

# ARTICLE DE FOND

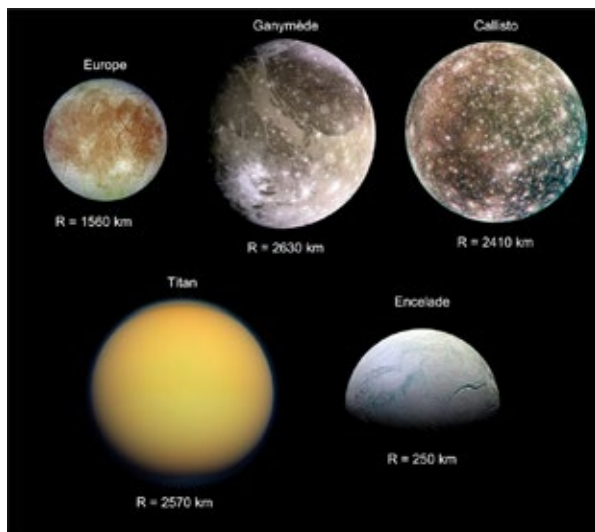
## La promesse d'habitabilité des lunes glacées du Système solaire

**Ines Belgacem**, planétologue, chercheuse en post-doctorat à l'Agence Spatiale Européenne (ESA) à Madrid

*Les lunes glacées du Système solaire sont au centre des intérêts des planétologues. La raison principale est qu'elles sont des candidats de choix dans la recherche d'environnements potentiellement habitables.*

Dans le passé, la « zone habitable » autour d'une étoile était définie par la distance à laquelle l'eau liquide pouvait exister à la surface d'une planète orbitant autour d'elle. Avec les lunes glacées, nous avons découvert une nouvelle façon d'étudier l'habitabilité avec de potentiels habitats en profondeur et non plus à la surface.

On parle ici des lunes glacées majeures que sont Europe, Ganymède et Callisto orbitant autour de Jupiter ainsi que Titan et Encelade autour de Saturne. Bien qu'elles aient toutes leurs particularités, elles ont en commun d'abriter un océan d'eau liquide sous leur surface de glace.



**Fig.1.** Vue des principales lunes glacées de Jupiter (haut) et Saturne (bas). Crédit : NASA/JPL-Caltech/DLR (haut) et NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute (bas).

Leurs surfaces sont très variées et reflètent différents niveaux d'activité présente et passée avec des signes de cryovolcanisme pour les unes, de nombreux cratères d'impacts pour d'autres.

Les forces de marées engendrées par les géantes Jupiter et Saturne apportent à ces lunes de l'énergie thermique et permet aux océans d'eau liquide d'exister sous la croûte de glace. Ces forces de

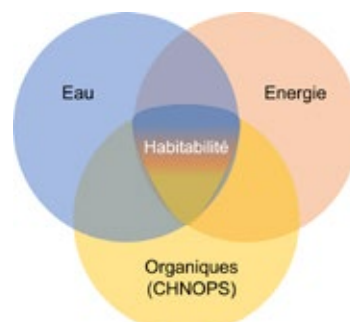
marées n'affectent pas tous ces corps de la même façon. Plus ces lunes sont proches de leur planète et plus les forces de marées sont fortes.

Ces lunes glacées sont, pour la plupart, des corps complètement différenciés avec un noyau solide, un manteau rocheux et des couches d'eau et de glace. Ces modèles intérieurs sont basés en grande partie sur les mesures de gravité qui ont été permises par la mission Galileo à la fin des années 1990 pour le système de Jupiter et par la mission Cassini dans les années 2000 pour le système de Saturne. Ces hypothèses dépendent aussi grandement de la composition chimique des différentes couches, notamment des espèces qui seraient présentes dans la glace et dans l'océan. Il y a encore des incertitudes, notamment sur l'épaisseur des différentes couches. Ces modèles évoluent sans cesse et seront renforcés par les données des futures missions de la décennie.

### Que veut dire habitabilité ?

L'habitabilité fait référence à la possibilité d'un environnement pouvant abriter la vie. Il faut faire la distinction stricte avec un environnement habité où la vie existe : si un environnement est habitable, cela n'implique pas nécessairement qu'on y trouvera des traces de vie présente ou passée.

Trois qualités sont nécessaires à l'habitabilité d'un environnement :



**Fig.2.** Définition schématique de l'habitabilité.

- la présence d'eau liquide ;
- une source d'énergie ;
- la présence de molécules organiques ou CHNOPS (pour les atomes de carbone, hydrogène, azote, oxygène, phosphore et soufre).

## Europe et Encelade, les prometteuses

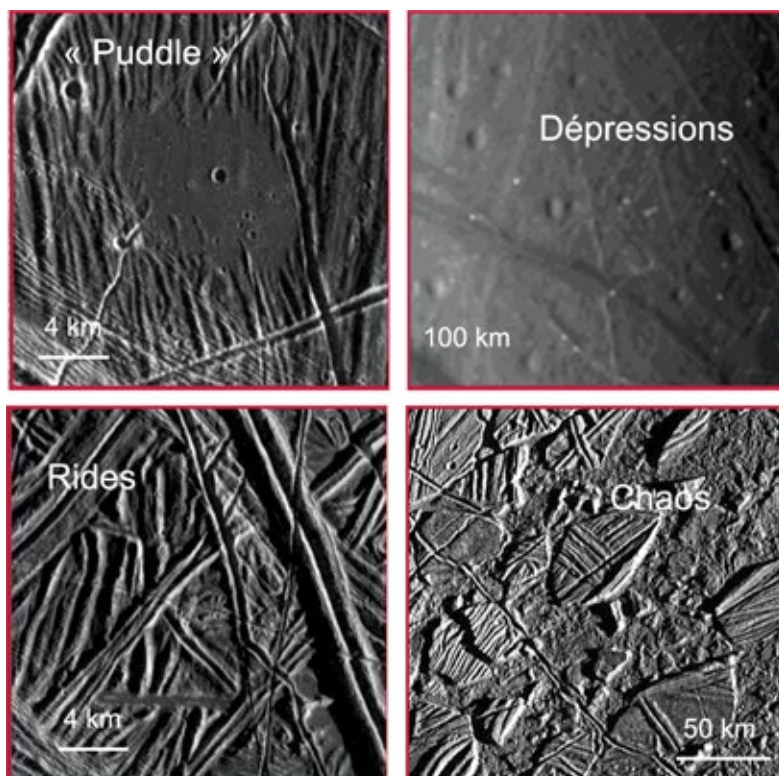
Europe et Encelade qui orbitent respectivement autour de Jupiter et Saturne sont certainement les plus prometteuses dans la recherche d'habitabilité.

Des signes d'activité actuelle et récente sont visibles à la surface comme les puissants geysers au pôle sud d'Encelade (figure 4). Dans le cas d'Europe, on peut voir des signes géologiques de cryovolcanisme – c.à.d. du volcanisme de glace et d'eau – comme les exemples de la figure 3.

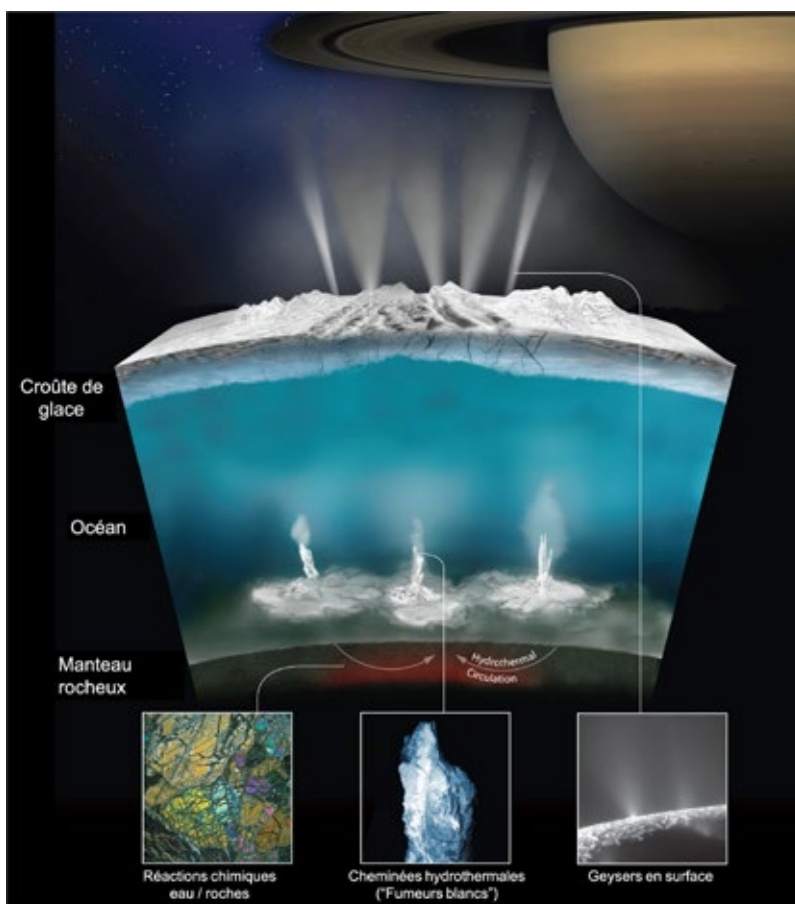
Dans le cas d'Europe comme d'Encelade, leur océan sous la surface est en contact direct avec le manteau rocheux, favorisant les échanges chimiques entre eau et roches qui contiennent des éléments plus lourds. Par analogie avec certains environnements terrestres qui ont vu naître les extrémophiles, cette caractéristique rend ces deux lunes particulièrement intéressantes dans la recherche d'environnements habitables. La figure 4 représente une possible vision de ce que l'on imagine à l'intérieur d'Encelade, les interactions entre l'océan et le manteau ainsi qu'avec la surface. On y voit, en particulier, à quoi pourrait ressembler les fonds océaniques.

Les modèles de l'intérieur d'Europe sont similaires en termes d'interactions manteau / océan mais diffèrent un peu sur l'interaction avec la surface. En effet, on n'a pas observé de geysers de façon aussi claire sur Europe bien que des observations du Hubble Space Telescope semblent pointer vers la présence au moins transitoire de geysers de vapeur d'eau.

Les geysers d'Encelade ont été découverts et observés sans équivoque par la sonde Cassini. Après un passage à travers la vapeur d'eau, les instruments ont pu



**Fig.3.** Exemples de structures géologiques qui indiquent des signes d'activité récente sur Europe (crédit : NASA/JPL-Caltech/DLR).



**Fig.4.** Vue d'artiste de l'intérieur d'Encelade et de l'activité possible (image adaptée en français de source NASA/JPL-Caltech/Southwest Research Institute).

identifier en plus des molécules d'eau, la présence de traces de molécules organiques.

Contrairement à Encelade dont l'océan serait à peine à quelques dizaines de kilomètres de la surface (voire même à 5 km au pôle Sud !), l'océan d'Europe serait à une centaine de kilomètres de profondeur. Cela rend les futures explorations directes de l'océan très difficiles. Cependant, les modèles de cryovolcanisme – que l'on essaie encore de contraindre – ainsi que les analyses chimiques semblent pointer vers la présence d'éléments de l'océan qui remonteraient jusqu'à la surface comme les sels.

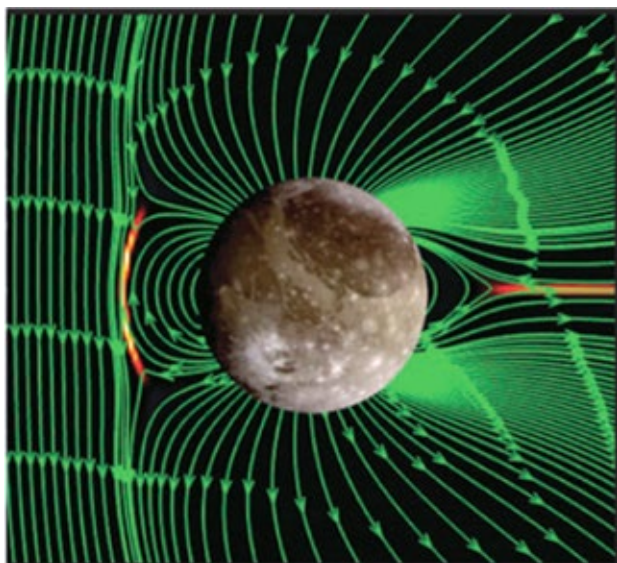
## Ganymède, l'énigmatique

Ganymède est la plus grande lune du Système solaire avec un rayon même supérieur à la planète Mercure.

Contrairement à sa petite sœur Europe, l'océan de Ganymède n'est pas en contact direct avec le manteau rocheux mais en est séparé par des couches de glaces haute pression. Cependant, des études ont montré qu'elles n'interdisaient pas nécessairement les échanges de matériel entre l'océan et le manteau.

Mais le caractère unique de Ganymède lui vient de son champ magnétique interne. C'est le seul satellite naturel à en posséder un. Si sa mesure ne fait aucun doute grâce aux mesures de la sonde Galileo, l'explication de cette caractéristique unique reste encore un mystère.

Ce champ magnétique crée, tout comme dans le cas de la Terre, une magnétosphère autour de Ganymède. Jupiter ayant elle-même un fort champ magnétique, on a une situation particulière de deux magnétosphères imbriquées.



*Fig.5. Représentation des lignes de champ magnétique autour de Ganymède. Crédit : X. Jia (University of Michigan) and M. Kivelson (UCLA).*

La surface de Ganymède est une combinaison de terrains sombres et très cratérisés comme sur Callisto et de terrains clairs et peu cratérisés – donc plus jeunes – avec des signes d'activité récente comme sur Europe. La figure 9 compare ces trois surfaces. Plus les corps sont proches de Jupiter et plus ils ont une surface jeune et sont actifs, les effets de marées étant plus forts. Plus ils sont éloignés et moins la surface se renouvelle.

Ganymède a donc un potentiel d'habitabilité moins évident que sa voisine Europe avec une énergie thermique moins importante du fait de sa distance à Jupiter et des échanges chimiques moins faciles en profondeur. Mais elle reste une candidate sérieuse sur laquelle on a encore beaucoup à apprendre.

## Callisto, l'ancienne

Bien qu'assez massive avec une taille à peine moins importante que Ganymède, Callisto est la lune galiléenne la plus éloignée de Jupiter. En conséquence, les forces de marées qui décroissent avec le cube de la distance y sont beaucoup moins fortes que pour Europe, par exemple. Le résultat est qu'aucune activité n'est visible à la surface de Callisto. Plus précisément, l'altération des paysages de Callisto est majoritairement causée par l'érosion. Ainsi, la figure 6 montre un exemple de cratères érodés créant des structures que l'on appelle « knobs » sur lesquels de la glace d'eau peut se déposer en altitude.

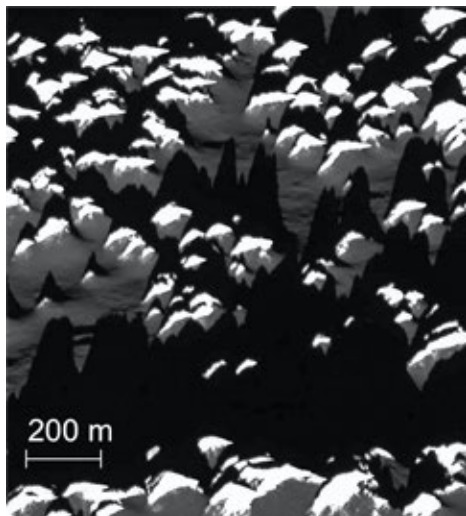
C'est d'ailleurs une des surfaces les plus âgées du Système solaire avec une complète saturation de la surface en cratères. Le nombre de cratères nous permet de dater une surface planétaire et quand cette surface est saturée cela signifie que tout nouveau cratère ne pourrait se former qu'au sein d'un cratère déjà existant tant ils sont nombreux (voir figure 9, troisième image).

Cependant, il semblerait qu'un océan liquide soit tout de même présent à l'intérieur de Callisto. Comme pour les autres lunes de Jupiter, il a été identifié par la sonde Galileo par des perturbations du champ magnétique de Jupiter. Ces perturbations ne peuvent être expliquées que par le fait que Callisto possède une couche conductrice. Cette couche serait un océan d'eau liquide salée.

Malgré cela, il est très peu probable que Callisto qui n'est même pas entièrement différenciée (c.à.d. qu'elle n'a pas de noyau dense séparé d'un manteau rocheux comme ses voisines) ait des propriétés habitables.



Callisto a d'autres qualités, et par l'absence d'activité à sa surface, elle a enregistré la majorité de l'histoire des grands événements du Système solaire.



**Fig.6.** Illustration du processus d'érosion sur Callisto avec un champ de « knobs », seuls restes de cratères passés.

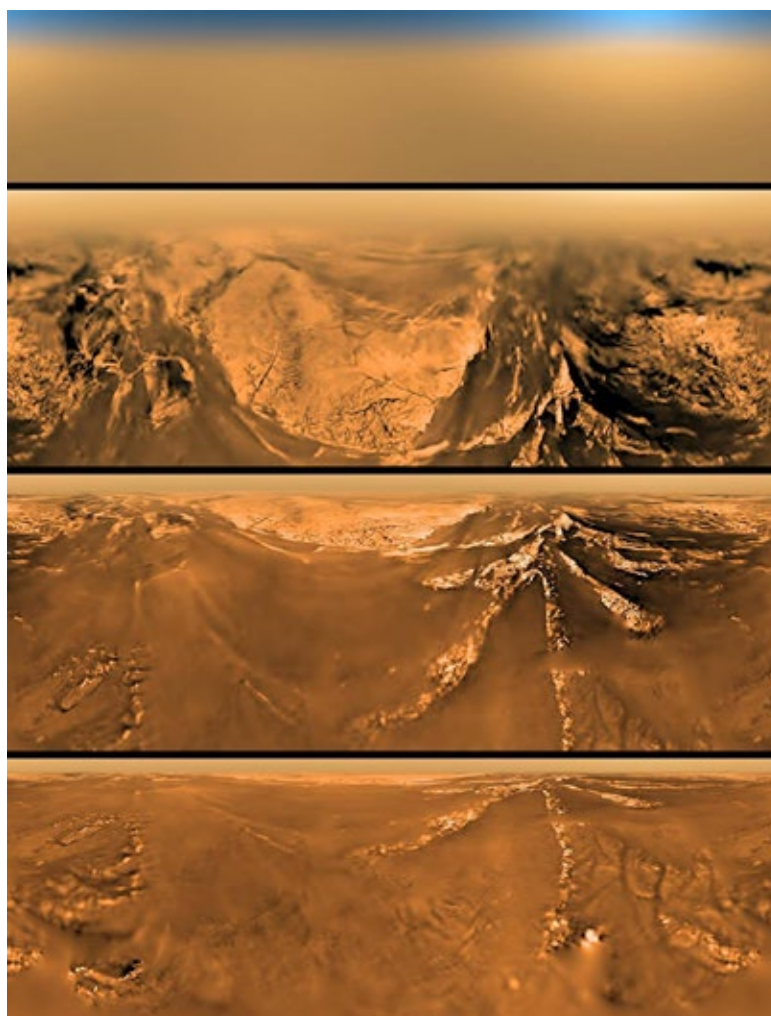
## Titan, la méthaneuse

Titan est de loin la lune de Saturne la plus importante en taille, presque aussi grande que Ganymède. Ce qui la rend unique est la présence d'une atmosphère composée majoritairement d'azote (plus de 90 %) et de méthane (environ 6 %) environ 60 % plus dense que sur Terre. Il faut l'observer en infrarouge si on veut avoir une chance d'apprécier ses incroyables paysages. En 2005, la sonde Cassini de la NASA, alors en orbite autour de Saturne, largue l'atterrisseur de l'ESA Huygens dans le ciel de Titan. La sonde a renvoyé des images à couper le souffle qui nous ont fait découvrir des paysages étonnamment proches de ce que l'on voit sur Terre avec des dunes, des étendues glacées et des lacs. Une série de clichés au cours de la descente sont représentés à la figure 7.

Contrairement à la Terre, ces lacs ne sont pas remplis d'eau mais de méthane et d'hydrocarbures. Car une chimie bien particulière est à l'œuvre sur Titan. Là où sur Terre nous avons un cycle de l'eau, c'est bien un cycle du méthane (figure 8) que l'on a sur cette

lune avec des nuages, des précipitations et des étendues liquides de méthane. On y trouve de nombreuses molécules organiques et une chimie active à la surface que l'on pense pouvoir ressembler à celle qui dominait sur une Terre primordiale il y a de cela 4 milliards d'années. Mais avec des températures frôlant les -200 degrés Celsius, aucune chance de pouvoir trouver de l'eau liquide à la surface. La surface de Titan ne remplit donc pas les conditions que l'on définit pour l'habitabilité mais on pourrait tout à fait imaginer des habitats auxquels on n'a pas encore pensé dans cet environnement exotique dont on a encore tant à apprendre.

Tout comme Europe et Encelade, Titan possède aussi un océan d'eau qui serait directement en contact avec son manteau rocheux, favorisant ainsi les échanges eau / roches. Dans notre recherche d'habitabilité, c'est donc en profondeur une nouvelle fois que l'on retrouve notre triptyque avec de l'eau liquide, de l'énergie thermique entretenue par les forces de marées et un fort potentiel chimique qui nous laisse espérer la présence de molécules organiques dans les fonds océaniques, comme en surface.



**Fig.7.** Images de la descente de Huygens dans l'atmosphère de Titan (crédit : ESA/NASA/JPL/University of Arizona).

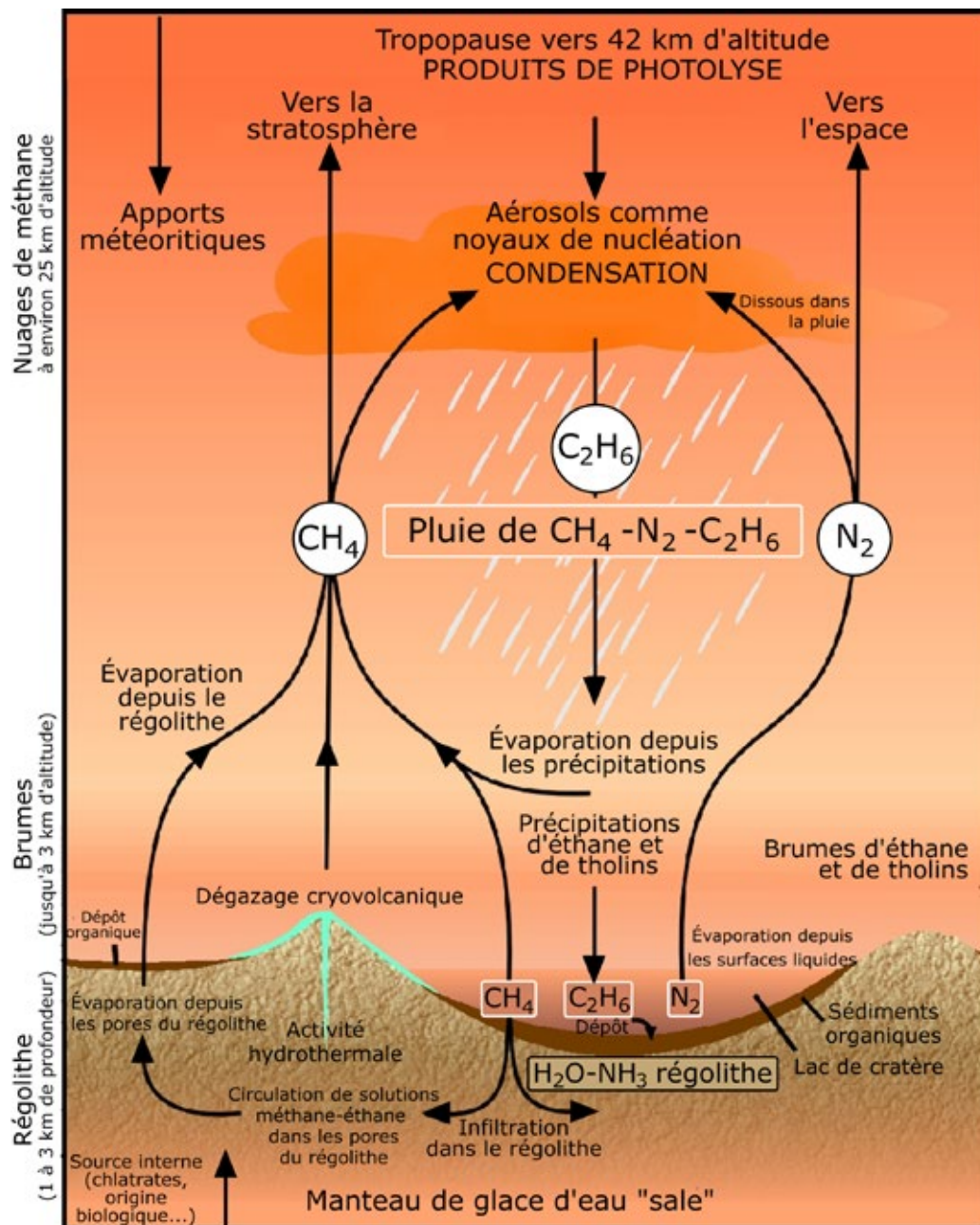


Fig.8. Cycle du méthane sur Titan (crédit : Laboratoire interuniversitaire des systèmes atmosphériques / Université Paris 12).

## Future exploration

De nombreuses missions ont visité les systèmes de Jupiter et Saturne mais seule deux missions avaient dans leurs objectifs principaux d'étudier les lunes glacées – la mission Galileo pour le système de Jupiter et la mission Cassini pour le système de Saturne. La majorité de notre connaissance vient de ces deux missions mais nous avons encore beaucoup à apprendre !

Certaines missions clés sont déjà sur la ligne de départ pour creuser les questions encore en suspens,

et, en particulier, celle de l'habitabilité.

En 2022, l'ESA va lancer la mission JUPiter ICy moons Explorer (JUICE) qui arrivera dans le système jovien en 2030 avec pour mission de caractériser les lunes de Jupiter et leur environnement. En particulier, la sonde passera environ 8 mois en orbite autour de Ganymède et pourra en étudier la surface et l'environnement magnétique en détail.

Deux ans plus tard, la NASA lancera Europa Clipper qui devrait arriver dans le système jovien quasiment au même moment que JUICE. La sonde aura elle



la mission de caractériser précisément Europe, son potentiel d'habitabilité ainsi que de sélectionner de possibles sites d'atterrissage pour un futur atterrisseur.

Enfin, en 2026, la mission Dragonfly de la NASA devrait s'envoler pour Titan avec une arrivée prévue en 2034. Ce petit hélicoptère explorera la surface de la lune de Saturne à la recherche de traces de vie actuelles et passées. Grâce à son mode de

déplacement, la mission pourra explorer de nombreux environnements différents.

Ces trois missions nous promettent des résultats fascinants pour la prochaine décennie et pourront peut-être nous permettre de découvrir de nouveaux environnements habitables au sein de notre Système solaire.

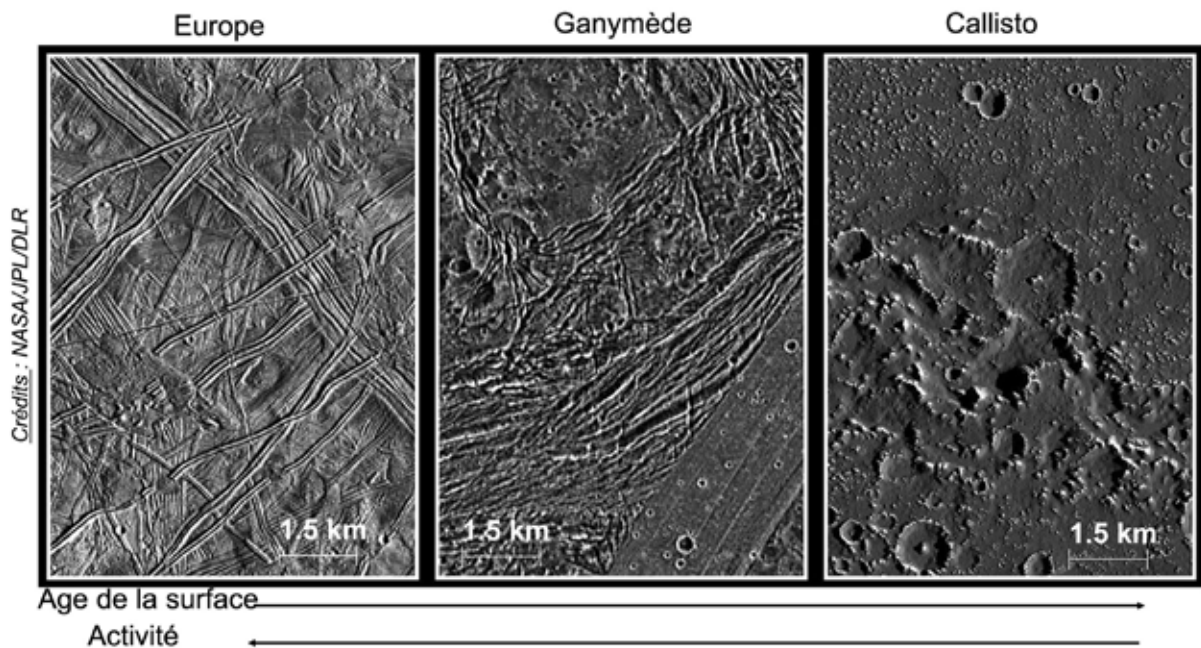


Fig.9. Vue comparée de terrains caractéristiques des trois lunes glacées de Jupiter.

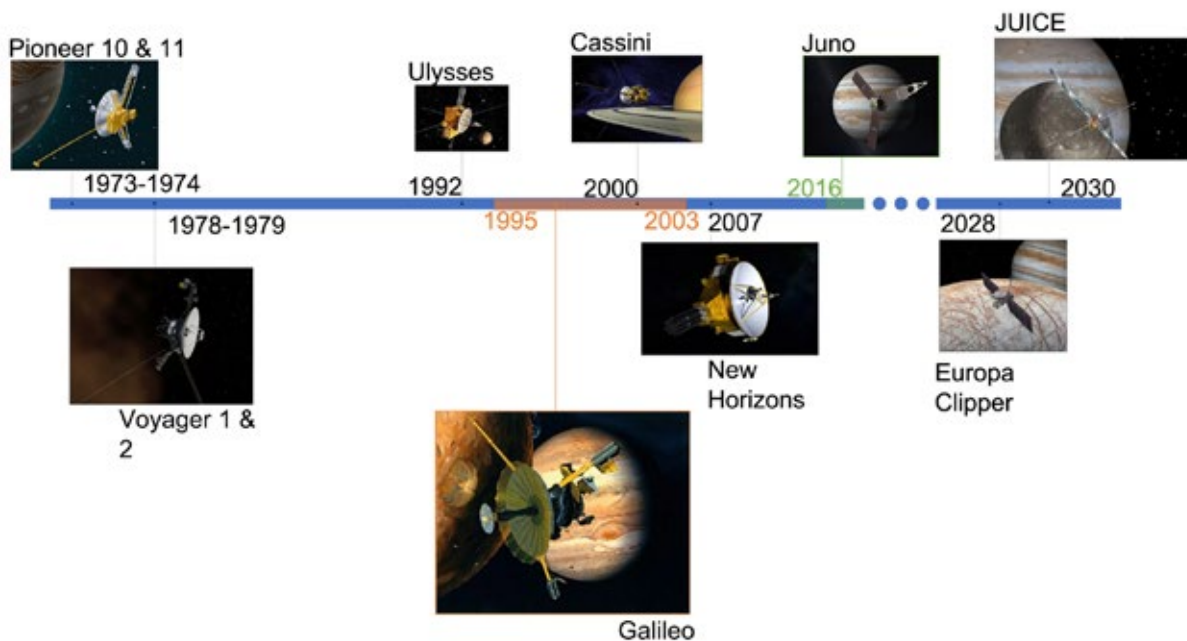


Fig.10. Frise chronologique des missions ayant visité le système jovien.