

Le paysage

Le paysage, la géologie



Sur Terre, les structures géologiques sont en général recouvertes par le sol, en général de nature biologique, qui les cachent.

Recherche **d'affleurements** : roches nues d'un désert, paroi de montagne, falaises, chaos de rochers. [photo : SaharaMet / R. Péliison]

Le paysage, la géologie

Sur Terre, les structures géologiques sont en général recouvertes par le sol, en général de nature biologique, qui les cachent.

Recherche **d'affleurements** : roches nues d'un désert, paroi de montagne, falaises, chaos de rochers.

Sur les autres planètes : pas de sol (enfin, on en reparlera). C'est un avantage pour l'étude géologique : tout est comme dans les déserts.

Autres moyens terrestres : carrières, mines, et forages, carottes, études sismiques, géophones, propagation d'ondes électromagnétiques.

Carottes (superficielles) : Lune (missions Apollo)

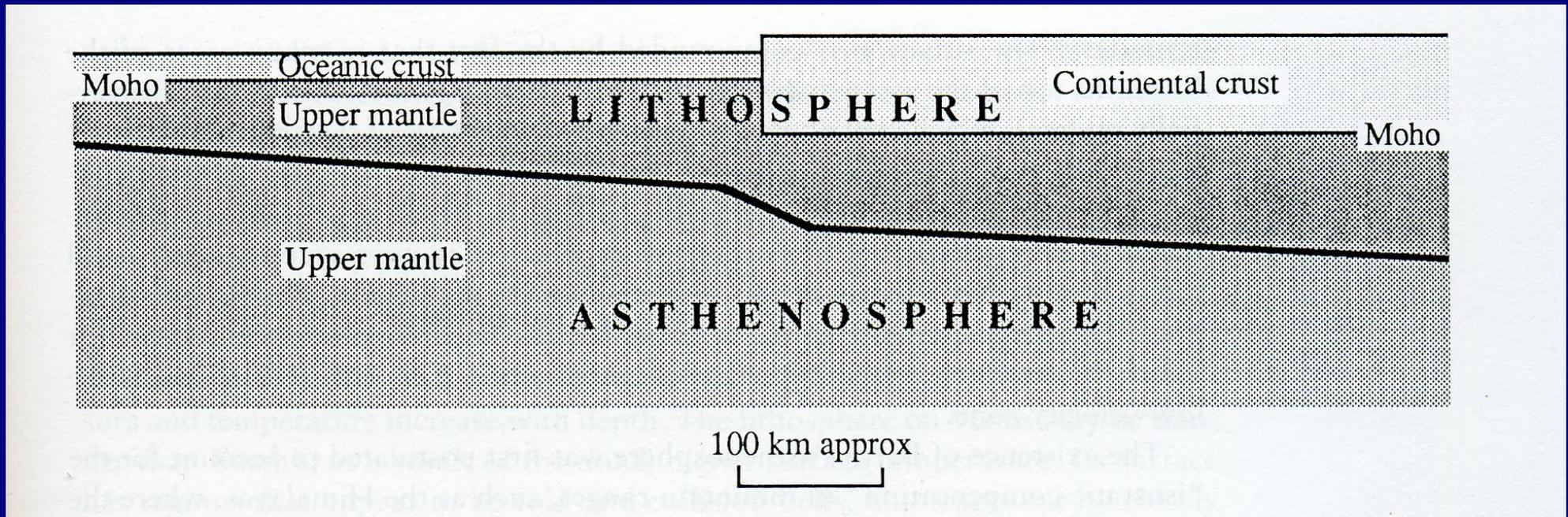
Etudes sismiques, géophones : Lune.

Sondages électromagnétiques : Mars.

Carottes jusqu'à 600m, prospection minière.
[Société Golden Goose Resources, Canada]



La croûte de la Terre et le magma



Lithosphere, couche dure, 70-150 km.

Asthenosphere : couche molle, plus fluide. (distinction physique.)

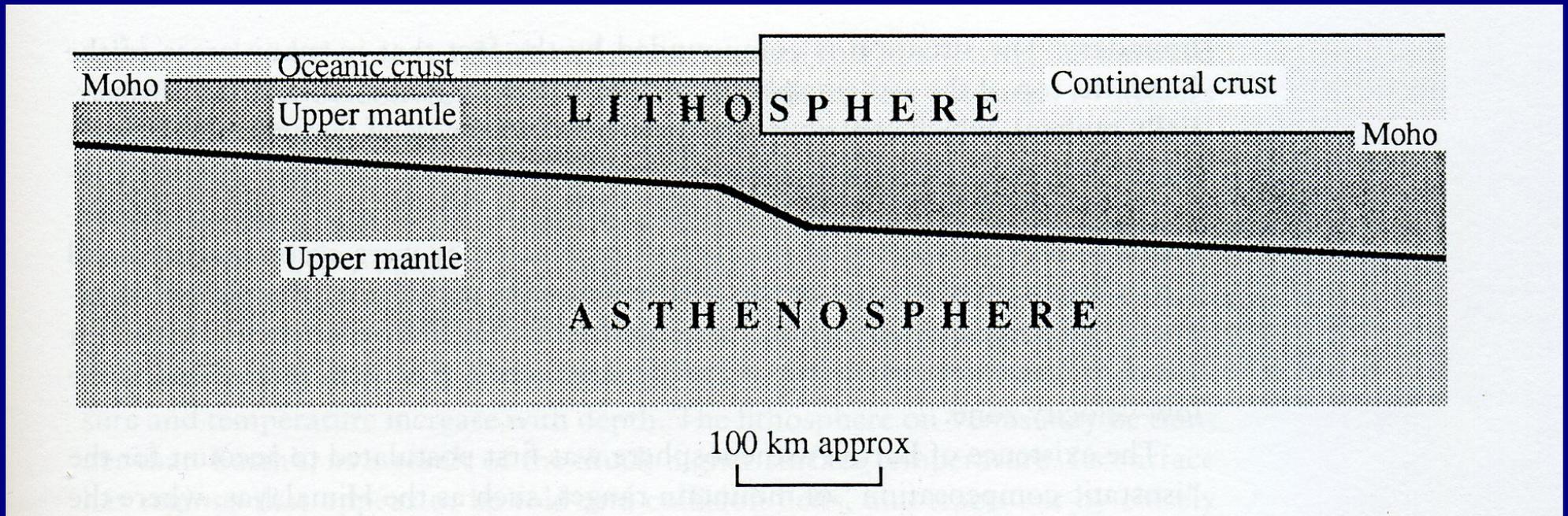
Croûtes : parties de la lithosphere. (distinction chimique.)

Croûte océanique : basalte, gabbro (issu du manteau) densité : 3,2. Epaisseur : 6-12 km.

Croûte continentale : granite et roches associées, densité 2,7 à 3. Epaisseur : 30-70 km.

Equilibre isostatique : ces trucs flottent les uns au dessus des autres.

La croûte de la Terre et le magma



Equilibre isostatique : ces trucs flottent les uns au dessus des autres.

La croûte continentale, moins dense, est plus haute que l'océanique de 3 km. Mais, comme un iceberg, elle s'enfonce également plus en profondeur.

Les roches



Basalte, composant majoritaire de la croûte océanique. Rejeté aussi lors d'éruptions volcaniques.

De la silice (Si O_2), environ 50%.
Feldspath (avec silicates d'aluminium),
pyroxène, aussi de l'olivine etc.



Gabbro. Composition analogue au basalte.
Condition de cristallisation différentes.

Les roches



Falaises en granite
de Yosemite
Valley, Californie.
[Wikipedia]

Granite.

Roche qui a refroidi lentement, entièrement cristallisée.

Composée de quartz (un cristal de silice) à 72%, Feldspath, micas, plagioclases.

densité : 2,7.

Attention, le granit n'est pas forcément du granite. Un granit : terme de marbriers, roche non poreuse, imperméable, qui ne s'effrite pas.

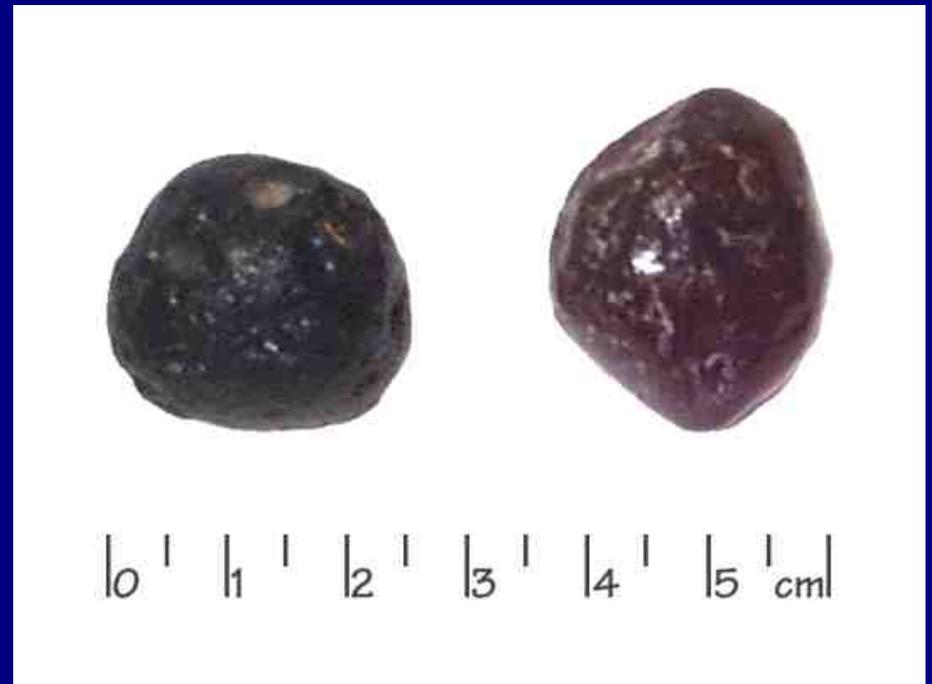
Les roches, la cristallisation

La cristallisation des roches s'opère lors de leur refroidissement, lors du passage de l'état liquide à l'état solide.

Un refroidissement très rapide (par exemple des gouttes refroidies « en vol » ou la surface d'une coulée de lave n'entraîne pas de cristallisation : les molécules n'ont pas le temps de s'organiser. A la limite, on obtient un verre, c'est à dire un milieu aussi désordonné qu'un fluide, mais immobile.

Plus la cristallisation est lente, plus elle donne de gros cristaux.

Sphérules recueillies sur Terre.
Origine volcanique.



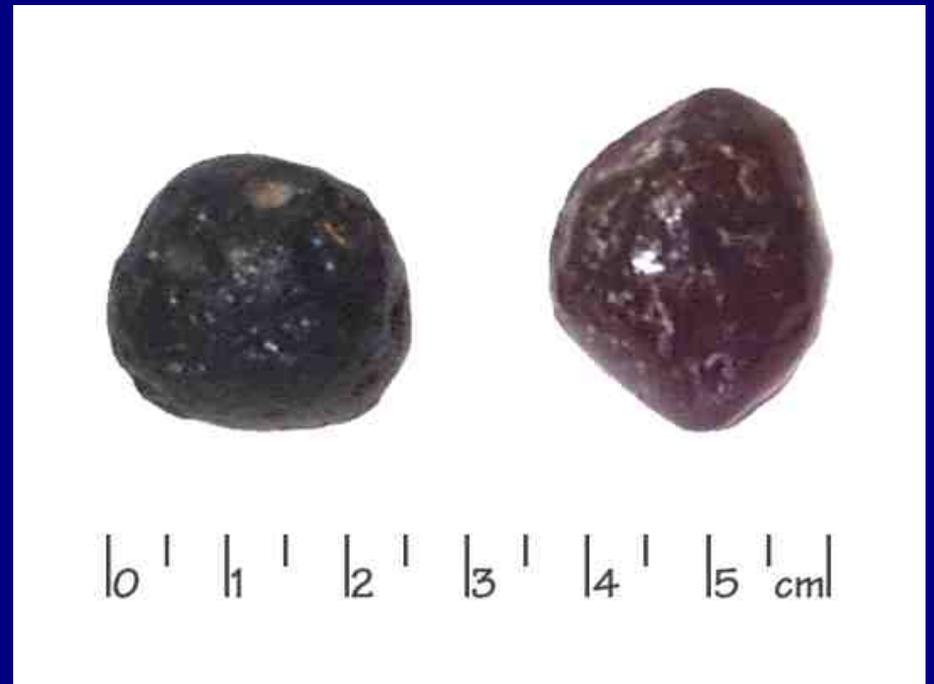
Les roches, la cristallisation

La cristallisation des roches s'opère lors de leur refroidissement, lors du passage de l'état liquide à l'état solide.

Un refroidissement très rapide (par exemple des gouttes refroidies « en vol » ou la surface d'une coulée de lave n'entraîne pas de cristallisation : les molécules n'ont pas le temps de s'organiser. A la limite, on obtient un verre, c'est à dire un milieu aussi désordonné qu'un fluide, mais immobile.

Plus la cristallisation est lente, plus elle donne de gros cristaux.

Sphérules recueillies sur Terre.
Origine volcanique.



Les « planètes mortes »

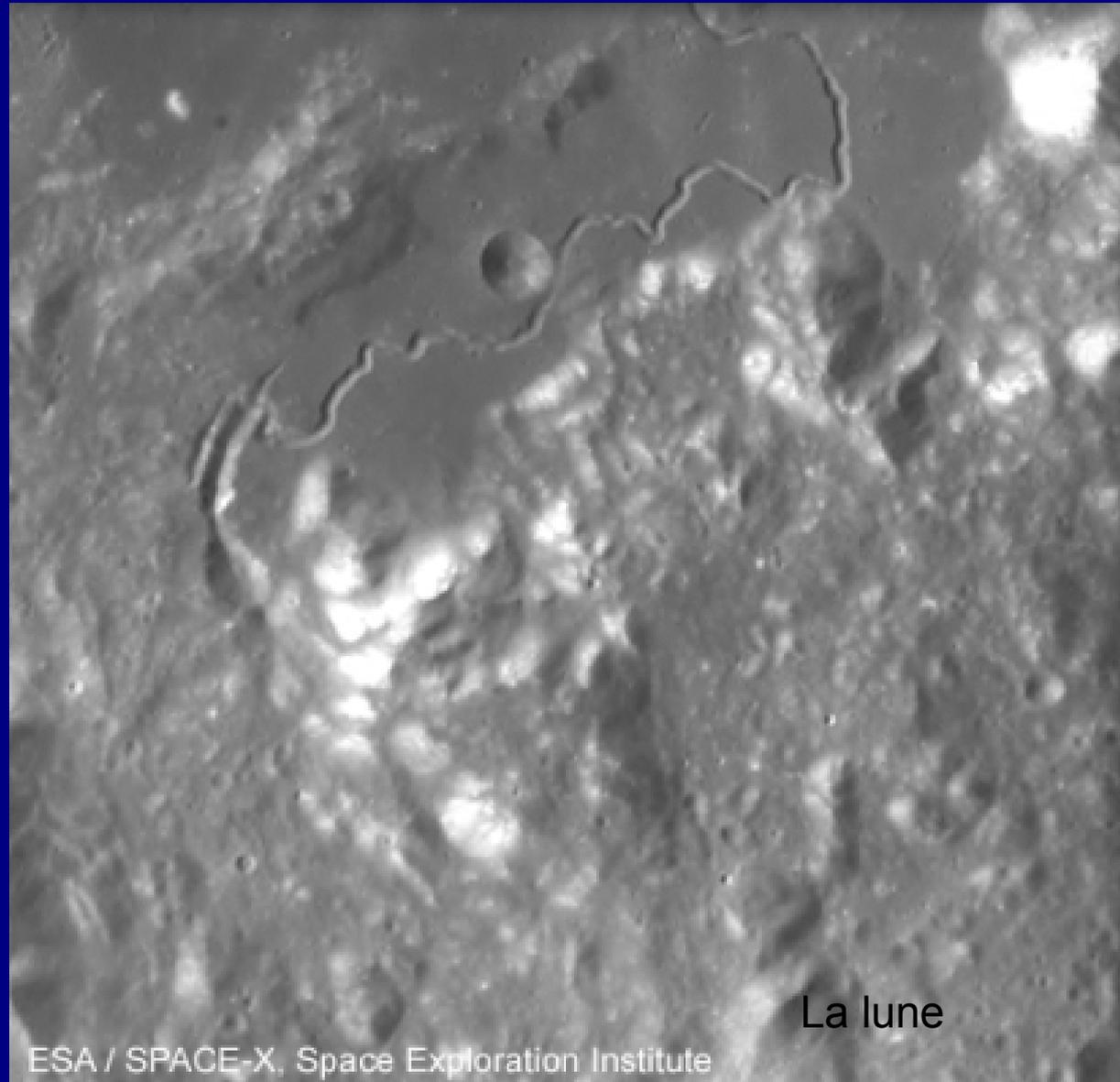
Cratères et bassins

- La Lune
- Mercure (?)
- Callisto (Jupiter)
- Rhea (Saturne)
- Japet (Saturne)
- Mimas (Saturne)
- Oberon (Uranus)
- Umbriel (Uranus)
- Assez petits, se sont complètement refroidis, dès la fin de l'ère du grand bombardement.

Les « planètes mortes »

Cratères et bassins

- **La Lune**
- Mercure (?)
- Callisto (Jupiter)
- Rhea (Saturne)
- Japet (Saturne)
- Mimas (Saturne)
- Oberon (Uranus)
- Umbriel (Uranus)



Les « planètes mortes »

Cratères et bassins

- La Lune
- Mercure (?)
- **Callisto** (Jupiter)
- Rhea (Saturne)
- Japet (Saturne)
- Mimas (Saturne)
- Oberon (Uranus)
- Umbriel (Uranus)



Callisto [Galileo, NASA]

Callisto

Densité moyenne : 1,86.

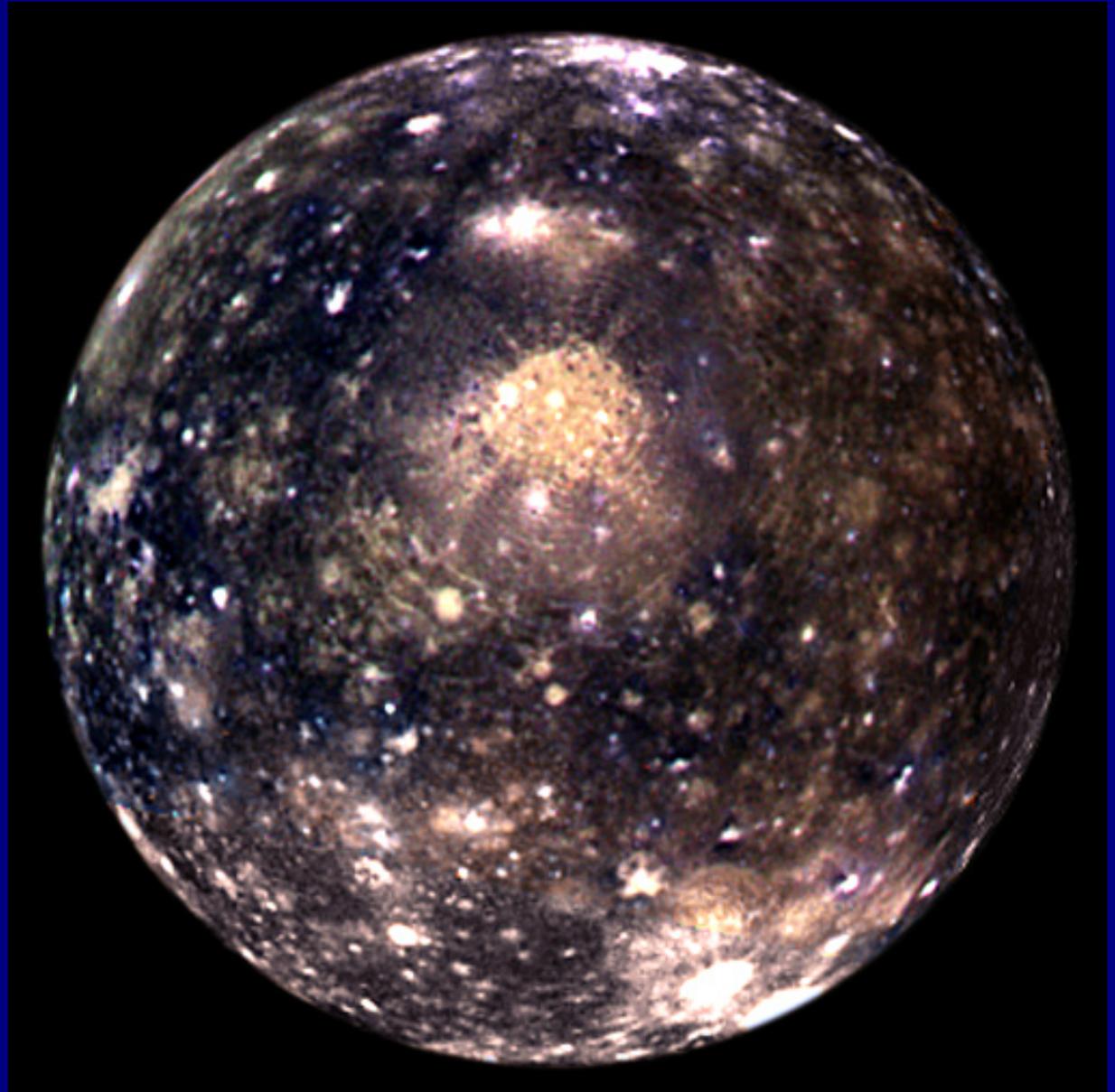
Un champ magnétique variable (interaction avec Jupiter). Donc une région interne « mobile ».

Sur Callisto, les impacts les moins anciens sont plus clairs. Le reste est très foncé pour de la glace : 20 %.

Peu de petits cratères < 1 km.

Pourquoi si noir :
terrains anciens.
impacts : vaporisation de l'eau,
enrichissement en pierres.

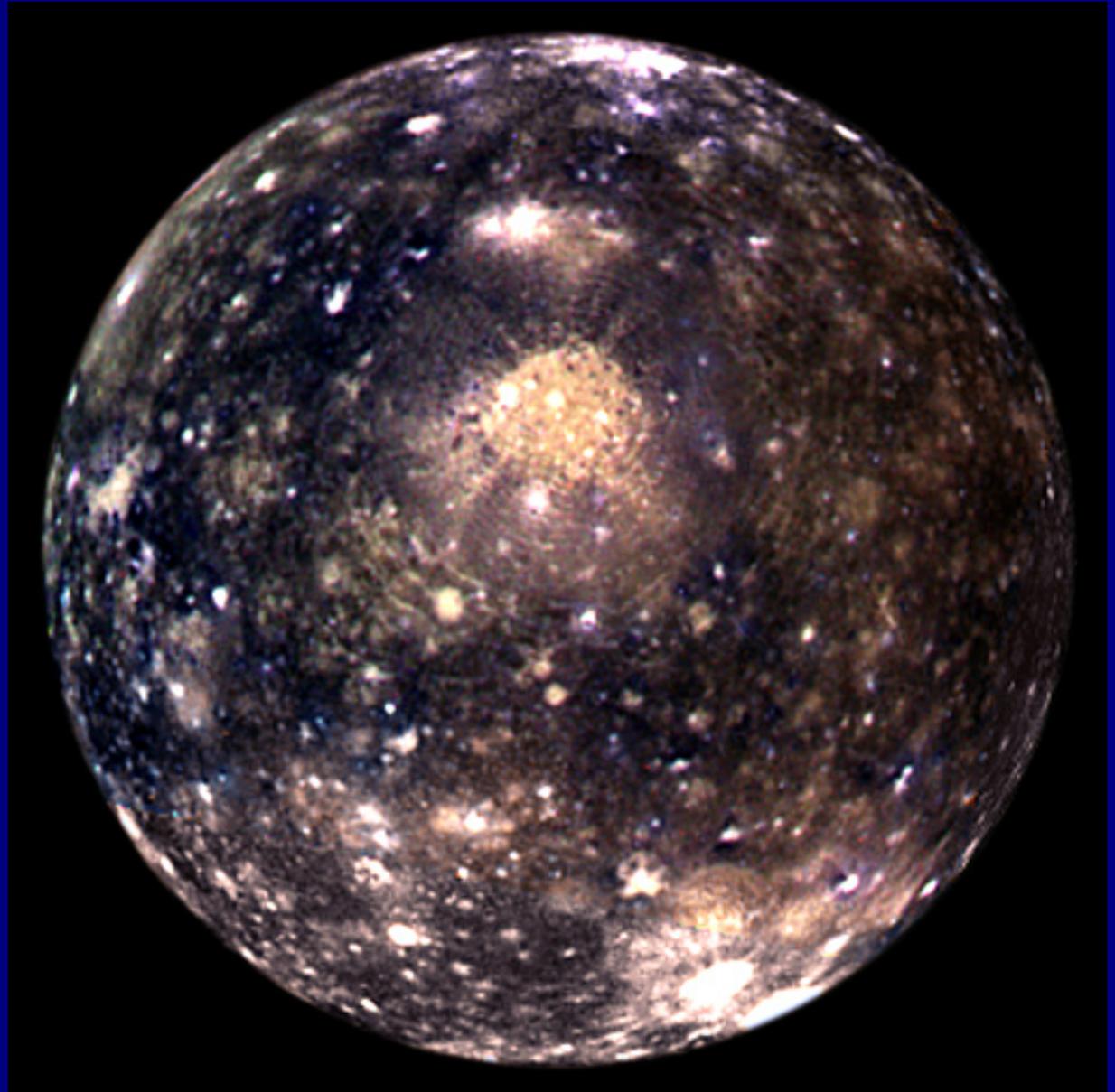
échappement d'H observé.



Callisto, Bassin Valhalla

Autour du bassin, des anneaux concentriques, plus nombreux que sur la Lune.

Au centre, un « édifice » qui s'est peut-être effondré.
Traces effacées :
le palimpseste.



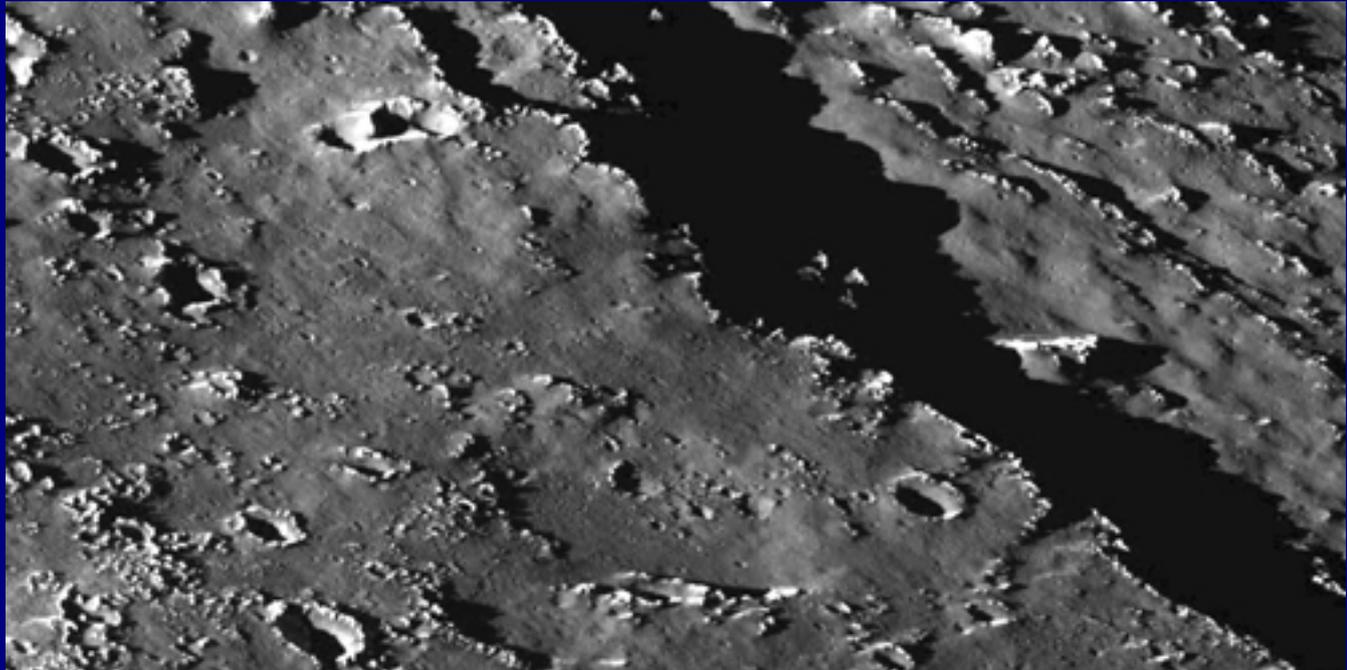
Callisto, Bassin Valhalla

Autour du bassin, des anneaux concentriques, plus nombreux que sur la Lune.

Vue de 38 km.
Un anneau du bassin Valhalla.

Les sommets des crêtes sont blancs.

Le reste semble couvert de poussière : régolithe ?
Typique de Callisto.



Callisto, structure interne

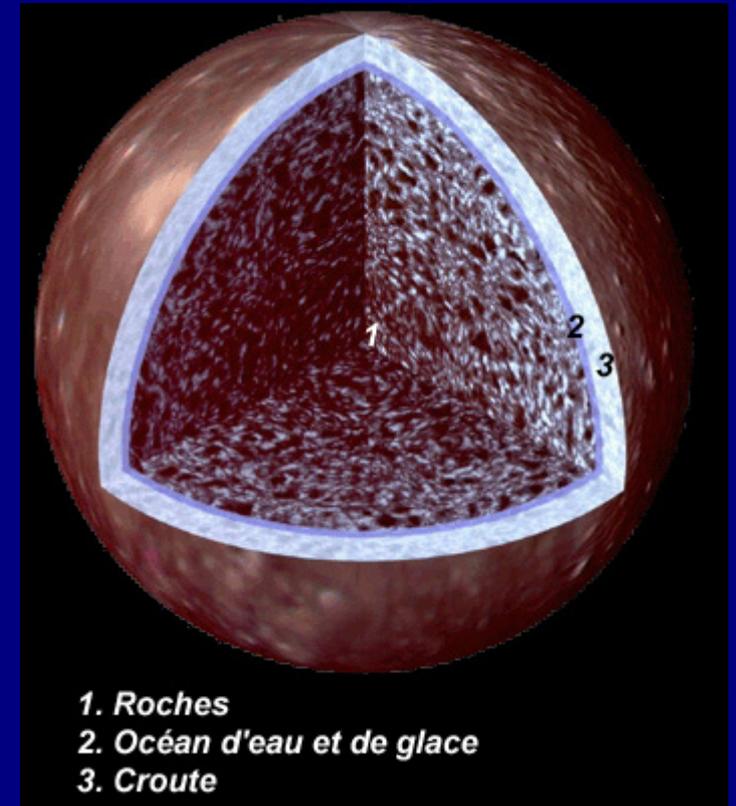
Peut-être un noyau rocheux, et un manteau d'eau liquide et de glace.

Le côté « océan sous terrain » faciliterait l'entretien d'un champ magnétique.

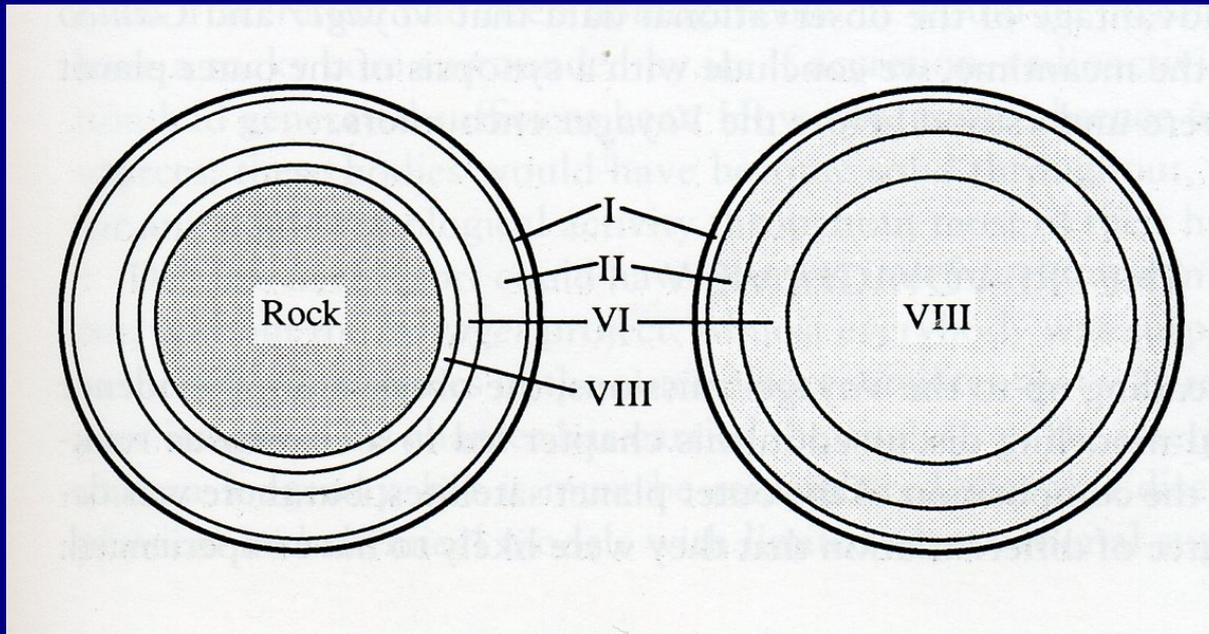
Il faut peut-être améliorer la légende, et mettre à l'intérieur Roches ---> Roches et Glace.

densité = 1,86

densité des roches ~ 3.

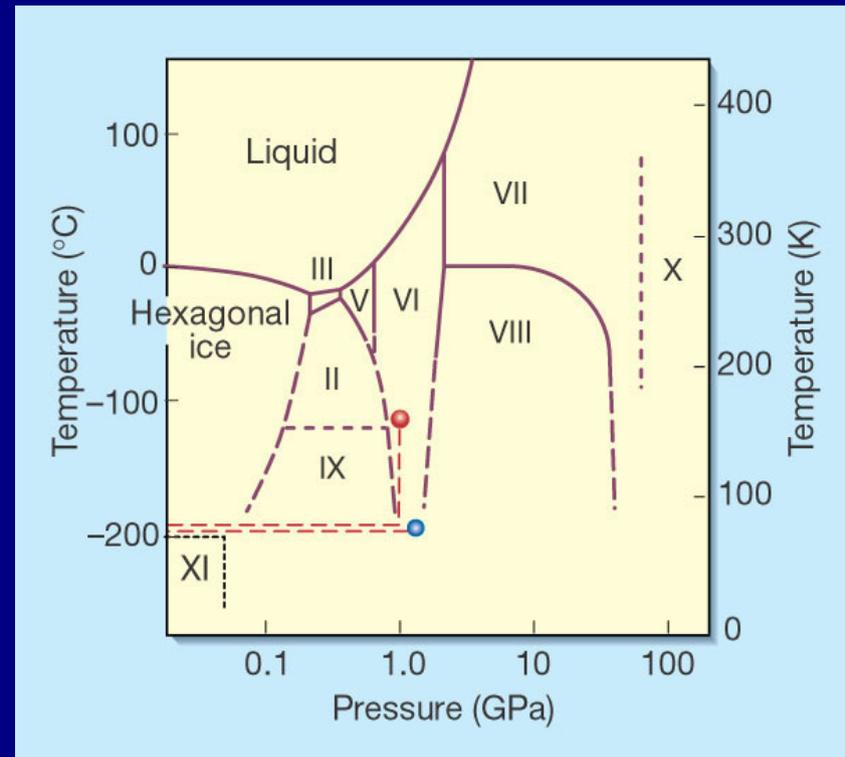


Callisto, structure interne



[D. Rothery]

Cas avec et sans noyau rocheux. Les distinctions entre les couches ne sont pas nécessairement chimiques, mais physiques. Ce qui les distingue : des formes différentes de la cristallisation de la glace. D'où des densités, des viscosités et des conductivités thermiques différentes.



[Nature]

Les « planètes mortes »

Cratères et bassins

- La Lune
- Mercure (?)
- Callisto (Jupiter)
- **Rhea** (Saturne)
- Japet (Saturne)
- Mimas (Saturne)
- Oberon (Uranus)
- Umbriel (Uranus)



Rhea [Cassini, NASA]

Rhea

Beaucoup plus petite que Callisto,
R=764 km.

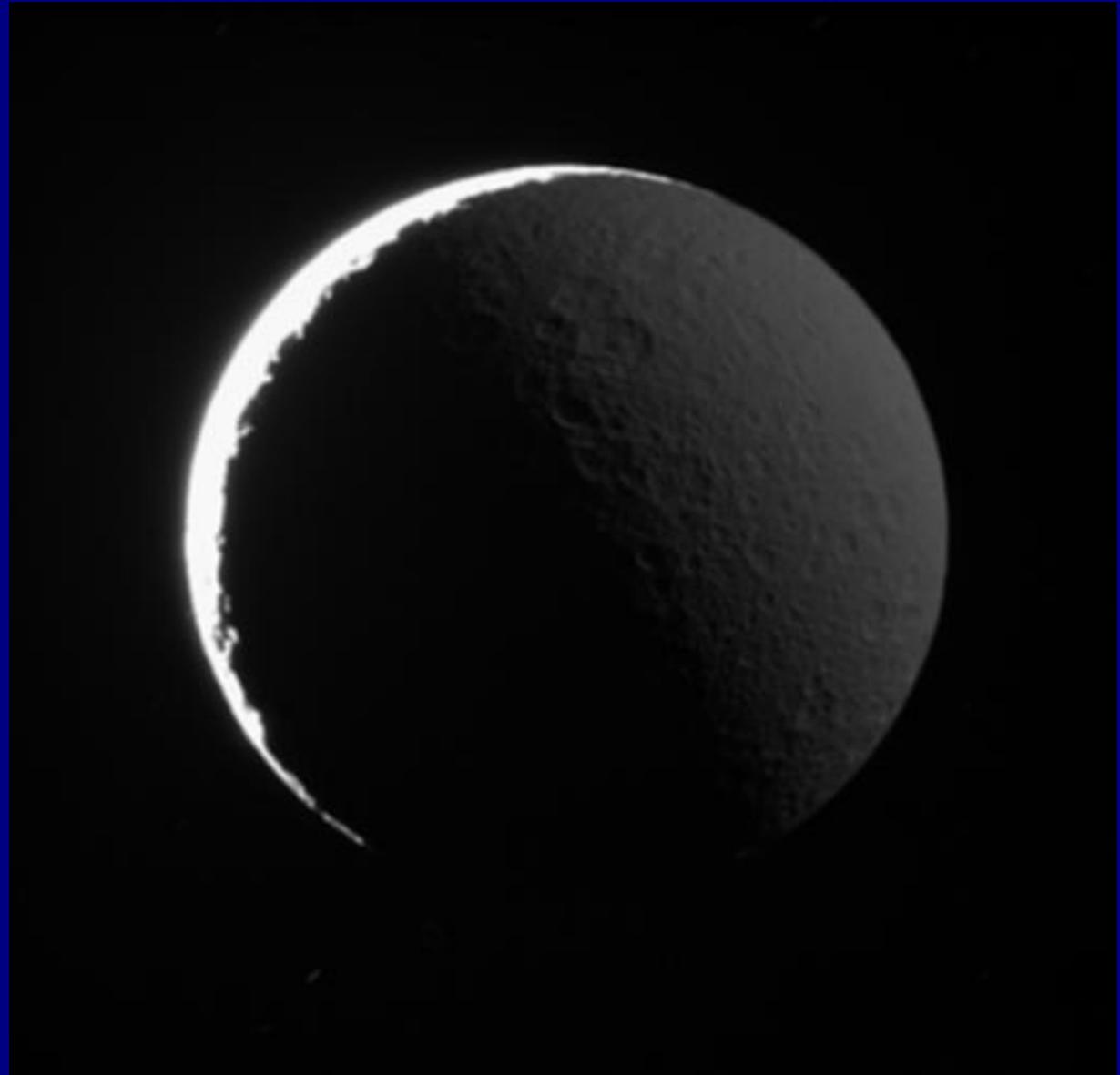


Rhea [Cassini, NASA]

Rhea

Rhea éclairée à la fois par le Soleil et par Saturne.

L'albédo de Rhéa est 0,6 : des glaces plus « propres » que celles de Callisto.



Rhea

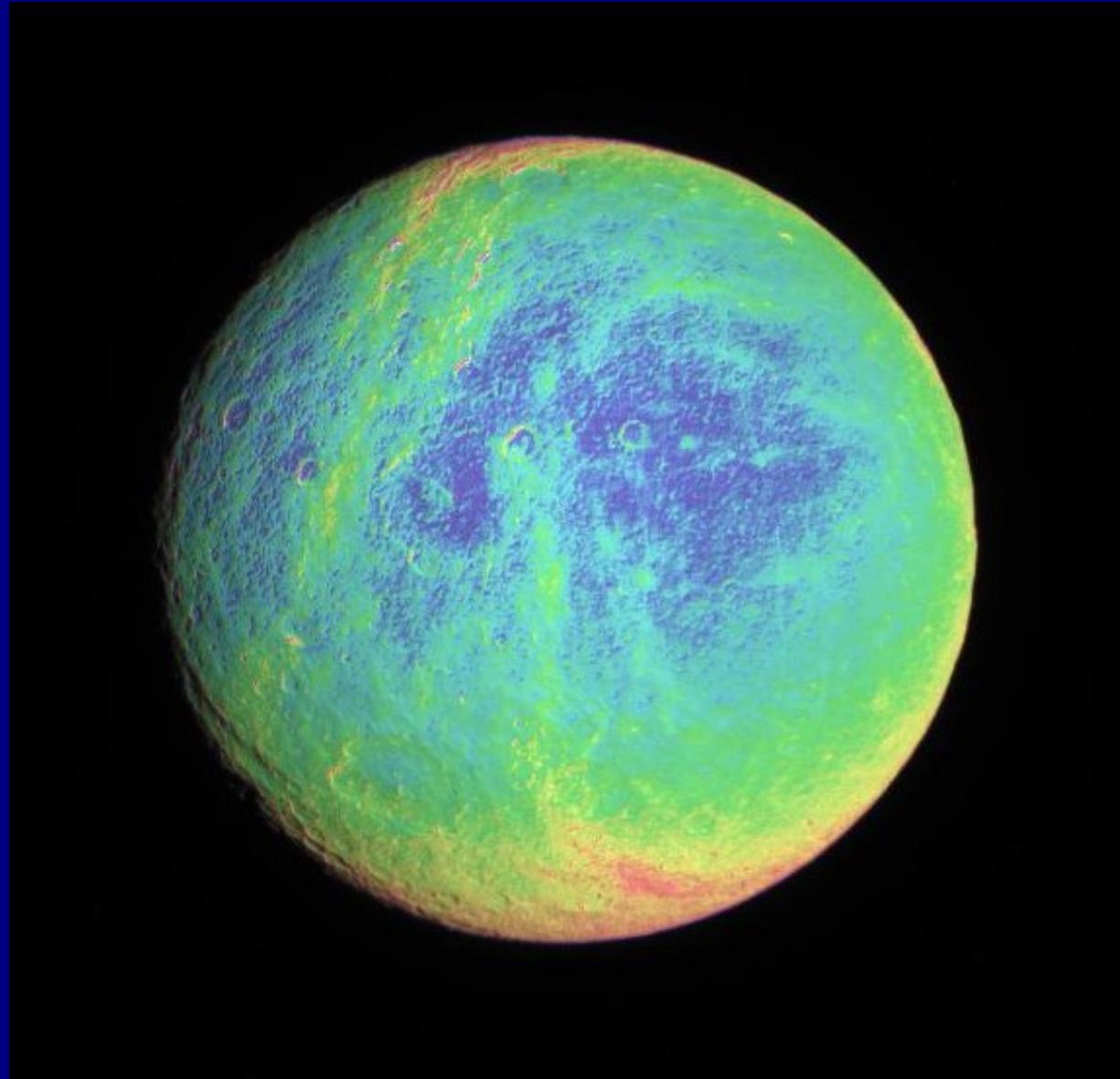
Beaucoup plus petite que Callisto,
R=764 km.

Des différences entre les surfaces :
populations de cratères différentes :
anciens -gros et nombreux- ou
moins anciens avec moins de gros.

Variations de « couleur ».

Quelques fissures dans les
régions récentes.

Resurfaçage (coulées) peut-être liées
à une expansion thermique lors de la
différenciation, ou à un impact.



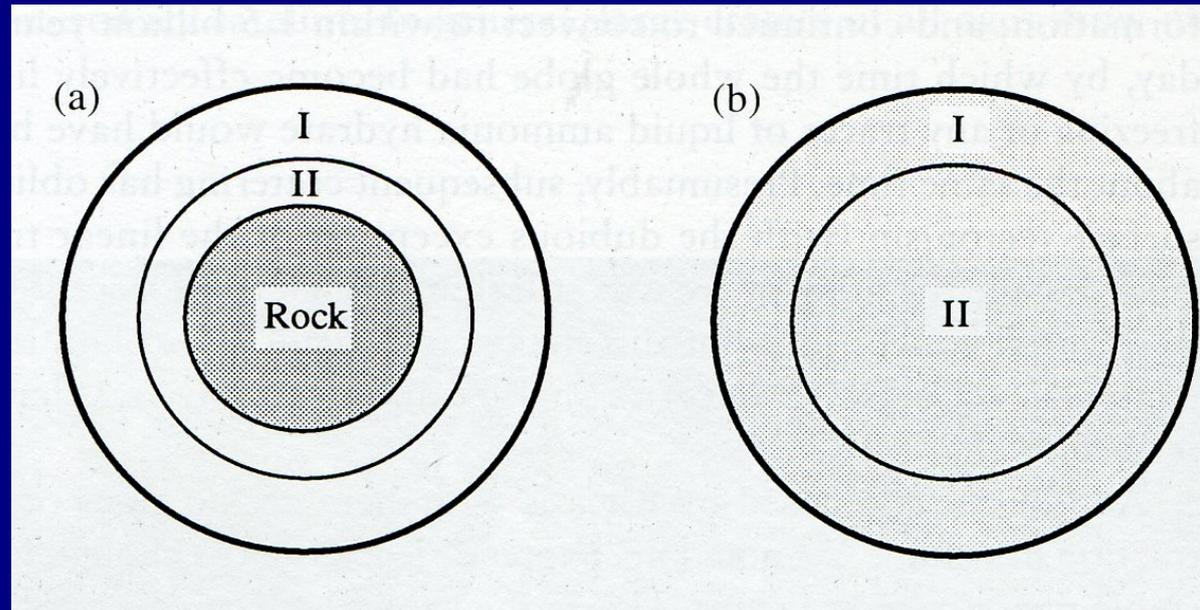
Rhea

Densité : environ 40% de roches
(si différenciée) 35% (si indifférenciée).

Structure interne : moindre pression,
seulement des glaces I et II.

Les modèles d'évolution interne de
Rhea (avec et sans chauffage
radiogénique) indiqueraient une activité
thermique (sans atteindre la fusion),
de la convection, donc l'existence d'une
asthénosphère.

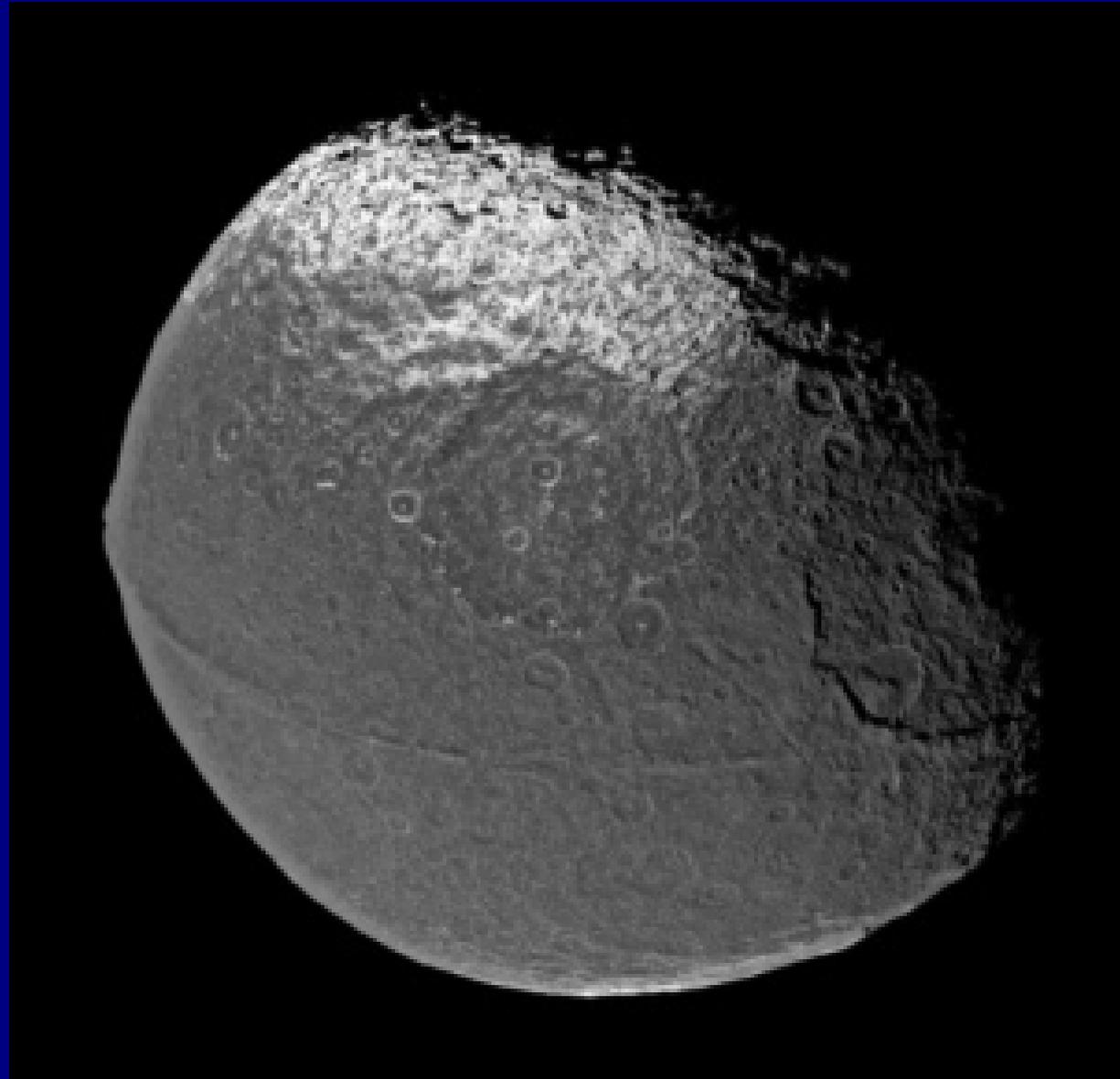
L'état actuel (lithosphère partout)
daterait d'il y a 1,5 Md années.



Les « planètes mortes »

Cratères et bassins

- La Lune
- Mercure (?)
- Callisto (Jupiter)
- Rhea (Saturne)
- **Japet** (Saturne)
- Mimas (Saturne)
- Oberon (Uranus)
- Umbriel (Uranus)



Japet [Cassini, NASA]

Japet

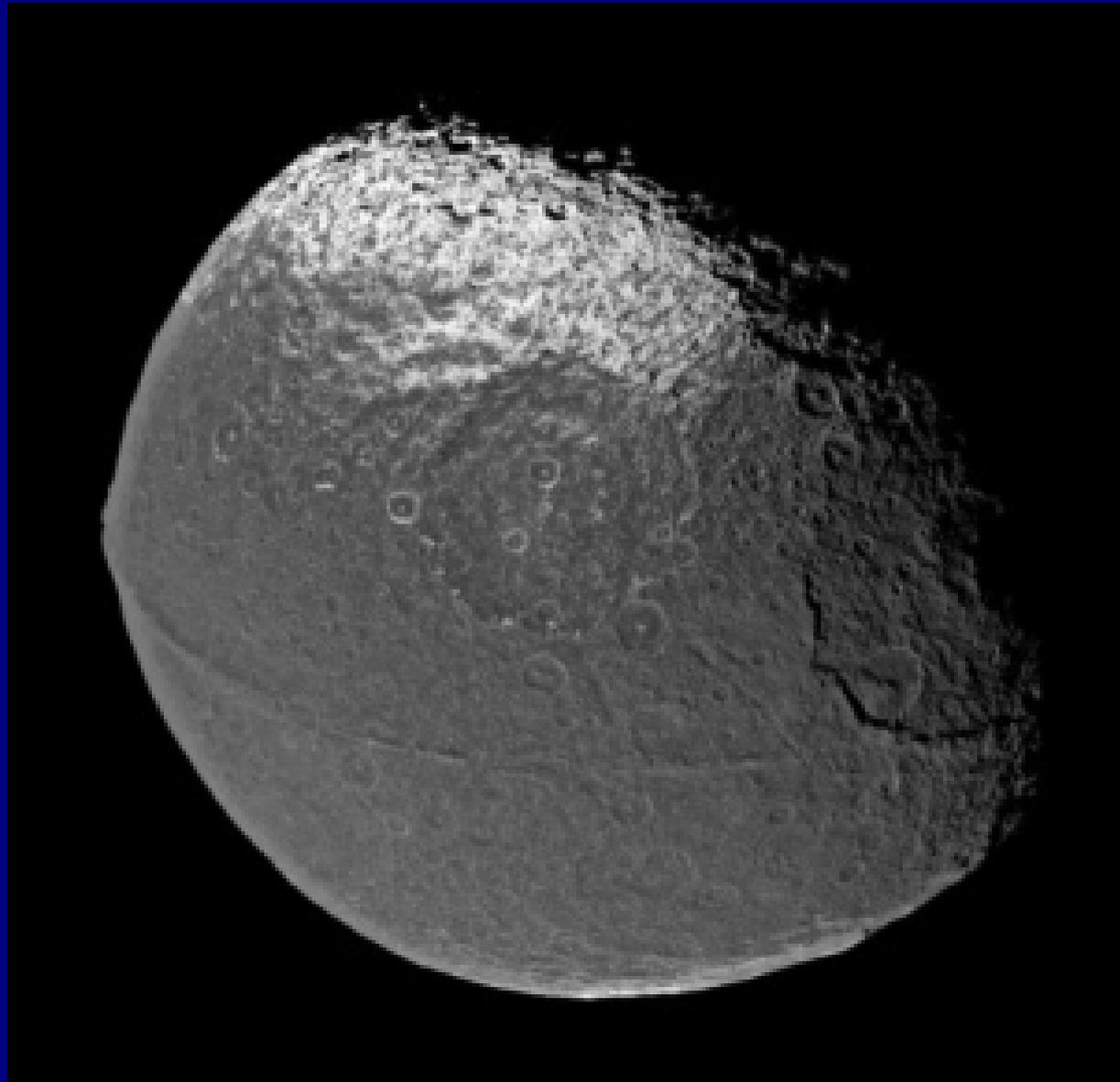
Petit satellite de Saturne,
rayon et densité : proche de Rhea.

Mais plus étrange.

Un bassin très étendu.

Une forte asymétrie de couleur.

Une crête équatoriale.



Japet [Cassini, NASA]

Japet, une coloration asymétrique.

Zones sombres : albédo 0,02, symétrique par rapport à l'apex du mouvement orbital. Contrôle externe du processus de coloration.

Zones claires : albédo 0,5 (typique des satellites de glace), dans la partie en arrière du mouvement.

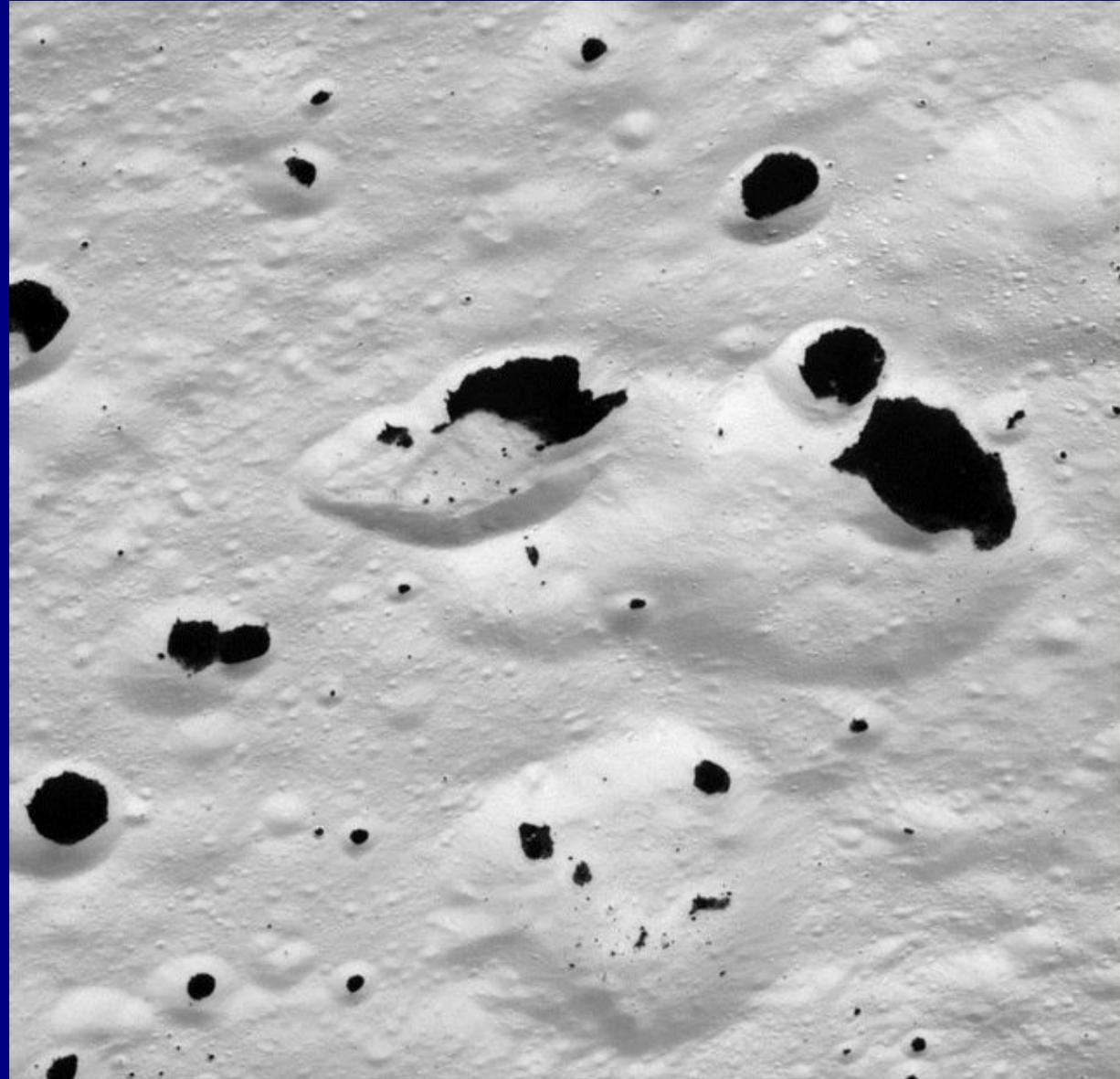
Observations au sol des zones sombres : peut-être des silicates riches en carbonates (polymères, tholine) comme les météorites « chondrites carbonées. »

Peut être de la poussière échappée de Phoebe, ou d'un petit satellite en orbite rétrograde et inconnu.

Surfaces sombres : pas de cratère vu avec éjectas clairs, donc soit la couche est épaisse, soit elle est jeune.



Japet, une coloration asymétrique.



Japet, zone de transition
entre les régions claires et les sombres.

[Cassini, NASA, 2007]

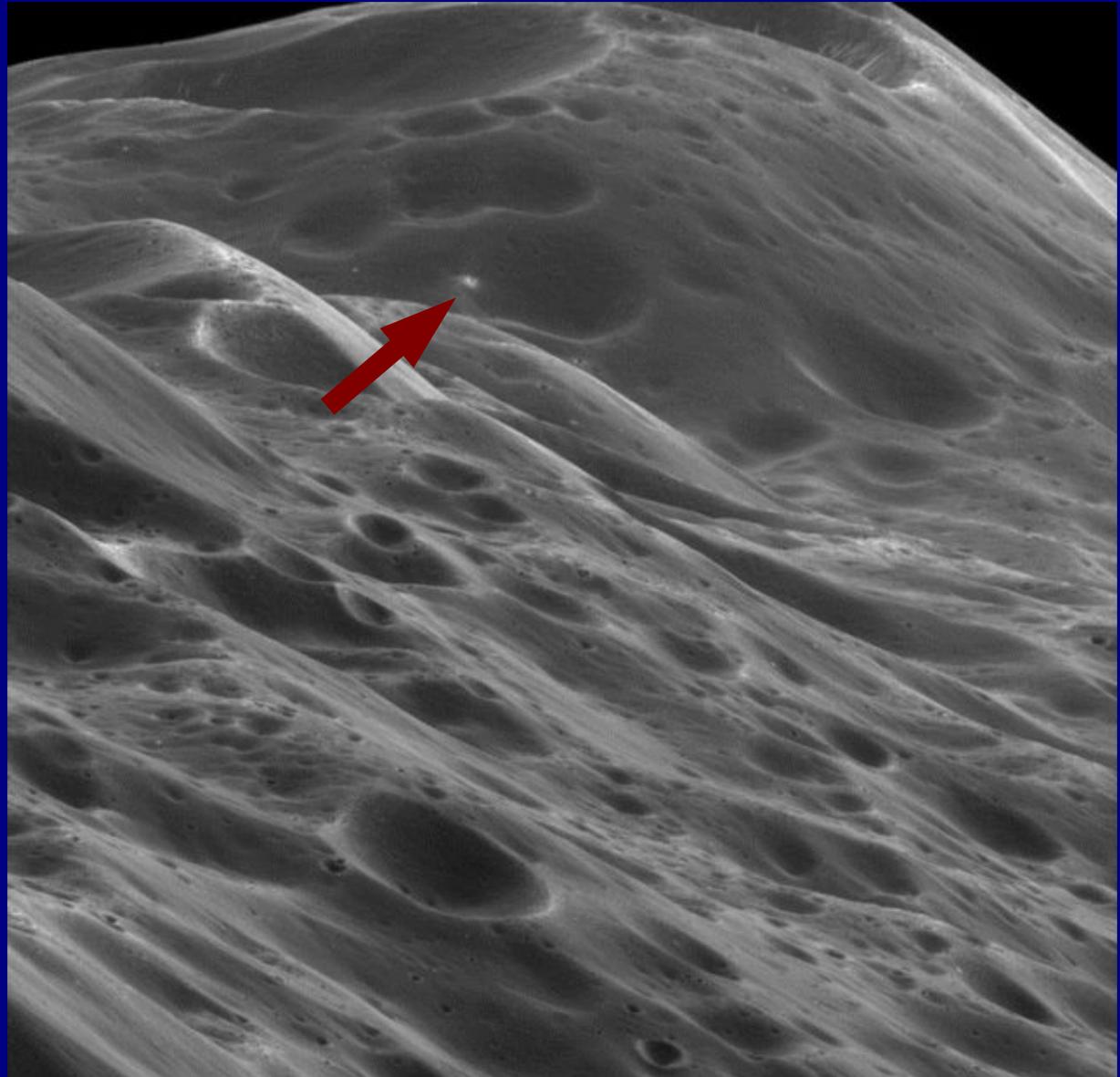
Japet, la crête équatoriale

Japet. Gros plan
sur la crête équatoriale.
Altitude : 10 km.

Elle recouvre le terrain sombre
et n'a été découverte que récemment.
(non mentionnée en 1998)

On voit une petite zone blanche : de
la glace découverte sous la poussière
par un impact.

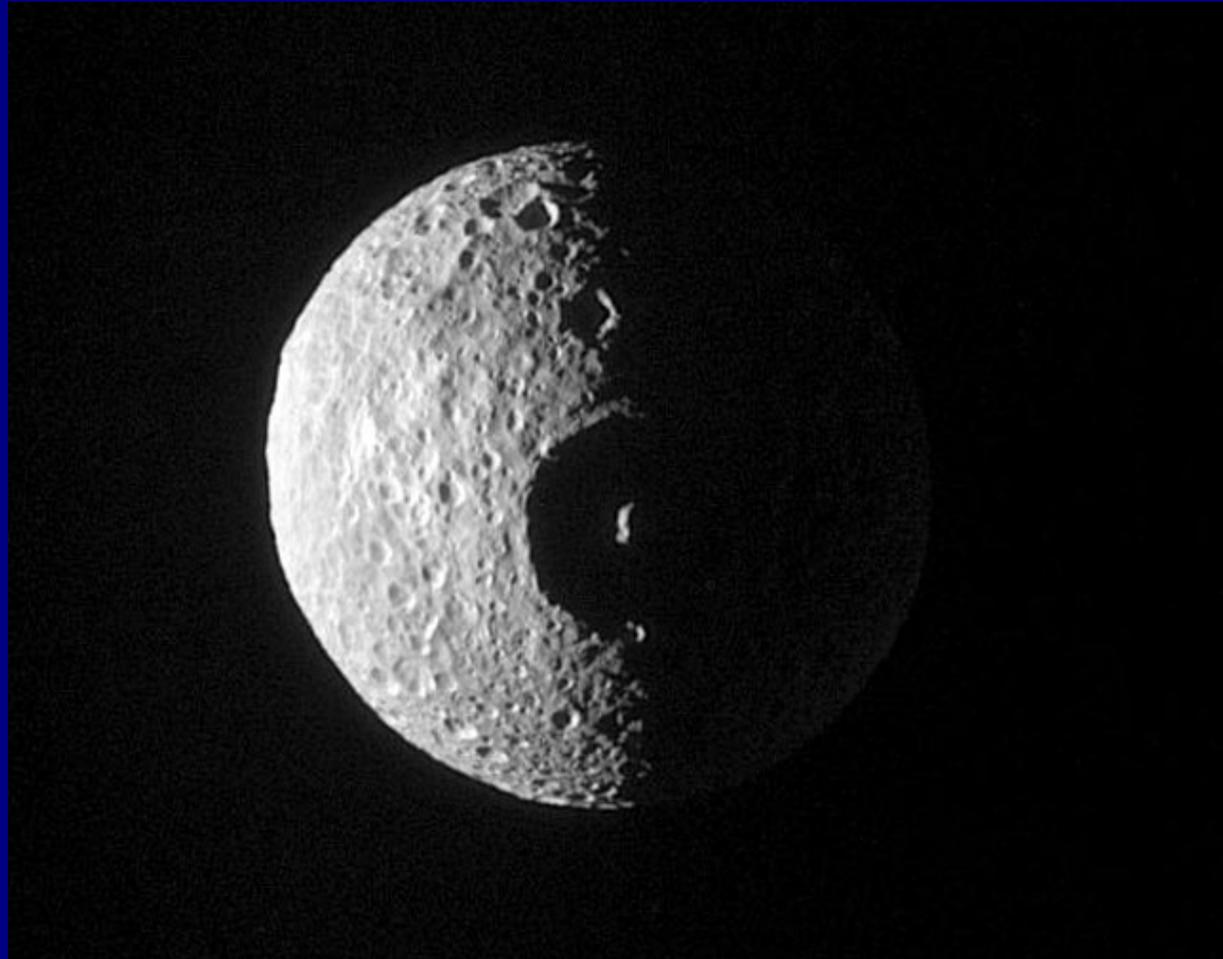
[Cassini, NASA, septembre 2007]



Les « planètes mortes »

Cratères et bassins

- La Lune
- Mercure (?)
- Callisto (Jupiter)
- Rhea (Saturne)
- Japet (Saturne)
- **Mimas** (Saturne)
- Oberon (Uranus)
- Umbriel (Uranus)



Mimas (gravité minimale pour sphéricité) [Cassini, NASA]

Mimas, le plus petit des gros, et le plus près de Saturne.

R=197 km.

Densité = 1,17.

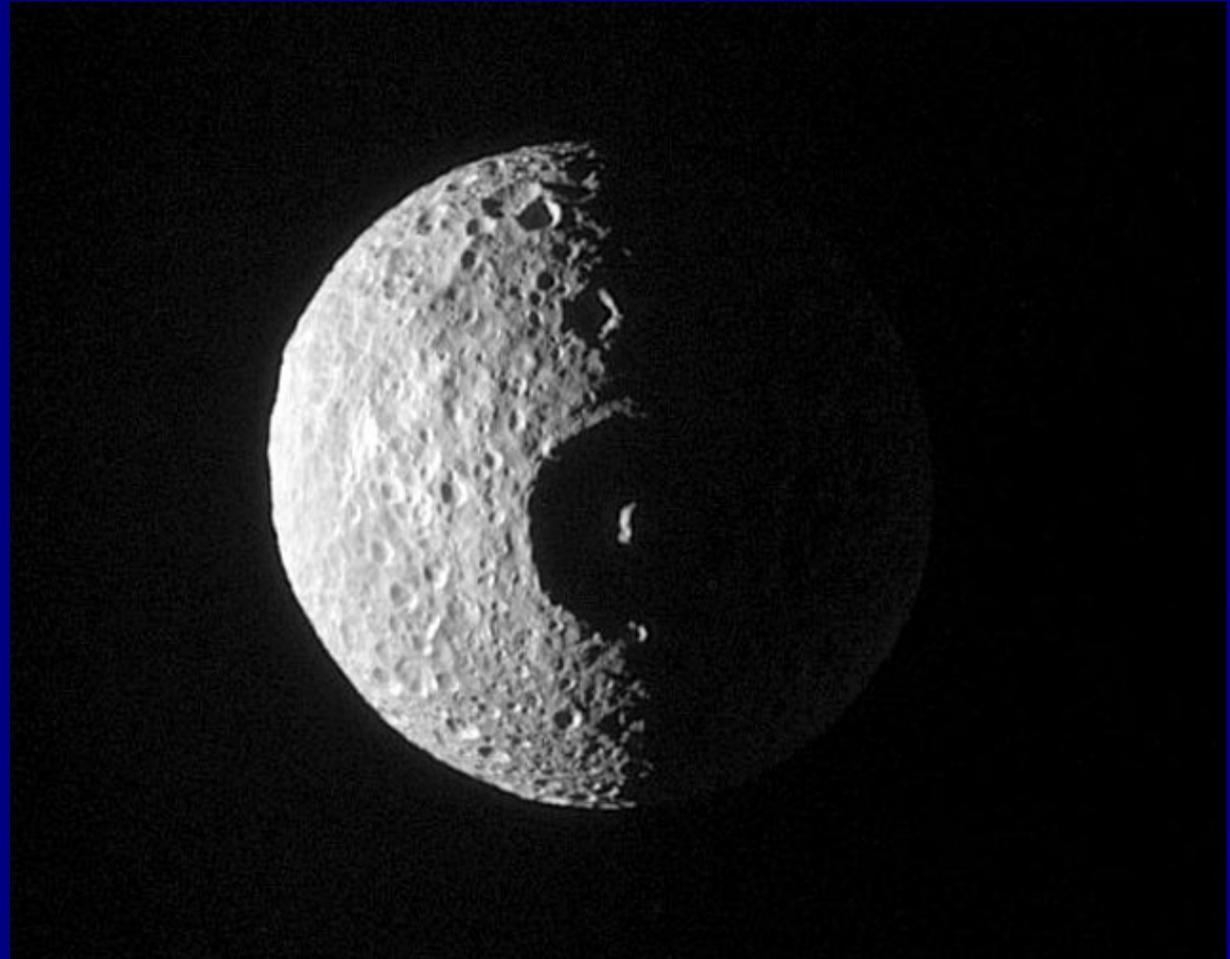
Très peu massif, la gravitation est quasiment le minimum permettant une forme sphérique.

N'a certainement pas eu de convection interne, et n'est pas différencié.

Presque que de l'eau ? Pas de chauffage radiogénique.

Cratères jeunes.

Cratère Hershell : 1/3 du diamètre de l'astre, 10km de profondeur, un pic central de 6 km.



Les « planètes mortes »

Cratères et bassins

- La Lune
- Mercure (?)
- Callisto (Jupiter)
- Rhea (Saturne)
- Japet (Saturne)
- Mimas (Saturne)
- **Oberon** (Uranus)
- Umbriel (Uranus)



Oberon [Voyager 2, NASA]

Les « planètes mortes »

Cratères et bassins

- La Lune
- Mercure (?)
- Callisto (Jupiter)
- Rhea (Saturne)
- Japet (Saturne)
- Mimas (Saturne)
- Oberon (Uranus)
- **Umbriel** (Uranus)



Umbriel [Voyager 2, NASA]

Cratères

Les cratères de Jupiter, Saturne, la Lune et Uranus ont des lois de répartition différentes.
Peu de grands cratères autour des planètes géantes (Callisto).

Callisto et Ganymede n'ont pas eu les mêmes bombardements que la Lune.

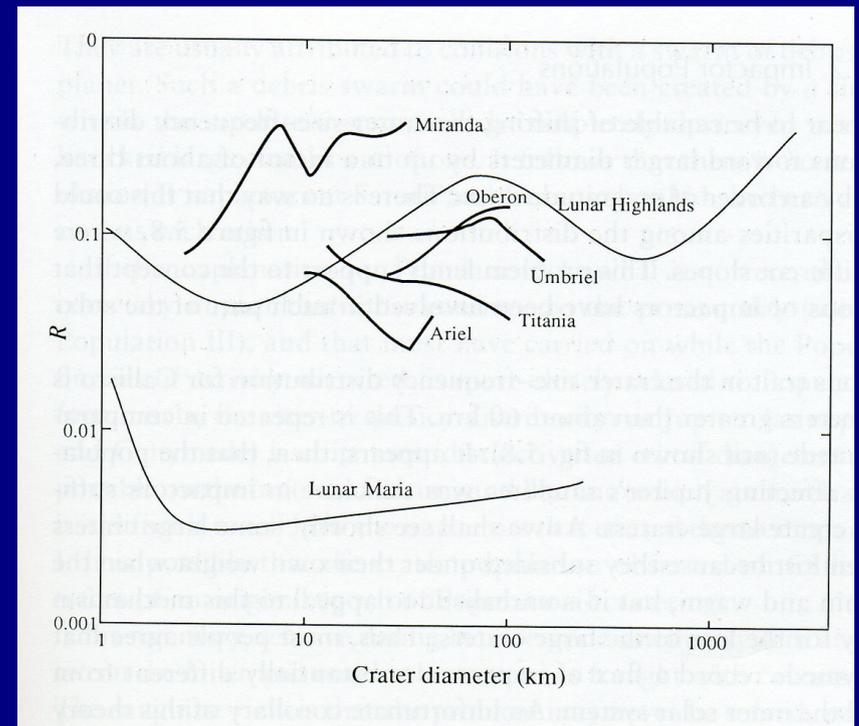
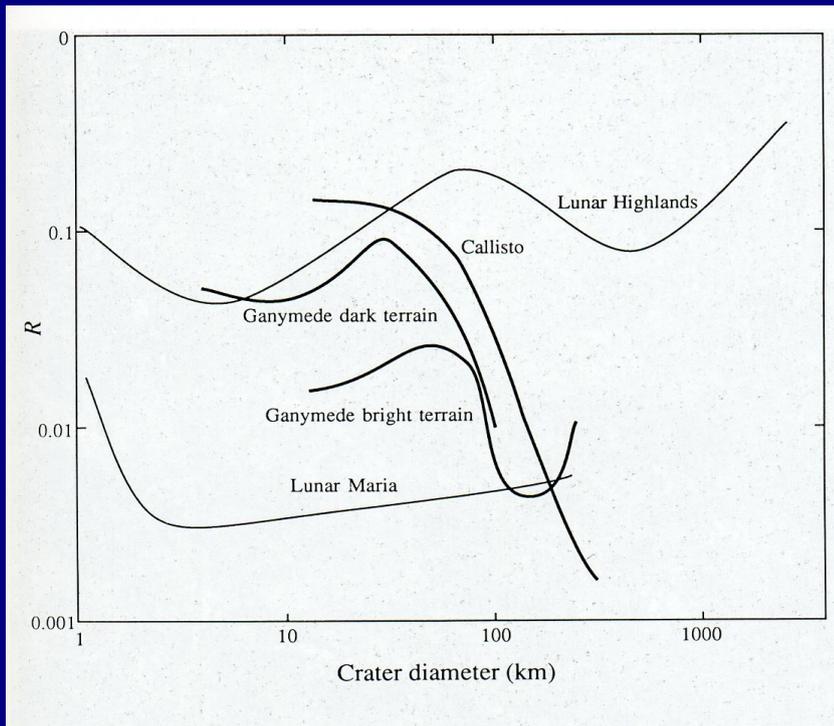
Sur Saturne, il semble qu'il y ait eu deux périodes de bombardement :

pop I 4Md années comme le grand bombardement, et et

pop II compatible avec rien de possible sur Jupiter.

pop III : actuel, comètes.

Impossible d'obtenir une datation avec les mêmes statistiques de bombardement pour les telluriques, Jupiter, Saturne etc.



Pas de trace de tectonique de plaques

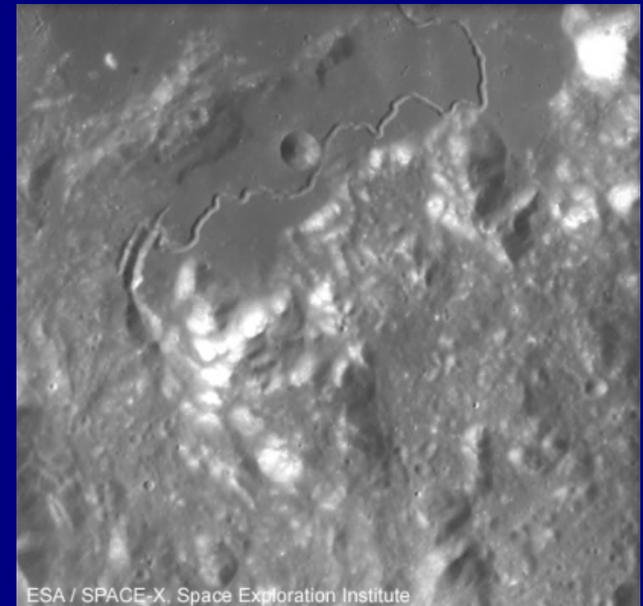
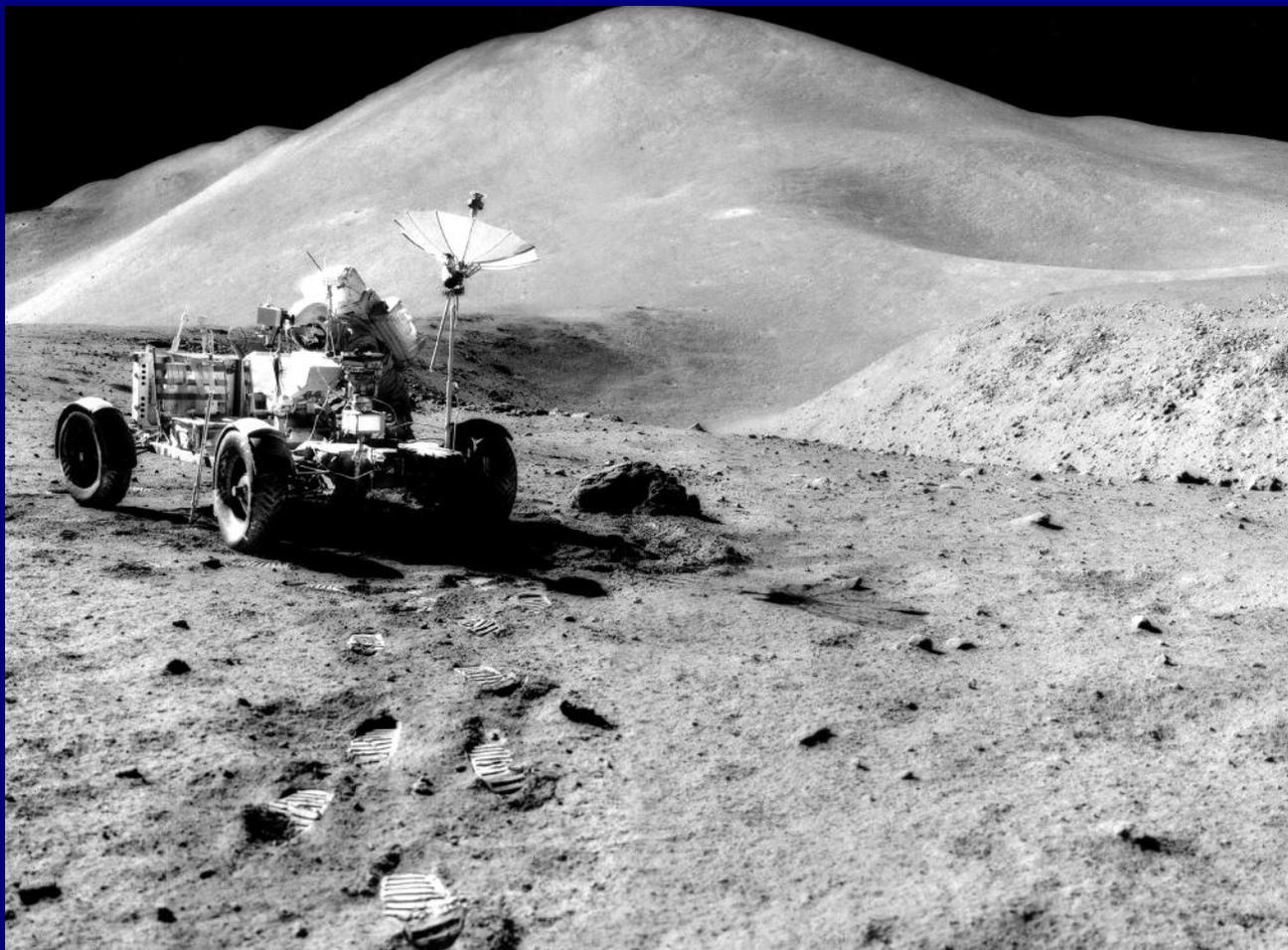
- S'il y en avait eu, certains cratères, très anciens donc postérieur à une activité tectonique, seraient cisailés. Jamais vu sur ces mondes là.

Des traces d'activité volcaniques.

- Lune : zones avec des basaltes (mers).
- Des traces de coulées de lave : les sillons (rilles en anglais).
- Pas de calderas (cratères volcaniques, avec un cône de laves).

Des traces d'activité volcaniques.

Des traces de coulées de lave : les sillons (rilles en anglais). Des tunnels de lave effondrés.



Hadley rille
135 km de long.
approché par Apollo 15 [NASA]
et photographié par la sonde
SMART [ESA].

Des traces d'activité volcaniques.

Des traces de coulées de lave : les sillons (rilles en anglais). Des tunnels de lave effondrés.

Il en existe sur Terre également.



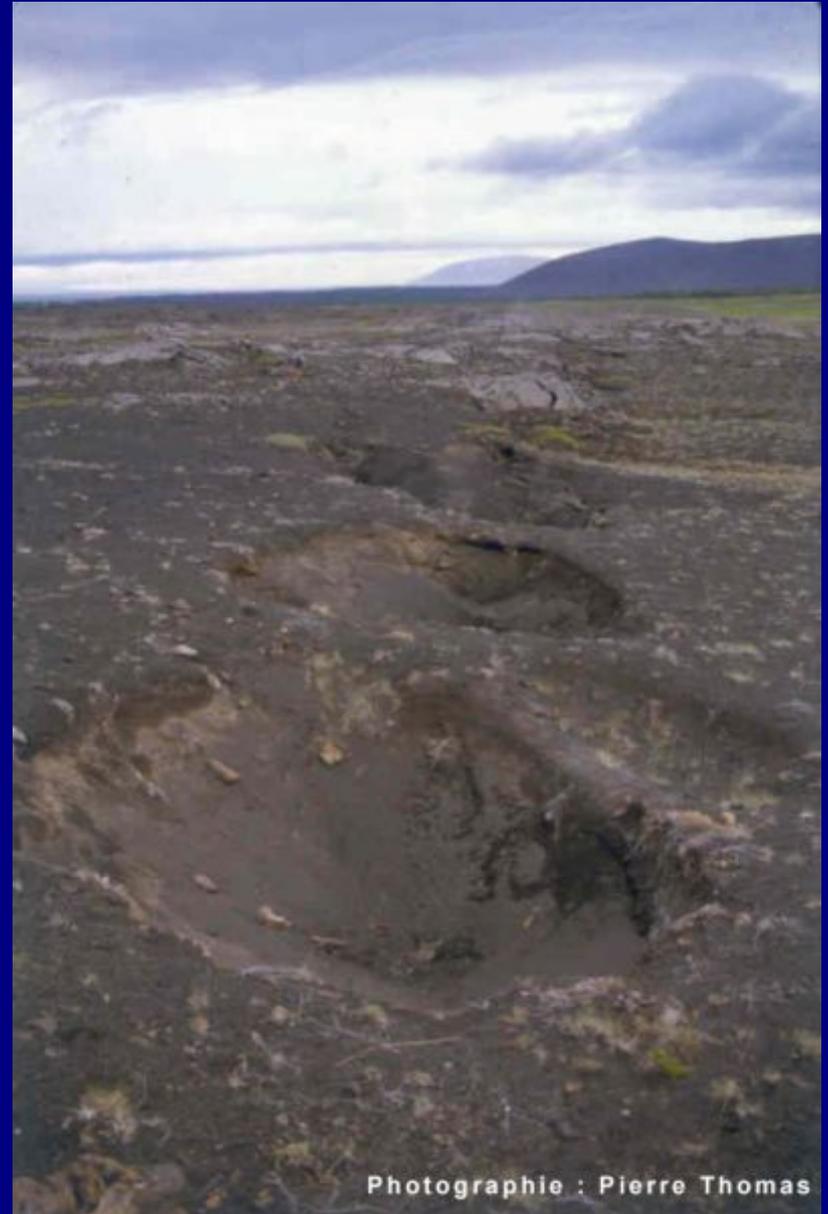
Lanzarote, Canaries [P. Thomas, ENS Lyon]

Des traces d'activité volcaniques.

Une succession de petits cratères sont formés par effondrement de cendres meubles reposant sur une coulée de lave.

Alignement de cratères de soutirage, région de Myvatn, Islande

[P. Thomas, ENS Lyon]



Photographie : Pierre Thomas

Les planètes qui furent actives

- Mars (?)
- Vénus (?)
- Ganymede (Jupiter)
- Dione (Saturne)
- Thetys (Saturne)
- Ariel (Uranus)
- Titania (Uranus)
- Miranda (Uranus)
- Une activité géologique éteinte depuis > 1 Md années
- Mais bien après le grand bombardement.
- Formations géologiques liées à une activité interne.

Ganymède

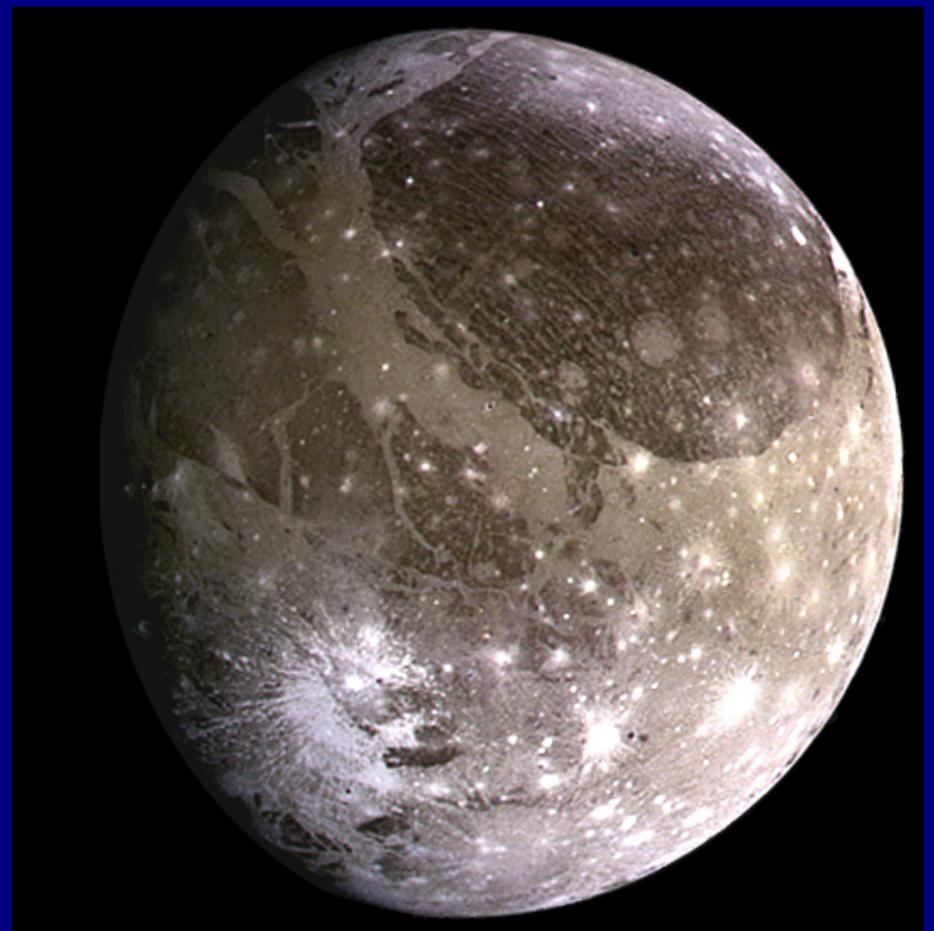


[Galileo,
NASA]

R=2631 km, le plus gros et massif des Galiléens. Plus gros que Mercure (2439 km). densité = 1,94

Ganymède

Les deux astres ont des dimensions et des densités voisines. Callisto est « morte » et Ganymède présente des signes d'activité géologique. Callisto est peu différenciée, Ganymède l'est, avec un noyau et un manteau. Pourquoi de telles différences ? La question n'a pas de réponse à l'heure actuelle.

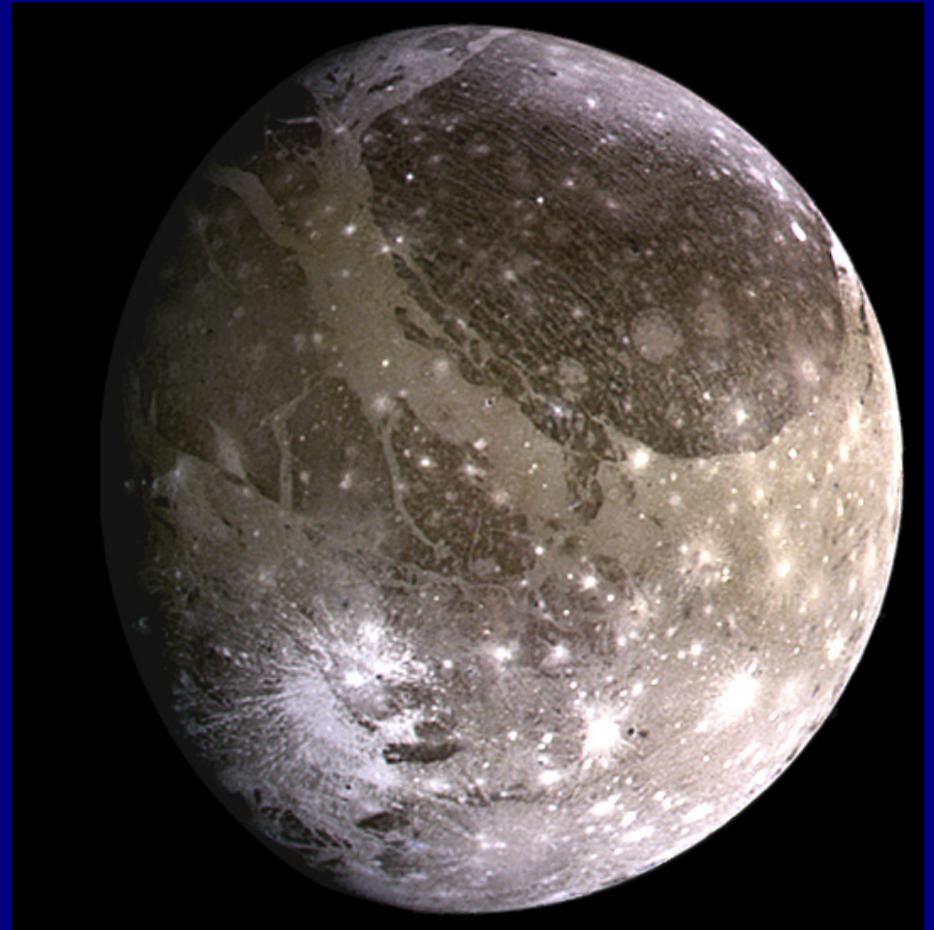


Ganymède

Les deux astres ont des dimensions et des densités voisines. Callisto est « morte » et Ganymède présente des signes d'activité géologique. Callisto est peu différenciée, Ganymède l'est, avec un noyau et un manteau. Pourquoi de telles différences ? La question n'a pas de réponse à l'heure actuelle.

Terrains sombres : mêmes sortes de cratères que Callisto, mais « relaxation visqueuse ». Peu de cratères >100km. Palimpseste clair. (Memphis Facula 350km)
Peut être une tectonique des plaques.

Terrains clairs : plus récents. Peuvent couper des terrains sombres. Ce sont généralement de larges rainures, comme si de la matière nouvelle était sortie par de longues failles.



Ganymède

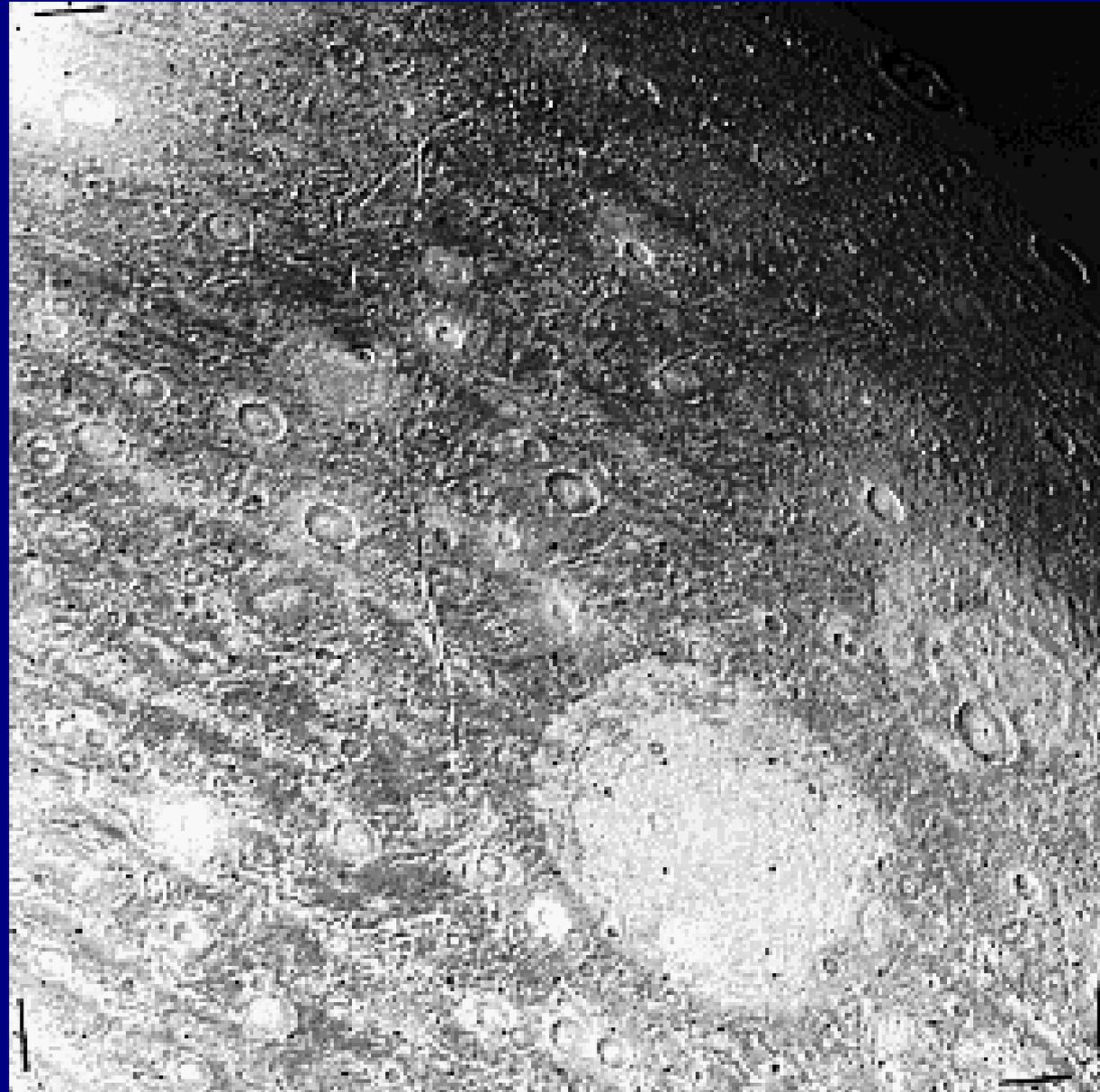
Terrain sombre :

Le palimpseste Memphis Facula (en blanc) une structure géologique disparue suite à un effondrement

et

Lakhmu Fossa, une faille longue de 2800 km.

[Voyage 2, NASA]



Ganymède, une tectonique des plaques ?

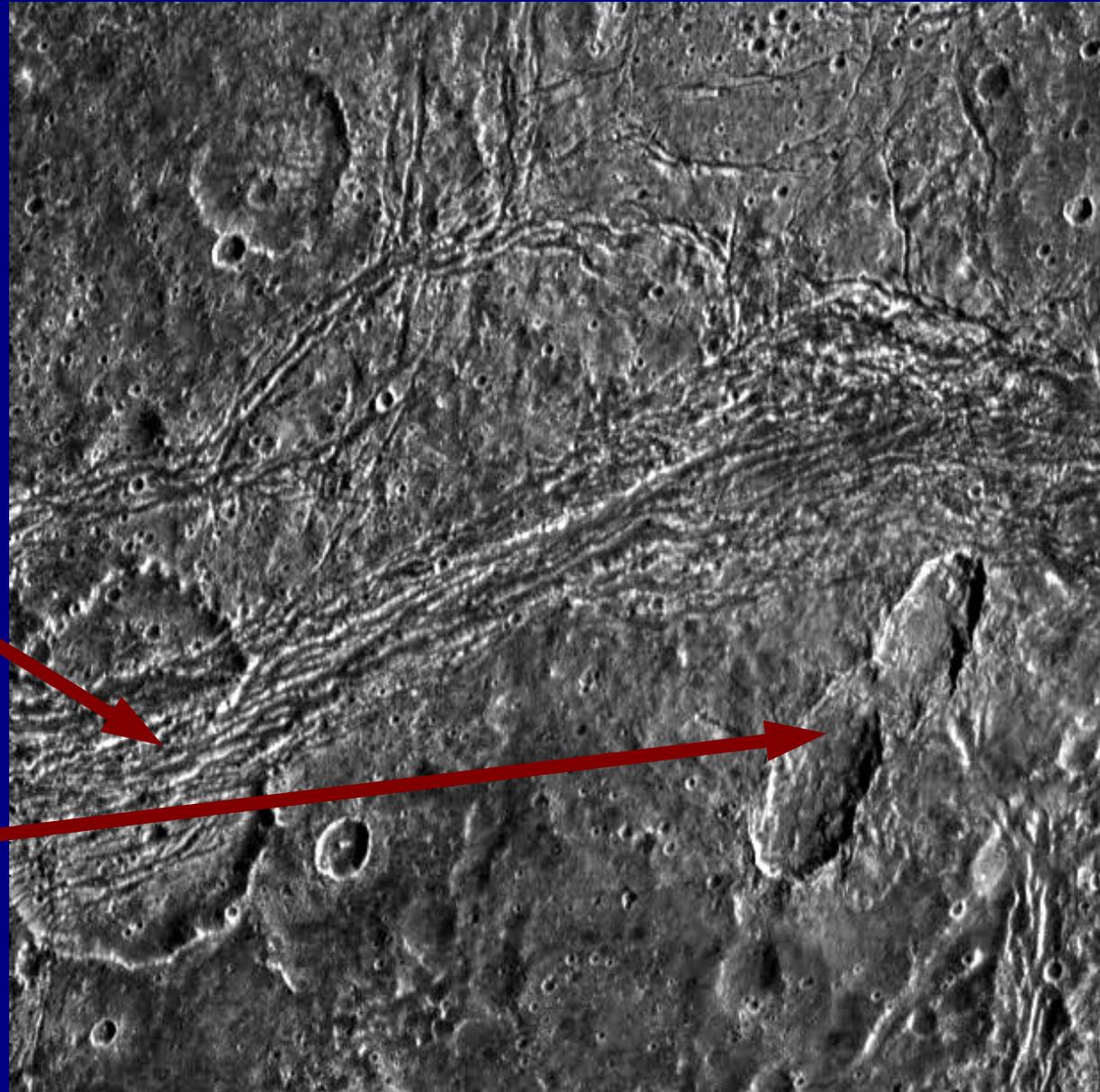
Terrain sombre et clair :

Nicholson regio.

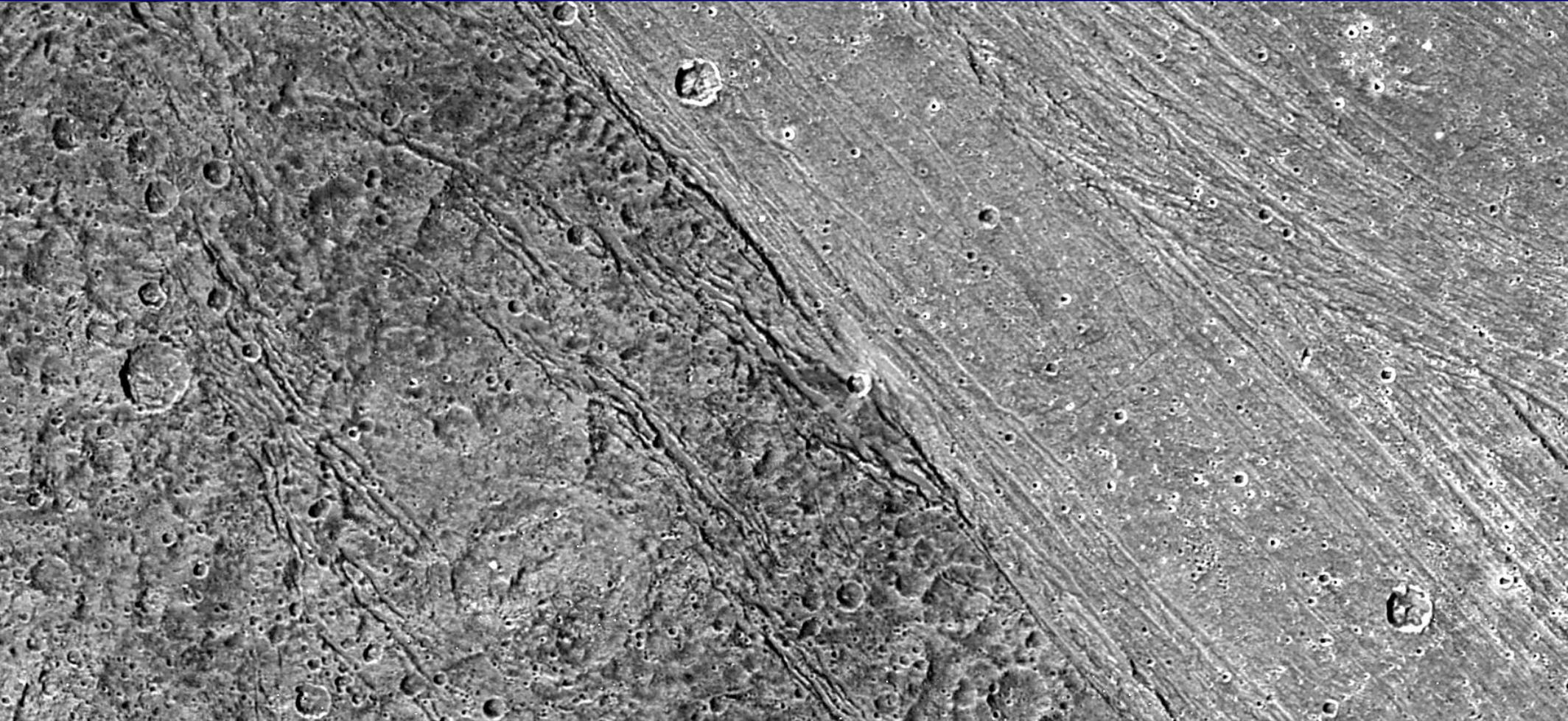
Le cratère à gauche a été « écartelé » par une faille complexe. L'écartement est de 5-10 km.

Crater double, choc oblique d'une comète fragmentée (par effet de marée -cf Shoemaker-Levy).

[Galileo, IASP, U. Boulder, NASA]



Ganymède

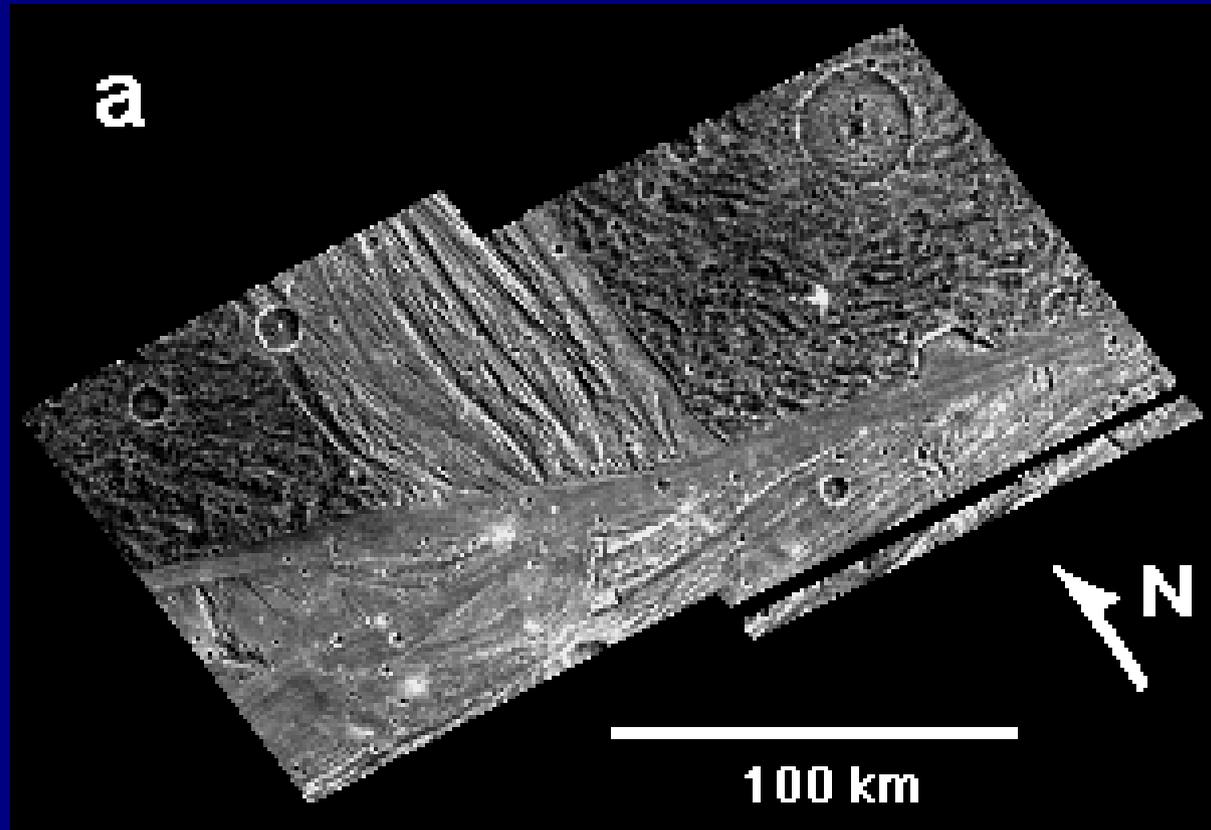


Terrains sombre et clair :

Nicholson regio. On voit le contraste entre une zone sombre (cratères etc.) et une zone claire avec des gorges et des crêtes parallèles.

[Galileo, German aerospace center, NASA]

Ganymède



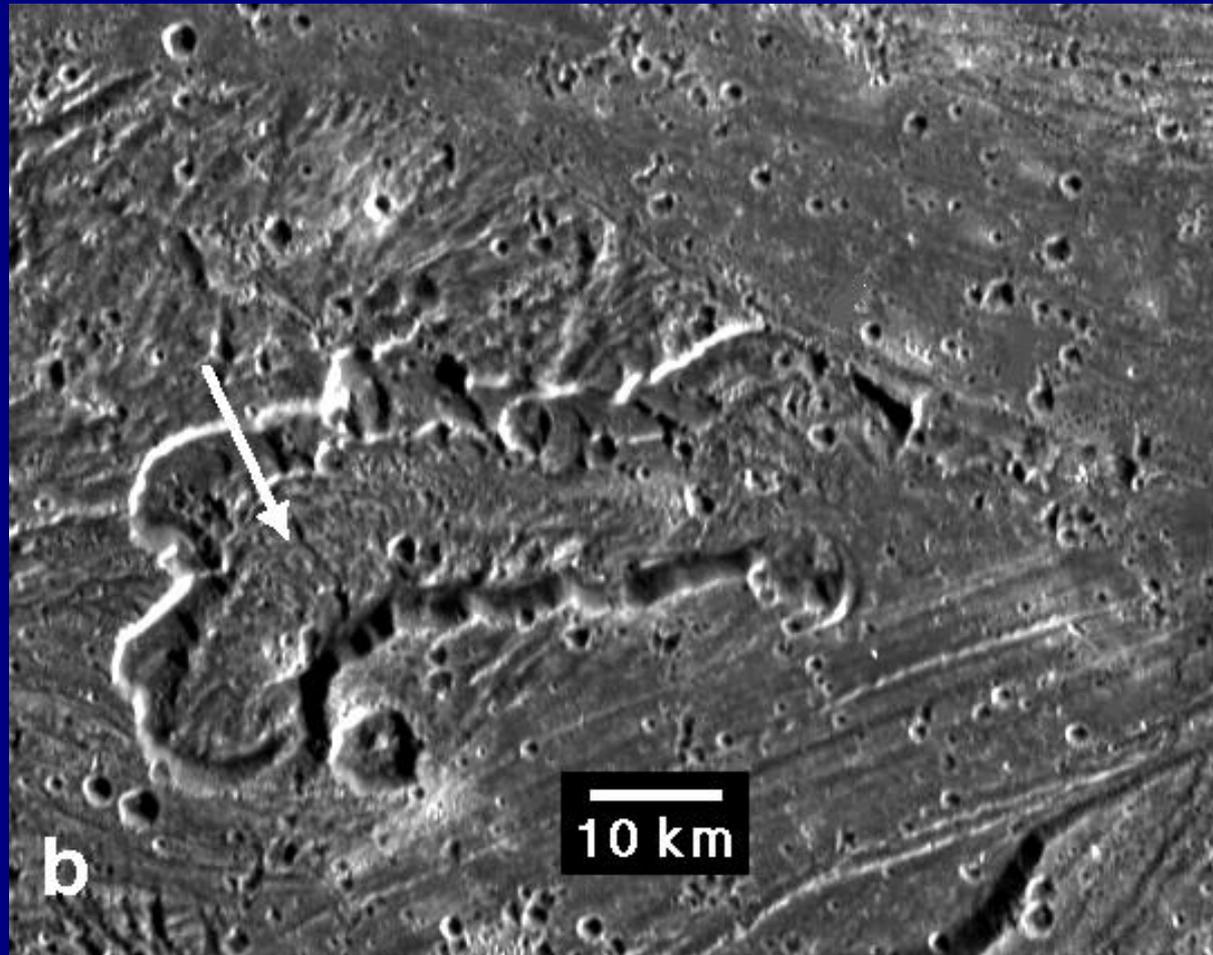
Les régions claires ne se sont pas toutes faites en même temps.

Erech Sulcus.

Deux zones claires se rencontrent. L'une, recouvrant l'autre, est plus récente.

[Galileo, lunar & planet Inst, Houston, NASA, Nature 2001]

Ganymède



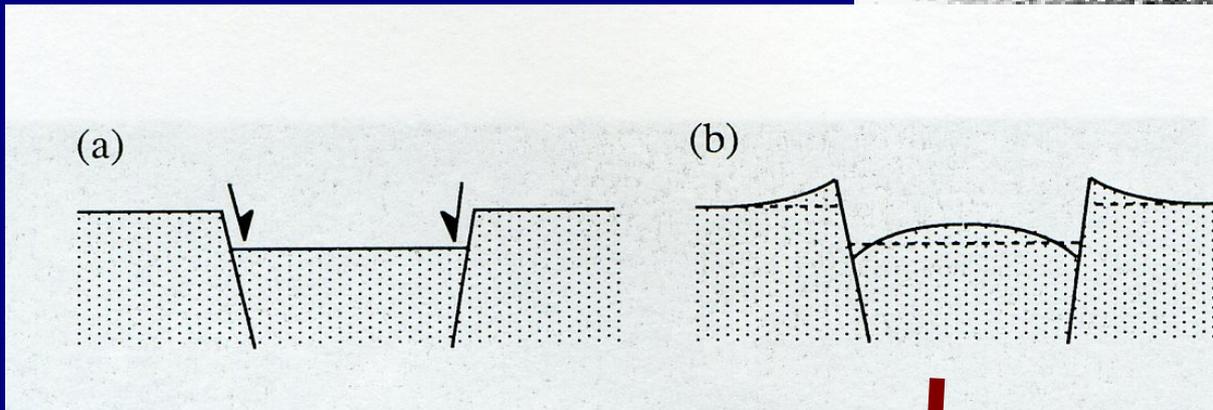
Des volcans ont existé. Même avec une caldera.

Sippar Sulcus.

Au bout de la flêche, une caldera... petite certes.

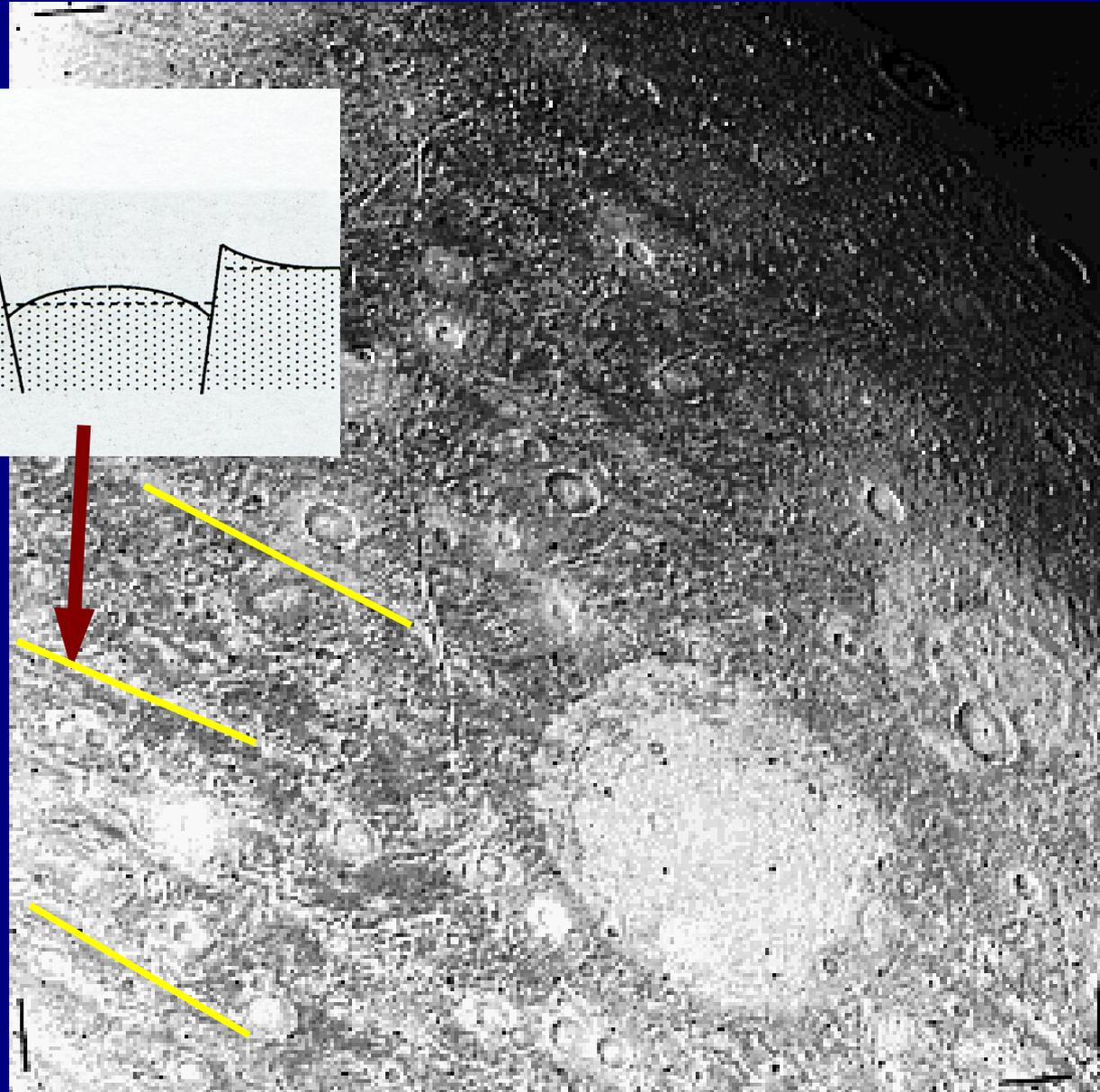
[Galileo, lunar & planet Inst, Houston, NASA, Nature 2001]

Ganymède, formation des sillons

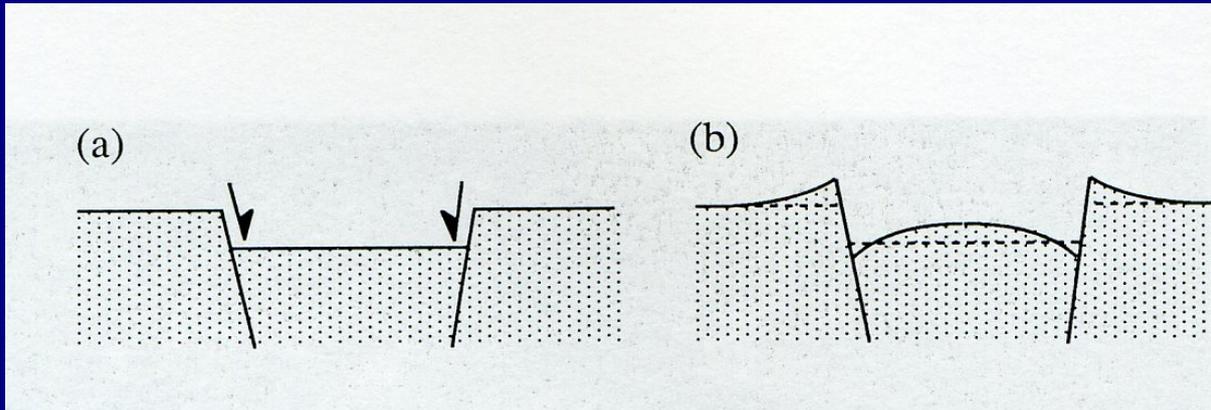


Formation d'un graben : un fossé tectonique entre des failles.
La phase (b) est dite de relaxation visqueuse et ne se produit que si la glace n'a pas été trop froide ; ce qui semble être le cas sur Ganymède (pas sur Callisto).

Ces graben seraient une explication aux sillons (en jaune ici).



Sur Terre...



En géologie, un graben est un fossé tectonique d'effondrement situé entre des failles normales. Le compartiment soulevé par rapport au graben est appelé horst. Ce phénomène résulte d'une remontée de matériel chaud provenant de l'asthénosphère, créant une tension au niveau de la surface de la lithosphère. Cette tension se traduit par un bombement de la croûte qui induit un effondrement du relief.

A terme, le matériel chaud perforera la surface, on parlera alors de dorsale océanique qui, par extension de la lithosphère donnera naissance à un océan. [\[Wikipedia\]](#)

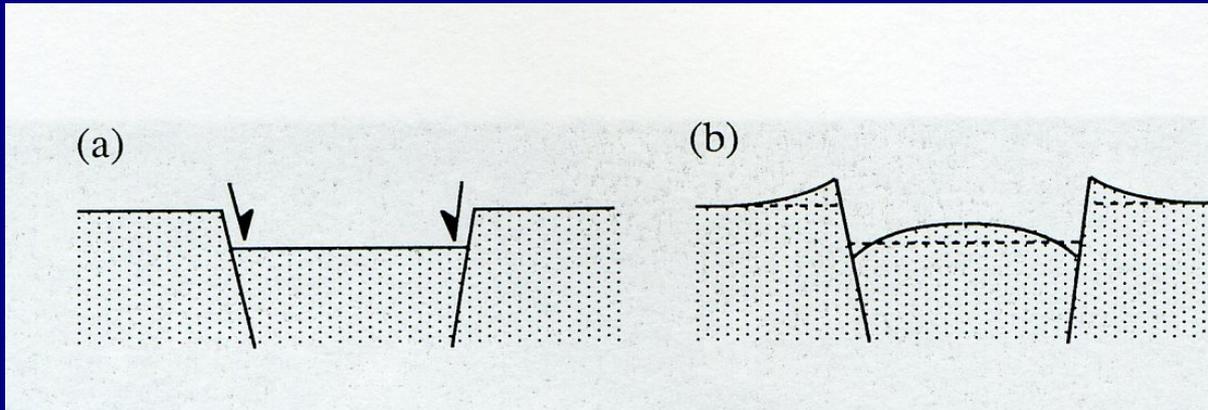
Des grabens sur Terre...



Horst et graben au Yemen, Golfe d'Aden. [[Benoit Hauville, sur Wikipedia](#)]
Autres exemple : vallée de la mort dans le Nevada,

...des graben sur Mars..

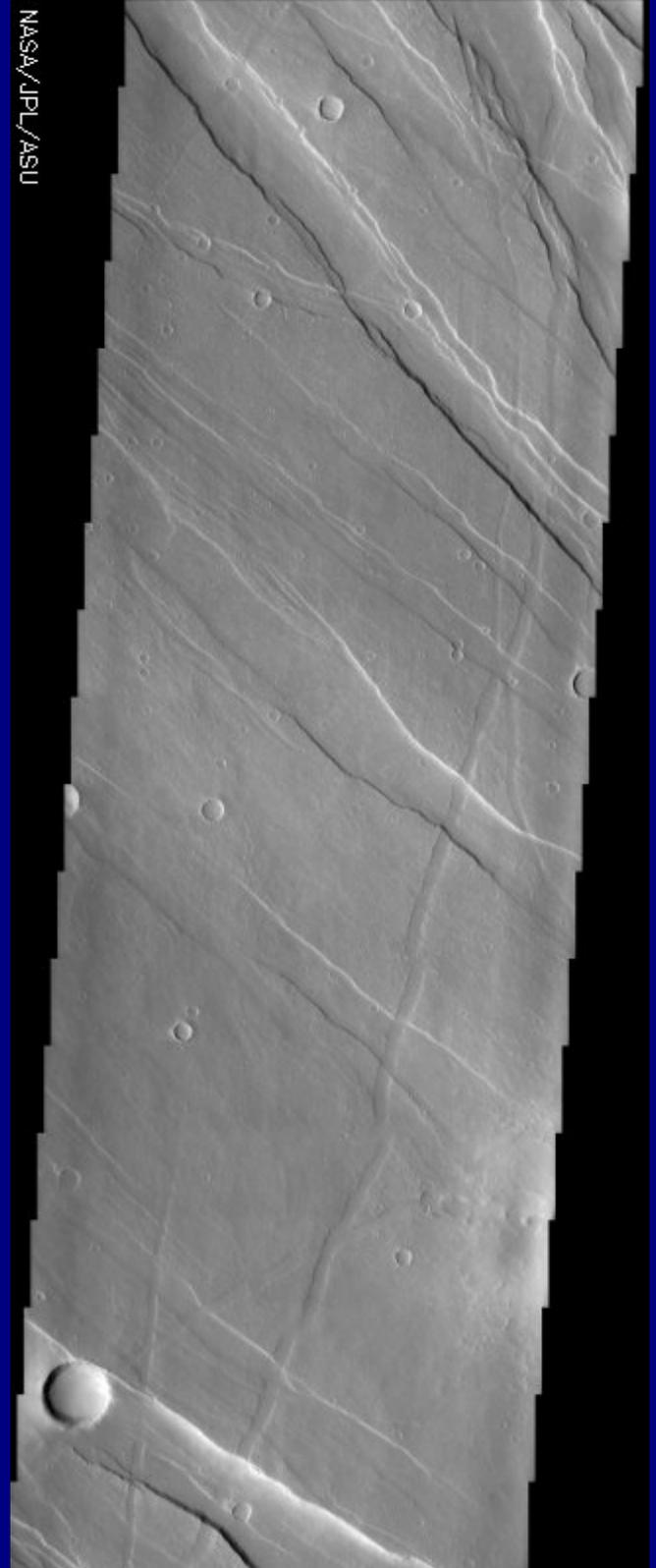
NASA/JPL/ASU



Horst et graben dans la région Tharsys de Mars.

La région Tharsis a été soumise à de fortes contraintes tectoniques. Tharsis est la région des grands volcans martiens.

[Mars Odyssey 2001, camera THEMIS, NASA]



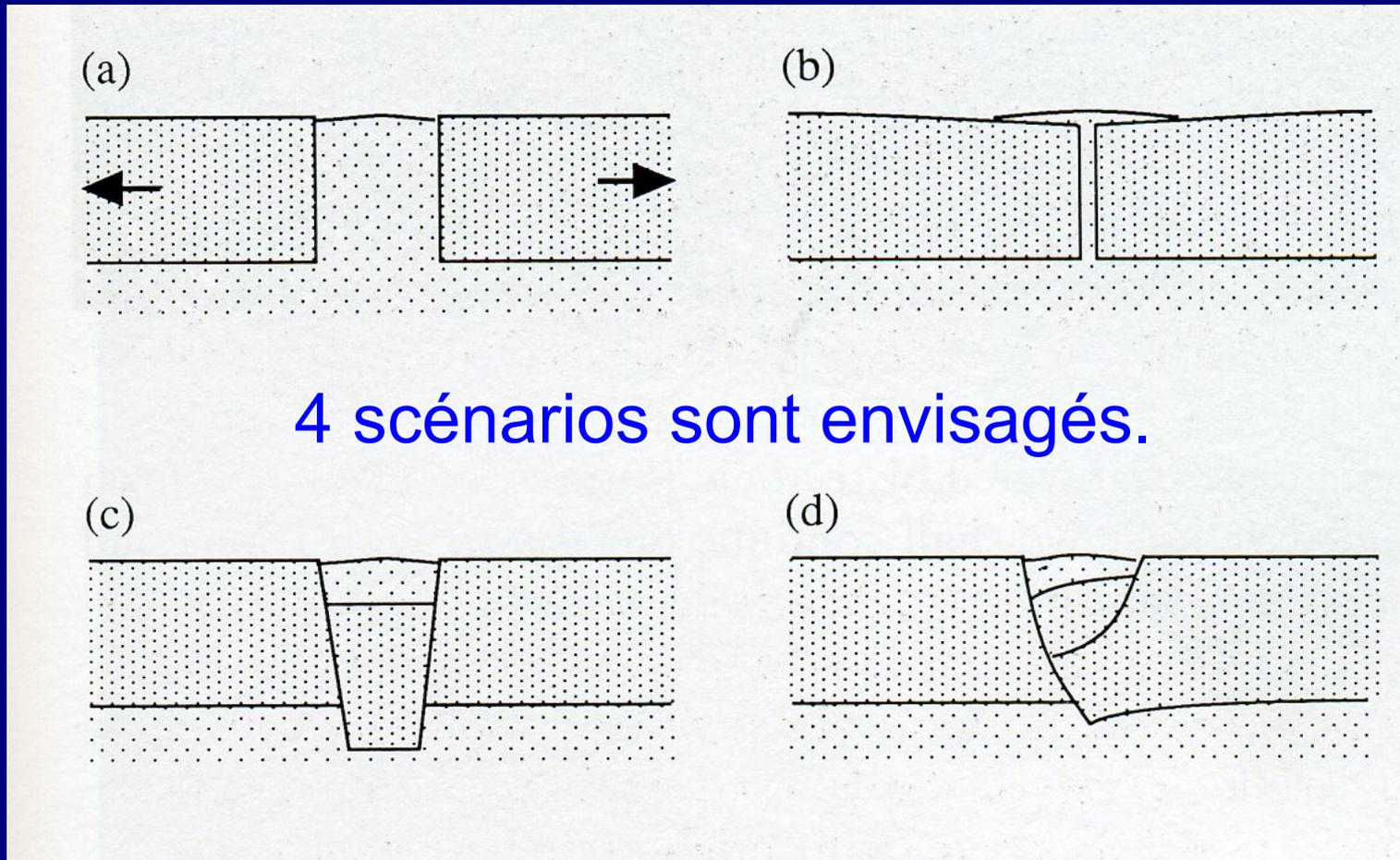
A 3D synthetic image of the Martian surface, showing a prominent graben (a linear depression) and a horst (a raised block) in the Claritas Fossae region. The terrain is rugged and reddish-brown, with numerous smaller craters and ridges. The image is presented in a perspective view, with a dark blue background representing the sky.

...des graben sur Mars...

Horst et graben dans la région Claritas Fossae, à 2000km au sud de Valles Marineris.
Image 3D de synthèse.

[MarsExpress, ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum)]

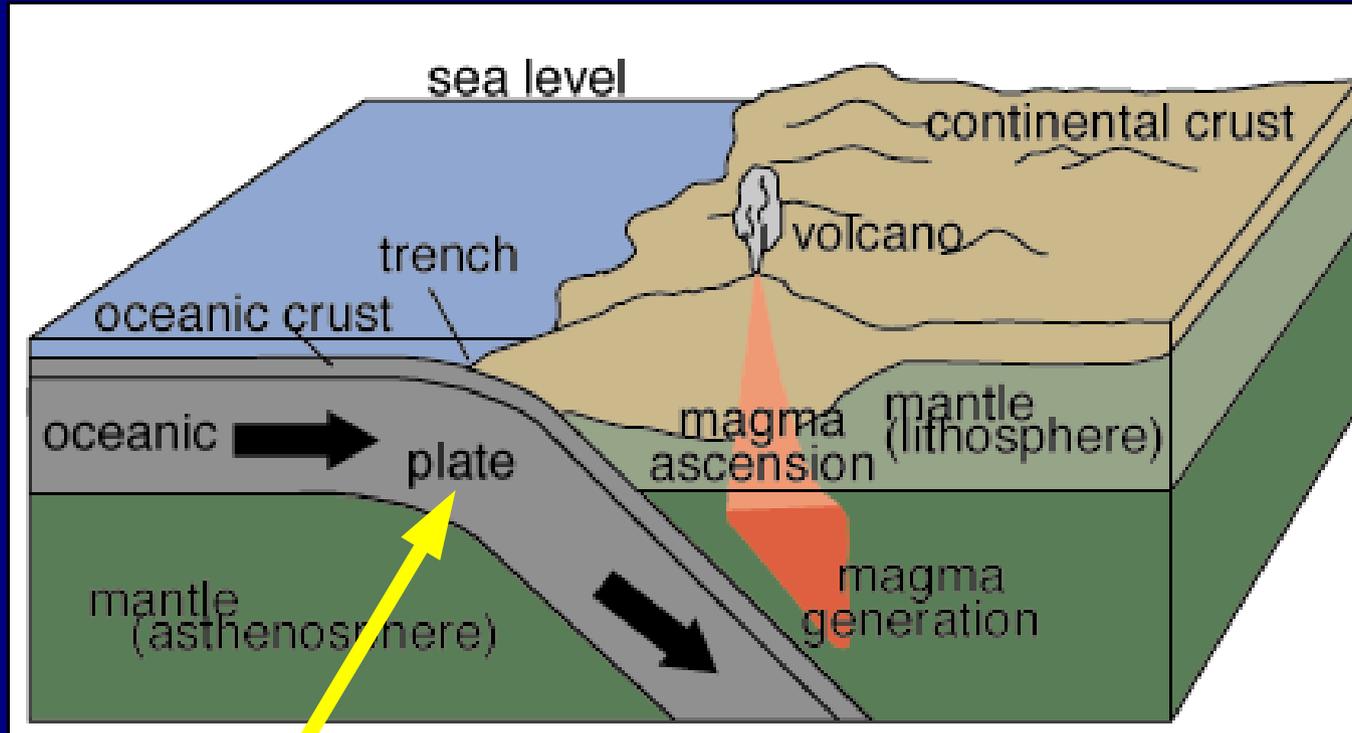
retour sur Ganymède... formation des bandes claires.



4 scénarios sont envisagés.

(a) Un fort écartement de plaques de la lithosphère. Du magma remonte. Le magma correspondrait sur Terre à la croûte océanique. Mais pour que des plaques s'écartent autant, il faut des zones de subduction.

Cas de la Terre

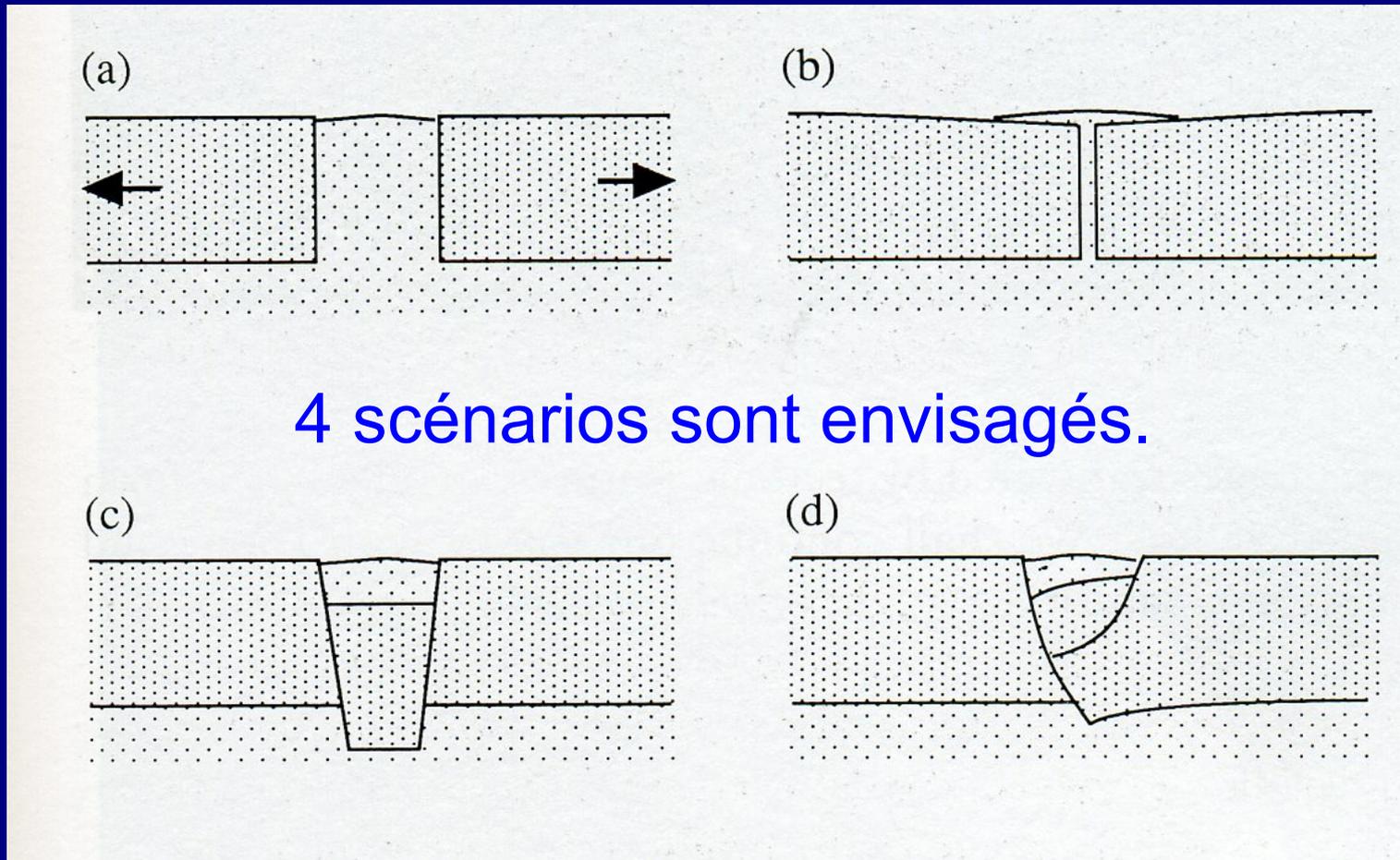


Zone de subduction. Là où une plaque océanique (en expansion) passe sous une plaque continentale. On n'en a pas vu de trace sur Ganymède. Si il existe une tectonique des plaques sur Ganymède, elle est très restreinte (qq km).

En fait, on n'a trouvé aucune zone zone de subduction hors de la Terre.

[Keith-Wiess Geological Laboratories; Rice University]

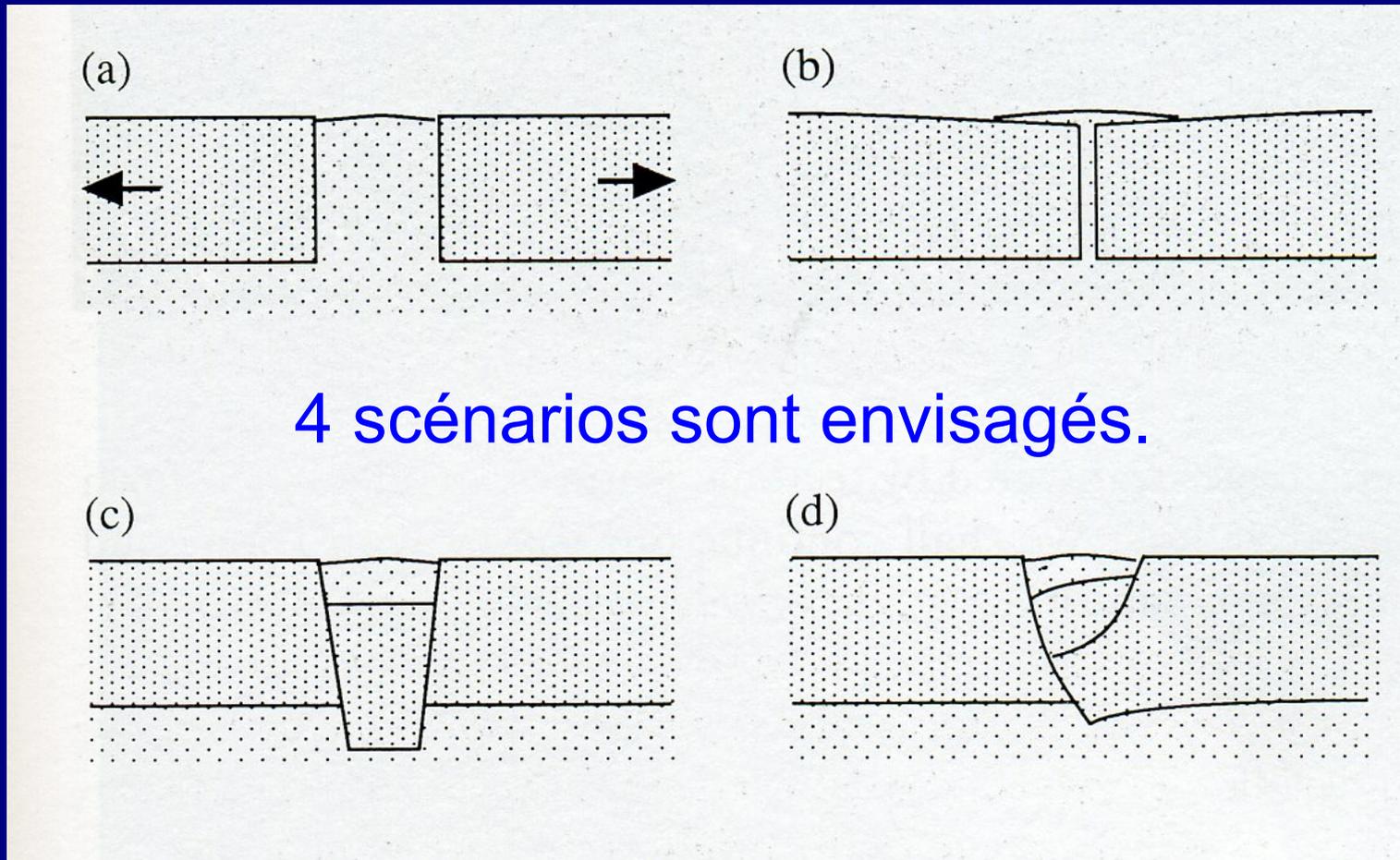
retour sur Ganymède... formation des bandes claires.



4 scénarios sont envisagés.

(b) Un faible écartement de plaques de la lithosphere. Du magma remonte et se répand tout autour. Mais dans ce cas, les bords seraient très irréguliers, pas de structures alignées.

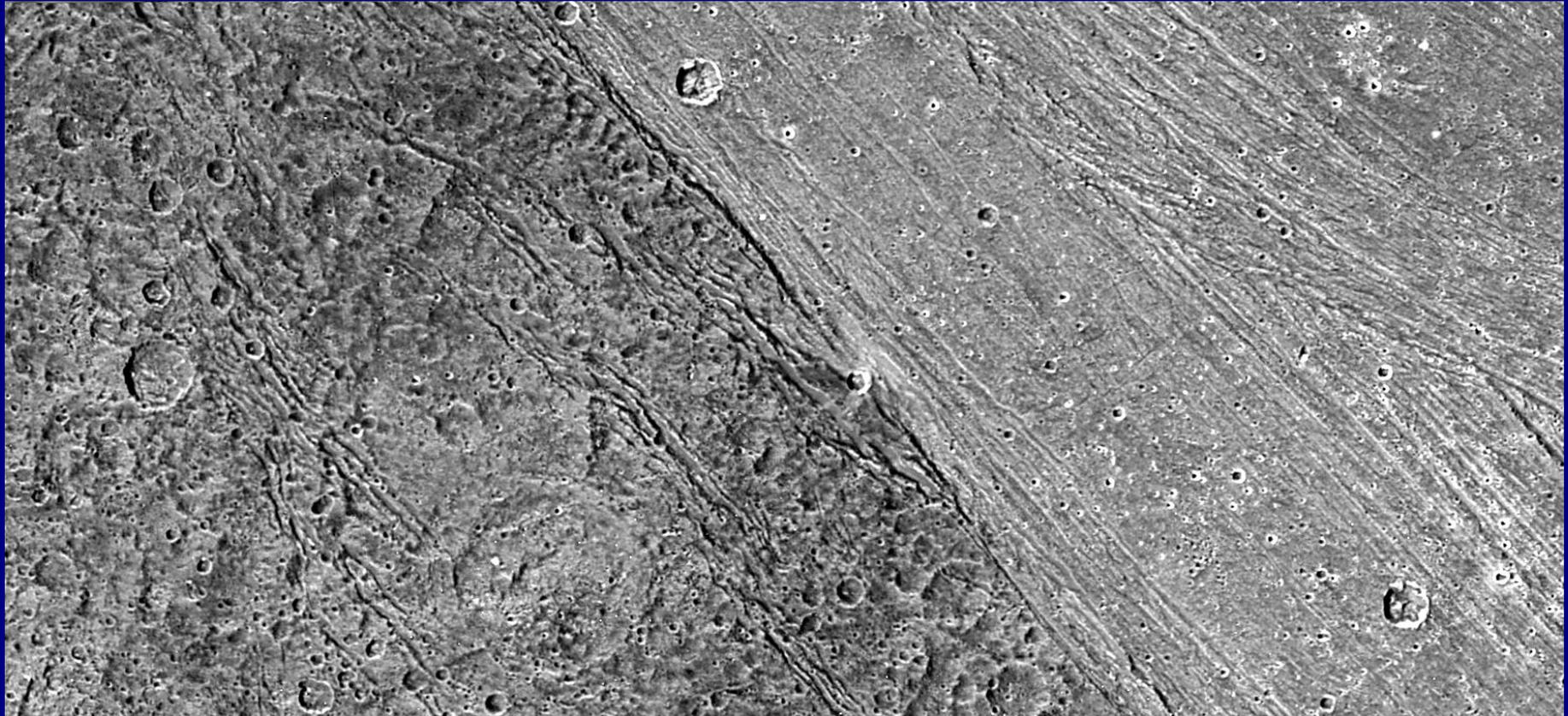
retour sur Ganymède... formation des bandes claires.



4 scénarios sont envisagés.

(c) et (d) Une fissure tectonique entraîne la formation d'un graben très large.
Il se remplit par les bords (fissures comme le cas b).
Pas besoin de tectonique des plaques forte ou de subduction.
Bords ayant la même régularité que les failles.

retour sur Ganymède... formation des bandes claires.

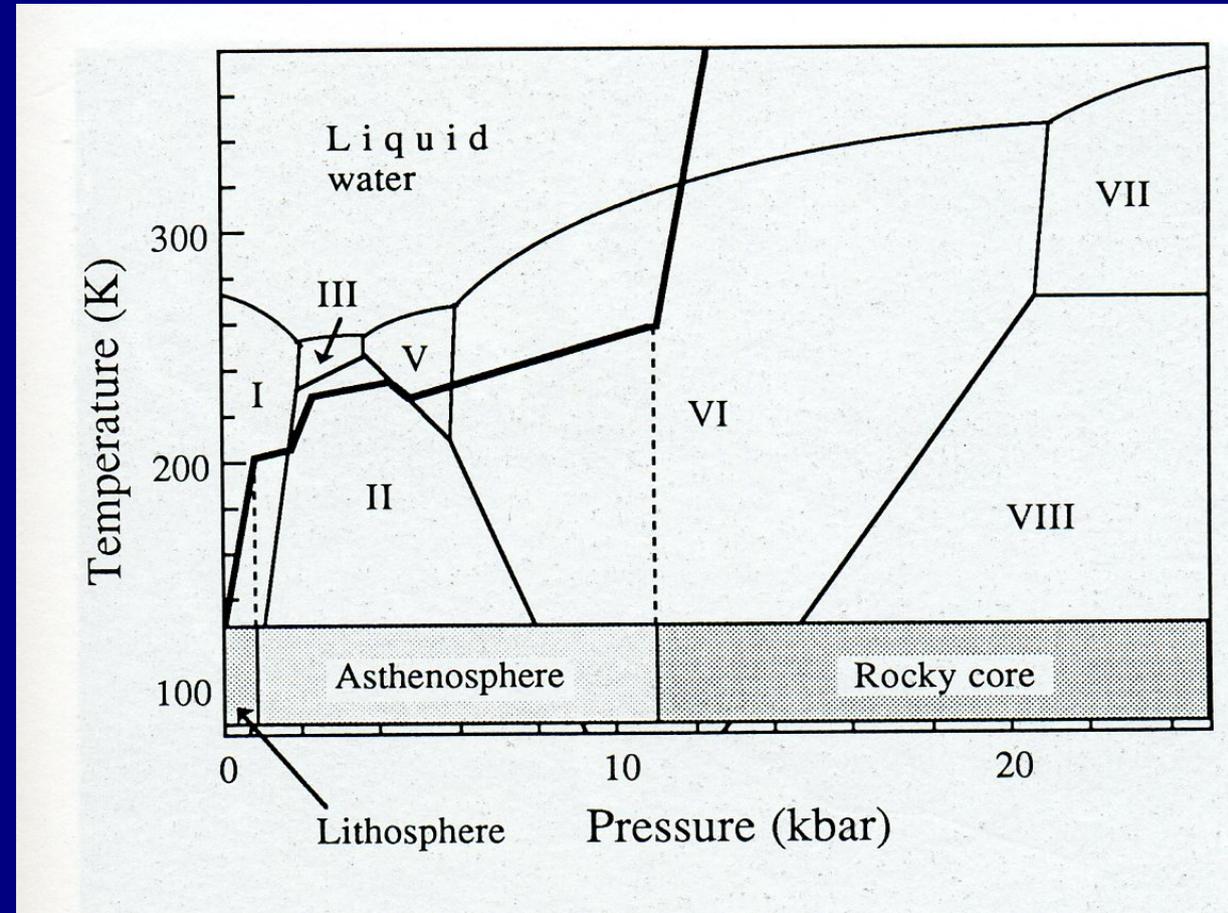
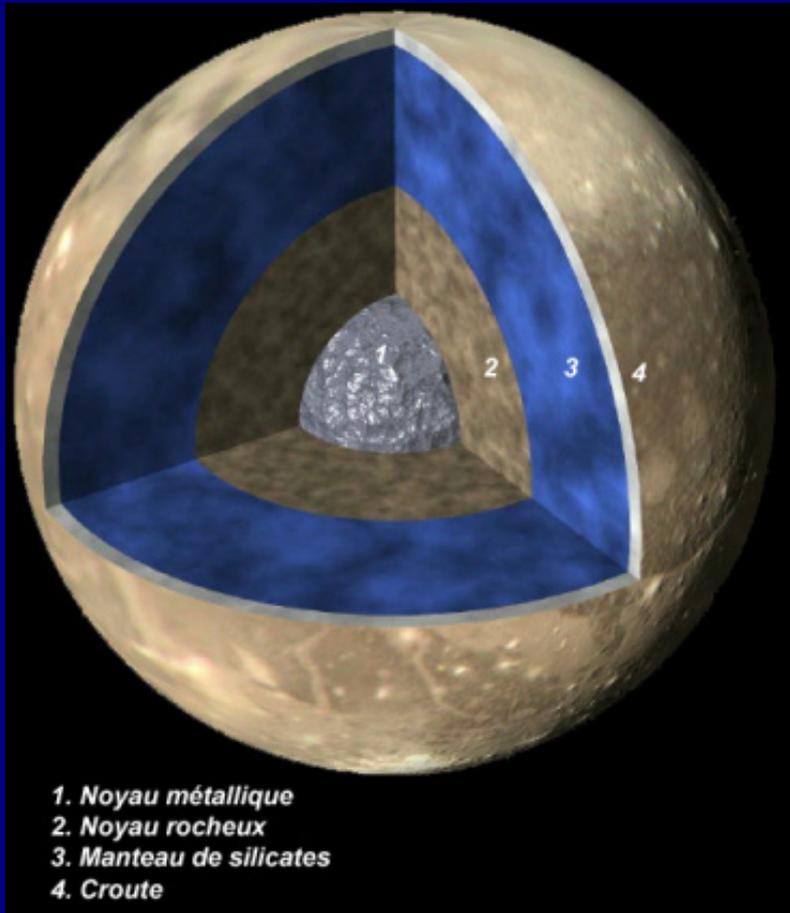


(c) et (d) Une fissure tectonique entraîne la formation d'un graben très large.
Il se remplit par les bords (fissures comme le cas b).

Pas besoin de tectonique des plaques forte ou de subduction.

Bords ayant la même régularité que les failles. C'est l'hypothèse retenue actuellement.

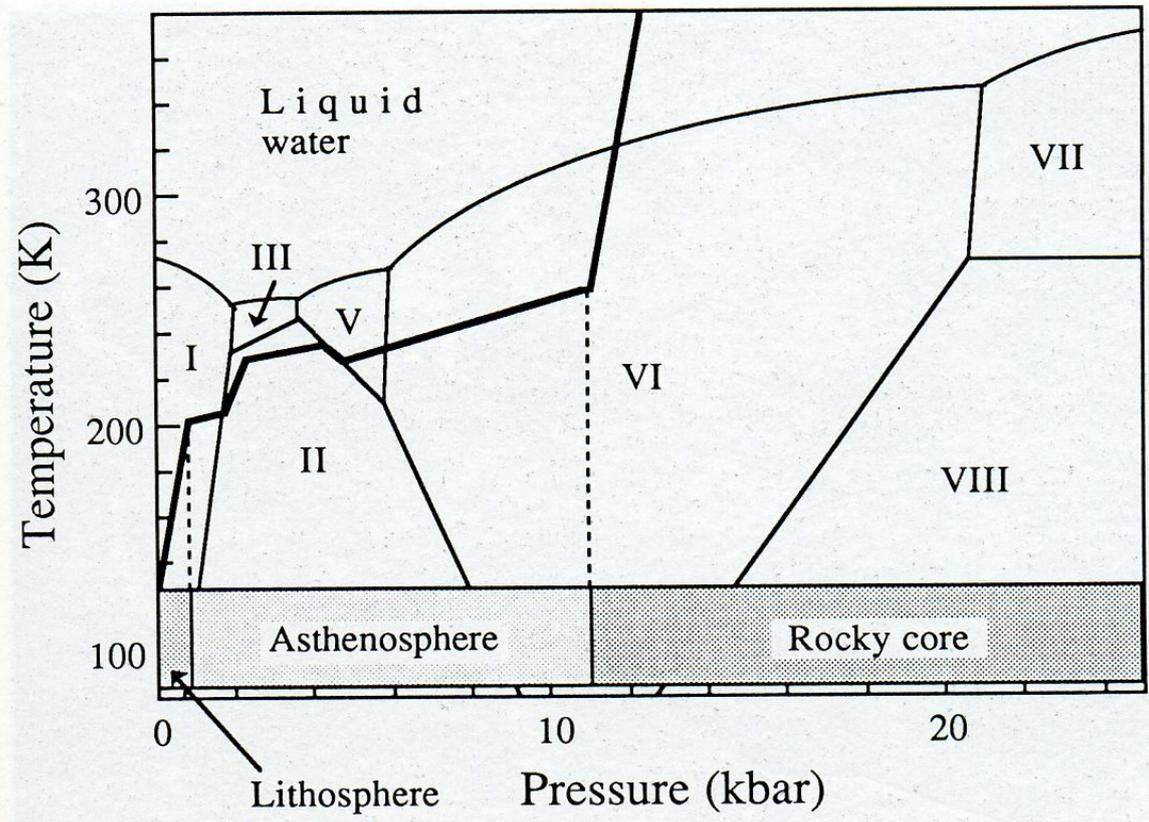
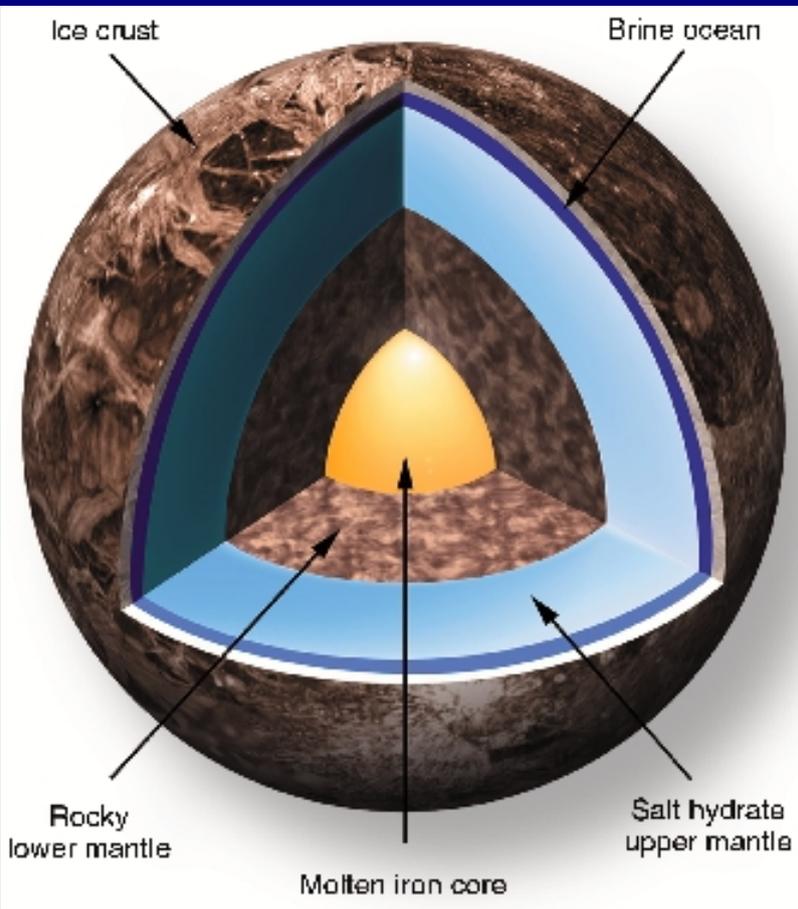
La structure interne de Ganymède



La dimension du noyau interne dépend de sa composition : 400 km si Fe. 130 km si Fe et composant plus léger (souffre). A gauche, un modèle avec un noyau métallique (petit). La manteau de silicates est-il compatible avec les régions claires composées de glace ?

A droite : structure moins profonde, fondée sur un forte proportion de glace. [D. Rothery]

La structure interne de Ganymède



La dimension du noyau interne dépend de sa composition : 400 km si Fe. 130 km si Fe et composant plus léger (souffre). A gauche, un modèle avec un noyau métallique (petit). Le manteau serait riche en sel (magnesium et souffre) [D. Fortes, Univ. college, Londres]

A droite : structure moins profonde, fondée sur un forte proportion de glace. [D. Rothery]

Les planètes qui furent actives

- Mars (?)
- Vénus (?)
- Ganymede (Jupiter)
- Dione (Saturne)
- Thetys (Saturne)
- Ariel (Uranus)
- Titania (Uranus)
- **Miranda** (Uranus)



survol rapproché par Voyager 2 [NASA]

Pourquoi la surface de Miranda est-elle si tourmentée ?

Découverte par Kuiper en 1948.

$R=236$ km. Gravitation faible, mais suffisante pour rendre l'astre sphérique.

Une faible gravitation autorise des reliefs accentués (ils pèsent moins lourd).

densité : $1,35 \pm 0,4$.

suggère un mélange de glaces (40 à 70%) et de roches.

l'albedo est assez uniforme : 0,27

température -187°C ou 86 K.

surface de glace d'eau (spectroscopie).

le plus proche « gros » satellite d'Uranus.

Le satellite le plus cratérisé d'Uranus.

Des grandes structures étonnantes : les coronae.



survol rapproché par Voyager 2 [NASA]

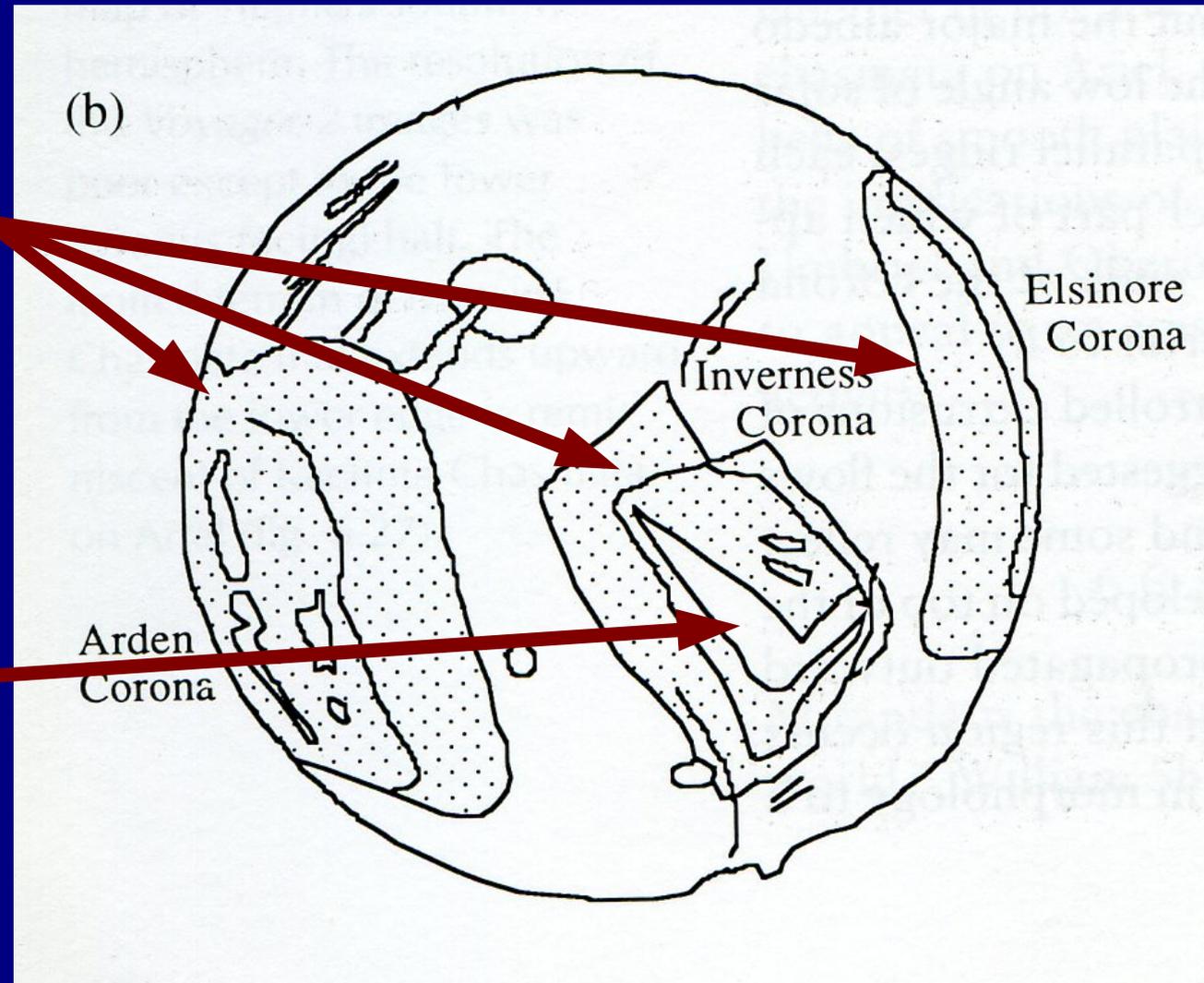
Pourquoi la surface de Miranda est-elle si tourmentée ?

Trois grandes structures étonnantes : les couronnes.
Comment ont-elles été formées ?

Les couronnes ont moins de cratères.

Elles ont des ceintures claires et sombres, et des arrêtes.
Inverness : une falaise de 10km d'altitude.

Pourquoi ce chevron en sol clair ?



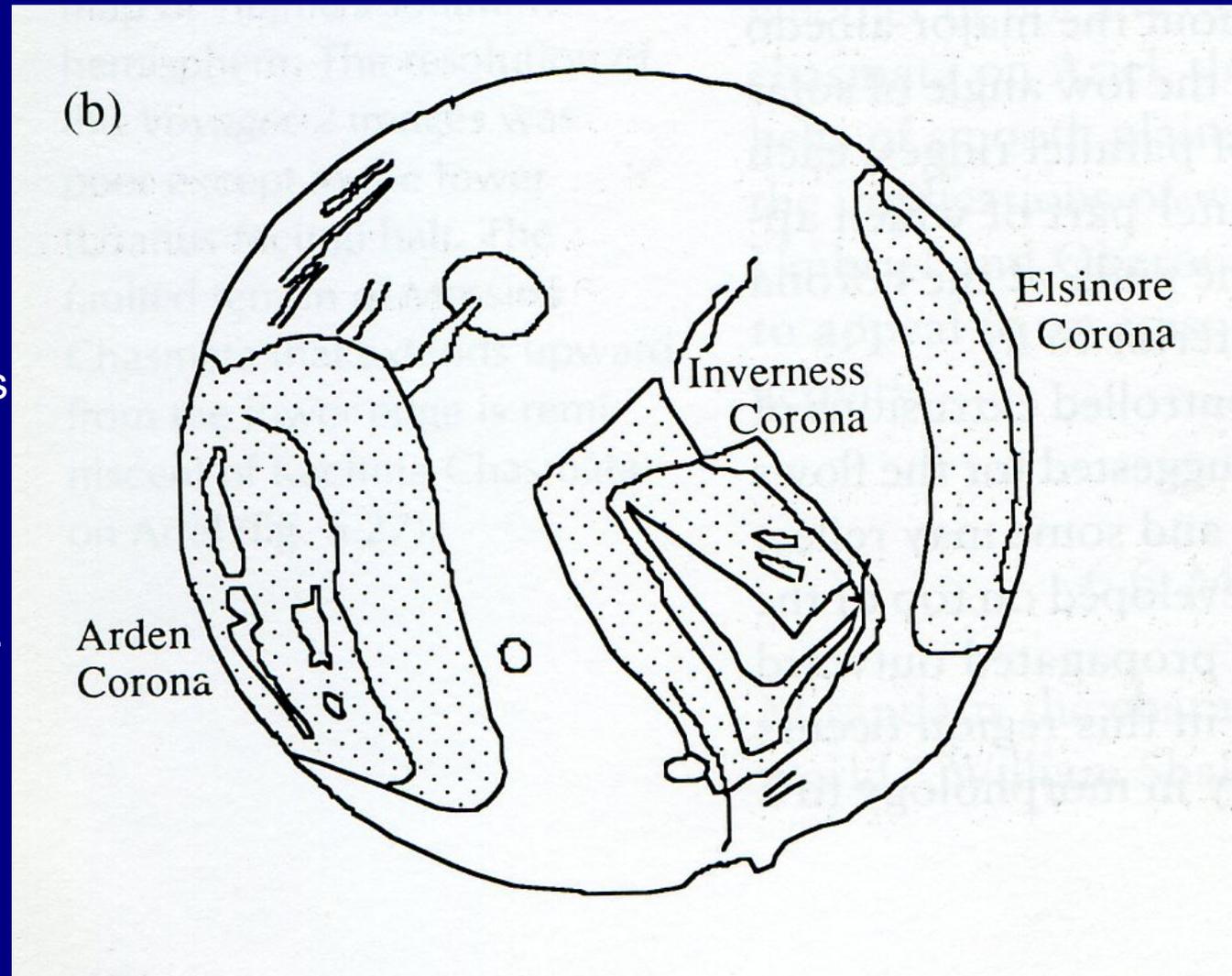
Pourquoi la surface de Miranda est-elle si tourmentée ?

Les couronnes semblent des terrains plus récents, ils portent moins de cratères. Les cratères des couronnes sont effilés.

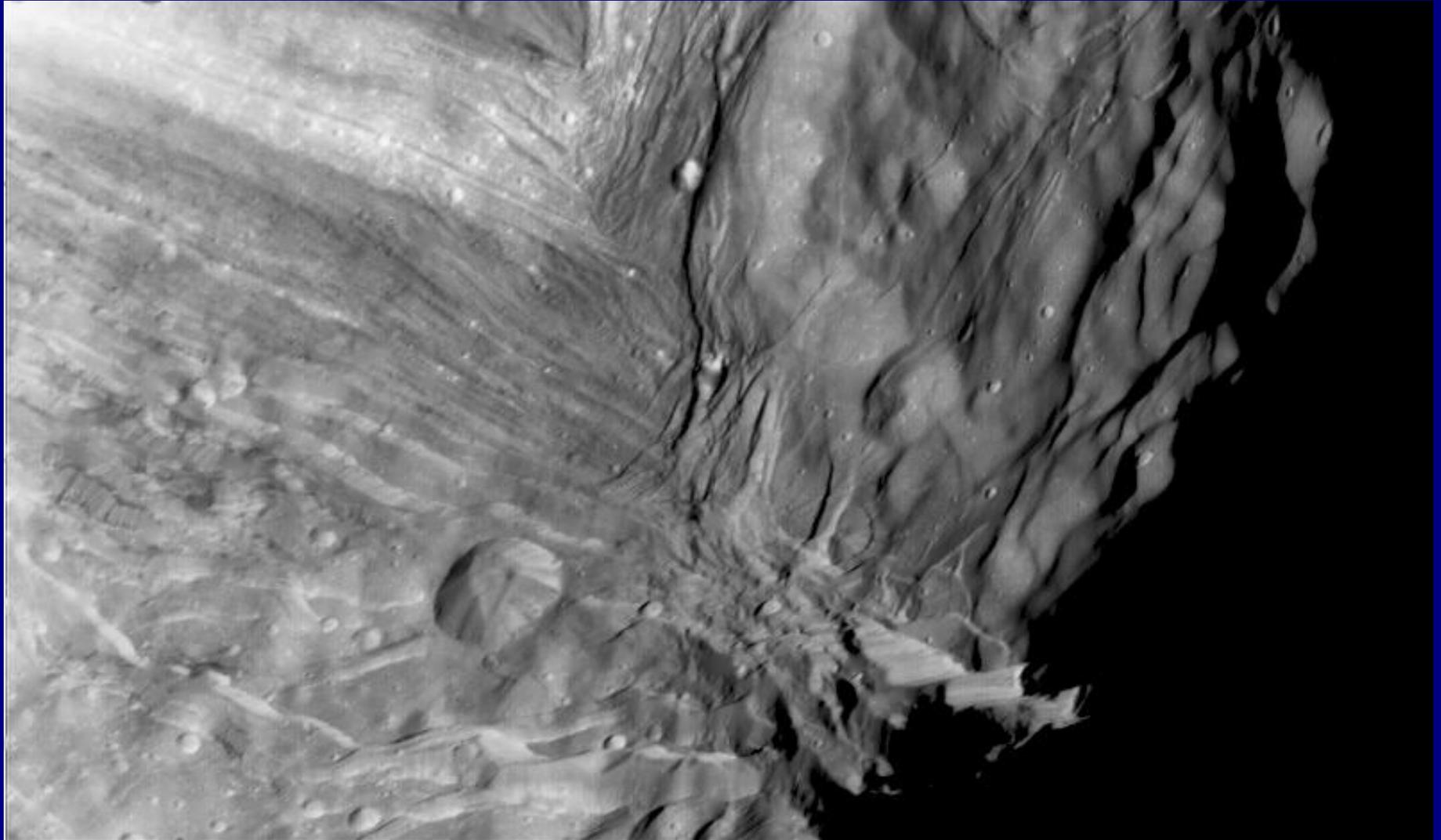
(Autant de cratères effilés dans les régions adjacentes, mais d'autres bien plus érodés.)

On trouve dans les couronnes des séries d'escarpements élevés. Inverness corona a une falaise de 10 km.

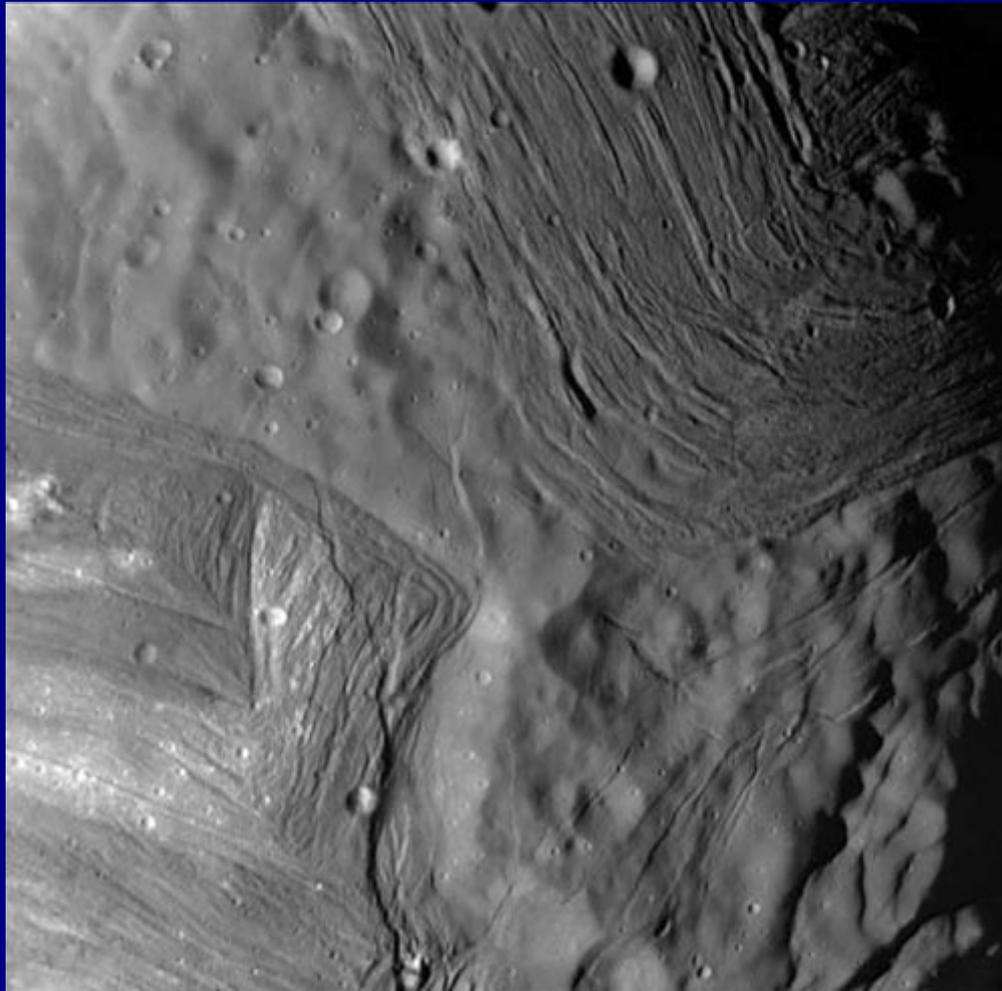
Les couronnes ont des contrastes d'albedo plus poussés.



Miranda, Inverness Corona



Le chevron et autres zones claires.



Possibilité de failles et de graben, et resurfaçage, comme sur Ganymede.

Sur l'origine des couronnes ?

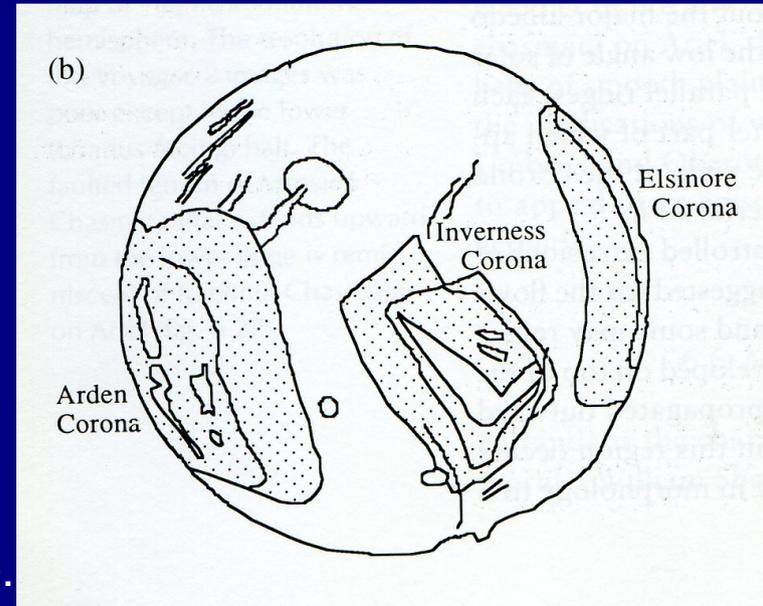
Quelques hypothèses :

une formation catastrophique due à un impact.

L'impact aurait eu lieu à Arden. Par réchauffement il aurait engendré du cryovolcanisme, reformant la surface.

Par la réactivation de fractures tectoniques, réactivation de cryovolcanisme et de soulèvements à Inverness.

Puis, plus tard, propagation jusqu'au coté opposé : Elsinore.



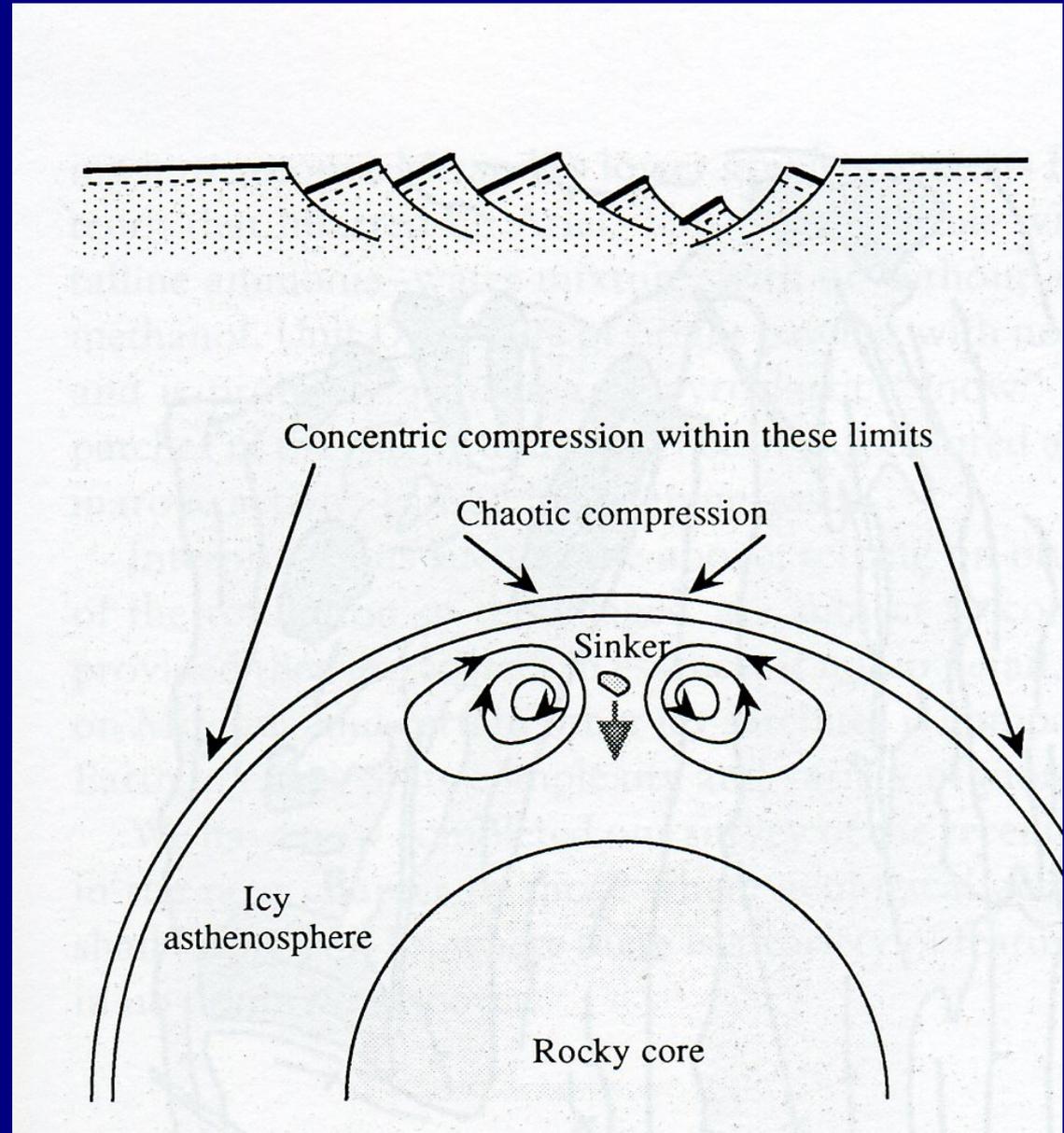
Sur l'origine des couronnes ?

Quelques hypothèses :

Des impacts lors d'une phase de ré-accretion. Les impacts, avec d'autres objets en orbite autour d'Uranus, sont à faible vitesse.

Des rochers 10-20km en silicate, pour former une couronne. Après l'impact, ils s'enfoncent doucement dans le manteau, activant le cryo-volcanisme et des compressions plus ou moins concentriques.

1 impact forme 1 bassin.



[D. Rothery]

Sur l'origine des couronnes ?

Quelques hypothèses :

Un effet de la convection dans le manteau de Miranda, alors que celle-ci, du fait de sa légèreté, était peu différenciée.

Les couronnes auraient été formées par des anomalies de densité dans le manteau.

Sur l'origine des couronnes ?

Les hypothèses ne manquent pas.

Elles considèrent presque toutes une surface formée d'eau et d'ammoniac, compatible avec la composition de d'Uranus.

Elles se fondent sur des calculs où règnent encore beaucoup d'inconnues.

Dans tous les cas, des phénomènes volcaniques variés (autant que sur la Terre) entrent en jeu.

Les planètes qui furent actives

- Mars (?)
- Vénus (?)
- Ganymede (Jupiter)
- Dione (Saturne)
- Thetys (Saturne)
- Ariel (Uranus)
- Titania (Uranus)
- Miranda (Uranus)

Les planètes actives

- Terre
- Io (Jupiter)
- Europe (Jupiter)
- Encelade (Saturne)
- Triton (Neptune)
- Une reformation actuelle de leurs surface liée à une activité interne.