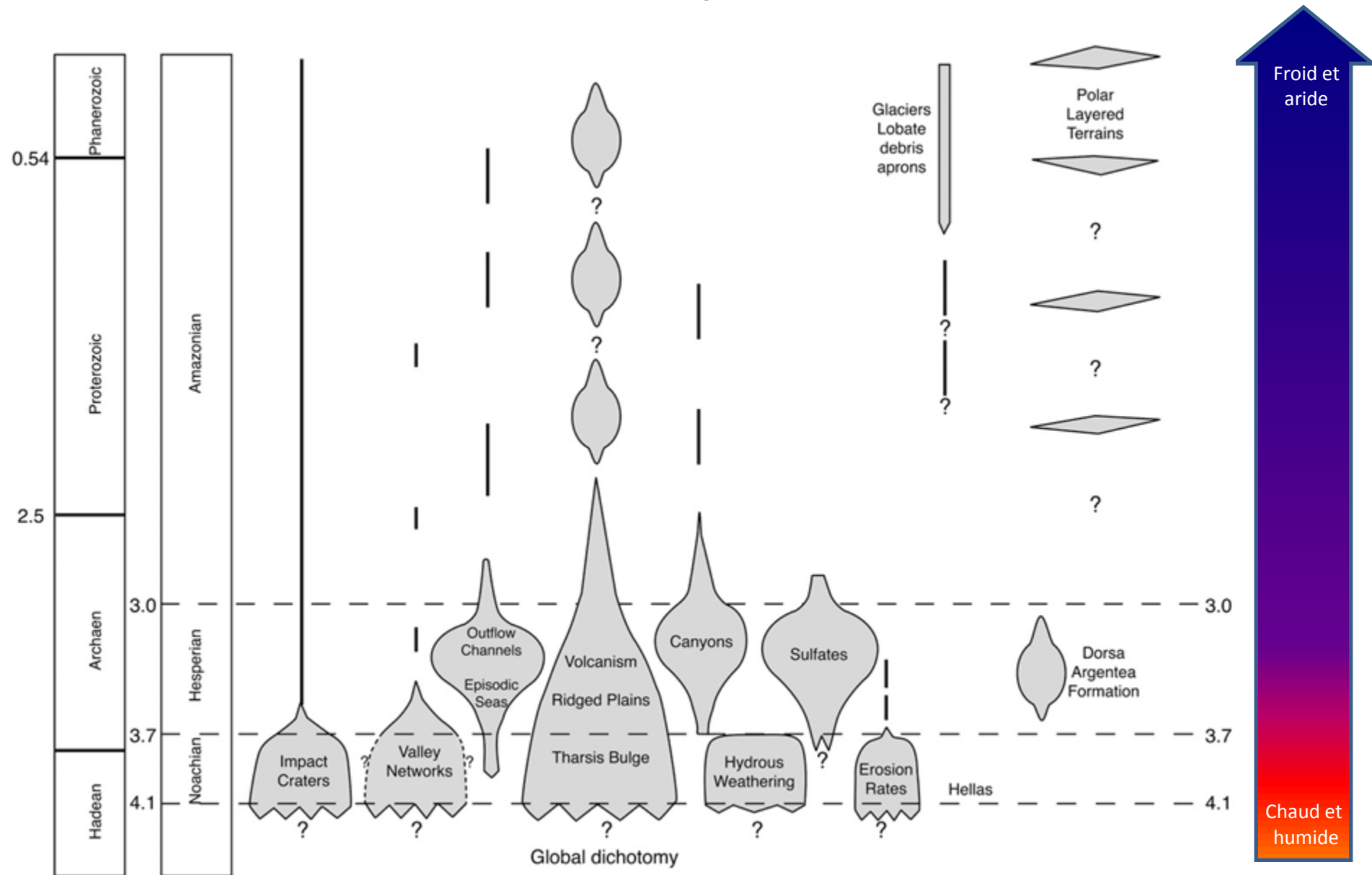


Aujourd'hui : apparition de ravines et de traînées sombres
Ecoulement présent d'eau liquide salée (saumure) ?

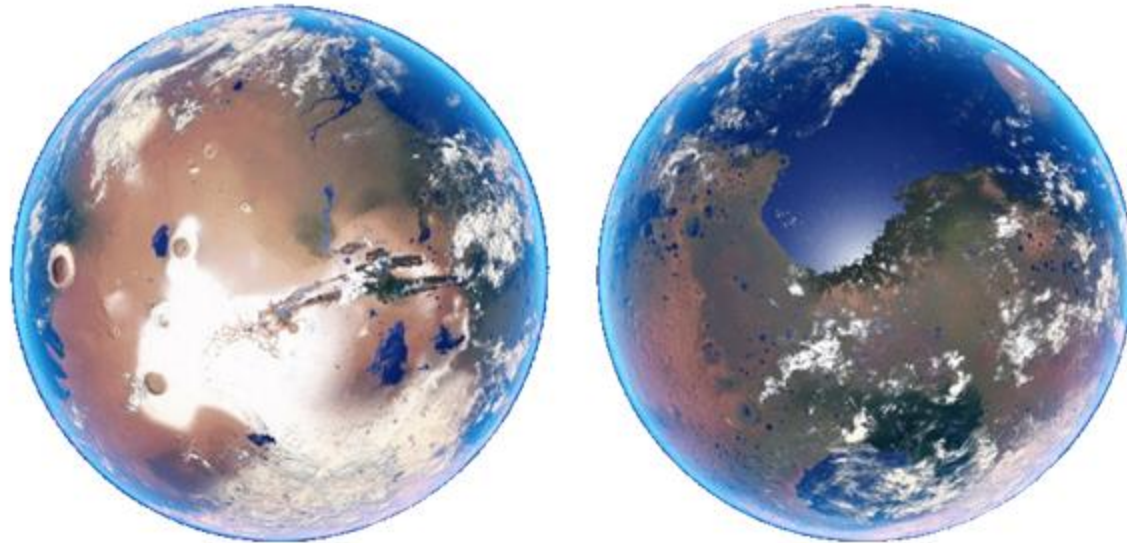
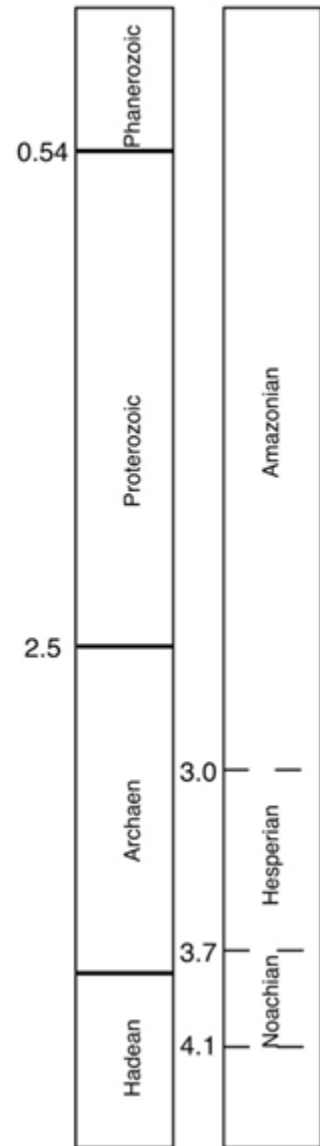
Histoire de la planète Mars



Histoire de la planète Mars



Histoire de la planète Mars

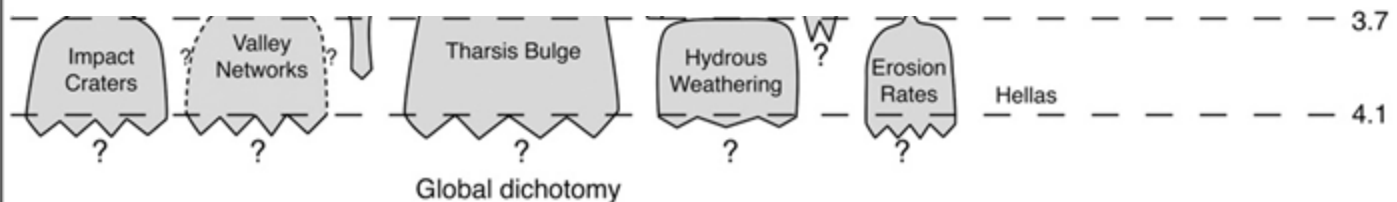


Pendant ≈ 800 millions d'années : **Habitable en surface ? Conditions favorables à l'apparition de la vie ?**

Ensuite : **désertification et glaciation « galopantes »**

Ce que nous apprend Mars :

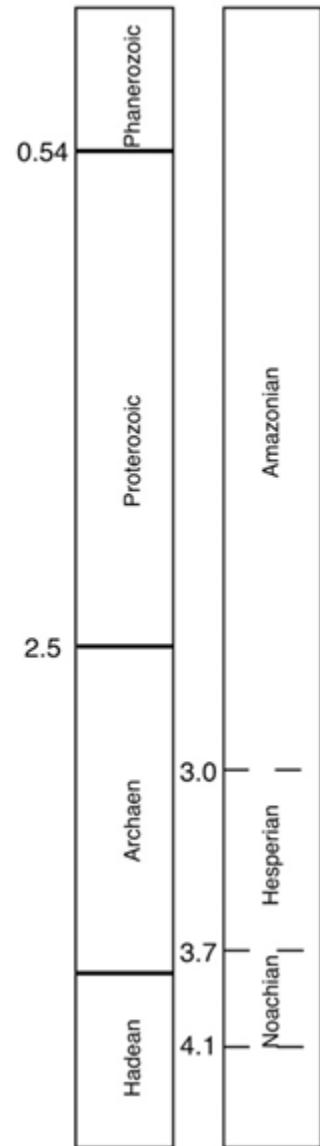
Pour rester propice à la vie en surface, il faut aussi conserver son atmosphère
Gravité, champ magnétique, tectonique des plaques $\Rightarrow$ masse suffisante



Froid et aride

Chaud et humide

Histoire de la planète Mars

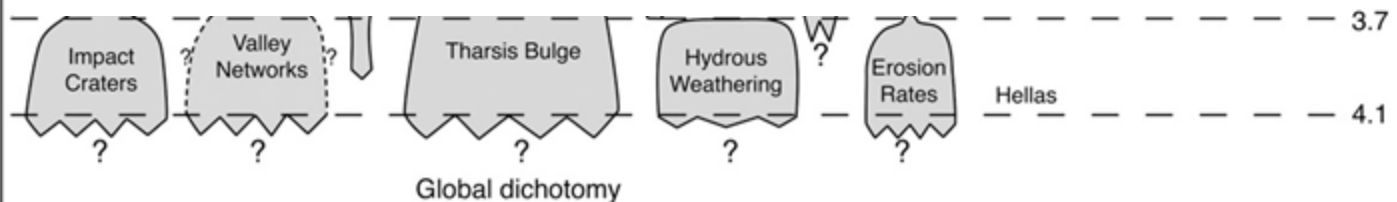


Pendant ≈ 800 millions d'années : **Habitable en surface ? Conditions favorables à l'apparition de la vie ?**

Ensuite : **désertification et glaciation « galopantes »**

Ce que nous apprend Mars :

Pour rester propice à la vie en surface, il faut aussi conserver son atmosphère
Gravité, champ magnétique, tectonique des plaques $\Rightarrow$ masse suffisante



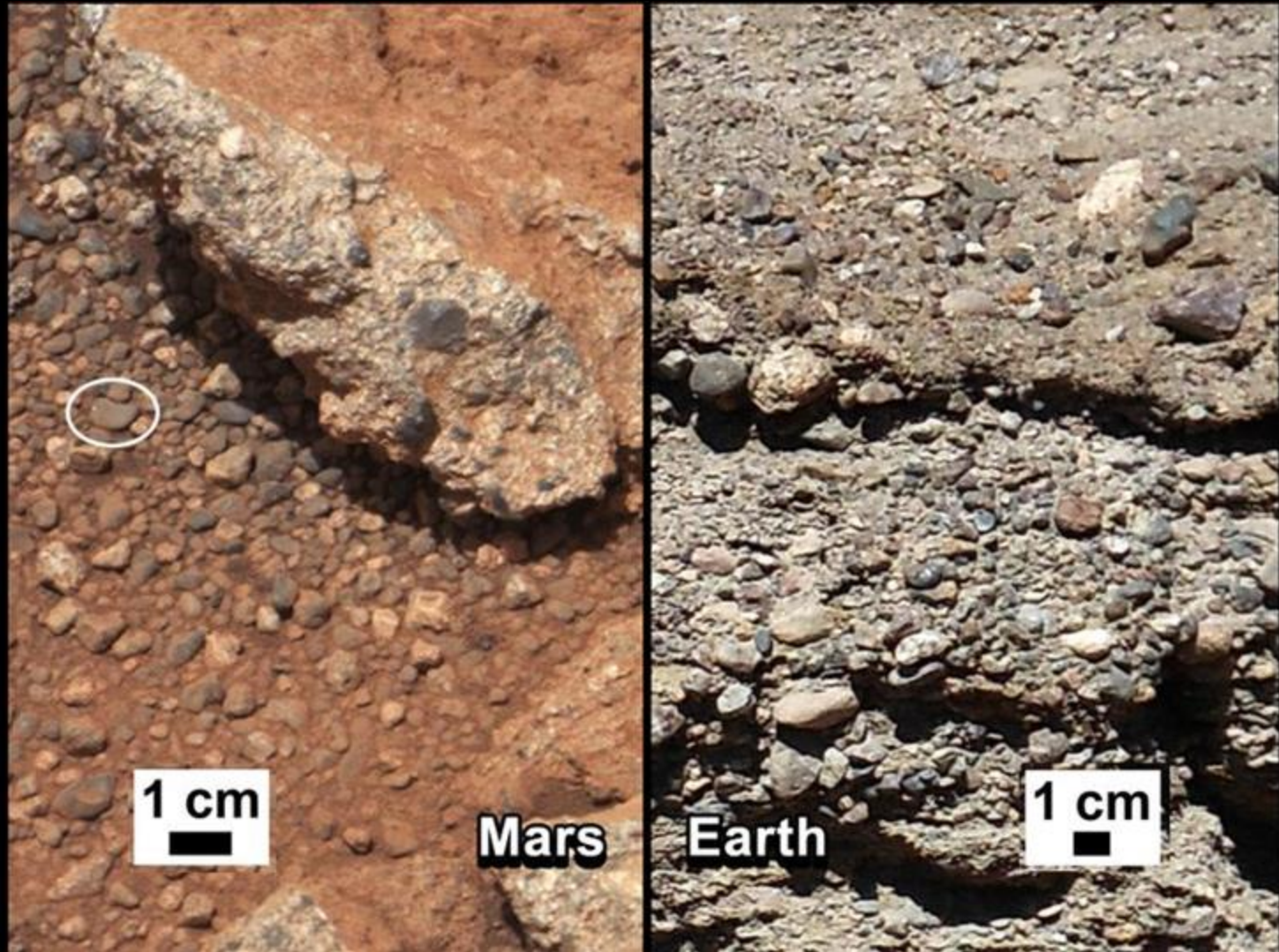
Froid et aride

Chaud et humide



Curiosity

2 septembre 2012



Cailloux arrondis cimentés : **transport actif-durable (érosion) et dépôt sédimentaire par eau liquide ($\approx 1 \text{ m/s}$ - $\approx 90\text{cm}$)**

13 février 2013

Archéen

Hadéen



« Wopmay » rock (Opportunity)

Sulfates + concrétions : **précipitation en présence d'eau liquide**

Environnement non-habitable : eau très acide, faible gradient chimique (peu d'énergie disponible), très forte salinité (ralenti le métabolisme microbien)

« Sheepbed » unit (Curiosity)

Concrétions + veines de Ca-sulfates : **précipitation en présence d'eau liquide**

Environnement habitable : pH neutre, sulfates + sulfures (énergie), faible salinité

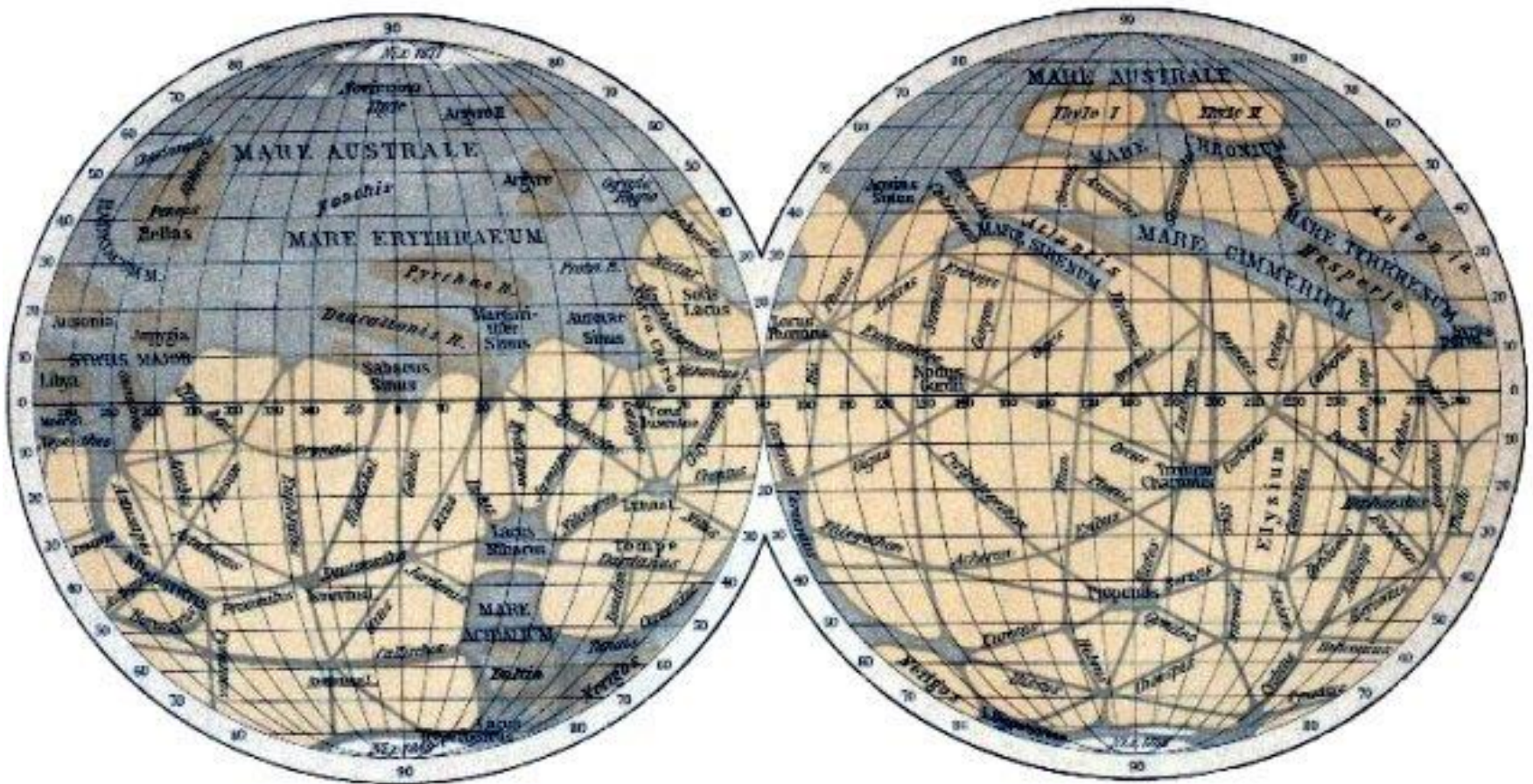
La vie sur Mars :

- actuelle : surface ou sous-sol ?
- fossile ?

Les canaux martiens

- 1695 : Huygens : vie sur Mars
 - 1686 : de Fontenelle « Entretiens sur la pluralité des mondes »
 - C. Flammarion (1842 - 1925) « La pluralité des mondes habités » et « La planète Mars et ses conditions d'habitabilité »
 - 1858 : Père Secchi : une large tache triangulaire très sombre $\Rightarrow$ «canali »
 - Schiaparelli (1877): « canali » $\Rightarrow$ canaux
-

Cartes de Mars dessinée par Schiaparelli



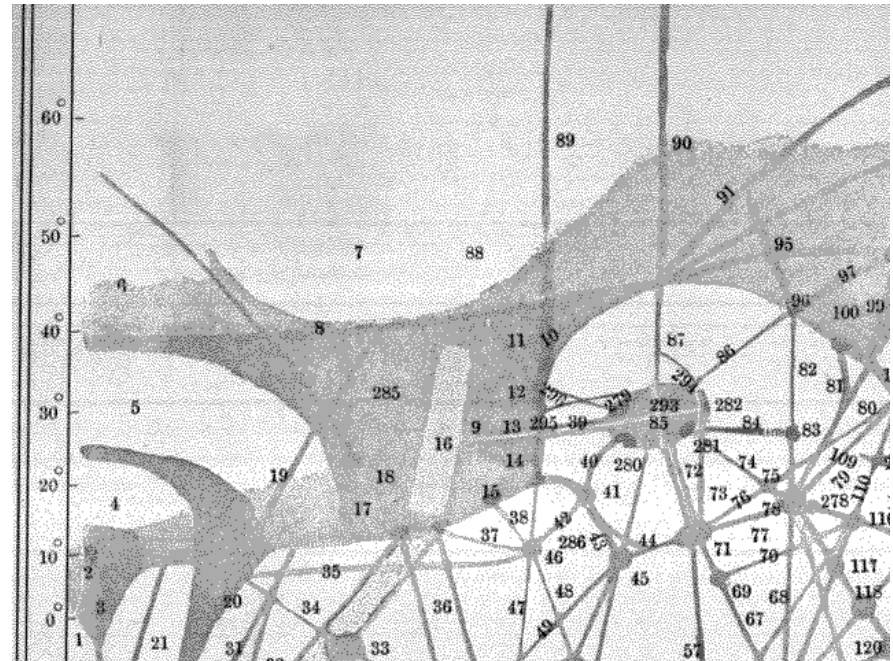
Travaux de G. Schiaparelli (1888) et E. Antoniadi (1909)

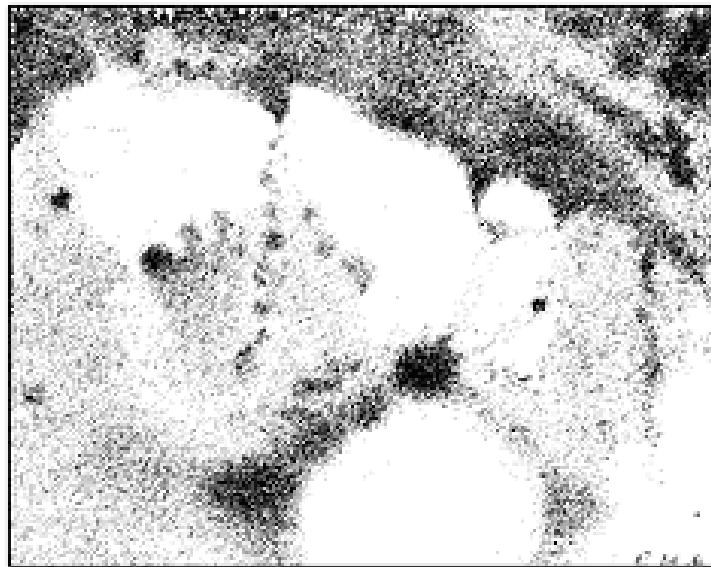
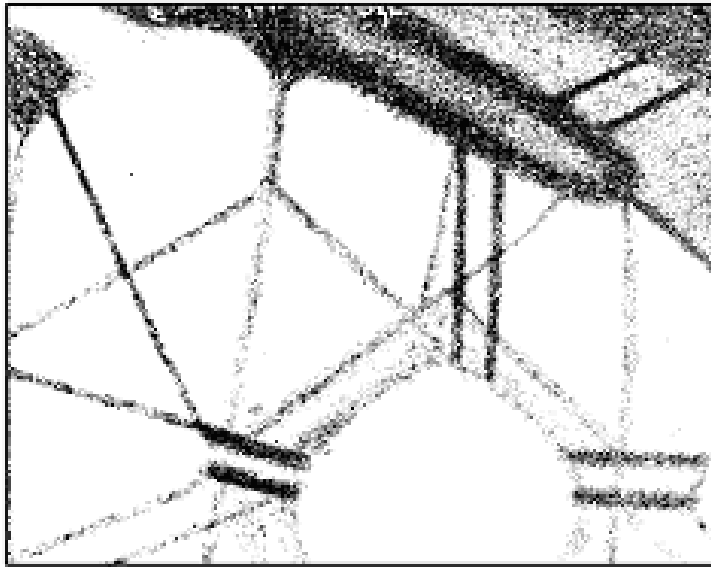
Percival Lowell

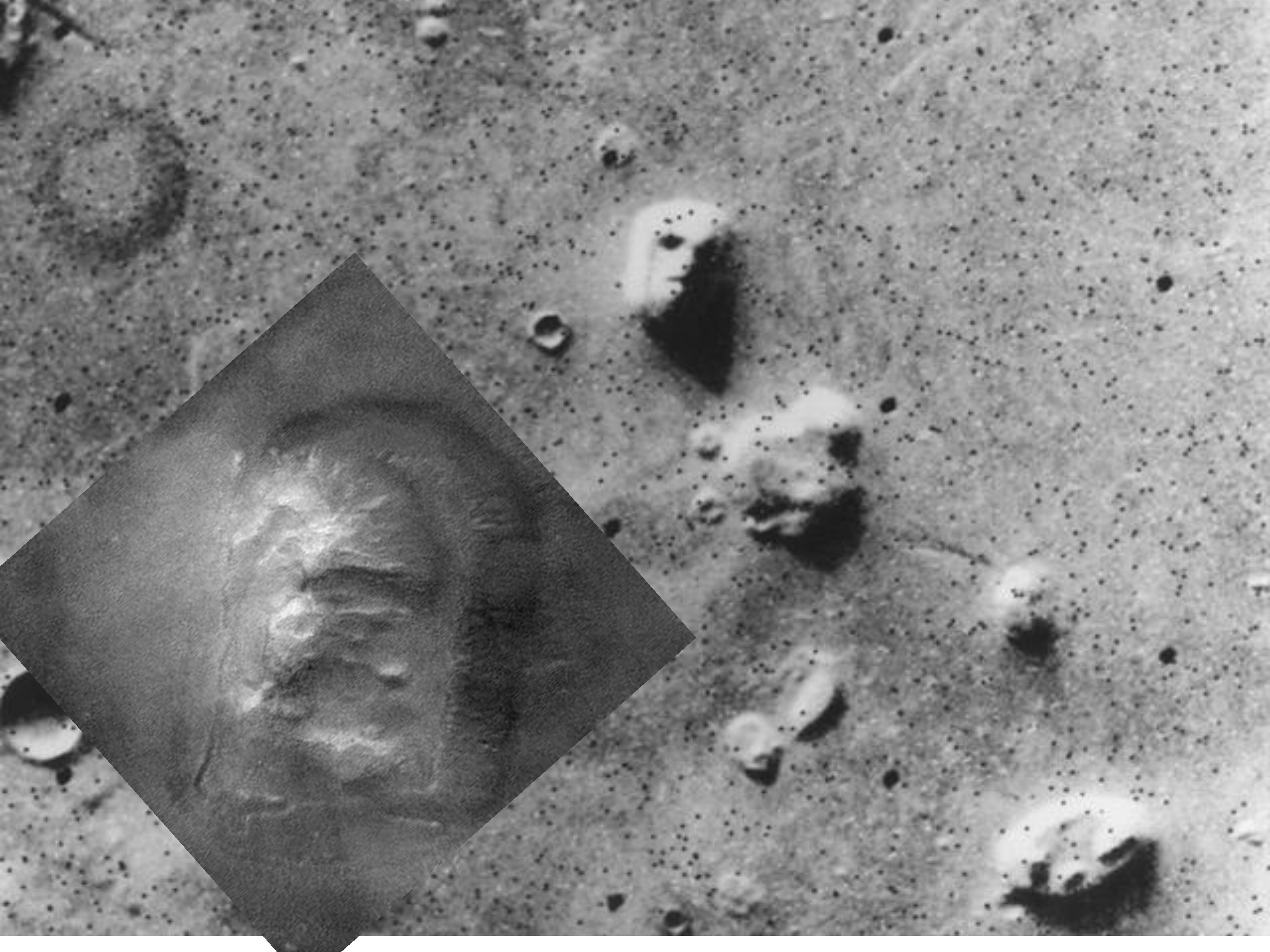


Percival Lowell

- Canaux = Vaste système d'irrigation/oasis. Idée d'une civilisation en décadence
- Earl C. Slipher
- 1909 : Eugène Antoniadi découvre la nature illusoire des canaux
- Qualité moyenne des instruments utilisés + influence psycho.







Le principe de détection de vie des Viking (1976)

■ Hypothèse: l'activité microbiologique doit impliquer la libération (ou la consommation) de H_2 , O_2 , CO_2 , CO , CH_4 , H_2S , NO , et $N_2O \Rightarrow 4$ expériences :

- ❑ PR (Pyrolytic-Release Experiment) :
détection de composés organiques
produits par la vie
- ❑ GEX (Gas Exchange Experiment) :
détection de la consommation ou
libération de gaz
(fixation du C) liées à la vie
- ❑ LR (Labeled Release Experiment) :
détection de l'utilisation de
nutriments par la vie
- ❑ GC-MS (Gas Chromatograph/Mass
Spectrometer) : détection de matière
organique



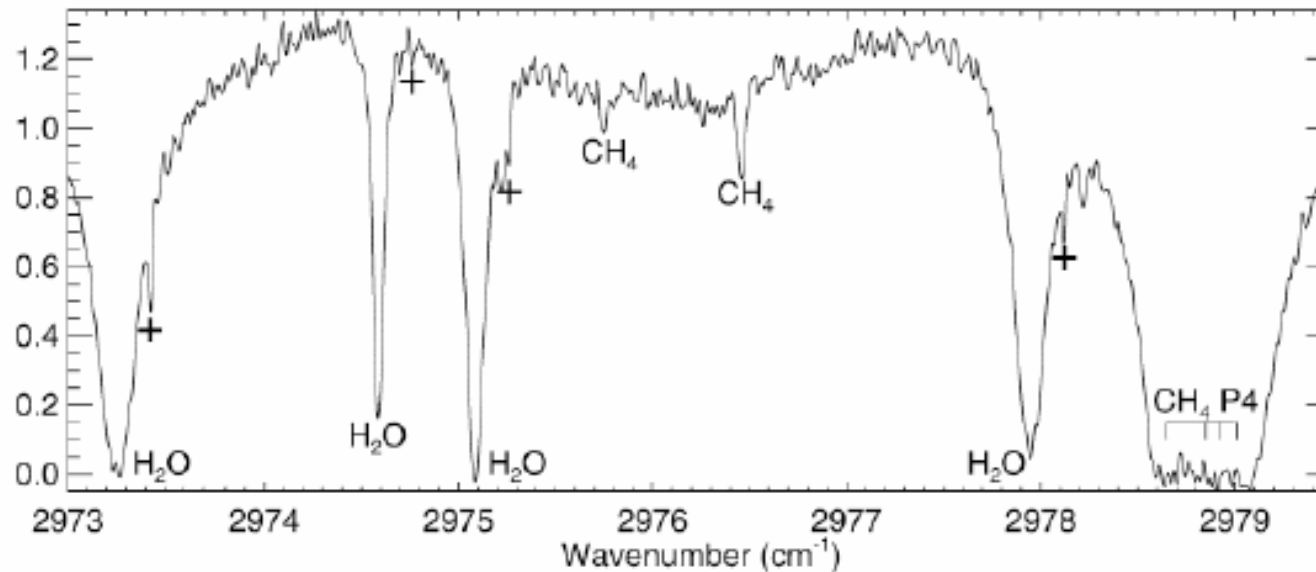
Résultats des expériences biologiques des atterrisseurs Viking

Nom de l'expérience	Résultat	Témoin	Interprétation
Pyrolytic Release (PR)	Détection de carbone	Détection de carbone	Pas de vie, la fixation du carbone atmosphérique est expliquée par l'action catalytique de la maghémite (oxyde de fer).
Gas Exchange (GEX)	Emission d'oxygène	Emission d'oxygène	Pas de vie, l'émission d'oxygène est expliquée par l'action de molécules oxydantes.
Labeled Release (LR)	Emission de gaz	Pas d'émission	Résultat compatible avec une activité biologique !

Gas-Chromatograph Mass-Spectrometer (GCMS)

- Hyp : là où il y a de la vie, on doit détecter des composés organiques
 - Analyse du sol martien par GC-MS $\Rightarrow$ aucune présence d'un quelconque composé organique !!! Très surprenant au vu des résultats des autres expériences (ou l'inverse !!).
 - Question sur le fctmt de GC-MS ? Capable de détecter les produit de nettoyage ayant servi à le stériliser !!!
 - Tous les résultats positifs de Viking peuvent s'expliquer par des processus non biologiques. L'activité du sol martien est attribuée à des substances oxydantes.
 - Expériences par forcément bien imaginées au vus des connaissances actuelles : la surface de Mars est un milieu très hostile à cause du rayt UV
 - LR : vie dans le sous sol ???
-

Du méthane dans l'atmosphère



- Obs au sol & Mars Express : détection du CH₄
- Source possible: bactéries méthanogène ou tout simplement volcanisme !



Les météorites martiennes

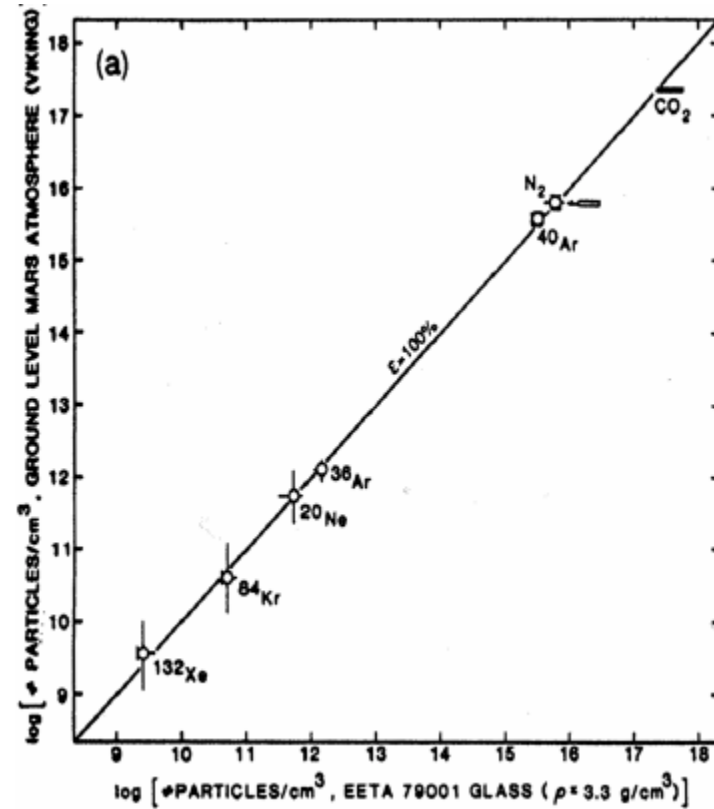


- Météorites SNC (shergottite, nakhlite, chassignite) au nb de ≈ 30 : résultent de la cristallisation de magma

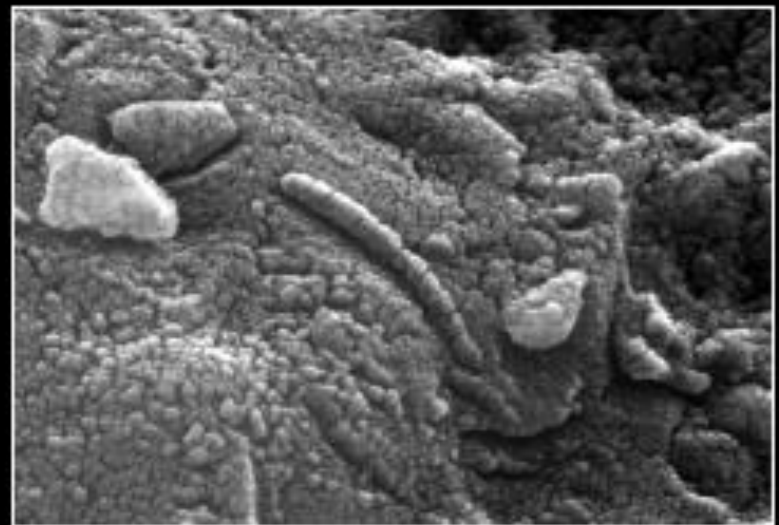
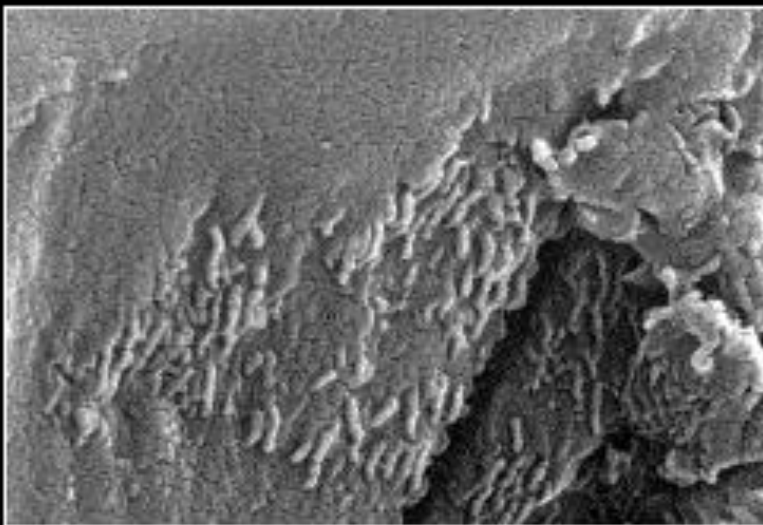
- Plutôt jeune: 0.2 à 1.3 Gy ($\neq$ de la plupart des météorites (4.5 Gy))

- Impact $\Rightarrow$ fonte partielle $\Rightarrow$ verre : analyse gaz enfermés: identique atm Mars

- Toutes les météorites SNC proviennent de Mars

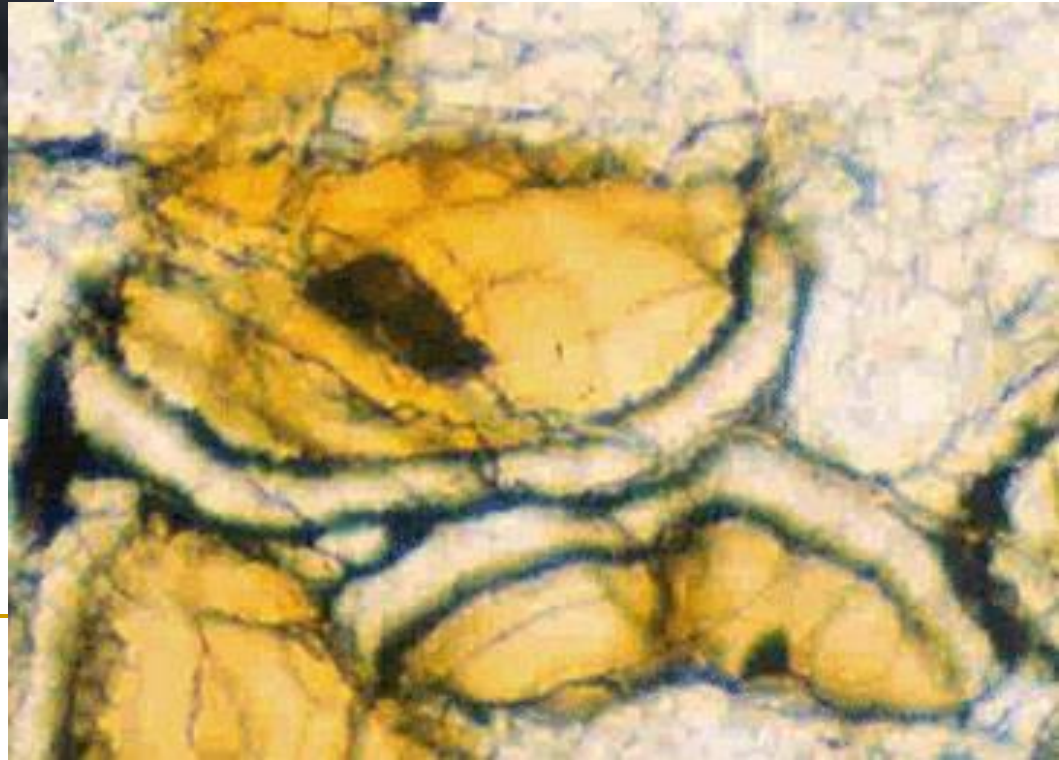


ALH 84001 : la vie dans une météorite martienne ?

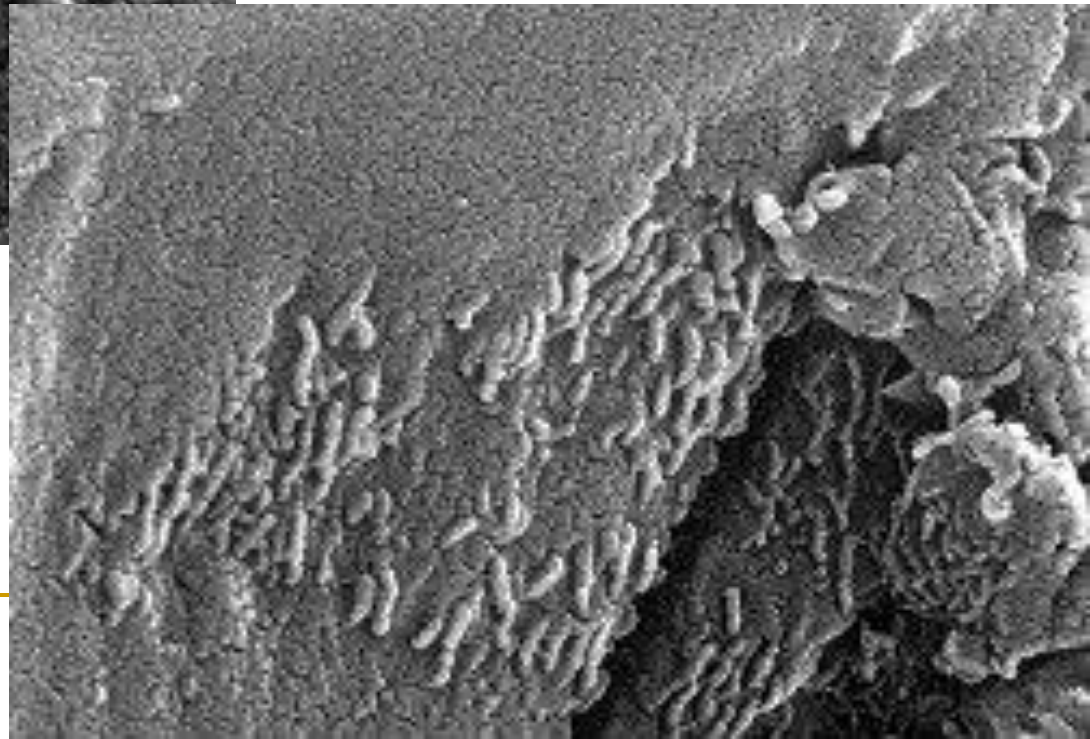
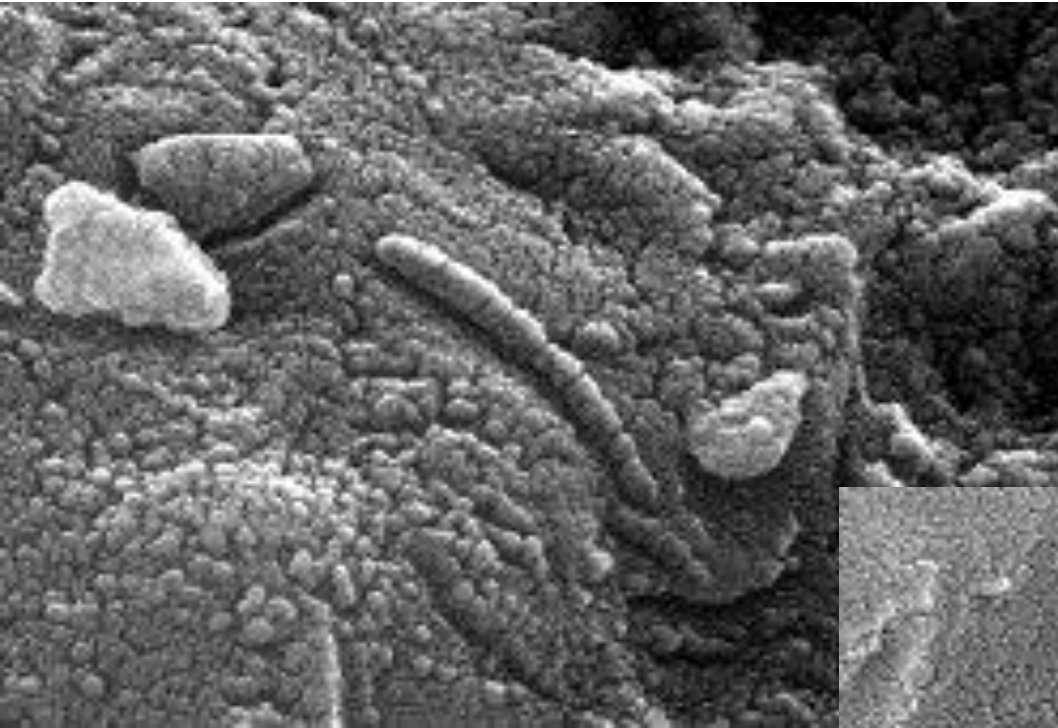


-
- Age ~ 4.5 Gy ($\neq$ SNC). Failles lors d'un impact il y a ≈ 3.6 Gy. La vie se développe (et se fossilise) ds ces failles. Éjection lors d'un impact majeur il y a 15 My.
 - Certaines caractéristiques de cette météorite sont interprétées comme des traces d'ancienne vie microbologique.
 - Cinq « preuves » :
 - ❑ 1-Les globules de carbonate : agrégat cristallin produit par des bactéries
 - ❑ 2-Fossiles de microbes (30 à 400 nm)
 - ❑ 3-Ds les globules carbonés : cristaux de magnétite
 - ❑ 4-Présence simultanée de carbonate, sulfure de fer et oxyde de fer
 - ❑ 5-Matière inorganique et complexe carboné (PAH) pouvant avoir été produit par être vivant . En fait fréquent sur les météorites classiques, pas forcément significatif pour vie.
-

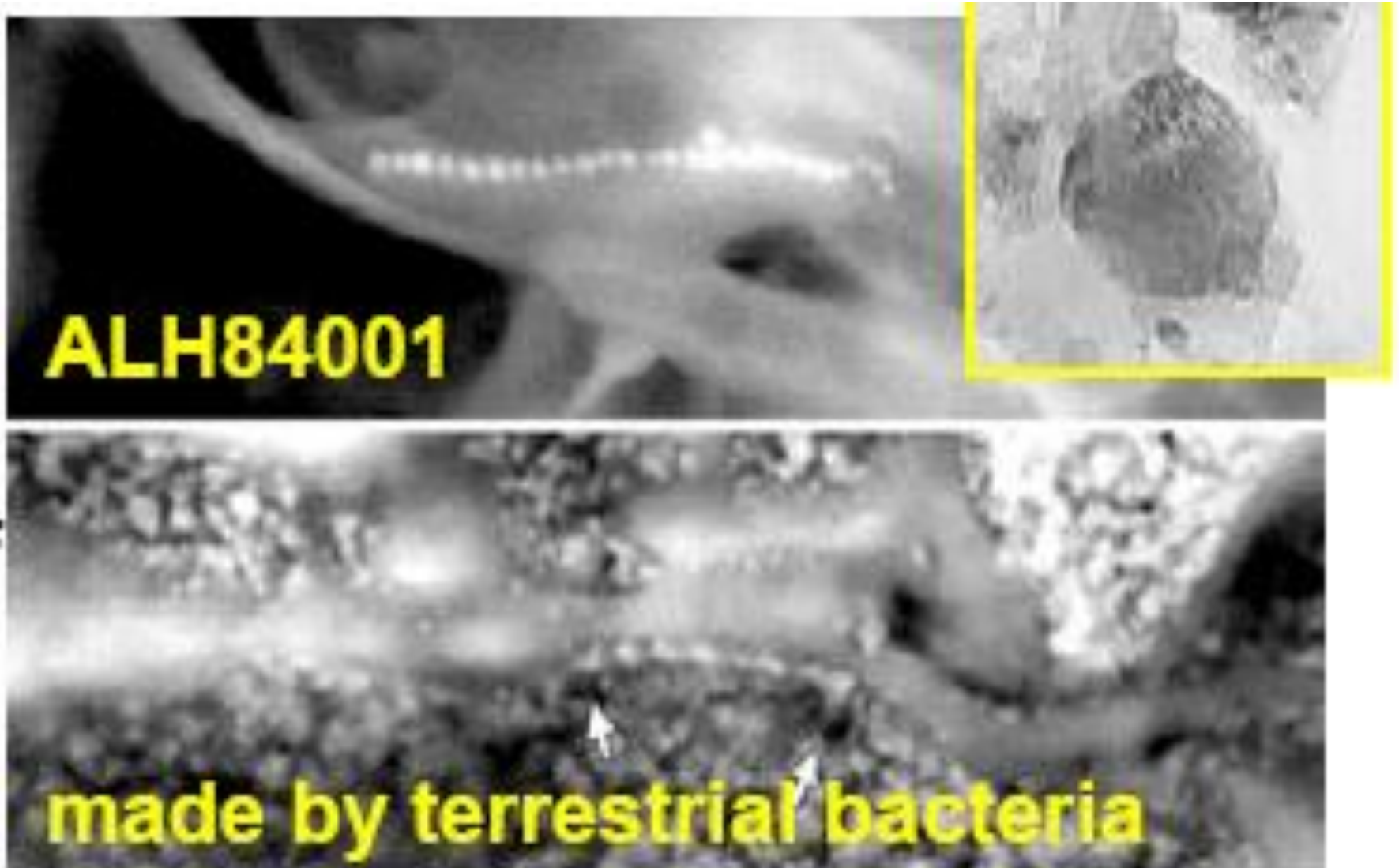
Les globules carbonés



Fossiles de microbes ?

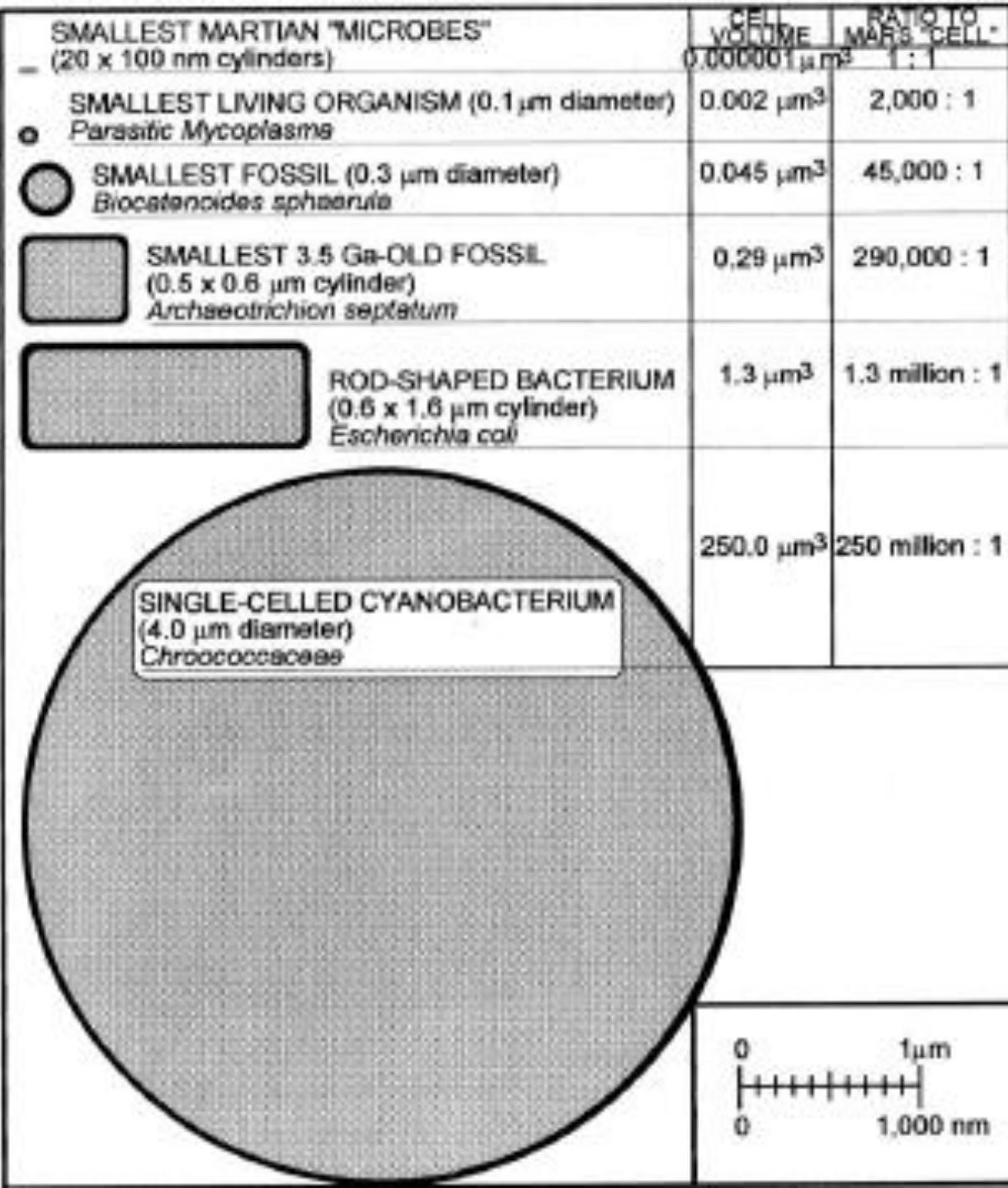


Cristaux de magnétite

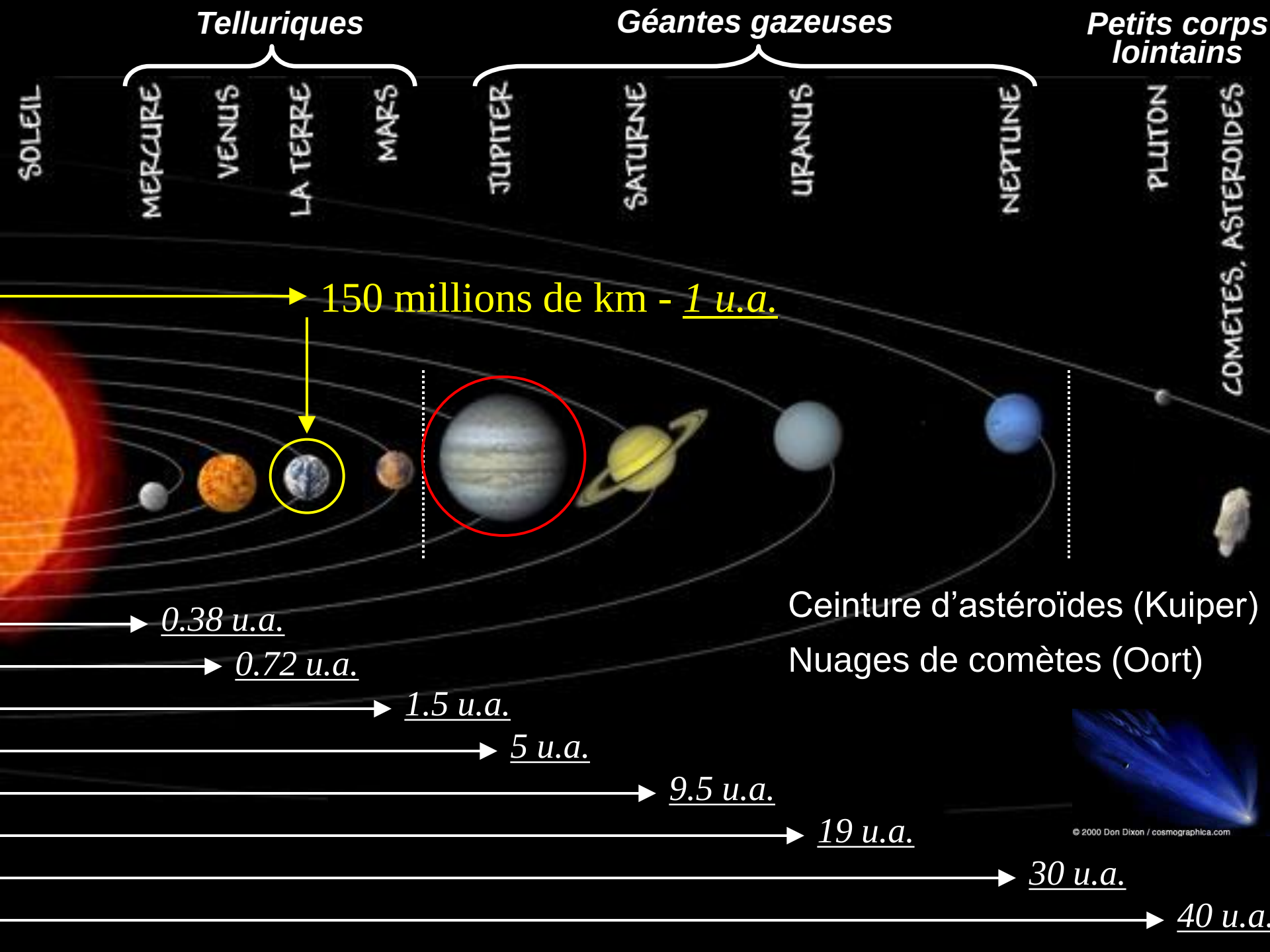


Contre arguments

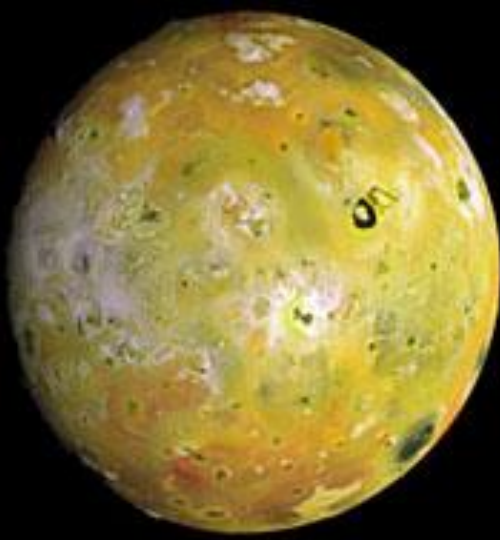
- 1- **Globules de carbonate** : peuvent être déposés par des fluides à haute température lorsque des minéraux ont fondu lorsque ALH84001 a été éjectée dans l'espace. Peuvent aussi se former sur Terre sans bactérie.
- 2- **Nanofossiles** : difficile de trouver des fossiles si vieux (3.9 Gans) sur Terre. Alors en trouver dans un échantillon de 30 roches est peu probable. Probablement un artefact chimique ou minéralogique, voire même par le microscope électronique! 10 à 100 fois plus petit que bactérie similaire sur Terre. Pb des nanobactéries sur Terre ?
- 3- **Cristaux de magnétite** ????? Seul élément tangible ?
- 5- **PAH** : En fait, fréquent sur les météorites classiques, pas forcément significatif pour vie. Contamination possible avec les glaces de l'Antartique.



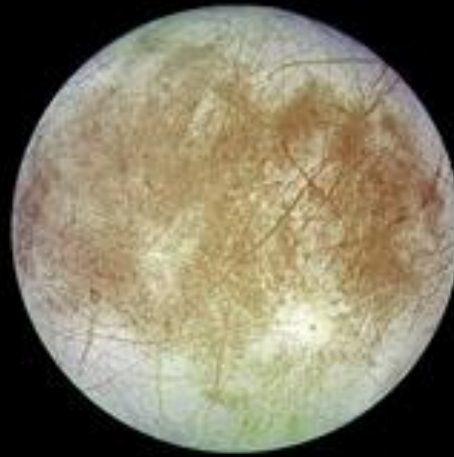
Jupiter - Europe



Les grands
satellites
de Jupiter



Io



Europa



Earth's Moon



Ganymede



Callisto

Europe (Jupiter)

orbite : 670900 km de Jupiter

diamètre : 3138 km

masse : $4,80 \cdot 10^{22}$ kg

Composition : glace d'eau

Très peu de cratères

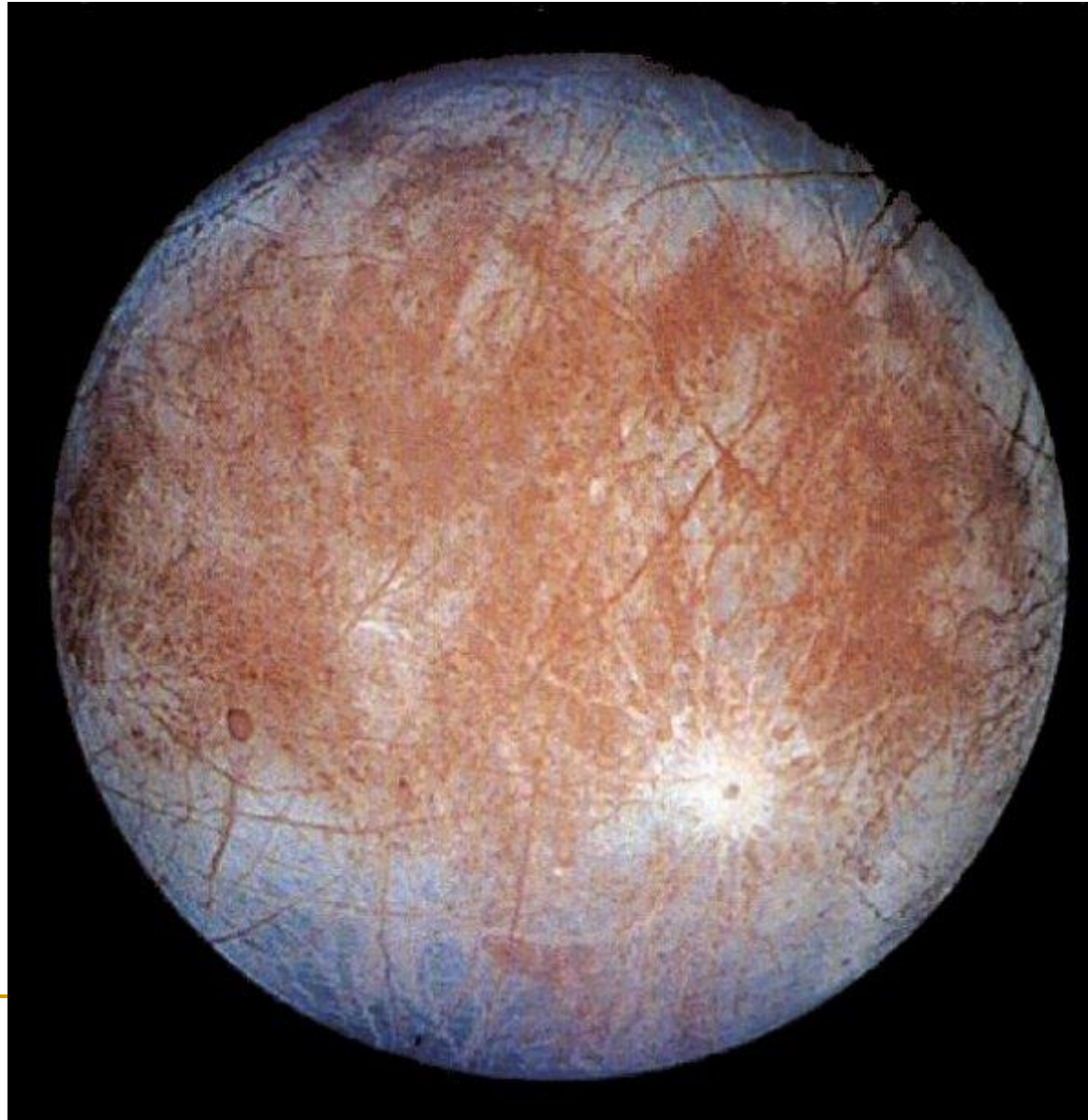
Relief TRES doux ($< 1\text{km}$)

La surface d'Europe ressemble
à de la banquise terrestre

Parcourues de fractures

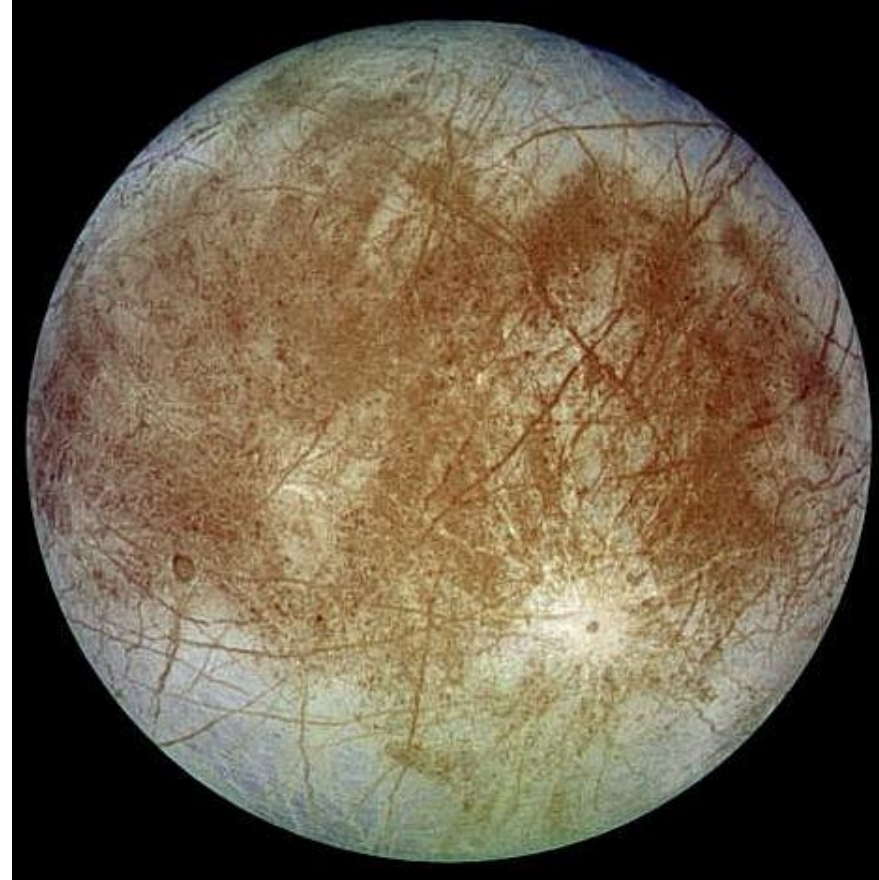
Teintes rougeâtres : silicates + sels

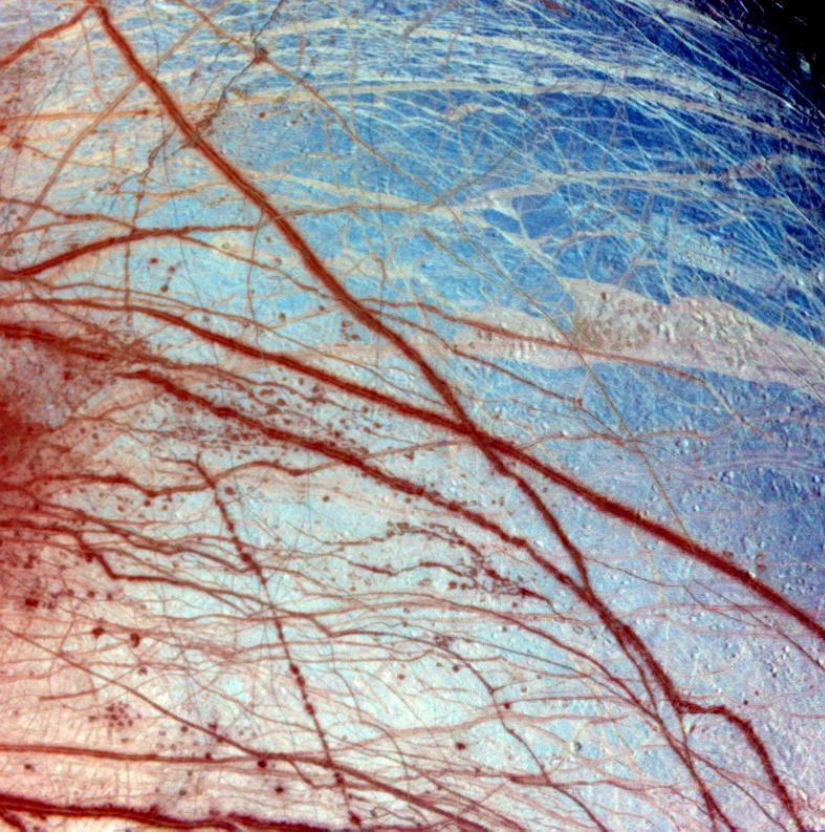
Surface de Europe très hostile :
Radiations du Soleil



Europe

- Cratères d'impact peu nombreux + albédo ≈ 0.7
 - Surface glacée jeune (50 Mns).
 - Température : 80 à 130 K
- Mouvement, tectonique, failles, ...Couche de glace d'eau salée (non unif) flottante
- Pas de saison
- Chp B: mvt d'un cœur de Fer ou océan salé au dessous de la glace





Détail de la surface d'Europe vu par Galiléo

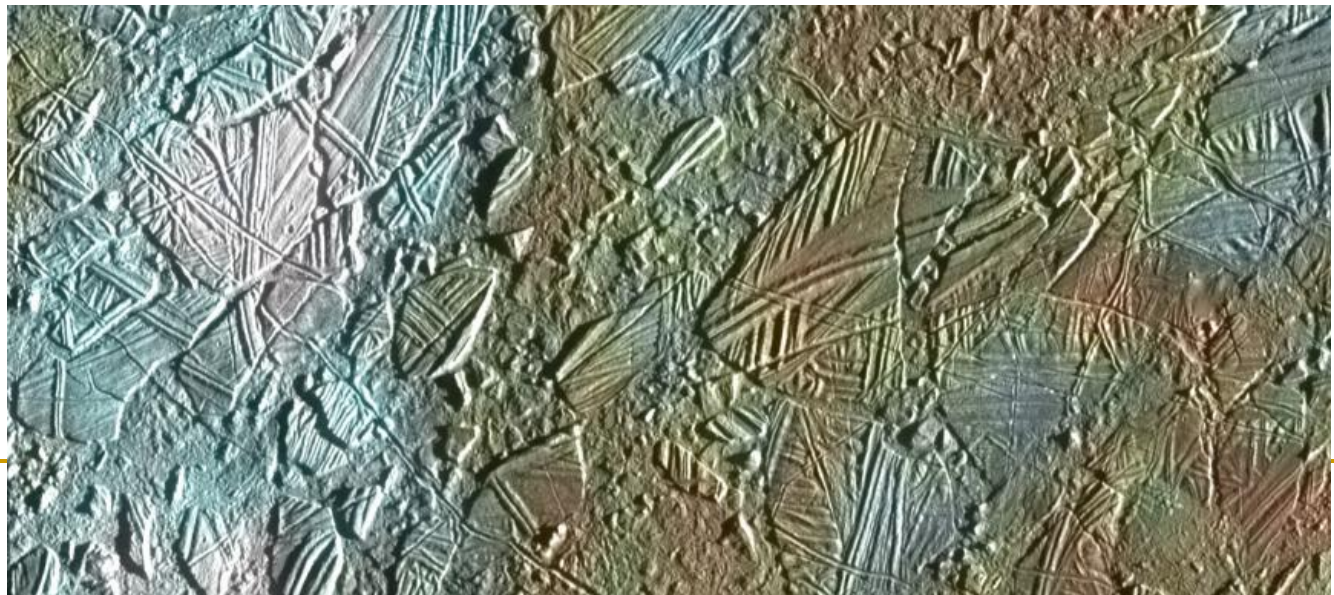
Teinte bleue : glace

Teinte rouge : silicates, sels

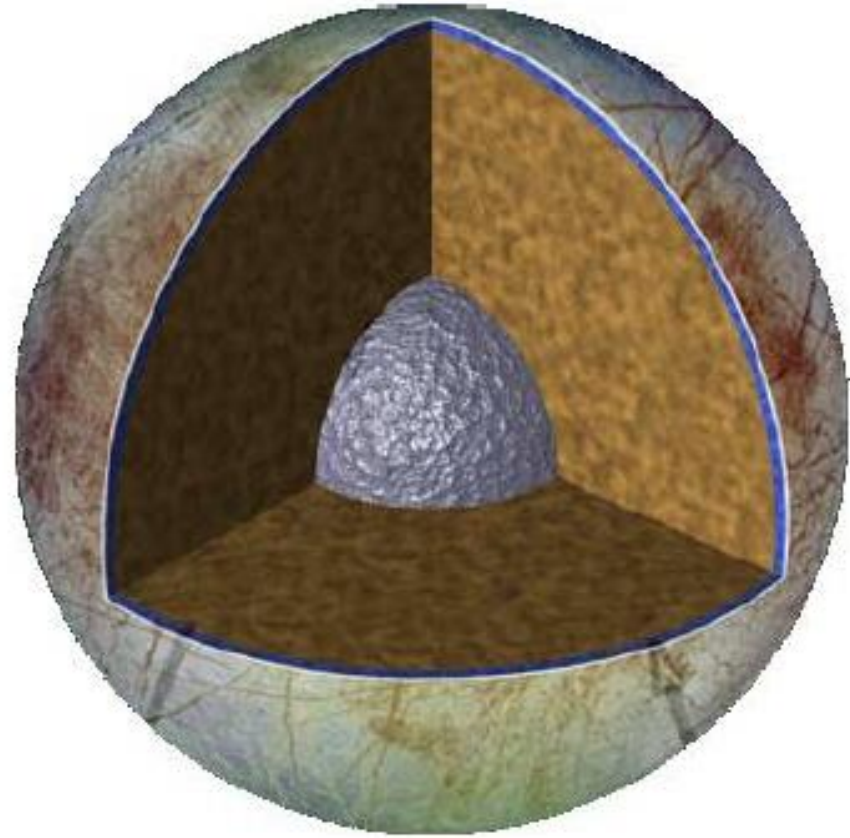
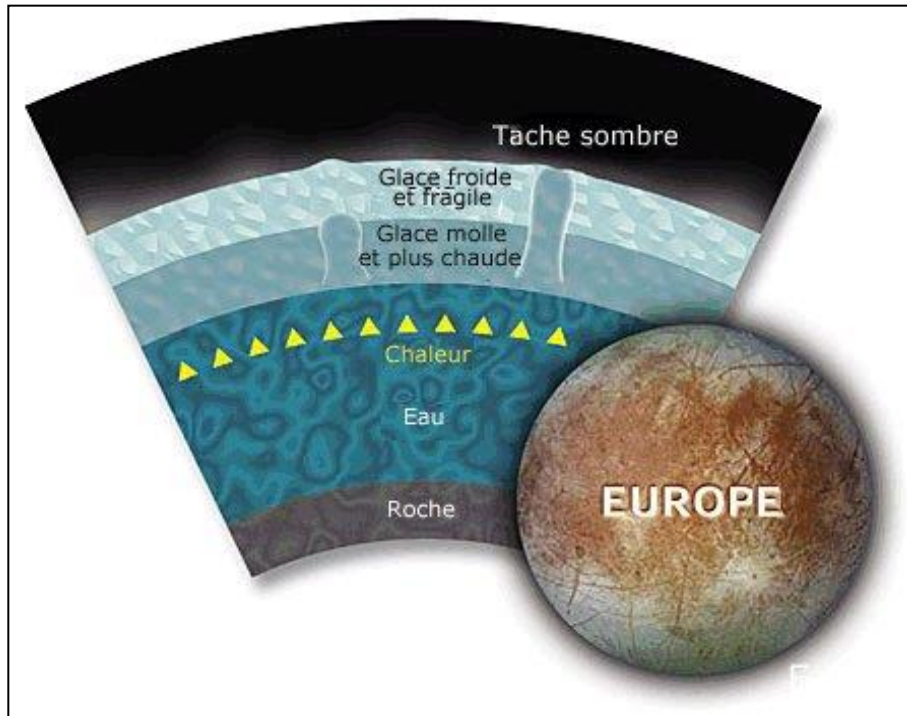
Les marées forment des fractures en surface

On suspecte fortement un océan souterrain sous la croûte

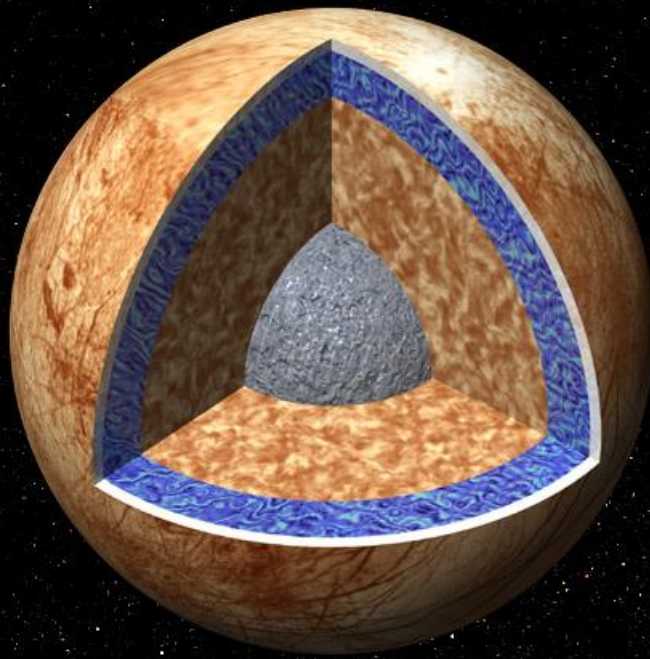
On a détecté en surface des minéraux hydratés => l'eau liquide remonte en surface en quelques endroits.



Structure d'Europe

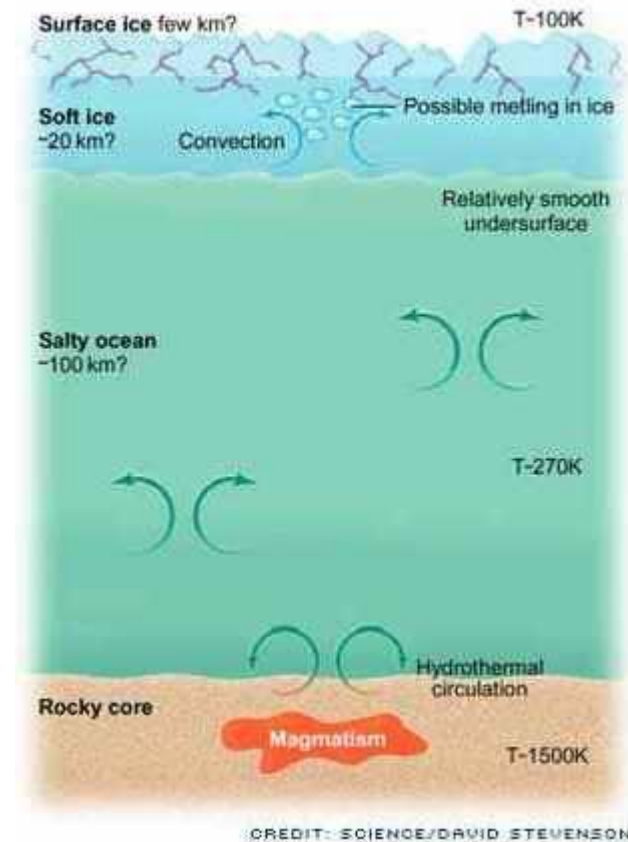


- Croûte riche en eau : $\approx 80\text{-}170$ km d'épaisseur
- Manteaux rocheux $\approx 700\text{-}1300$ km d'épaisseur
- Cœur ferreux rayon $\approx 200\text{-}700$ km.



The Interior of Europa

© Copyright 1999 by Calvin J. Hamilton



CREDIT: SCIENCE/DAVID STEVENSON

Un cœur métallique, une couche de roche, un océan souterrain, une enveloppe de glace.

PB : Quelle est l'épaisseur de la croûte ??? Entre 100m et 10 km ...

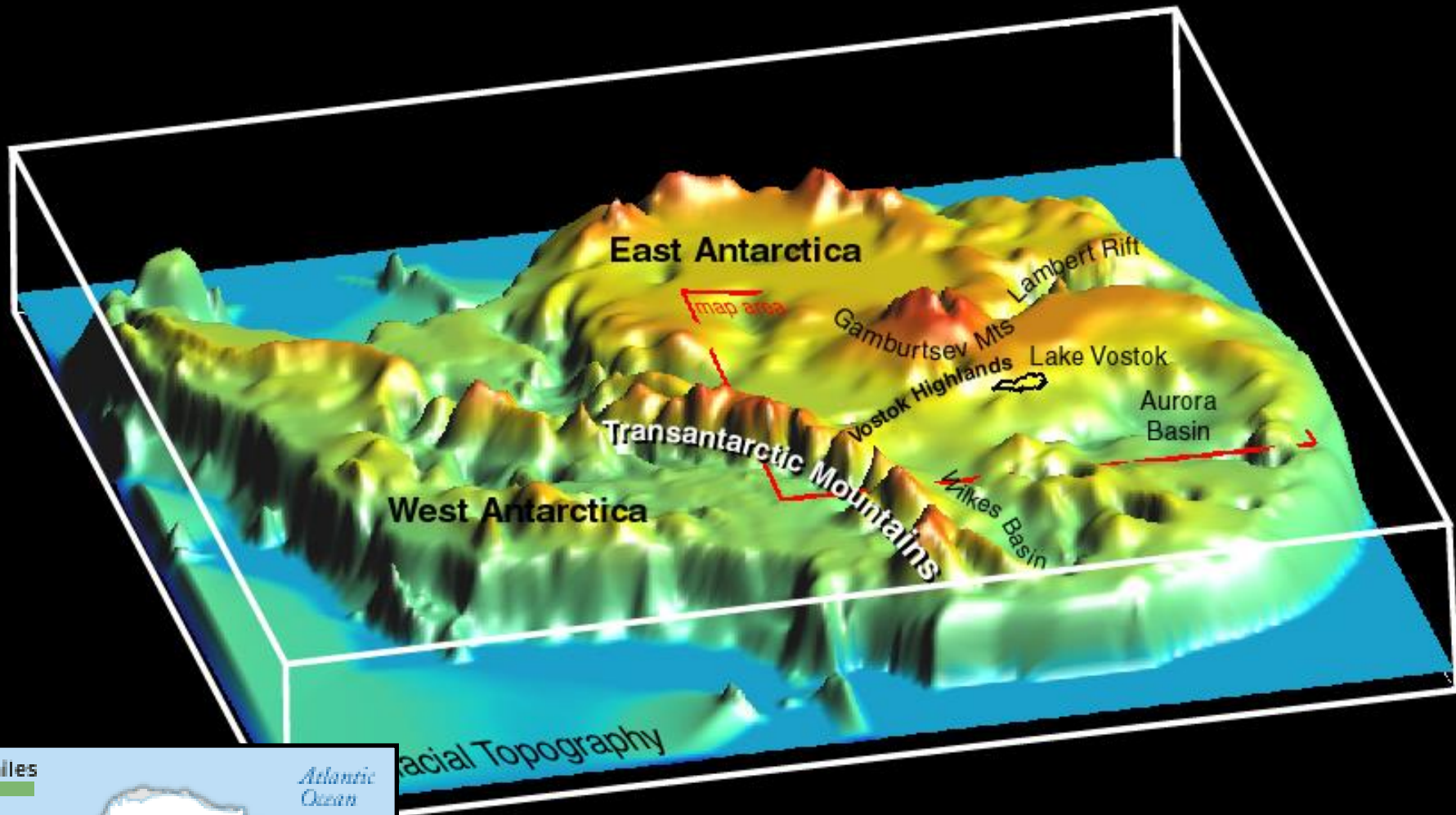
Problème pour la vie : d'où peut venir l'énergie pour assurer la vie dans cet océan hypothétique ? Lumière : pas assez, réchauffement par marées ? Présence de peroxyde (H_2O_2) ? Difficile à estimer.

La vie sur Europe

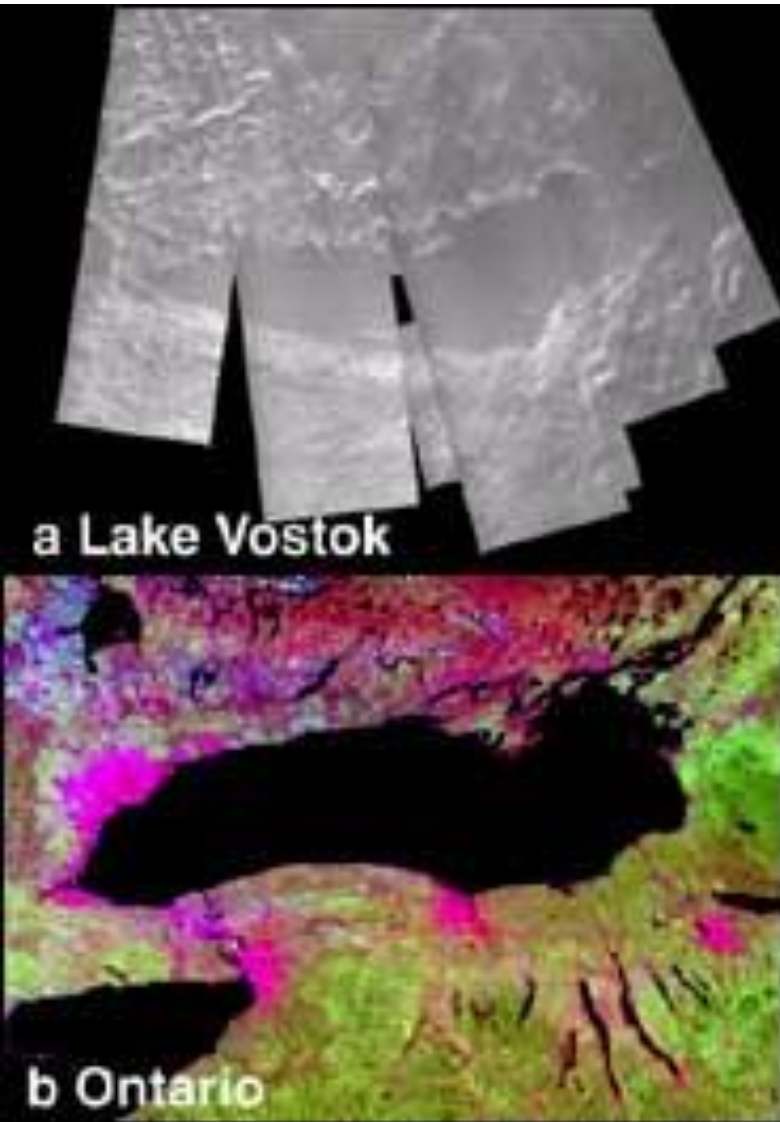
- Sources d'énergie éventuellement disponibles sur Europe pour le devpt de la vie ?
- Chimie radiative sur H_2O crée des oxydants :
 - ❑ H_2O_2 (eau oxygénée) détecté
 - ❑ HCOH (formaldéhyde) prédit
 - ❑ Décroissance radioactive du $^{40}\text{K} \Rightarrow \text{H}_2, \text{O}_2$
- Sources d'éléments biotiques:
 - ❑ CO_2 capturé pdt accrétion
 - ❑ Carbone délivré par collision gros corps (bcp sur Ganymède et Callisto)
- Sources hydrothermales sur le manteau rocheux ?
 - ❑ Milieux réducteurs ?
 - ❑ Synthèse de molécules organiques (comme sur Terre ?) ?
 - ❑ Meilleure chance de détecter la vie si l'océan et la surface peuvent communiquer

Lake Vostok : similarités avec Europe ?





Le lac Vostock est un « grand lac »



- Longueur 230 km
- Largeur moy 60 km
- Profondeur
 - min. <10 m
 - max. 510 m
 - moyenne 130 m
- Surfa 14,000 km²
- Volume 1,800 km³
- Épaisseur de la glace: 3750-4200 m
- Le plus grand des 68 lacs sous glaciaires de l'Antarctique

LAKE VOSTOK

Vostok Station



Cored 3623 m

Ice flow

O_2 & CO_2
Hydrates?

Liquid water depth
650-800m

melt water

refreeze

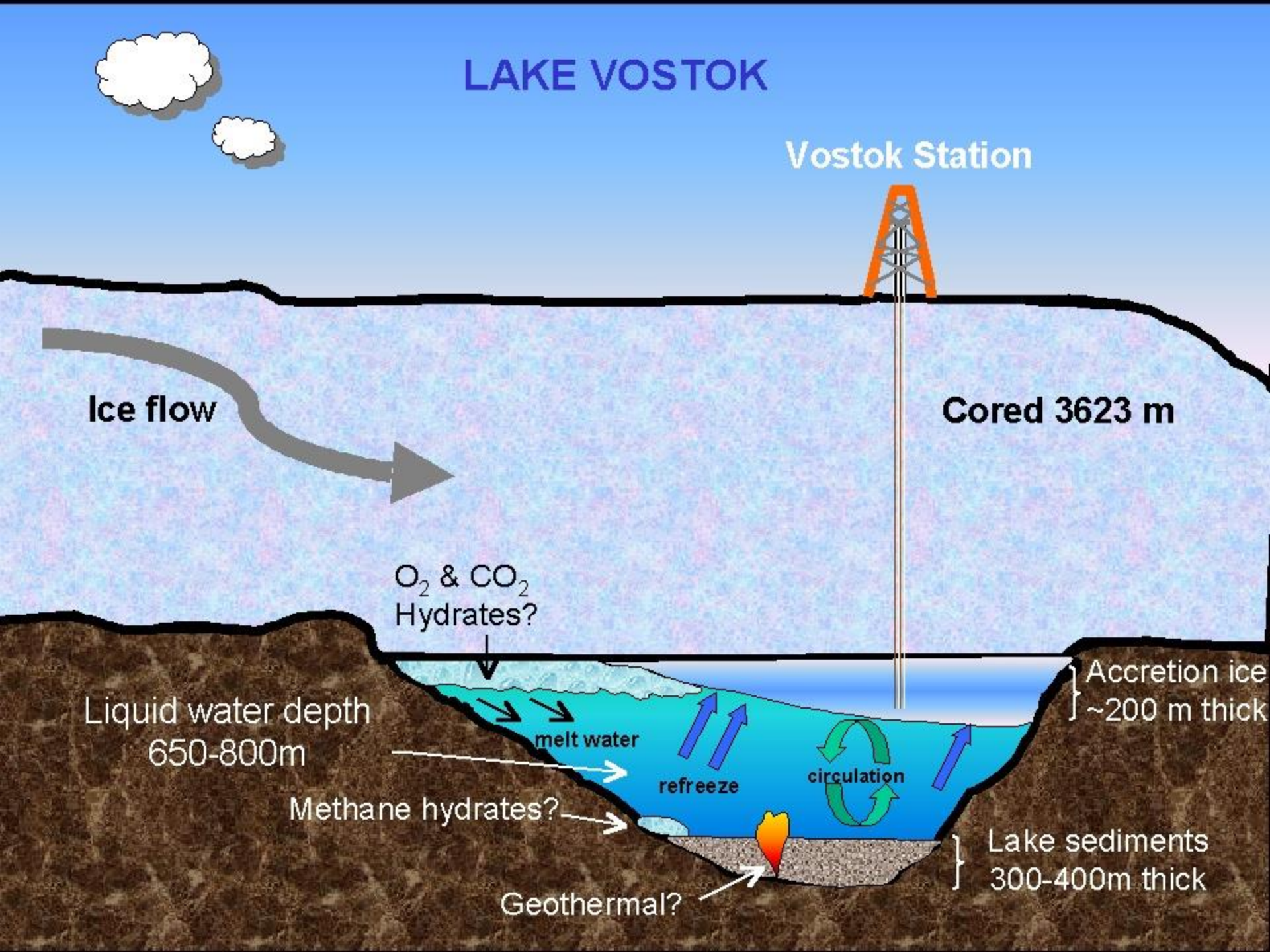
circulation

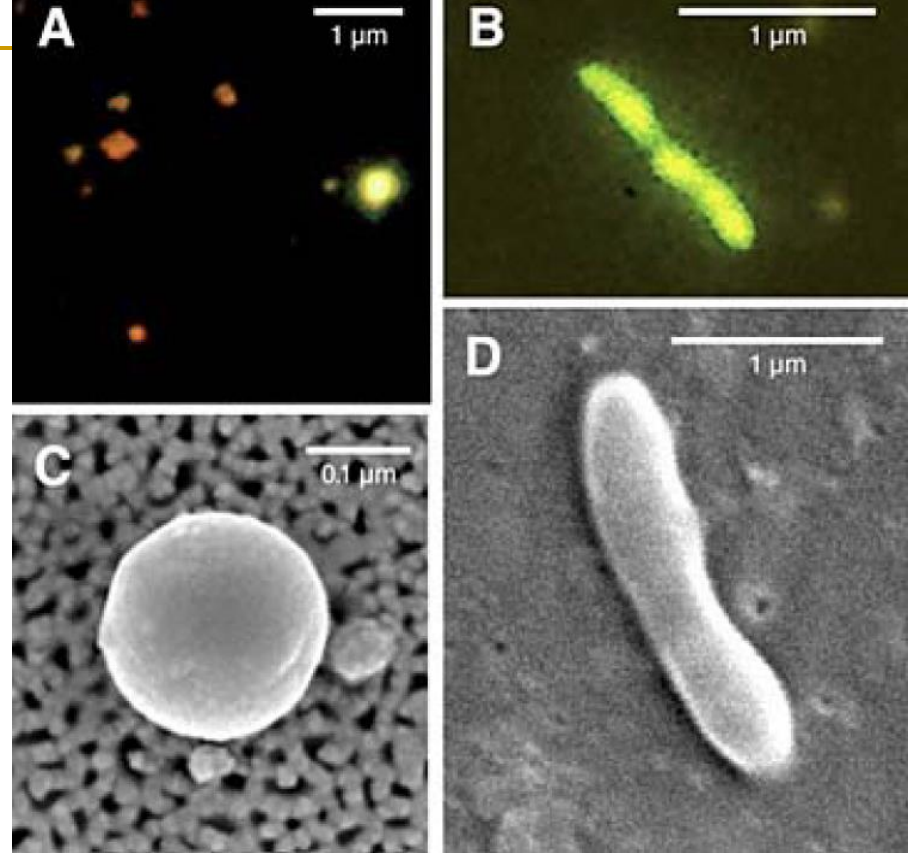
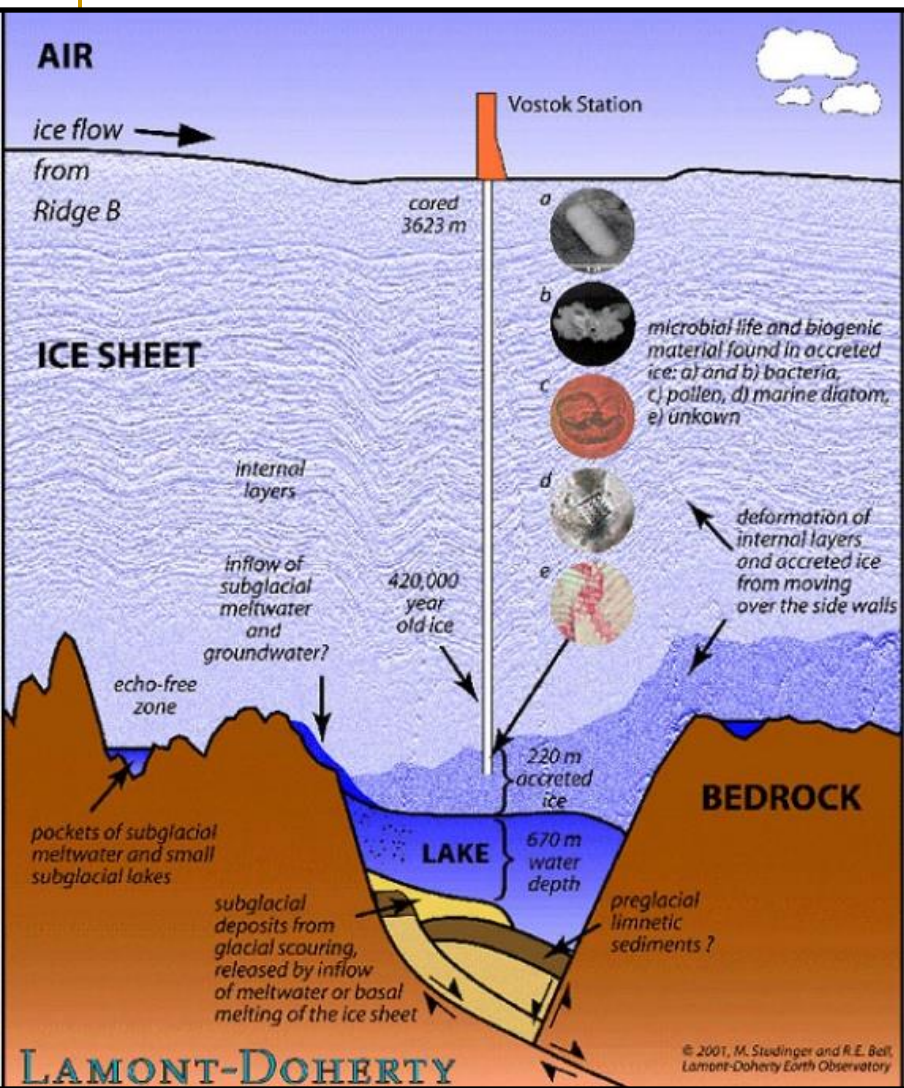
Methane hydrates?

Geothermal?

Accretion ice
~200 m thick

Lake sediments
300-400m thick

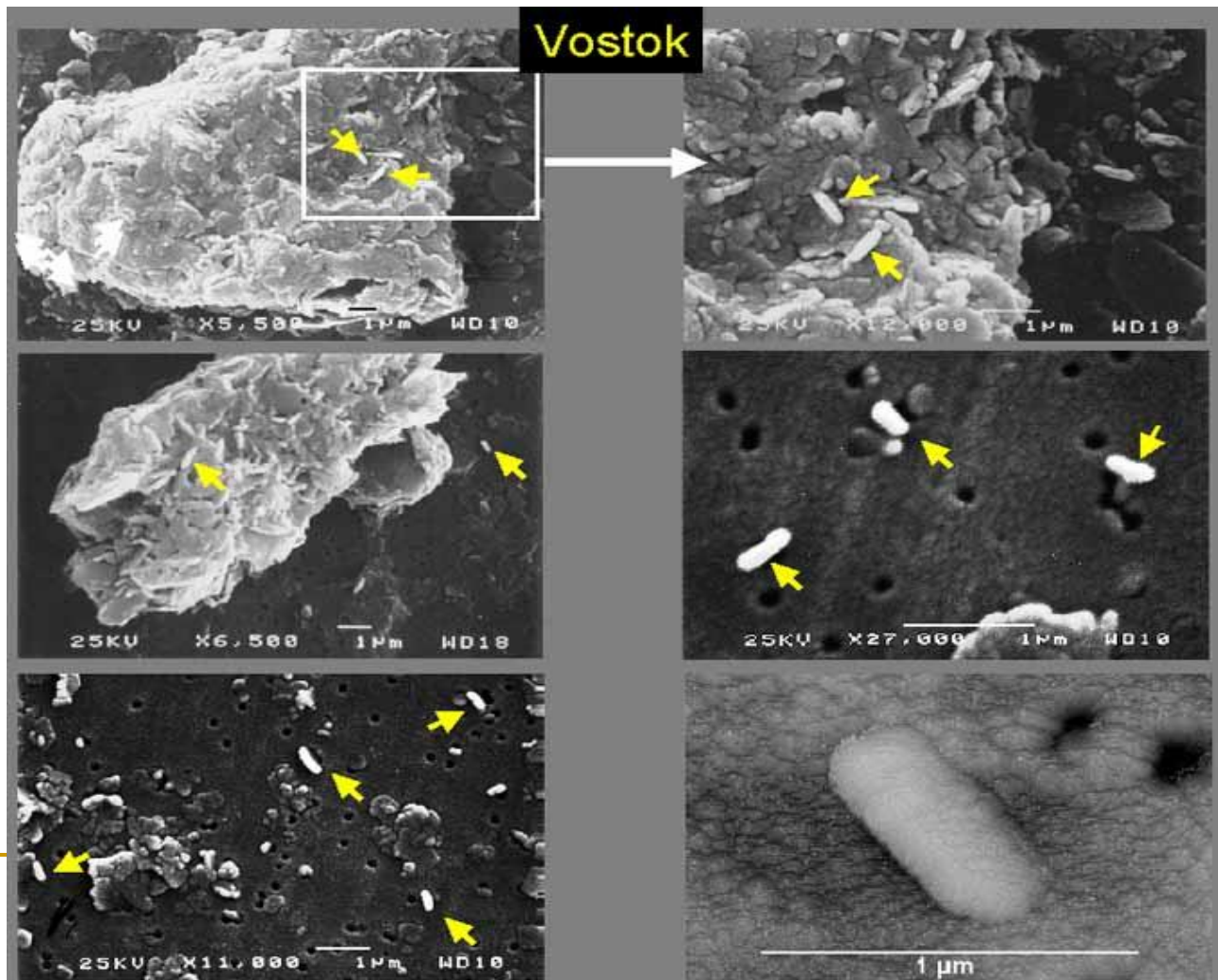




- Vie microbienne ou artéfact ?
- 70% des ADN trouvés appartiennent à l'environnement terrestre et proviennent de contaminations lors des forages.
- 30% des ADN correspondraient à 3 espèces de bactéries autochtones du lac.

- Une espèce : Hydrogenophilus thermophilus, Vie par chimio-lithoautotrophie : oxyde l'hydrogène et fixe le CO_2 , connue pour vivre dans les sources chaudes.
- 2 autres espèces proches des bactéries des sources chaudes.

Photo en
microscopie
électronique à
balayage des
microorganismes
du lac Vostok



Et Europe ?



Et Europe ?
Et Ganymède ? Et Callisto ?
Et Titan ? Et Encelade ? ...



CONCLUSION

Le système solaire est avant tout un lieu de DIVERSITE

Il n'y a que 4 planètes « terrestre », mais plus de 150 satellites qui sont autant de systèmes géologiques à part entière.

Extraordinaire richesse de l'histoire et de l'évolution des planètes.
MAIS multiplicité des facteurs d'évolution :
position, atmosphère, chimie, effets de marée etc...

Un paramètre important : la source d'énergie pour la présence d'eau liquide (surface et/ou interne) et pour l'évolution :

- Etoile centrale
- Radioactivité pour les planètes
- Effets de marée pour les satellites

