

# Etude de l'habitabilité des satellites Galiléens, revue des observations actuelles et perspectives apportées par les sondes Europa Clipper et JUICE.

Grégoire Audo

DU SU, Juin 2025

Tuteur : Tanguy Bertrand

Responsable du DU SU : Pierre Cristofari

# Table des matières

|  |           |
|--|-----------|
| Introduction .....   | 3         |
| <b>I. LE SYSTEME JOVIEN .....</b>  | <b>4</b>  |
| A. Jupiter et son environnement.....   | 4         |
| 1. Jupiter, planète hors norme .....   | 4         |
| 2. Son environnement .....   | 5         |
| B. Satellites Galiléens.....   | 6         |
| 1. Caractéristiques communes .....   | 6         |
| 2. Résonance orbitale.....   | 6         |
| 3. Océans subglacières .....   | 6         |
| C. Instruments d'observation de ces satellites et techniques utilisés .....            | 7         |
| 1. Instruments .....   | 7         |
| 2. Techniques .....  | 8         |
| D. Les lunes glacées de Jupiter .....  | 11        |
| 1. Europe.....   | 11        |
| 2. Ganymède .....  | 12        |
| 3. Callisto .....  | 13        |
| E. Comparaison des 3 satellites et discussions sur leur habitabilité potentielle ..... | 14        |
| <b>II. MISSIONS JOVIENNES.....</b>   | <b>16</b> |
| A. Europa clipper.....   | 16        |
| 1. Objectifs de la mission.....  | 16        |
| 2. Les instruments et techniques embarqués de la sonde .....                           | 19        |
| B. JUICE.....  | 21        |
| 1. Objectifs de la mission.....  | 21        |
| 2. Les instruments et techniques embarqués de la sonde .....                           | 22        |
| C. Résultats attendus en lien avec l'habitabilité.....                                 | 24        |
| <b>III. L'ABIOGENESE : L'ORIGINE CHIMIQUE DE LA VIE .....</b>                          | <b>26</b> |
| A. Définitions et contextualisation .....  | 26        |
| B. De l'atome aux premiers organismes vivants .....                                    | 30        |
| 1. Etape 1 : Synthèse et origine des molécules prébiotiques .....                      | 30        |
| 2. Etape 2 : Des molécules prébiotiques aux macromolécules .....                       | 32        |
| 3. Etape 3 : Des macromolécules aux premières cellules .....                           | 32        |
| 4. Conclusions sur l'émergence de la vie sur Terre.....                                | 33        |
| C. L'origine hydrothermale de la vie sur Terre.....                                    | 34        |
| 1. Hydro-volcanologie .....  | 34        |
| 2. Rôle des minéraux .....   | 36        |
| 3. Chimie hydrothermale .....  | 37        |
| 4. Une origine de l'émergence de la vie la plus plausible ? .....                      | 39        |
| D. Discussions sur la présence potentielle de vie sur Europe .....                     | 39        |
| Conclusion .....   | 43        |
| Bibliographie .....  | 44        |

# Introduction

L'Astrobiologie, ou exobiologie dans la langue de Molière, cherche à comprendre l'histoire de la vie dans l'Univers. Cela inclut la recherche des conditions nécessaires (mais possiblement non suffisantes) à l'émergence de la vie, l'origine et l'évolution de la vie sur Terre et la recherche de conditions d'habitabilité et des traces de vie extraterrestre. C'est une approche multidisciplinaire qui fait appel aux connaissances de la biologie, de la physique, de la chimie et des sciences de la Terre et de l'Univers.

Ce mémoire se concentre sur la recherche de la vie sur les satellites glacés du système solaire qui prend une nouvelle dimension notamment avec le lancement de 2 nouvelles sondes Europa Clipper et JUICE qui arriveront respectivement en 2030 et 2031 dans le **système jovien**<sup>1</sup>. Parmi les satellites du système solaire, Europe, Ganymède et Callisto pour Jupiter, Encelade et Mimas pour Saturne, et le couple lune/planète naine Triton/Pluton possèdent avec de fortes probabilités des océans subglaciaires susceptibles d'abriter la vie ([J.J. Buffo et al., 2021](#); [V. Lainey et AL., 2024](#)). La présence d'eau liquide n'est pas le seul facteur nécessaire à l'éclosion de la vie, des sources d'énergie ainsi que la présence de **molécules prébiotiques**<sup>2</sup> sont également les éléments indispensables à son émergence.

Ce document se concentrera sur l'étude des satellites Galiléens de Jupiter où nous discuterons dans un premier temps de l'état de l'art sur les recherches récentes des caractéristiques géologiques et environnementales de ces satellites ainsi que des instruments et techniques utilisés pour obtenir ces résultats.

Les missions JUICE et Europa Clipper seront dans un second temps décrites tant au niveau de leurs objectifs respectifs que des techniques embarquées. Nous ferons un éclairage notamment des résultats attendus permettant d'avancer sur la potentialité de la présence de vie sur ces satellites.

Enfin nous porterons l'attention sur l'origine de la vie sur Terre afin de faire un parallèle avec le développement de la vie sur ces mondes. Nous ferons un point sur les éléments chimiques déjà détectés sur ces satellites et un parallèle avec la chimie autour des sources hydrothermales identifiées sur terre dans des conditions proches de ce que l'on pourrait retrouver sur ces lunes glacées.

---

<sup>1</sup> Relatif à la planète Jupiter

<sup>2</sup> Molécules impliquées dans les processus menant à l'origine de la vie (*pré* pour **avant** et *biotique* pour **vie**)

# I. LE SYSTEME JOVIEN

L'objectif est ici de donner les principales caractéristiques de Jupiter et de son environnement afin d'expliquer son influence sur le système Jovien (voir Figure 1). Une description des satellites Galiléens sera proposée évoquant les dernières découvertes sur leurs structures et compositions.



Figure 1, Photo prise par la JunoCam de la sonde Juno. Crédit: NASA/JPL-Caltech/MSSS

## A. Jupiter et son environnement

### 1. Jupiter, planète hors norme

Jupiter est la 5ème planète du système solaire distante du soleil de 5,2 UA. Sa période de révolution est de 12 ans. Par rapport à la terre son volume est 1300 fois plus important et sa masse 318 fois plus grande ce qui en fait la plus grosse planète du système solaire.

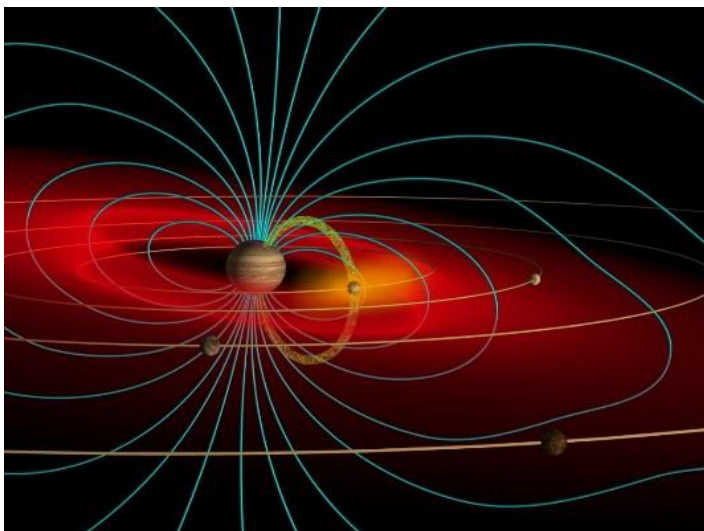


Figure 2, Interaction entre les lunes de Jupiter, Io et Europe, avec la magnétosphère de Jupiter, vue d'artiste. Crédit: John Spencer, Southwest Research Institute

C'est une planète gazeuse dont le noyau composé de roche et de métaux ne représente que 4% de sa masse. Son atmosphère est composée de 86% d'hydrogène, 13% d'hélium le reste étant principalement du méthane, de l'ammoniac et de la vapeur d'eau. Au-delà de 20000 km de profondeur, une couche d'hydrogène liquide métallique, en mouvement due à la rotation rapide de la planète (jour de 9h56), génère un champ magnétique puissant sous forme de dipôle 10 fois plus important que celui de la Terre. Celui-ci s'étend jusqu'à 30 millions de km et englobe ainsi les orbites des 4 satellites Galiléens (Figure 2). Ce champ magnétique

génère des radiations importantes sur ces lunes par bombardement de particules ionisées. (A la découverte de l'univers, Edition De Boeck).

Elle émet également 2 fois plus d'énergie qu'elle n'en reçoit, et sa haute atmosphère est presque aussi chaude que celle de la Terre alors qu'elle est 5 fois plus éloignée du Soleil. Ceci serait dû à l'impact des vents solaires aux pôles de Jupiter, les courants électriques au niveau des aurores pouvant produire un **chauffage ohmique**<sup>3</sup> (J. O'Donoghue et AL., 2025).

## 2. Son environnement

Au 5 février 2024, dans le catalogue officiel « Minor Planet Center » (MPC) qui référence tous les objets du système solaire, 95 satellites joviens sont inscrits dont 57 sont nommés. (Site web : [Minor Planet Center](https://www.minorplanetcenter.org/))

Parmi eux, il y a les 4 satellites Galiléens (Io, Europe, Ganymède et Callisto) et 4 satellites de l'ordre de 20 à 250 km dans leur plus grande largeur qui se situent dans l'orbite interne de Io : Adrastée, Métis, Amalthée et Thébé. (A la découverte de l'univers, Edition De Boeck)

Les 87 restants sont situés sur des orbites externes dans 2 groupes majeurs, l'un en orbite **prograde**<sup>4</sup> (même sens que les galiléens) et l'autre plus externe en orbite rétrograde. Ce sont principalement des astéroïdes irréguliers de petites tailles probablement capturés par Jupiter (figure 3).

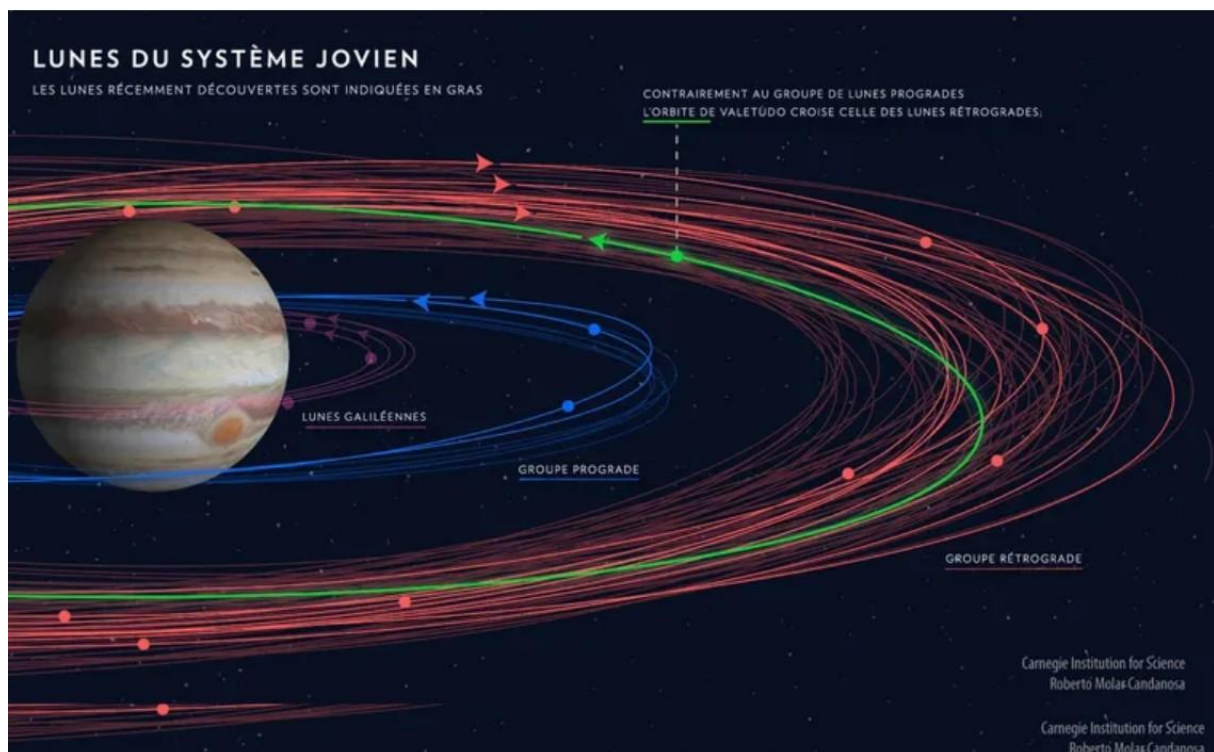


Figure 3, orbites des lunes de Jupiter. Crédit ; Roberto Molar Candanosa, Carnegie Institution For Science

En plus des satellites, on peut également noter la présence autour de Jupiter d'un anneau ainsi que de 2 **tores**<sup>5</sup> de particules chargées générés par Io et Europe (A la découverte de l'univers, Edition De Boeck)

<sup>3</sup> Chaleur générée par le passage d'un courant électrique dans une résistance

<sup>4</sup> Révolution autour de Jupiter dans le sens des aiguilles d'une montre, lorsqu'on le regarde depuis son pôle positif de rotation

<sup>5</sup> Nuage toroïdal de gaz ou de plasma en orbite autour d'une planète

## B. Satellites Galiléens

Les 4 satellites Galiléens, Io, Europe, Ganymède et Callisto sont les plus grands et les plus brillants en orbite autour de Jupiter. Ils ont été découverts en 1610 par Galilée avec sa lunette astronomique et sont les premières lunes observées en orbite autour d'une autre planète, remettant en cause le modèle géocentrique généralement adopté à cette époque.

### 1. Caractéristiques communes

Ces 4 satellites représentent 99,997 % de la masse en orbite Jovienne. Ils sont en rotation synchrone c'est à dire qu'ils tournent sur eux même en autant de temps que ce qu'il leur faut pour faire un tour autour de Jupiter, présentant ainsi toujours la même face avec Jupiter au même titre que la lune avec la Terre. ([Bruce G. Bills et al, 2022](#))

Ces satellites possèdent une **exosphère**<sup>6</sup> ténue générée, pour Io par l'activité volcanique et la sublimation des composés volatils à la surface, pour Europe, Ganymède et Callisto par **sublimation**<sup>7</sup> de la glace d'eau présente en surface. Cette glace serait dissociée par criblage de particules énergétique provenant de la magnétosphère jovienne pour former de l'oxygène (dioxygène O<sub>2</sub>) et de l'oxygène moléculaire O ([Thèse Ludivine Leclercq, 2015](#)).

Les satellites Galiléens se seraient formés à la fin de l'**accrétion**<sup>8</sup> de Jupiter à partir d'un disque circumplanétaire constitué de gaz (H<sub>2</sub>, He) et de particules solides (roche/glace). Ce disque comporte des similitudes avec la formation du disque circumstellaire et serait apparu de 1 à 10 millions d'années après ce dernier. Les collisions entre objets de ce disque auraient engendré plusieurs proto satellites, qui auraient été détruits rapidement avant la formation des satellites Galiléens. Selon les modèles envisagés une accrétion lente de ces satellites avec un disque refroidi permettrait d'expliquer le fort pourcentage de glace/eau liquide qui compose Callisto, Ganymède et en plus faible quantité Europe ([Robin M Canup et AL., 2009](#))

### 2. Résonance orbitale

Trois d'entre eux, Io, Europe et Ganymède, sont en résonance de Laplace ou résonance orbitale 4 : 2 : 1. Pendant que Ganymède effectue une révolution, Europe en effectue 2 et Io 4. La période orbitale de Io est de 1.8 jours, Europe 3.5 jours Ganymède 7.2 jours et Callisto 16.7 jours (Site Web : [ESA](#)). Callisto, le plus externe, n'est pas en résonance avec les 3 autres lunes.

### 3. Océans subglacières

De l'eau glacée à la surface d'Europe, Ganymède et Callisto a été détectée dès 1972 par réflectivité infrarouge ([Carl B. Pilcher et al., 1972](#)). Entrée en Orbite Jovienne en 1995 et détruite en plongeant dans Jupiter en 2003, la sonde Galileo a mis en évidence la présence potentielle d'océans subglaciaires sous la surface d'Europe et Ganymède. Elle reste suspectée sur Callisto et absente sur Io. La figure 4 présente un schéma possible des structures internes de ces lunes

---

<sup>6</sup> Atmosphère extrêmement peu dense

<sup>7</sup> Passage (d'un corps) de l'état solide à l'état gazeux sans passage par l'état liquide

<sup>8</sup> Capture de matière par un astre sous l'effet de la gravitation.

en situant les couches d'eau liquide et glacée. (Tim Van Hoolst et AL., 2024). Ces résultats seront détaillés en Chapitre I Partie D de ce mémoire.

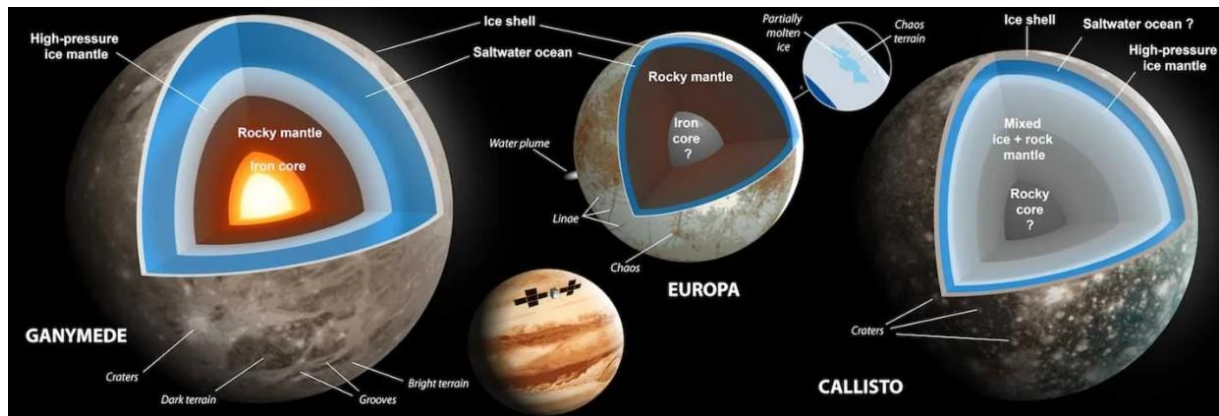


Figure 4, Schéma possible des structures intérieures de Ganymède, Europa et Callisto sur la base des données obtenues par Galileo. Crédit: Tim Van Hoolst et al., 2024

La présence d'eau étant la base de l'origine de la vie, nous allons donc nous attarder plus particulièrement sur ces trois satellites dans la suite de ce chapitre.

## C. Instruments d'observation de ces satellites et techniques utilisées

### 1. Instruments

Les télescopes et les sondes permettant d'étudier l'habitabilité des 3 satellites galiléens sont cités ci-dessous. Seuls les instruments et techniques utilisés pour cette étude sont décrits.

Télescopes :

- **Hubble**, Télescope en orbite terrestre : Imagerie spectroscopique dans l'UV le Visible et le proche Infra Rouge (NIR).
- **James Web Telescope (JWST)**, Télescope en orbite autour du soleil au point Lagrange 2 à 1,5 million de kilomètre : Imagerie spectroscopique dans l'IR et proche IR (NIR)
- **Very Large Telescope (VLT)**, Telescope situé au Chili: SINFONI ([Near Infra Red Spectrophotometer](#)) Imagerie proche IR (NIR), SPHERE ([Spectro polarimetric high Contrast Exoplanet Research](#)).

Sondes :

- **Pioneer 10** (1973): [narrow angle imaging photopolarimeter](#)
- **Voyager 1 et 2 (1979)** : [Imaging Science Subsystem \(ISS\)](#)
- **Galileo** (1995): Solid-state imaging camera (photo), Near-Infrared Mapping Spectrometer NIMS (étude de la composition des surfaces), ultraviolet spectrometer, magnetometer (étude des champs magnétique internes).
- **Juno** (2016): Juno's Stellar Reference Unit, Juno Cam Imager

La sonde Galileo est indéniablement la sonde qui a permis d'obtenir les principaux résultats mentionnés ci-dessous grâce notamment à ses photos haute résolution, son magnétomètre et

son spectromètre en proche IR. La sonde Juno grâce à une extension de sa mission autour de Jupiter a également permis d'obtenir des images et résultats plus précis pour Europe (W. S. Kurth et al, 2023 ; G. Filacchione et al., 2019 ; P. Addison et AL., 2024) et Ganymède (C. J. Hansen et al., 2022).

## 2. Techniques

### Spectrométries UV, visible Infra Rouge ou proche Infra rouge

Les spectres des rayonnements électromagnétiques que nous captions du ciel témoignent des processus physiques qui se produisent dans le cosmos. Leur étude permet de décrire la constitution et l'évolution des astres. Ces techniques sont donc d'une grande importance en astrophysique car elles permettent de déterminer des températures (étoiles...), des vitesses (décalage des raies spectrales par effet Doppler) et la composition chimique d'une substance inconnue (grâce aux longueurs d'ondes des raies spectrales en absorption ou en émission). On peut les distinguer en fonction de la plage de longueur d'ondes analysée (Figure 5).

Tout le spectre électromagnétique est étudié en astronomie. Les télescopes et sondes cités ci-dessus utilisent principalement les domaines de l'infrarouge (IR) et du proche IR (NIR).

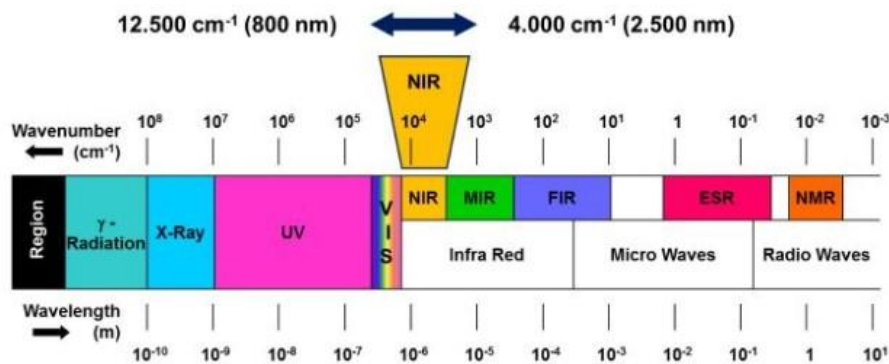


Figure 5, Spectre électromagnétique mettant en évidence la région NIR entre 800 et 2500 nm ([site web Brucker](#))

Par exemple, en ce qui concerne notre étude, la spectroscopie en NIR du VLT (instrument SPHERE) et de Galileo (Instrument NIMS) permet d'analyser la composition des surfaces des satellites par réflexion/absorption des rayons du soleil. La figure 6 est le résultat de l'ajustement des spectres IR du cratère Osiris sur Ganymède obtenu avec ces deux instruments. Sur la gauche, les graphiques représentent le spectre observé en rouge et la « famille » de spectres ajustés en noir. En ordonné, la réflexion permet d'évaluer l'abondance des éléments présents en surface. La longueur d'onde en abscisse, permet d'évaluer la nature de l'élément. Les incertitudes sur les spectres observés ont été calculées en mesurant le niveau de bruit dans les pixels du ciel d'arrière-plan pour chaque observation. La photo indique l'endroit analysé dans la région de Galileo. Les diagrammes de droite présentent les distributions postérieures d'abondance ajustées où les points noirs donnent la meilleure estimation de l'abondance des éléments observés (H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, sels, glaces ...), les lignes noires montrent l'incertitude et la région colorée montre la distribution postérieure complète. (Oliver King et al., 2022)

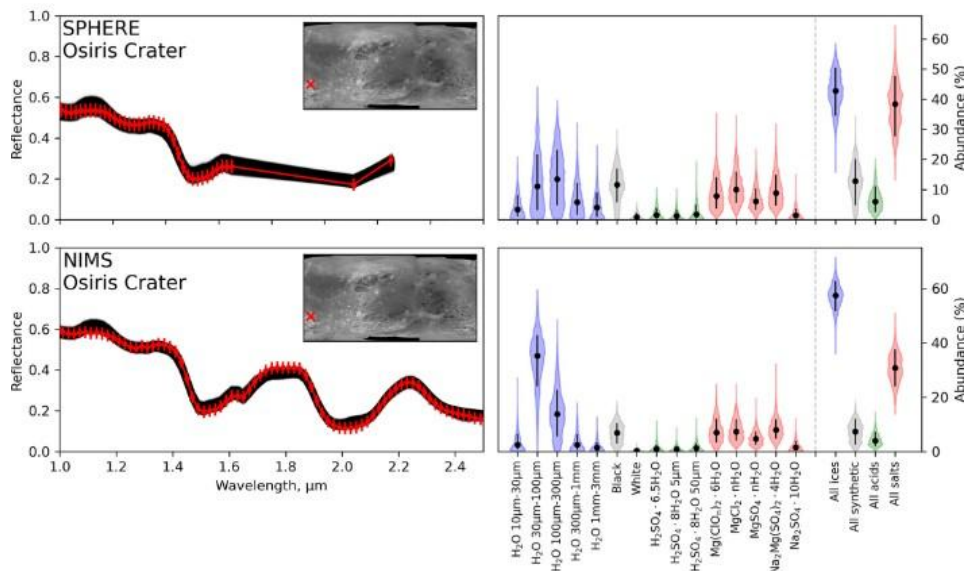


Figure 6, Résultats de l'ajustement des spectres de Galileo Regio et du cratère Osiris sur Ganymède. Crédit : [Oliver King et al., 2022](#)

Parmi ces techniques, on peut également mentionner l'imagerie spectroscopique qui combine la spectroscopie et l'imagerie pour identifier les propriétés physicochimiques de gaz/matériaux à travers des images à différentes longueurs d'onde. Hubble et le télescope James Webb se distinguent notamment par la gamme de longueur d'ondes utilisée pour obtenir ces images et ainsi obtenir de nouvelles informations sur les zones observées. (Figure 7)

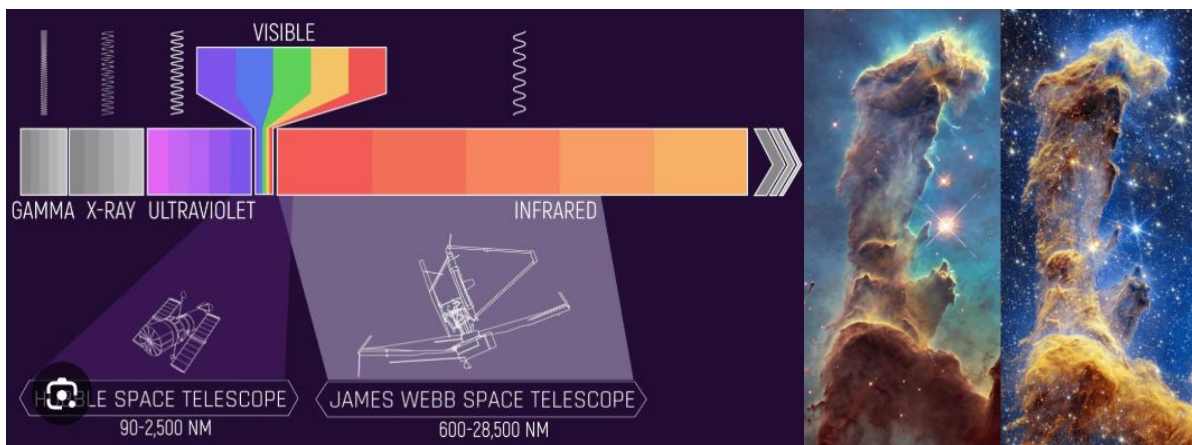


Figure 7, à gauche, gamme de longueurs d'onde couverte par Hubble et JWST ; à droite image obtenue par Hubble dans le visible partie gauche et JWST en IR partie droite. Crédit : site web NASA

## Magnétométrie

Le magnétomètre permet de mesurer notamment un courant induit potentiellement par un océan liquide subglaciaire. Les satellites Galiléens évoluent dans le champ magnétique de Jupiter, et sont exposés à son champ magnétique variable. S'ils contiennent des milieux conducteurs,

comme des océans souterrains chargés en **électrolytes**<sup>9</sup>, cela donne naissance à des courants de Foucault. On appelle courants de Foucault, les courants électriques créés dans une masse conductrice (eau contenant des électrolytes dans notre cas), soit par la variation au cours du temps d'un champ magnétique extérieur traversant ce milieu (le flux du champ à travers le milieu), soit par un déplacement de cette masse dans un champ magnétique ([site web wikipedia](#) ; figure 8). Ils sont une conséquence de l'induction électromagnétique.

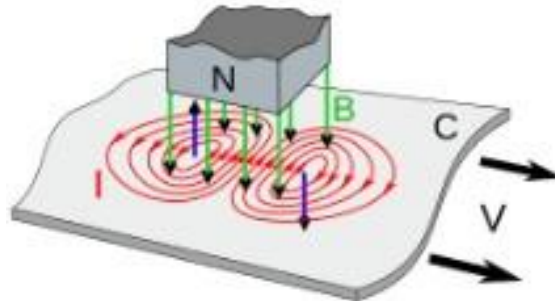


Figure 8, En rouge les courants de Foucault générés par le champ magnétique B de Jupiter (N) qui crée leur propre champ magnétique induit en bleu. C étant la masse d'eau en mouvement

Ainsi, un satellite Galiléen peut avoir un champ magnétique induit par une masse d'eau contenant des électrolytes sous l'influence du champ magnétique de Jupiter.

### Gravimétrie

La gravimétrie permet d'obtenir des informations sur la masse et l'hétérogénéité ou non des couches composant les satellites. Il n'y a pas d'instrument dédié pour obtenir ces données. Elles sont mesurées à partir de la déviation de l'orbite des sondes lors du survol de ces lunes. Ces mesures sont obtenues en relevant précisément la trajectoire de la sonde et par mesure des effets doppler observés à travers les ondes radio qu'elle renvoie sur terre. ([site web ESA](#))

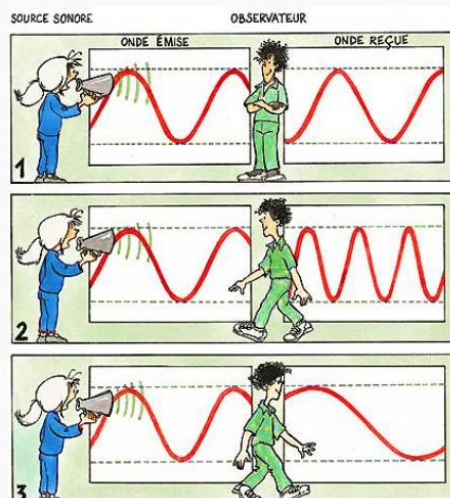


Figure 9, Effet Doppler Fizeau. Crédit : Philippe Garcelon

<sup>9</sup> Substance conductrice en raison de la présence d'ions mobiles

## D. Les lunes glacées de Jupiter

### 1. Europe



Figure 10, Europe photo prise par Galileo. Crédit : NASA / JPL

Europe est le satellite Galiléen le plus proche de Jupiter après Io. Europe a été photographié la première fois par Pioneer 10 des 1972 puis Voyager en 1977 révélant une surface glacée lisse dépourvue de cratère et striée par de longues structures sombres. Galileo survole Europe à 11 reprises entre 1995 et 2003 ([Site web NASA](#)) et renvoie des photos à plus haute résolution qui révèlent différentes structures de surfaces caractéristiques telles que des stries, des structures de type *lenticulae*, des zones dénommées chaos et des plaines lisses (Figure 10). Ces structures en surface sont probablement générées par des circulations entre le manteau et l'océan et

alimentées par différents phénomènes : écoulement de liquide en surface ou fonte locale pour les plaines lisses, poche d'eau en subsurface pour les *lenticulae*, chauffage local de la glace pour les chaos ou encore ouverture/fermeture de la glace lors des marées diurnes pour les rides (Figure 11). La nature de ces structures et le peu de cratères présents évoquent une surface jeune en mouvement probablement généré par un océan liquide alimenté par des effets de marée importants. En effet, la résonance entre Io et Ganymède génère une excentricité de l'orbite d'Europe de 0.9 à 1% ce qui induit une déformation périodique longitudinale du satellite lié aux variations de sa distance à Jupiter (Figure 12). Le pôle de rotation d'Europe peut également être légèrement incliné (c'est-à-dire présenter une obliquité non nulle), ce qui entraînerait une oscillation des renflements de marée en latitude, au-dessus et au-dessous de l'équateur. ([Alyssa Rose Rhoden et al., 2021](#))

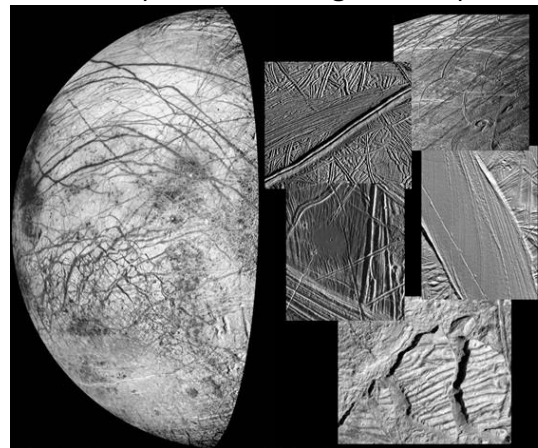


Figure 11, Caractéristiques de la surface d'Europe, révélées par la sonde Galileo, dans le sens des aiguilles d'une montre, en partant du haut à droite : des crêtes cycloïdales, des bandes, des blocs ressemblant à des icebergs, quelques zones lisses et des crêtes doubles. Crédit : [Cynthia B. Phillips, NASA / JPL](#)

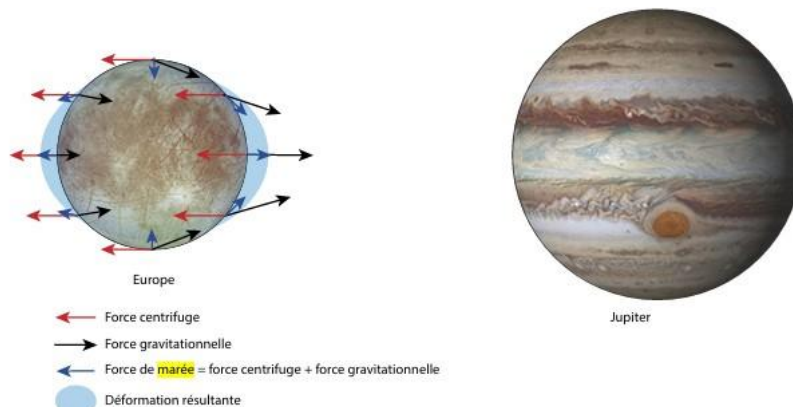


Figure 12, Principe des forces de marée. Crédit : Robert I. Pappalardo et al., 2009.

Ces marées sont donc des sources d'énergie permettant entre autres d'expliquer le maintien d'une température suffisante pour avoir de l'eau à l'état liquide en profondeur, la température de surface étant de l'ordre de  $-160^{\circ}\text{C}$ .

Les mesures obtenues par Galileo ont permis de déterminer l'accélération du champ de pesanteur d'Europe en analysant les perturbations de la trajectoire par effet doppler des émissions radios. Ceci permet d'accéder à sa masse volumique globale et de faire le rapport entre la force centrifuge et la force gravitationnelle afin d'évaluer l'homogénéité de la structure interne. Ces mesures permettent de distinguer Europe avec un noyau à haute densité en profondeur (manteau silicaté et métallique) en contact direct avec une couche liquide d'une épaisseur d'une centaine de km sous une faible épaisseur de glace (5 à 30 km). En 2018, Vance *et al.* suggèrent la structure interne illustrée en Figure 13 (Thèse Elodie Lesage., 2020 ; Thèse Loic Mevel, 2003)

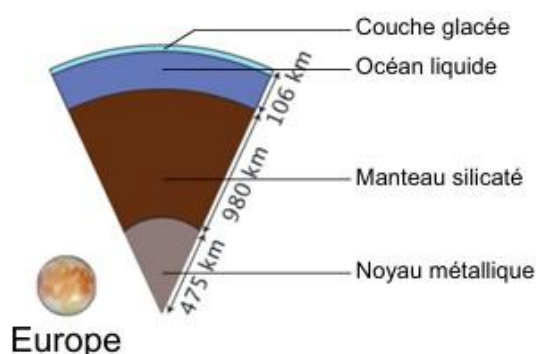


Figure 13, Coupe schématique d'Europe. Crédit : [Vance et al., 2018](#)

Galileo a également enregistré un champ magnétique induit permettant de consolider l'hypothèse de la présence potentielle d'un océan salé sous la couche de glace externe. (Margaret G. Kivelson *et al.*, 2000). Sels qui pourraient provenir d'une activité hydrothermale (Samantha K. Trumbo *et al.*, 2019).

Enfin des panaches de vapeur d'eau ou « plumes » s'élevant jusqu'à 200 km d'altitude dans l'exosphère d'Europe ont été observés avec Hubble en 2012 (Lorenz Roth *et al.*, 2014) et confirmés par une nouvelle étude des données de Galileo en 2018 (Xianzhe Jia *et al.*, 2018)

L'ensemble de ces données confirment donc la forte probabilité de présence de cet océan, d'une centaine de km de profondeur en dessous de la surface glacée d'Europe et en contact direct avec le manteau silicaté.

## 2. Ganymède



Figure 14, Ganymède. Crédit : NASA / JPL

Ganymède est le plus grand satellite de Jupiter et du système solaire (Figure 14). Sa taille est supérieure à celle de Mercure. Cette lune a été observée par la sonde Galileo entre 1995 et 2003 qui l'a survolée à 8 reprises (Louise M. Prockter *et al.*, 1998 ; Site web NASA). La sonde Juno l'a également survolée 2 fois, le 7 Juin et le 20 juillet 2021, permettant d'obtenir des images plus détaillées des faces diurnes et nocturnes avec les cameras JSR et JCI et de compléter/confirmer les données obtenues par Galileo sur la composition de sa surface, de son exosphère et de sa structure interne (C. J. Hansen *et al.*, 2022). Des observations récentes de 2022 avec le VLT et son instrument SPHERE obtenues par réflexion des rayons du soleil en IR proche ( $0.95\text{-}1.65\ \mu\text{m}$ ) permettent d'affiner les

résultats obtenus avec le NIMS de Galileo et confirment que sa surface est approximativement constituée au 2/3 d'eau glacée sur les zones récentes et pour 1/3 d'un matériau noir plus ancien. Ces études suggèrent la présence d'acide sulfurique hydraté et de sels de type sulfate de sodium et magnésium et chlorate de magnésium principalement dans les régions polaires, tandis que du chlorure et du sulfate de magnésium semblent être présents plus uniformément à la surface de la lune et sur les zones les plus récentes. ([Oliver King et al., 2022](#))

Deux études suggèrent par mesure indirecte la présence d'un océan subglaciaire. Lors de 3 survols, la sonde Galileo avec son magnétomètre a mis en évidence un moment magnétique interne induit par la présence potentielle d'eau liquide contenant des électrolytes ([M.G. Kivelson et al., 2002](#)). Une deuxième étude de Saur et Hall en 2015 utilise le télescope Hubble pour l'observation de la dynamique d'aurores induites par les champs magnétiques à la fois de Jupiter et interne à Ganymède. Ils comparent les modèles avec et sans océan salé conducteur d'électricité à l'intérieur de Ganymède avec les images capturées par le télescope. L'étude est consolidée par un test de Monte Carlo permettant de valider que les deux hypothèses sont bien statistiquement distinctes ([J. Saur et al., 2015](#))

Enfin Ganymède possède la caractéristique unique parmi ces satellites d'avoir un champ magnétique interne généré par des mouvements de convection à l'intérieur d'un noyau liquide métallique. ([Thèse Ludivine Leclercq, 2016](#))

### 3. Callisto



Figure 15, Callisto. Crédit : NASA / JPL

**Callisto** est le satellite Galiléen le plus externe des quatre (Figure 15). Sa taille et sa masse sont proche de celle de Ganymède. Les mesures prises par le NIMS de la sonde Galileo (8 survols ([Site web NASA](#))) montrent que la surface de cette lune comporte plus de zones sombres cratérisées et donc plus anciennes que sur Europe et Ganymède au détriment des zones plus claires avec un spectre IR caractéristique d'eau glacée cristallisée. La présence d'eau liquide en profondeur est encore discutée et recherchée notamment par la détection d'un champ magnétique induit qui peut être généré par de l'eau liquide contenant des électrolytes. Cependant

Callisto possède une **ionosphère**<sup>10</sup> qui génère également un champ magnétique. Il est difficile pour l'instant de savoir si ce champ magnétique est généré uniquement par l'ionosphère ou par un océan subglaciaire et l'ionosphère ([Federico Tosi et al., 2024](#) ; [A. Galli et al., 2022](#)). Une étude récente consolide cependant l'hypothèse de la présence d'un océan en étendant l'analyse des données obtenues par le magnétomètre de Galileo. Des simulations de la réponse d'un champ magnétique induit uniquement par l'ionosphère ou par la combinaison de l'ionosphère et d'une couche d'eau liquide sont confrontés aux données obtenues par Galileo ([Corey J. Cochrane et al., 2025](#)).

---

<sup>10</sup> Couche de son atmosphère caractérisée par une ionisation partielle des gaz

## E. Comparaison des 3 satellites et discussions sur leur habitabilité potentielle

Comme indiqué en début de chapitre les ingrédients nécessaires au développement de la vie sont la présence d'eau liquide salée, une source de chaleur, la présence de molécules prébiotiques et potentiellement un contact direct entre de l'eau liquide et un plancher océanique.

|                                     | Europe   | Ganymède   | Callisto   |
|-------------------------------------|--|--|--|
| Diamètre (km)                       | 3138   | 5262   | 4800   |
| Période orbitale (jour)             | 3.55   | 7.16   | 16.69  |
| Surface                             | Jeune essentiellement de la glace géologiquement active                      | 2/3 matériaux sombres/Glace                          | Ancient mélange de glace, silicates, dioxyde de carbone. Pas d'activité tectonique |
| Effet de marée                      | Oui  | Partiel  | Non observé  |
| Champs magnétique interne           | Non  | Oui généré par un noyau métallique liquide           | Oui généré par Ionosphère  |
| Champs magnétique induit            | Oui  | Oui  | ?  |
| Océan Subglaciaire                  | Très forte probabilité   | Forte probabilité                                    | A confirmer  |
| Panache, geyser                     | Oui observé par Hubble   | Non observé  | Non observé  |
| Exosphère (modeles et observations) | O, O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O trace de SO <sub>2</sub> , Na, Cl and K | H <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , O, CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , O, CO <sub>2</sub>                               |

Tableau 1, Comparaison des caractéristiques physique d'Europe, Ganymède et Callisto

La tableau 1 compare les caractéristiques physiques de ces 3 satellites. Nous avons vu notamment que les observations, analyses et modèles étudiés jusqu'à aujourd'hui permettent d'envisager avec une forte probabilité, la présence d'un océan subglaciaire salé sur Europe et Ganymède et avec une plus faible probabilité sur Callisto.

Le fond de cet océan sur Europe serait à priori en contact direct avec une surface borosilicatée permettant d'envisager la présence potentielle de sources hydrothermales semblables à la terre. Cela ne semble pas être le cas sur Ganymède et Callisto où la pression au fond de l'océan peut générer la présence d'une couche d'eau glacée entre l'océan liquide et leur noyau.

On observe également, d'Europe ayant l'orbite la plus interne à Callisto la plus externe, une évolution vers une surface de plus en plus cratérisée donc ancienne (Figure 16). La surface glacée d'Europe, permet d'envisager un océan sous une faible couche de glace constamment renouvelée par des effets de marée source d'énergie. Les différentes structures identifiées à la surface d'Europe ainsi que les panaches ou plumes également observés confirment ces mouvements tectoniques et ces échanges entre l'océan et sa surface. Cette activité est partiellement observée sur Ganymède avec la présence de zones lisses et absente sur Callisto.

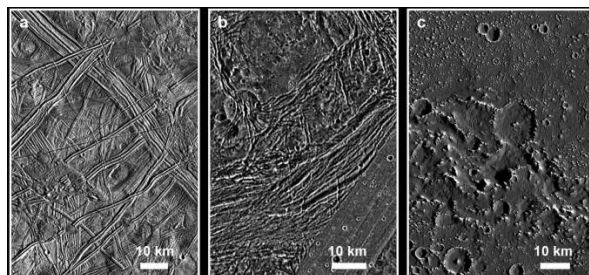


Figure 16, Exemples de surfaces typiques des Galiléens glacés. La densité des cratères (un indicateur de l'âge de la surface) augmente d'Europe à Callisto. La surface d'Europe présente l'inventaire le plus complexe de reliefs formés par des processus endogènes, tandis que la surface de Callisto est pratiquement dépourvue de toute trace d'activité tectonique et cryovolcanique. (Image: NASA/DLR).

Europe réunit donc les principaux ingrédients permettant d'envisager la présence d'une vie dans son océan. Ganymède reste également dans la course mais présente moins d'activité. On peut à ce niveau noter les similitudes entre Europe et Encelade, satellite de Saturne, candidat également à la présence d'une vie potentielle.

Il faut également noter ici que la présence d'une vie potentielle en surface de ces satellites est fortement improbable dû notamment au bombardement constant de plasma généré par le champ magnétique puissant de Jupiter et à une exosphère très tenue.

Le chapitre suivant a pour objectif de décrire les instruments et résultats attendus des prochaines missions joviennes JUICE et Europa Clipper et de voir ainsi comment ces observation/analyses permettront d'une part de consolider et d'avoir des certitudes sur les analyses précédentes mais également d'avancer sur la compréhension de ces lunes.

## II. MISSIONS JOVIENNES

Europa Clipper et JUICE (JUperiter ICy moons Explorer) sont 2 sondes qui arriveront dans l'orbite de Jupiter respectivement en 2030 et 2031. Ces sondes forment une dream team pour la recherche de vie sur les satellites Galiléens. Europa clipper sera consacrée à l'étude d'Europe avec 49 survols entre 25 et 100 km alors que JUICE va se concentrer sur Ganymède en se plaçant en orbite autour de cette lune avec des observations préalables également d'Io, d'Europe (2 survols), de Callisto, de Jupiter et ses anneaux. ([site web ESA](#), Figure 17)

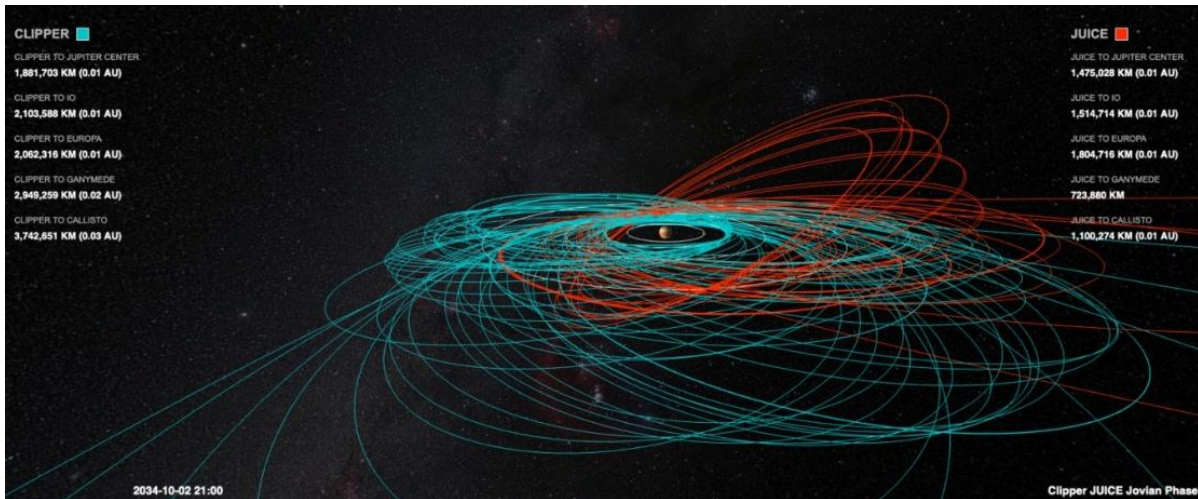


Figure 17, Orbites de JUICE et Europa clipper autour de Jupiter. Crédit : ESA.

Il est à noter que ces sondes ne sont pas équipées pour détecter la vie directement mais pour approfondir les connaissances sur les éléments permettant son développement.

### A. Europa clipper

#### 1. Objectifs de la mission

A travers l'étude de l'océan d'Europe (permettant également la confirmation de sa présence), de sa surface glacée, des différentes structures qui la composent, de son exosphère et de son environnement spatial proche, la mission Europa Clipper (Figure 18) vise à répondre à l'objectif scientifique stratégique de la division Planetary Science de la NASA, à savoir « déterminer le contenu, l'origine et l'évolution du système solaire et la potentialité de vie ailleurs en étudiant la capacité d'Europe et de son océan profond à abriter de la vie dans le passé, le présent ou l'avenir » (NASA 2022).



Figure 18, Sonde Europa Clipper au moment de son encapsulation dans la fusée SpaceX Falcon. Crédit : NASA/Ben Smegelsky

Ce n'est pas une mission pour rechercher directement la vie, mais pour poser les fondations de futures missions qui pourront rechercher directement des biosignatures et les caractériser.

Les 3 principaux objectifs scientifiques de la NASA pour cette mission sont (NASA 2022 ; [Robert T.Pappalardo et al., 2024](#)) :

- **Etude de la structure Interne.** Caractériser la couche de glace et l'eau subglaciaire : hétérogénéité, propriété de l'océan et nature des échanges océan/surface glacée. Ceci afin de confirmer l'existence d'un océan subglaciaire, sa profondeur et fournir des informations sur sa salinité et les processus d'échanges avec la couche de glace en surface.
- **Etude de la composition.** Comprendre l'habitabilité d'Europe à travers la composition et la chimie de son océan. Pour cet objectif les critères de succès sont d'identifier la composition et les sources des constituants (en dehors de la glace) à la surface et dans l'exosphère d'Europe incluant des composés carbonés.
- **Etude de la géologie.** Comprendre la formation des différentes structures présentes à la surface d'Europe, incluant des sites d'activités récentes. Identifier et caractériser des sites de grand intérêt scientifique. Pour cet objectif le livrable est de produire une carte spatiale couvrant 30% de la surface d'Europe et de déterminer les caractéristiques 3D des différents types de structures à haute résolution.

Pour chacun de ces 3 objectifs des thèmes scientifiques de recherche sont listés en tableau 2

|                   |   |
|-------------------|---|
| Structure interne | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Echange profond sous la surface : distribution verticale profonde de l'eau subglaciaire, structure de la couche de glace et échange entre la couche de glace et l'océan</li> <li>- Echange de faible profondeur sous la surface : distribution verticale superficielle de l'eau subglaciaire, structure de la couche de glace et échange entre la couche de glace et la surface</li> <li>- Propriétés de la couche de glace : épaisseur et propriétés thermophysiques de la couche de glace</li> <li>- Propriétés de l'océan : existence, profondeur, salinité et composition de l'océan</li> <li>- Recherche d'anomalie thermique en surface : signature thermique d'activité géologique récente ou en cours (partagé avec objectif géologique)</li> </ul>      |
| Composition       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cartographie de la composition globale de la surface : composition et chimie de la surface globale y compris la distribution et la variabilité à grande échelle des matériaux</li> <li>- Composition du relief : constituants de surface, en particulier la glace non aqueuse et les composés contenant du carbone, à l'échelle régionale et à l'échelle du relief.</li> <li>- Composition de l'atmosphère : composition et sources des volatiles non glacés, des particules et du plasma dans l'atmosphère, l'ionosphère et les panaches éventuels, dans la sphère de Hill d'Europe (&lt;8,5 rayons d'Europe).</li> <li>- Composition de l'environnement spatial : composition et sources des volatiles non glacés, des particules et du plasma dans</li> </ul> |

|          |  |
|----------|--|
|          | <p>l'environnement spatial, en dehors de la sphère de Hill d'Europe (&gt;8,5 rayons d'Europe).</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Recherche des panaches à distance : détection et caractérisation à distance des panaches actifs. (Thème partagé avec l'objectif géologie)</li> <li>- Recherche in situ sur les panaches : détection et caractérisation in situ des panaches récents et actifs.</li> </ul>  |
| Géologie | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cartographie de la surface du globe : géologie des formes de relief Distribution globale et relations entre les formes de relief géologique.</li> <li>- Géologie des reliefs : morphologie, topographie, corrélations géologie-composition, et diversité des formes de relief.</li> <li>- Propriétés de surface à l'échelle locale : propriétés de surface chimiques. Propriétés morphologiques, thermophysiques et mécaniques à l'échelle locale.</li> <li>- Recherche et caractérisation à distance des panaches : détection et caractérisation à distance des panaches actifs. (Thème partagé avec l'objectif de composition.)</li> <li>- Recherche d'anomalies thermiques de surface : signatures thermiques de l'activité géologique actuelle ou récente activité. (Thème partagé avec l'objectif intérieur.)</li> <li>- Preuves d'activité en surface : propriétés de surface et/ou changements indiquant une activité actuelle ou récent.</li> </ul> |

Tableau 2, Thèmes scientifiques liés aux 3 objectifs principaux de la mission Europa clipper.

Au-delà de ces objectifs principaux, 4 sujets seront également abordés afin d'étudier l'habitabilité d'Europe :

**- Activité actuelle et récente**

Nous l'avons évoqué précédemment la surface d'Europe est géologiquement jeune et ce renouvellement de la surface peut s'expliquer par des mécanismes de **cryovolcanisme**<sup>11</sup> : mouvement tectonique, impact de cratère, sublimation et présence de panache. Pour ce dernier Europa Clipper va continuer les investigations en plus d'étudier les changements récents ou en cours de la surface ([Daubar et al., 2024](#) ; [Becker et al., 2024](#))

**- Environnement radiatif**

Europa Clipper va faire des mesures sur le plasma et sur les radiations provenant du champ magnétique puissant de Jupiter qui bombarde la surface d'Europe, permettant ainsi d'évaluer l'impact de ces particules sur l'environnement d'Europe ([Meitzler et al., 2023](#))

**- Géodésie**

Cette partie consiste à étudier principalement la rotation et la forme d'Europe. D'autres recherches concerneront son obliquité, la position des pôles, les éphémérides du satellite le champ gravitationnel et les effets de marée du satellite ([Robert T.Pappalardo et al., 2024](#)).

<sup>11</sup> Ensemble des manifestations volcaniques qui se produisent dans une zone couverte de glace

## - Reconnaissance de site pour un futur atterrisseur potentiel

Enfin, l'identification potentielle d'un site d'atterrissage pour une future mission sera également étudiée. Les données seront obtenues principalement lors des survols à basse altitude d'Europa Clipper (<100 km). La stratégie déterminée pour cette reconnaissance est décrite par Daubar *et al.* (2024).

Enfin, l'expérience Gravity and Radio Science (**G/RS**) caractérisera les marées gravitationnelles d'Europe variant dans le temps afin de confirmer l'existence de l'océan souterrain d'Europe.

## 2. Les instruments et techniques embarqués de la sonde

Afin d'atteindre ces objectifs, Europa Clipper embarque 9 instruments divisés en 2 catégories : les instruments pour la détection à distance et ceux pour les mesures in situ (Figure 19 et 20). L'ensemble de ces instruments peut fonctionner simultanément ce qui permet ainsi des synergies dans l'interprétation des résultats et d'optimiser les temps d'observation et les résultats à chaque survol.

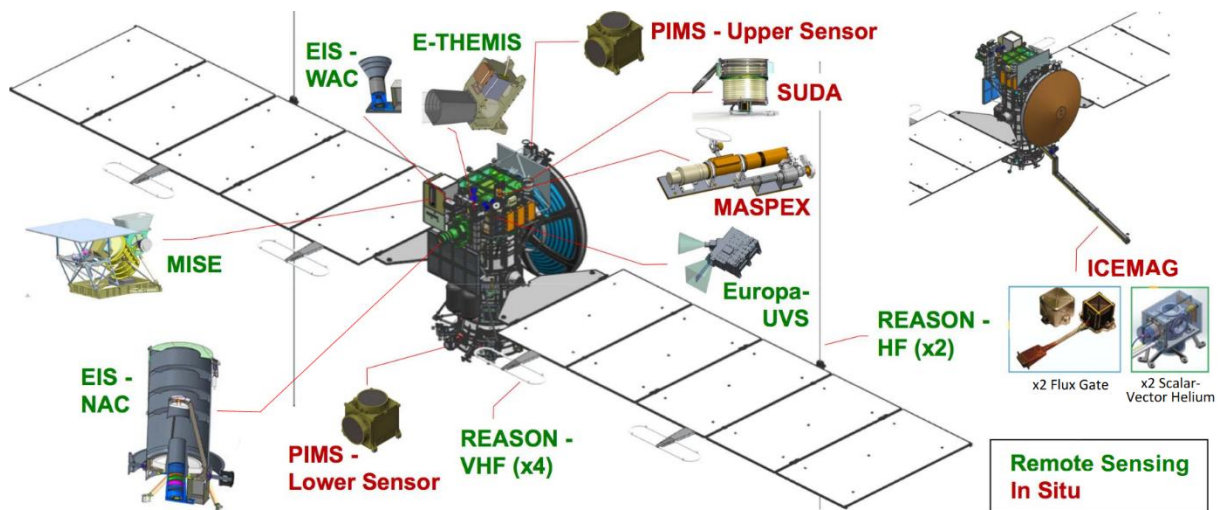


Figure 19, Schéma de la sonde Europa Clipper et de ses instruments pour les détections à distance (vert) et in situ (rouge). [Crédit : Caltech](#)

### a. Détections à distance, télédétection

Ces instruments optiques de télédétection effectueront ensemble des opérations d'imagerie, de cartographie de la composition et de recherche de différences de couleur, d'albédo ou de texture caractéristiques des dépôts de panache.

Le système d'imagerie Europa (**EIS**) qui comprend la caméra à angle étroit (NAC) et la caméra à grand angle (WAC), obtiendra des données sur l'albédo, la couleur et les reliefs de surface.

**Le spectrographe ultraviolet Europa (Europa-UVS)** caractérisera la composition chimique de l'atmosphère ténue d'Europe.

Europa-UVS et EIS rechercheront et caractériseront les activités des panaches.

Le système d'imagerie thermique d'Europa (**E-THEMIS**), cartographiera les températures diurnes et nocturnes afin de caractériser le régolithe, les processus d'érosions et l'état thermique de l'enveloppe de glace et de la surface.

Le spectromètre imageur cartographique pour Europa (**MISE**) permettra d'identifier la composition chimique globale et locale à la surface d'Europe en IR proche.

Le radar pour l'évaluation et le sondage d'Europe : Ocean to Near-surface (**REASON**) est un instrument radar pénétrant la glace, doté d'antennes haute fréquence (HF) et très haute fréquence (VHF) fonctionnant respectivement à 9 et 60 MHz (33,3 et 5 m de longueur d'onde). REASON sera utilisé pour cartographier la distribution des matériaux de surface et de subsurface, y compris les saumures et les sels éventuels, pour rechercher les interfaces glace-océan, pour caractériser le régolithe de la lune et recueillir des données pour comprendre les processus d'échange dans la subsurface d'Europe ; il fournira également des profils topographiques grâce à l'altimétrie.

Les instruments de télédétection couvrent une large bande du spectre électromagnétique avec seulement des lacunes mineures : couverture de 0,055-0,206  $\mu\text{m}$  pour le spectrographe ultraviolet Europa (Europa-UVS), de 0,350-1,05  $\mu\text{m}$  pour la caméra à angle étroit (NAC) et pour la caméra à grand angle (WAC) du système d'imagerie Europa (EIS), de 0,8-5,0  $\mu\text{m}$  pour le spectromètre imageur cartographique pour Europa (MISE), et de 7,0-70  $\mu\text{m}$  pour le système d'imagerie thermique d'Europa (E-THEMIS). Une résolution inférieure au mètre sera obtenue par EIS NAC lors des survols les plus rapprochés (25-100 km d'altitude), avec les meilleures échelles de pixels à partir de 100 km d'altitude pour EIS WAC (22 m), Europa-UVS (209 m), MISE (25 m) et E-THEMIS (12 m).

#### b. Détections in situ

Les expériences in situ offriront une vision tout aussi complète du champ magnétique et de l'environnement particulaire d'Europe.

Le spectromètre de masse pour l'exploration planétaire d'Europe (**MASPEX**) et l'analyseur de poussières de surface (**SUDA**) identifieront les principaux composants atmosphériques, y compris les substances volatiles, et préciseront leur lien avec les caractéristiques géologiques, les panaches éventuels et l'océan souterrain.

L'instrument **PIMS** (Plasma Instrument for Magnetic Sounding) caractérisera l'ionosphère d'Europe et la magnétosphère jovienne, ainsi que leurs influences sur les champs magnétiques observés.

Le magnétomètre Europa Clipper (**ECM**) caractérisera le champ magnétique induit d'Europe afin de déterminer l'épaisseur de l'océan et de la couche de glace, ainsi que la conductivité de l'océan.

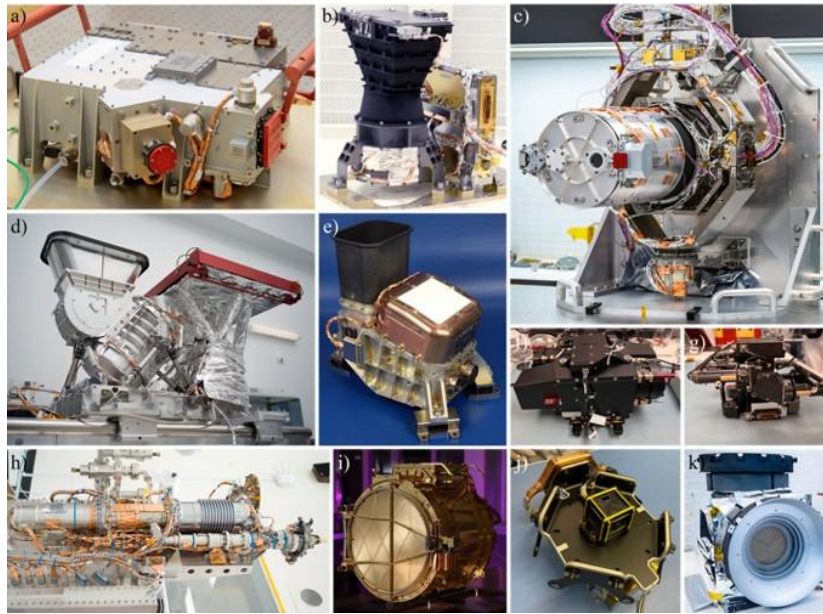


Figure 20, Images de chacun des instruments d'Europa Clipper a) Europa Ultraviolet Spectrograph (Europa-UVS); b) Europa Imaging System (EIS) Wide Angle Camera (WAC), and c) Narrow Angle Camera (NAC); d) Mapping Imaging Spectrometer for Europa (MISE); e) Europa Thermal Emission Imaging System (E-THEMIS); f) Radar for Europa Assessment and Sounding: Ocean to Near-surface (REASON) High Frequency (HF) antenna in stowed configuration, and g) Very High Frequency (VHF) antenna stowed; h) MASS Spectrometer for Planetary EXploration– Europa (MASPEX); i) SURface Dust Analyzer (SUDA); j) Europa Clipper Magnetometer (ECM) fluxgate assembly; and k) one of the two Plasma Instrument for Magnetic Sounding (PIMS) sensors. Image credits: a) NASA / JPL-Caltech / Southwest Research Institute; b) and c) Johns Hopkins Applied Physics Laboratory / Craig Weiman; d) NASA / JPL-Caltech; e) Arizona State University; f) and g) NASA / JPL-Caltech; h) NASA / JPL-Caltech / Southwest Research Institute; i) NASA / University of Colorado, Boulder / Glenn Asakawa; j) UCLA/NASA/JPL-Caltech; k) Johns Hopkins Applied Physics Laboratory / Ed Whitman

## B. JUICE

### 1. Objectifs de la mission

La mission JUICE va observer Jupiter et son environnement, en particulier Ganymède et dans une moindre mesure Callisto et Europe permettant ainsi d'obtenir une étude comparative des différentes lunes Galiléennes.

Elle sera la première sonde à se satelliser autour d'une lune différente de la nôtre (avec MMX qui se satellisera autour de Phobos) et la première à changer d'orbite en passant de Jupiter à Ganymède. En orbite autour de Jupiter, elle survolera plusieurs fois les différentes lunes Galiléennes (12 fois par exemple pour Ganymède), puis se satellisera autour de Ganymède pour des observations plus approfondies. ([site web ESA](#))

JUICE fait partie du programme « ESA's Cosmic Vision » qui comporte 4 thèmes principaux ([O. Grasset et al., 2013](#)) :

*"Thème 1 : Quelles sont les conditions de formation des planètes et d'apparition de la vie ?*

*"Thème 2 : Comment fonctionne le système solaire ?*

*"Thème 3 : Quelles sont les lois physiques fondamentales de l'Univers ?*

*"Thème 4 : Comment l'Univers est-il né et de quoi est-il fait ?*

JUICE s'inscrit dans les thématiques 1 et 2 comportant les sous thématiques suivantes :

*Thème 1 : Vie et habitabilité dans le système solaire : Explorer in situ la surface et la subsurface des corps solides du système solaire les plus susceptibles d'accueillir - ou d'avoir accueilli - la vie. Explorer les conditions environnementales qui rendent la vie possible.*

*Thème 2 : Du Soleil à la périphérie du système solaire : Étudier l'environnement du plasma et du champ magnétique du Soleil, de la Terre, du système jovien (comme un système solaire en miniature), et jusqu'à l'héliopause où le vent solaire rencontre le milieu interstellaire.*

*Thème 2 : Géantes gazeuses et leurs lunes : Étudier Jupiter in situ, son atmosphère et sa structure interne. Les planètes géantes avec leurs anneaux, leurs divers satellites et leurs environnements complexes constituent des systèmes qui jouent un rôle clé dans l'évolution des systèmes planétaires".*

Nous nous concentrerons ici sur les objectifs qui concernent l'observation de Ganymède, Europe et Callisto

Les principaux objectifs scientifiques pour Ganymède, et dans une moindre mesure pour Callisto, sont les suivants :

- Caractérisation des couches océaniques et détection des réservoirs d'eau souterrains potentiels ;
- Cartographie topographique, géologique et compositionnelle de la surface ;
- Étude des propriétés physiques des croûtes glacées ;
- Caractérisation de la distribution des masses internes, de la dynamique et de l'évolution des intérieurs ;
- Étude de l'exosphère ;
- Étude du champ magnétique intrinsèque de Ganymède et de ses interactions avec la magnétosphère jovienne.

Pour Europe, les études se concentreront sur la recherche de molécules prébiotiques, incluant les molécules organiques, la formation des structures de surface et la composition des composés non aqueux. Enfin, JUICE fournira le premier sondage de la subsurface de la lune glacée, y compris les premiers relevés de l'épaisseur minimale de la croûte glacée sur les régions les plus récemment actives. ([Site web ESA](#))

## 2. Les instruments et techniques embarqués de la sonde

La sonde JUICE de l'ESA transportera la plus importante charge utile de télédétection, de géophysique in situ jamais envoyée dans le système solaire externe (Figure 21).

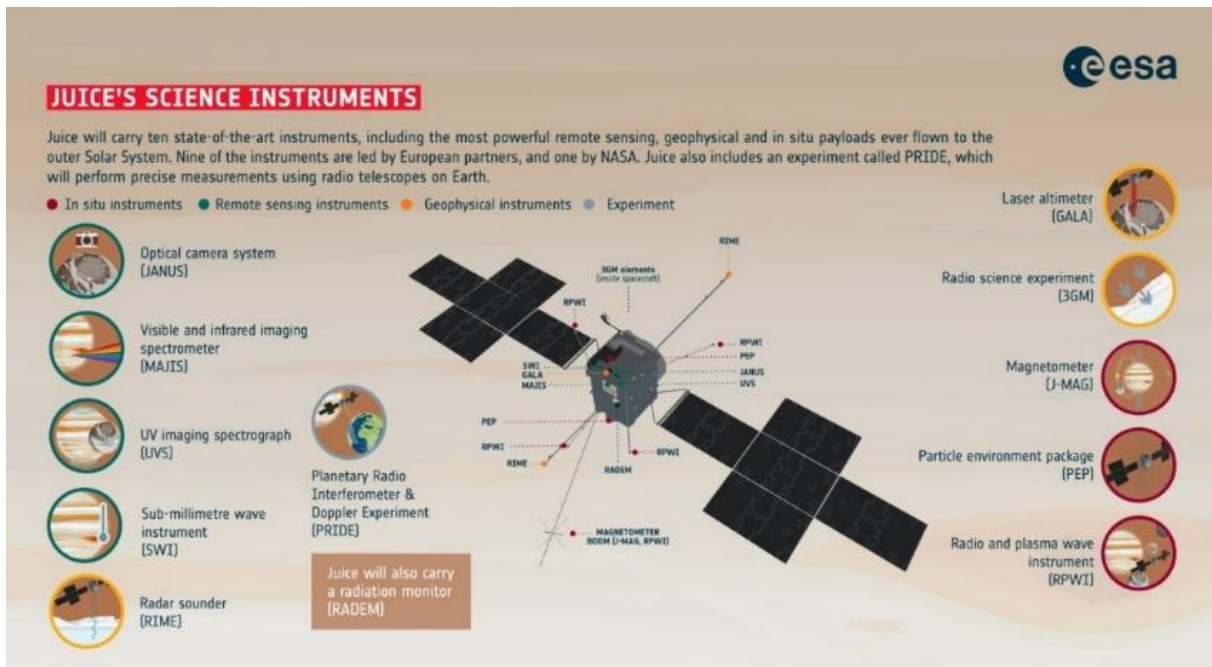


Figure 21, JUICE et ses instruments embarqués. Crédit : ESA/ATG medialab

L'étude du champ de gravité de Ganymède, l'étendue des océans internes sur les lunes glacées, ainsi que la structure de l'atmosphère neutre et de l'ionosphère de Jupiter et de ses lunes seront analysées grâce à l'instrument **3GM**, Geophysics of Jupiter and Galilean Moons (Gravité et géophysique de Jupiter et des lunes galiléennes). 3GM est un ensemble radio comprenant le KaT (transpondeur Ka), l'USO (oscillateur ultrastable) et le HAA (accéléromètre de haute précision).

**GALA**, l'altimètre laser de JUICE, étudiera la déformation due aux marées de Ganymède et la topographie de la surface des lunes glacées.

Les caractéristiques et les processus globaux, régionaux et locaux de la lune seront obtenus avec **JANUS**, un système de caméra optique dont la résolution atteindra 2,4 m

**J-MAG** est le magnétomètre de JUICE ; il est équipé de capteurs permettant de caractériser le champ magnétique jovien et son interaction avec celui de Ganymède, et d'étudier les océans souterrains des lunes glacées.

Les glaces et les minéraux à la surface des lunes glacées seront caractérisés par **MAJIS** un spectromètre imageur.

**PEP** (*Particle Environment Package* ; ensemble de mesures sur l'environnement des particules) est un ensemble de capteurs destinés à caractériser le plasma dans l'environnement du système de Jupiter.

**RIME** (*Radar for Icy Moon Exploration*) est un radar à pénétration de glace destiné à étudier la structure souterraine des lunes glacées jusqu'à une profondeur d'environ neuf kilomètres.

**RPWI** (*Radio and Plasma Wave Investigation*) caractérisera les émissions radio et le plasma dans l'environnement des lunes glacées à l'aide d'une série de capteurs et de sondes.

**SWI** (*Submillimetric Wave Instrument*) étudiera les exosphères et les surfaces des lunes glacées.

**UVS** (*UltraViolet Spectrometer*) est un spectrographe imageur UV qui caractérisera la composition et la dynamique des exosphères des lunes glacées.

La mission comprendra également une expérience PRIDE (*Planetary Radio Interferometer & Doppler Experiment*), qui utilisera le système de télécommunication standard de la sonde, ainsi que des radiotélescopes sur Terre pour effectuer des mesures précises de la position et de la vitesse de la sonde afin d'étudier les champs de gravité des lunes glacées. ([Site web ESA](#))

### C. Résultats attendus en lien avec l'habitabilité

Nous pouvons à ce stade faire un comparatif succinct entre les missions passées et futures afin de bien identifier ce que JUICE et Europa Clipper pourront apporter sur l'étude de l'habitabilité de ces lunes.

Le tableau 3 présente les techniques embarquées pour Galileo, Juno, Europa Clipper et JUICE.

|   | Galileo<br>(Bindschadle <i>et al.</i> , 2003) | Europa Clipper         | JUICE                  |
|---|---|------------------------|------------------------|
| <b>Spectro-Imagerie</b>                     | IR 0,7-5,2 µm (NIMS)                          | IR 0,8-8 µm (MISE)     | IR 0,5-5,54 µm (MAJIS) |
| <b>Spectrometre ultraviolet</b>             | (UVS) 113-432 nm, (EUS) 54-128 nm             | 55-210 nm (Europa UVS) | 55-210 nm (UVS)        |
| <b>Système d'imagerie</b>                   | (SSI)   | (EIS)                  | (JANUS)                |
| <b>Emission thermique</b>                   | (PPR)   | (E-THEMIS)             | (SWI)                  |
| <b>Radar, Altimètre</b>                     |   | (REASON)               | (RIME, GALA)           |
| <b>Science gravitationnelle</b>             |   |                        | (3GM)                  |
| <b>Spectrometre de Masse</b>                |   | (MASPEX)               | (PEP-NIM)              |
| <b>Detecteur de poussières</b>              | (DDS)   | (SUDA)                 |                        |
| <b>Recherche sur le plasma</b>              | (PLS)   | (PIMS)                 | (PEP)                  |
| <b>Magnetometre</b>                         | (MAG)   | (ICE-MAG)              | (J-MAG)                |
| <b>Ondes radio et plasmétique</b>           | (PWS)   |                        | (RPWI)                 |
| <b>Detecteur de particules energetiques</b> | (EPD)   |                        |                        |

Tableau 3, Comparaison des instruments et techniques embarqués par Galileo, Europa clipper et JUICE

De manière générale les sondes embarquent des technologies et instruments similaires, imagerie, spectromètre IR et UV, magnétomètres et sciences du plasma.

Pour ces trois sondes, leurs alimentations jouent également un rôle majeur, des panneaux solaires pour Clipper et JUICE et une batterie thermonucléaire RTG (Radioisotope Thermoelectric Generator) pour Galileo. Cette dernière ressource étant plus efficace en termes de puissance disponible et contrainte de recharge, elle est cependant plus couteuse et à fort impact environnemental. La puissance consommée pour ces sondes est de 570W pour Galileo, 850W for JUICE et 700W pour Europa clipper, ce qui correspond à la puissance d'un micro-onde et reste relativement faible.

La quantité de données accumulées et à renvoyer est également limitée donc l'avantage d'une mise en orbite de la sonde qui paraît évident au départ (cumul de données en permanence) reste en fait limité au flux de renvoi des informations. La mise en orbite de la sonde expose également celle-ci aux radiations importantes notamment autour d'Europe plus qu'autour de Ganymède (JUICE). Pour Europa clipper, les survols ponctuels permettent notamment de recharger la sonde et de renvoyer les données accumulées lors de l'orbite autour de Jupiter avant un nouveau survol. Il est à noter que Galileo a eu un problème majeur de déploiement de son antenne (uniquement 10%) ce qui a considérablement limité les flux d'informations lors de la mission.

JUICE et Clipper embarquent des appareils beaucoup plus résolutifs et compacts que Galileo notamment pour les spectromètres de masse et les spectromètres IR.

De manière générale, Europa clipper est plus orienté pour les investigations sur l'habitabilité d'Europe que JUICE pour les raisons suivantes :

- Valider la présence d'un océan avec le RADAR et 2 zones de fréquences (vs 1 pour JUICE)
- Présence de l'instrument SUDA pour capter des grains et analyser la présence potentielle de molécules complexes organiques dans l'exosphère grâce à une orbite plus basse à 20 km vs 200 km-400 km pour JUICE.
- Définir des zones d'atterrissage riches en information pour de future(s) mission(s) permettant d'avancer sur la recherche de vie potentielle
- Vérifier les anomalies thermiques avec E-THEMIS avec les poches d'eau

JUICE est plus dédié à la caractérisation globale de ces lunes et de l'environnement de Jupiter avec 3GM et avec une antenne dédiée à la gravimétrie (RIME).

### III. L'ABIOGENESE : L'ORIGINE CHIMIQUE DE LA VIE

L'abiogénèse est l'apparition de la vie à partir de matière inanimée. Dans sa conception moderne il s'agit de l'apparition de micro-organismes primitifs (et certainement disparus aujourd'hui) à partir de matière organique préexistante et d'origine **abiotique**<sup>12</sup>. Afin de bien concentrer la discussion sur la thématique de ce mémoire, il convient dans un premier temps de discuter succinctement des recherches actuelles qui concernent l'origine chimique de la vie sur Terre en essayant d'en donner une définition et une frontière : à quel moment de l'évolution considère-t-on le premier organisme vivant ? Puis de discuter des étapes permettant de passer de simples molécules aux premières cellules biologiques et enfin de se concentrer sur la chimie en phase aqueuse que l'on peut retrouver sur ces mondes glacés et la comparer à ce que l'on peut observer sur Terre dans les zones hydrothermales des fonds océaniques.

#### A. Définitions et contextualisation

La définition de la vie est toujours matière à débat. Selon le dictionnaire Larousse, c'est un « *Caractère propre aux êtres possédant des structures complexes (macromolécules, cellules, organes, tissus), capables de résister aux diverses causes de changement, aptes à renouveler, par assimilation, leurs éléments constitutifs (atomes, petites molécules), à croître et à se reproduire.* » ([Larousse, définition de la vie](#))

La NASA dans son programme d'exobiologie en 1992 donne la définition suivante : « *La vie est un système chimique auto-entretenu capable d'évolution darwinienne* » et considère les caractéristiques spécifiques de la seule vie que nous connaissons - la vie terrestre - ([Site web NASA](#))

Afin d'identifier les formes de vie potentielles retrouvées sur les lunes glacées, on peut étudier les formes de vie les plus primitives et les plus anciennes identifiées à ce jour sur Terre qui sont des organismes unicellulaires comme les bactéries et les archées. Les microfossiles, les plus anciens de ces cellules ou **stromatolithes**<sup>13</sup> ont été découverts en Australie et datent de 3,5 milliards d'années ([Site web ENS Lyon, Pierre Thomas](#), Figure 22). D'autres découvertes suggèrent une présence plus ancienne de traces de vie entre 3,9 et 4,1 milliards d'années notamment par mesure du rapport isotopique C12/C13 dans certaines roches : les molécules carbonées métabolisées biologiquement présentent un enrichissement en C12 significatif. ([Bell et al., 2015](#)).

---

<sup>12</sup> Sans présence (ou sans intervention) de la vie

<sup>13</sup> Fossile du précambrien supérieur remontant à plus de 2,7 milliards d'années. Les stromatolithes sont les plus anciennes structures que l'on peut rattacher à une activité biologique.

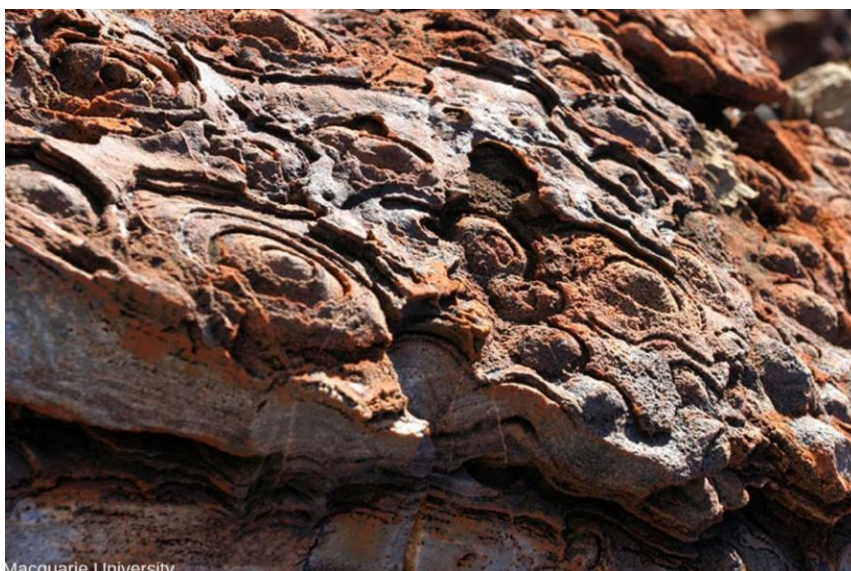


Figure 22, Vue de dessus et en section de stromatolites du craton de Pilbara, Australie (-3,5 Ga). Crédit : Macquarie University (Pilbara) - Gilles Dromart

Selon la théorie Darwinienne, tous les êtres vivants descendent d'êtres vivants plus anciens. Sur cette base, une autre approche que la paléontologie pour identifier les premiers organismes consiste à remonter **l'arbre phylogénétique**<sup>14</sup> de toutes les espèces actuelles jusqu'à un ancêtre théorique unique baptisé LUCA (*Last Universal Common Ancestor*) ([Edmund R. R. Moody et al., 2024](#)).

Selon les auteurs, LUCA serait un organisme extrémophile anaérobie qui pourrait évoluer au fond de l'eau, près de sources hydrothermales. Au regard du génome identifié de cet organisme, celui-ci pourrait avoir un système immunitaire primitif suggérant la présence d'autres organismes dans son environnement (virus...). L'âge de LUCA est estimé à 4.2 milliards d'années ce qui, avec les découvertes en paléontologie évoquées précédemment, suggère que la vie est rapidement apparue après la formation de la Terre (4.54 milliards d'année), même avant/pendant le grand bombardement dont l'intensité et la chronologie fait encore débat ([Thèse Ulysse Pedreira-Segade 2018](#)).

LUCA est donc le plus récent des ancêtres communs à tous les êtres vivants actuels mais il a potentiellement des ancêtres antérieurs dont les lignées aux fonctionnalités et constitutions plus basiques se seraient éteintes (voir figure 23, Figure 24).

---

<sup>14</sup> Un arbre phylogénétique est un arbre schématisé qui montre les relations de parenté entre des groupes d'êtres vivants. Chacun des nœuds de l'arbre représente l'ancêtre commun de ses descendants

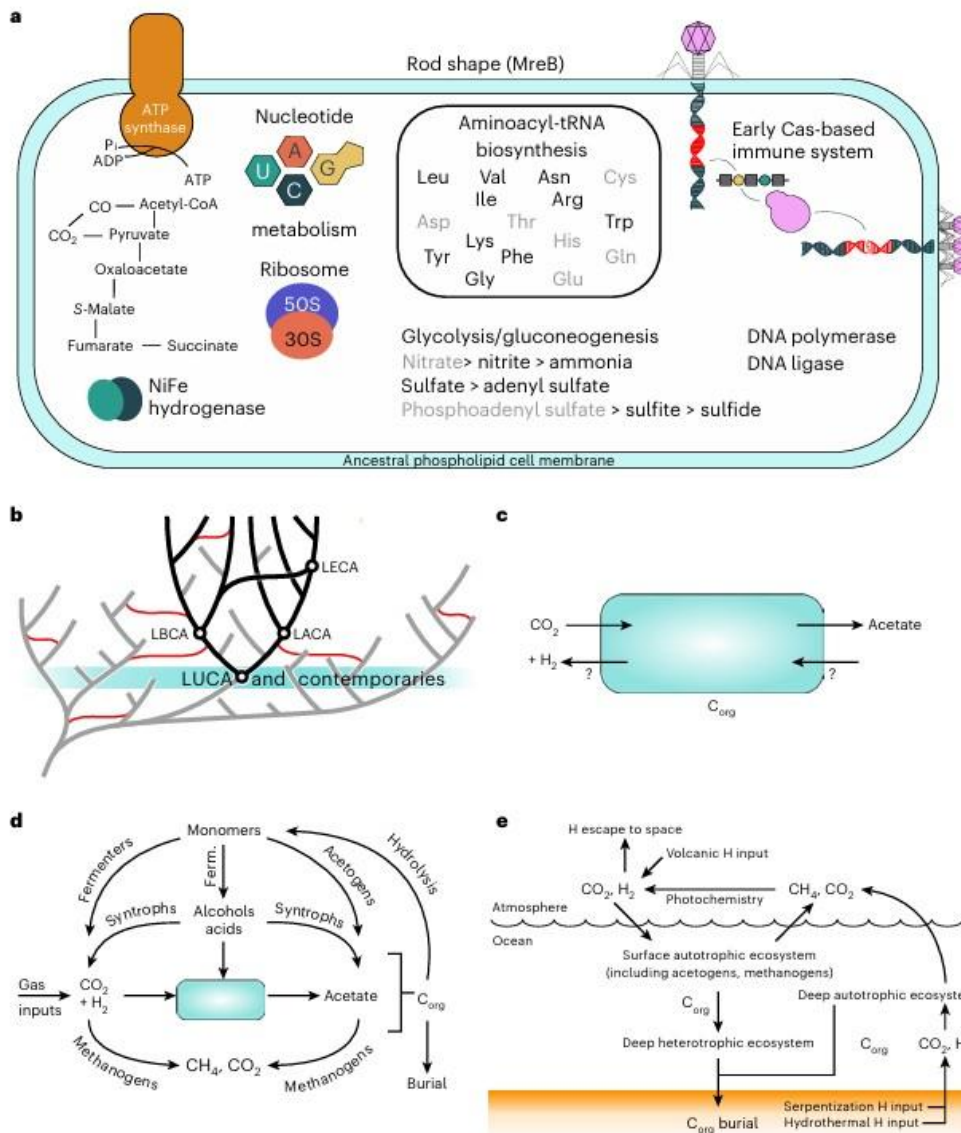


Figure 23, Reconstruction de LUCA dans son contexte évolutif et écologique. a, Représentation de LUCA basée sur une reconstruction du contenu en gènes ancestraux. b, LUCA dans le contexte de l'arbre phylogénétique. Les branches de l'arbre phylogénétique qui ont laissé des descendants échantillonnés aujourd'hui sont colorées en noir, celles qui n'ont pas laissé de descendants échantillonnés sont en gris. En tant qu'ancêtre commun de la vie cellulaire actuelle, LUCA est le nœud le plus ancien que l'on puisse reconstituer à l'aide de méthodes phylogénétiques. Il aurait partagé la Terre primitive avec d'autres lignées qui n'ont pas laissé de descendants parmi la vie cellulaire échantillonnée aujourd'hui. Toutefois, ces lignées peuvent avoir laissé une trace dans les organismes modernes en transférant des gènes dans l'arbre phylogénétique échantillonné (lignes rouges) avant leur extinction. c) Le métabolisme chimio-autotrophe de LUCA reposait probablement sur l'échange de gaz avec l'environnement immédiat pour fixer le carbone organique via l'acétogénèse et il peut également avoir exécuté le métabolisme en sens inverse. d, LUCA dans le contexte d'un écosystème précoce. Le CO<sub>2</sub> et le H<sub>2</sub> qui ont alimenté le métabolisme acétogène plausible de LUCA pourraient provenir d'apports géochimiques et biotiques. La matière organique et l'acétate produits par LUCA ont pu créer une niche pour d'autres métabolismes, y compris ceux qui recyclent le CO<sub>2</sub> et le H<sub>2</sub> (comme dans les sédiments modernes). e, LUCA dans le contexte d'un système terrestre. LUCA acétogène aurait pu être un élément clé des écosystèmes (chimio)autotrophes de surface et profonds, alimentés par H<sub>2</sub>. Si des méthanogènes étaient également présents, l'hydrogène serait libéré dans l'atmosphère sous forme de CH<sub>4</sub>, converti en H<sub>2</sub> par photochimie et donc recyclé dans l'écosystème de surface, ce qui stimulerait sa productivité. Crédit : [Edmund R. R. Moody et al., 2024](#)

Dans notre cas et si l'on retient l'hypothèse que les lunes glacées possèdent des formes de vies primitives dans leurs océans tels que des organismes unicellulaires comme LUCA ou antérieur à sa lignée, les caractéristiques physiques de la vie de ces cellules sont : la présence d'une membrane perméable qui le sépare du monde extérieur, d'un matériel génétique qui préside à l'autoréplication et de protéines qui assurent les fonctionnalités nécessaires à sa survie et dont la conformation spatiale est très importante. On peut également noter que de nombreuses études travaillent sur la chimie des protocellules sans membranes et faites d'agrégats de **macromolécules**<sup>15</sup> biologiques encapsulées dans des colloïdes ou **coacervats**<sup>16</sup> qui auraient pu également exister avant les cellules à membranes et être à l'origine de la biologie actuelle ([Thèse Clémence Schwartzman, 2024](#)).

Nous retiendrons cette hypothèse (avec ou sans membranes) pour essayer d'expliquer l'origine de la vie des atomes jusqu'à ces organismes unicellulaires. Il n'est bien sûr pas exclu que d'autres types de formes de vies, plus évoluées ou sur une base biochimique différente, soient présentes dans ces océans sub-glaciaires.



Figure 24, Illustration du dernier ancêtre commun LUCA. Un micro-organisme déjà attaqué par des virus, il y a 4,2 milliards d'année  
Credit : [Site web Science et Avenir](#)

---

<sup>15</sup> Assemblage (en général par polymérisation) d'un très grand nombre de molécules engendrant une molécule ayant un poids moléculaire élevé

<sup>16</sup> Un coacervat (du latin *coacervare*, rassembler, mettre en groupe) est une petite gouttelette sphéroïdale de particules colloïdales en suspension (typiquement, des molécules de lipides), dont la cohérence par rapport au liquide environnant est assurée par les forces hydrophobes du contenu

## B. De l'atome aux premiers organismes vivants

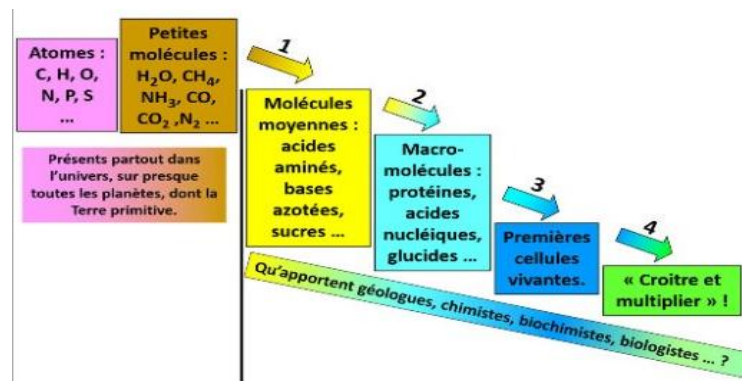


Figure 25, Principales étapes théoriques de l'origine et du développement de la vie sur Terre. Crédit : ENS Lyon, Pierre Thomas

On peut considérer 4 étapes pour le développement des premiers organismes unicellulaires à partir de simples molécules (voir figure 25) ([Site web ENS Lyon, Pierre Thomas](#)).

### 1. Etape 1 : Synthèse et origine des molécules prébiotiques

Ces molécules prébiotiques sont essentiellement des monomères ou **oligomères**<sup>17</sup> comme les peptides, constituant des protéines et les bases azotées à l'origine de l'ADN et de l'ARN. Elles sont constituées d'atomes d'Hydrogène, de Carbone, d'Azote, d'Oxygène et dans une moindre mesure de Phosphore et de Souffre. Tous ces éléments sont présents dans l'univers sous forme de petites molécules ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ...) potentiellement précurseurs de ces molécules prébiotiques.

L'origine de ces molécules prébiotiques retrouvées sur Terre peut être atmosphérique, extra-terrestre ou hydrothermale.

#### a. L'origine atmosphérique

Dans les années 50, Stanley Miller réalise une expérience en laboratoire consistant à reproduire les conditions atmosphériques (composition + décharges électriques) de la terre primitive et de

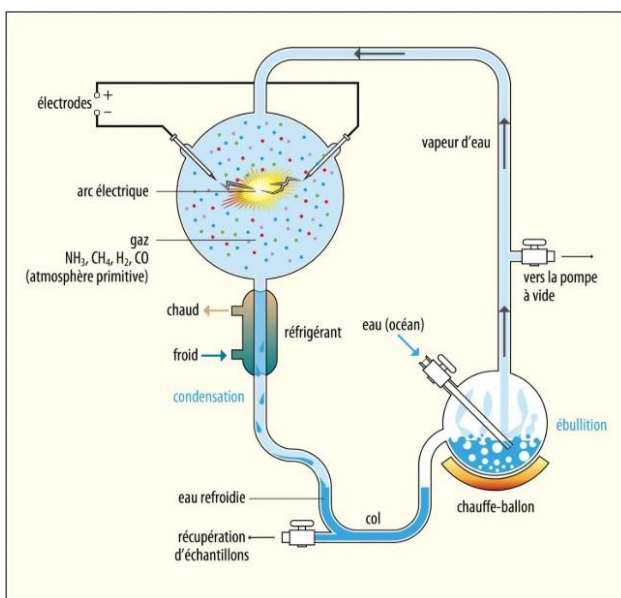


Figure 26, Expérience de Miller. L'atmosphère est schématisée dans le ballon de gauche, comprenant un mélange de gaz – typiquement de l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ), du méthane ( $\text{CH}_4$ ), du dihydrogène ( $\text{H}_2$ ) et du monoxyde de carbone ( $\text{CO}$ ). De la vapeur d'eau est ajoutée à ce mélange par chauffage d'eau liquide représentant l'océan primitif (ballon de droite). Une décharge électrique est ensuite déclenchée dans l'atmosphère (simulant l'impact des éclairs), puis un système par refroidissement fait condenser les vapeurs qui sont collectées au niveau du col. L'analyse de ces échantillons révèle la formation de plusieurs acides aminés. Crédit : Encyclopedia universalis

<sup>17</sup> Un oligomère est une molécule constituée d'un petit nombre (généralement inférieur à dix) d'éléments identiques ou très semblables (pour un grand nombre on parle de polymère)

vérifier si ces conditions permettent la synthèse de tout ou partie de ces molécules (Figure 26 ; [Stanley L. Miller et al., 1953](#)). Même si les résultats permettaient d'identifier la présence d'acides aminés après réaction, résultats confirmés récemment par de nouvelles analyses avec des instruments modernes, cette hypothèse d'une origine atmosphérique de la synthèse de molécules prébiotiques reste matière à débat car les conditions testées ne représentaient probablement pas la composition de l'atmosphère de l'époque et ne produisent pas de bases azotées à l'origine de l'ADN/ARN ([Wollrab et al., 2015](#)). Depuis l'expérience a été refaite plusieurs fois, en variant la composition de l'atmosphère et la source d'énergie : l'atmosphère terrestre d'alors était-elle un milieu oxydant, réducteur ou neutre ? Cette caractéristique conditionne en effet la nature et les quantités de molécules prébiotiques synthétisées.

#### b. L'origine Extraterrestre



Figure 27, Météorite de Murchison. Crédit : USDøE

Il a été détecté dans les nébuleuses (à l'origine de la formation des étoiles et planètes) de petites molécules ( $H_2O$ ,  $CO$ ,  $NH_3$ ,  $CH_4$  ...) et des molécules plus complexes telles que les hydrocarbures polycycliques aromatiques (PAHs). D'autres molécules sont probablement présentes mais non détectées à ce jour. Dans les parties externes les plus froides de ces nébuleuses peuvent se former des mélanges entre des silicates et des glaces de ces petites molécules qui par irradiation (UV, rayons cosmiques ...) forment des molécules plus complexes.

Des acides aminés et des bases azotés ont également été trouvés dans certaines météorites spécifiques comme les **chondrites**<sup>18</sup> récupérées sur Terre. La météorite de Murchison tombée en 1969 en Australie contient par exemple un mélange de plus de 70 acides aminés différents ainsi que de la purine et de la pyrimidine, bases azotées constituant l'ADN et l'ARN. (Figure 27 ; [Elsila et al., 2016](#)).

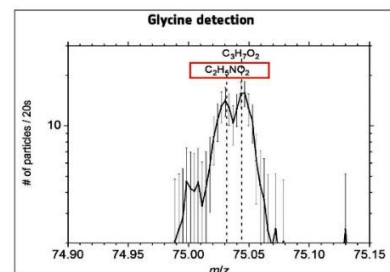


Figure 28, Détection de la glycine par le spectromètre de masse de l'orbiteur Rosetta. Crédit : K. Altwegg et al., 2016

Enfin, plusieurs études ont montré que les comètes contenaient également bon nombre de molécules carbonées.

On peut citer la mission Stardust de la NASA qui a ramené des échantillons de la queue de la comète Wild en 2006 dans lesquelles, parmi d'autres molécules carbonées, de la glycine a été identifiée. Il en va de même pour la mission Européenne Rosetta et son robot Philae, posé sur la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko en 2016 qui a détecté de nombreuses molécules carbonées dont également de la glycine (Figure 28 ; [K. Altwegg et al., 2016](#); [A. Bardyn et al., 2017](#)).

Donc une grande quantité de molécules organiques sont retrouvées dans l'espace entre nébuleuses, comètes et météorites probablement à l'origine de leur présence sur Terre.

#### c. Origine hydrothermale

<sup>18</sup> Type de météorites qui est composé de chondres, c'est-à-dire des petites sphérules dont les principaux constituants sont des minéraux comme l'olivine.

C'est la source qui nous intéresse le plus dans le cadre de ce mémoire. Elle sera développée en détails dans la suite de ce chapitre.

## 2. Etape 2 : Des molécules prébiotiques aux macromolécules

Toutes les cellules contiennent des macromolécules (protéines, ADN, ARN ...) qui sont des polymères de plus petites molécules comme les acides aminés ou les bases azotées. Comment ces polymères se sont-ils formés ? Cela reste matière à débat mais la concentration des monomères est un des points fondamentaux de cette polymérisation. Certaines surfaces minérales tels que les argiles ou les serpentines avec leurs constitutions en inter-feuillets peuvent concentrer, voir catalyser ces réactions. On en retrouve autour de sources hydrothermales et potentiellement autour de mares peu profondes

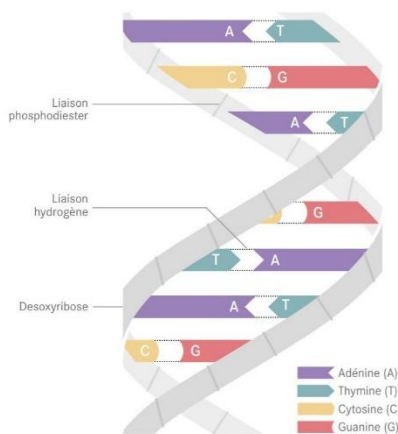


Figure 29, Schéma de l'ADN avec ces 4 bases azotées Adénine, Thymines, Cytosine et Guanine. Crédit : Victoria Denys/CEA

Se pose toutefois le problème de l'enchaînement des monomères lors de la polymérisation, en effet les protéines et leurs configurations pour être actives, dépendent de l'enchaînement des 20 acides aminés retrouvés dans le monde du vivant. Il en va de même pour l'ADN/ARN avec les bases azotées au nombre de 4 qui vont constituer les gènes à l'origine de la synthèse de ces protéines (Figure 29).

Enfin il faut noter également que les acides aminés et les glucides sont asymétriques et que pour chacun d'entre eux il existe deux configurations différentes : L pour Lévozyre (Gauche) ou D pour Dextrozyre (Droite). Or dans toutes les molécules du vivant on ne retrouve qu'une seule configuration, L pour les acides aminés et D pour les glucides alors que dans les expériences de

Miller, dans les météorites ou les comètes on retrouve uniquement un mélange racémique (50/50% des formes D ou L). Même s'il semble que l'une des formes soit majoritaire dans les météorites, pourquoi et comment retrouve-t-on uniquement l'une des formes dans le vivant ? Le mystère reste entier. (Figure 30 ; [Elsila et al., 2016](#) ; [Adrien D Garcia et al., 2021](#)).

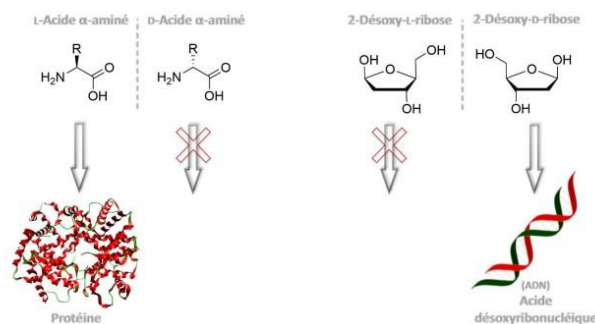


Figure 30, Composition asymétrique des biopolymères : Les protéines sont uniquement composées d'acides aminés L, l'ADN est lui composé de 2-désoxyribose de configuration D. Crédit : Adrien D Garcia et al., 2021

## 3. Etape 3 : Des macromolécules aux premières cellules

Enfin comment les macromolécules peuvent-elles se regrouper et former une cellule autonome à l'origine de la vie ?

Tous les organismes vivants sur terre sont constitués de cellules ; depuis les organismes unicellulaires constitués d'une seule cellule (bactéries, levures), aux organismes supérieurs pluricellulaires qui peuvent être constitués de plusieurs milliers de milliards de cellules (animaux, plantes). Les cellules procaryotes, unicellulaires, ne possèdent pas de noyau et les eucaryotes avec un noyau peuvent être uni ou pluricellulaires. Elles sont capables de se reproduire de manière autonome.

Les macromolécules grâce à leurs structures moléculaires, leurs charges et leurs caractères hydrophiles ou hydrophobes ont tendance à se regrouper pour former des films, filaments et membranes. Les coacervats, déjà cités précédemment en sont un exemple et des études complémentaires récentes essaient de reproduire ce type d'agglomérat en laboratoire (Figure 31 ; [Thèse Clémence Schwartzman, 2024](#)).

On suppose que ces agglomérats sans membrane ont été des intermédiaires dans le développement de la cellule telle qu'on la connaît avec membrane. Mais pour l'instant aucune preuve ne permet de l'affirmer.

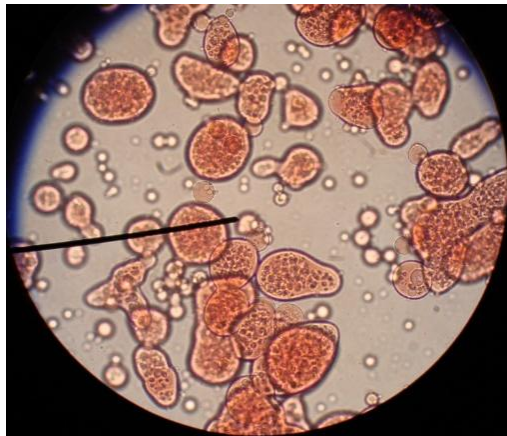


Figure 31, Coacervat. Crédit : Cégép de Drummondville, Québec

#### 4. Conclusions sur l'émergence de la vie sur Terre

Il est fort probable que les molécules organiques prébiotiques n'étaient pas présentes lors de la formation de la Terre au regard des températures et conditions extrêmes au moment de son accréation. Il y a de fortes chances que celles-ci aient été apportées/synthétisées après cette formation par synthèse organique dans les fonds marins/océaniques, et/ou par les météorites et les comètes.

Les 3 étapes décrites ci-dessus avant l'apparition d'organisme biologique capable de générer leur propre métabolisme et donc leurs propres réactions chimiques de manière autonome (cycle de Krebs, cycle de Calvin ...) constituent l'abiogenèse ou comment la vie est apparue à partir de matière inanimée et qu'elles sont les réactions organiques impliquées et les conditions nécessaires à leurs réalisations : concentration, température, pH, catalyseur, propriétés physico-chimiques des molécules impliquées (hydrophobicité, moment dipolaire, stabilité ...).

De plus, il faut supposer que ces réactions soient facilement reproductibles, quantitatives et suivent finalement une certaine logique due principalement à des conditions physico-chimiques favorables. Les études récentes en chimie évoquées précédemment tendent à confirmer cette hypothèse mettant en doute la théorie de la **panspermie**<sup>19</sup> et d'une chimie prébiotique apparue uniquement par le hasard.

En physico-chimie, les réactions tendent à conduire aux états les plus stables énergétiquement. On peut donc supposer que pour l'apparition de la vie que ce soit dans la phase d'abiogenèse (matière inanimée) puis dans l'évolution biologique, cette évolution constante de stabilité physico-chimique soit la norme à l'origine de tout développement et complexification de la vie sur Terre.

On peut donc se risquer à faire le parallèle entre l'évolution de la phase d'abiogenèse avec sa complexification et l'évolution Darwinienne de sélection naturelle (Figure 32).

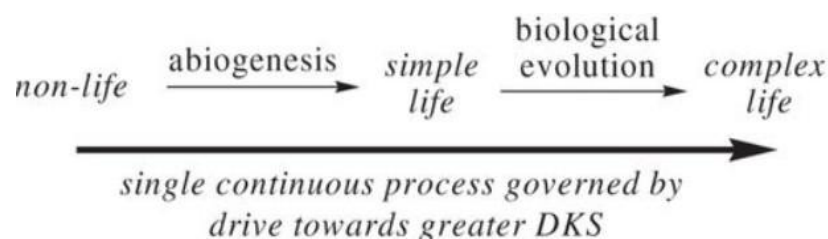


Figure 32, Unification de l'abiogenèse et de l'évolution biologique en un seul procédé continu gouverné par la stabilité dynamique cinétique. Crédit : Addy Pross *et al.*, 2013

Mais pour comprendre cette phase d'abiogenèse en détail, il faudra attendre que les expérimentations chimiques en laboratoire révèlent les classes de molécules impliquées et les types de voies chimiques à privilégier pour tendre vers des systèmes de plus en plus complexe, d'une plus grande stabilité et capables de réplication ([Addy Pross \*et al.\*, 2013](#)).

## C. L'origine hydrothermale de la vie sur Terre

Si la vie s'est développée sur les lunes glacées et sur Europe en particulier, (océan subglacière potentiellement en contact direct avec le manteau rocheux, voir chapitre I), il est fort probable que ce soit autour de sources hydrothermales.

### 1. Hydro-volcanologie

Sur Terre, l'hydro-volcanologie est l'étude du champ d'action de l'eau dans la volcanologie. Cette discipline concerne deux zones géologiques distinctes : le compartiment superficiel paravolcanique comme les lacs acides, les geysers, les fumerolles ... et le plancher océanique et l'environnement immédiat des rides océaniques avec la découverte des fumeurs noirs et blancs (Figure 33). Pour notre étude, nous allons nous concentrer sur cette dernière zone.

Plus d'une centaine de sites de fumeurs/cheminées ont été identifiés à ce jour sur le plancher océanique à une profondeur moyenne de 2800 m et une pression moyenne de 300 bars.

---

<sup>19</sup> Une des théories de l'origine de la vie, qui suggère que la vie peut se transmettre d'une planète à une autre. (L'ensemencement de la Terre proviendrait de germes errant dans le cosmos ou apportés par les météorites ou les comètes.)

Certaines de ces cheminées ont plusieurs mètres de diamètre et peuvent atteindre jusqu'à 60m de hauteur ([Sources : Marie-Laure Pons, ENS Lyon](#)).

Les fumeurs noirs :

Les premiers fumeurs noirs ont été découverts en 1977 au niveau de la dorsale océanique Est-pacifique, près des Galápagos, par Corliss et son équipe à l'aide d'un submersible baptisé ALVIN. Ces structures ou cheminées sont constituées de fer, de cuivre, de nickel, de zinc... et crachent des fluides chauds (300 à 400 °C), acides (pH~3) et réducteurs d'origine hydrothermale.

Les conditions au niveau de ces cheminées sont extrêmes et ne semblent pas en première approche favorable à la vie : absence totale de lumière, pression et température élevées, pH acide. On observe cependant tout un écosystème dans leur environnement proche comme des mollusques, des arthropodes et des annélides. Cependant, les animaux cités sont tous hétérotrophes et se nourrissent de matière organique dont le premier maillon de la chaîne alimentaire sont des archaebactéries chimiotrophes sulfo-oxydantes. Celles-ci tirent leur énergie du soufre, des sulfures et de l'hydrogène dissous dans l'eau de mer. Cette oxydation dégage de l'énergie que ces bactéries transforment en ATP et autres molécules, qui servent ensuite à transformer le CO<sub>2</sub> en carbone organique. ([John B. Corliss et al., 1978](#))

Les fumeurs blancs :

Plus récemment, en 2001, Kelley et ses collaborateurs ont découvert un nouveau type d'hydrothermalisme, toujours situé à proximité d'une dorsale océanique (la ride Atlantique), caractérisé par la présence de cheminées blanches atteignant parfois plusieurs dizaines de mètres de hauteur ([Kelley et al., 2007](#)). Ce lieu, nommé *Lost City*, est un champ hydrothermal composé de ces « *fumeurs blancs* » (figure ci-dessous). L'étude minéralogique des cheminées a révélé qu'elles sont constituées de carbonates de calcium (CaCO<sub>3</sub>) et de brucite (Mg(OH)<sub>2</sub>), et non de sulfures comme les fumeurs noirs. Ces sources sont situées dans un secteur où le magmatisme est absent ou très faible ; le fond de l'Atlantique n'y est pas constitué de basalte, mais de péridotite serpentinisée. Autre différence majeure : les caractéristiques physico-chimiques des fluides émis. En effet, les fluides des fumeurs blancs sont de température modérée (40 à 75°C), de pH basique (entre 9 et 10), pauvres en sulfure d'hydrogène et riches en sulfates. Ces conditions semblent plus clémentes envers la vie : température compatible avec la machinerie enzymatique de nombreux organismes thermophiles (qui se développent souvent à des températures comprises entre 60 et 90°C), et à un pH basique à neutre. *Lost City* est d'ailleurs l'hôte d'un écosystème riche comportant, entre autres, des arthropodes, des mollusques et de nombreuses bactéries ([Kelley et al., 2005](#)).

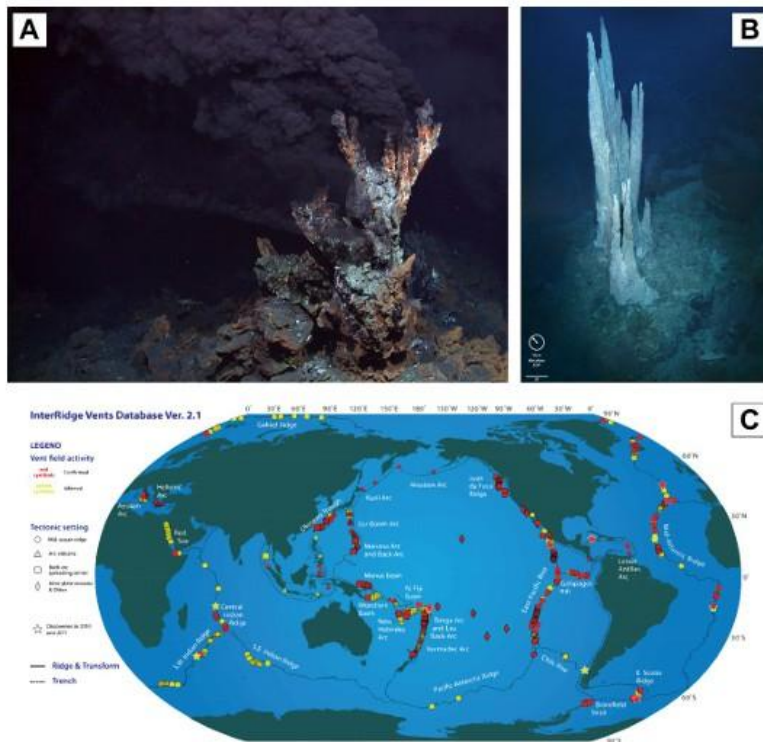


Figure 33, Photographie de fumeur noir (A) et de fumeur blanc (B). Carte de distribution des systèmes hydrothermaux sous-marins modernes recensés dans la base de données InterRidge Vents (C). Crédit : NASA, NOAA, Woods Oceanographic Institution, InterRidge Vents Database

## 2. Rôle des minéraux

Parmi les hypothèses envisagées pour l'émergence de la vie, une seule ne repose que sur les propriétés intrinsèques de notre planète et fait intervenir un processus géologique majeur : la serpentinisation de la lithosphère océanique. Cette réaction hydrothermale d'hydratation et d'oxydation des roches basiques et ultra-basiques océaniques apporte en effet des réponses fortes aux contraintes du vivant : une source d'énergie, des molécules organiques par synthèse abiotique, les briques des principales bio-macromolécules ainsi qu'un espace confiné pouvant faire office de réacteur chimique du vivant.

La serpentinisation des fonds océaniques produit également des molécules porteuses de pouvoir réducteur ( $H_2$ ) et constitue donc une source potentielle d'énergie pour des réactions chimiques favorables au développement de métabolismes primitifs. ([Marie-Laure Pons, ENS Lyon](#))

D'autre part, cette serpentinisation génère des minéraux en feuillets favorisant la concentration des molécules probiotiques et leur réactivité, permettant ainsi leur polymérisation en macromolécules. Les argiles gonflantes augmentent par exemple la concentration locale en nucléotides de trois ordres de grandeurs au moins (Figure 34).



Figure 34, Micrographie MET haute résolution d'une lizardite, serpentine organisée en feuillets dont le pas de répétition est de 0,72 nm Credit : Evans et al., 2013

Les environnements géologiques hydrothermaux semblent donc favorables à la concentration, à la préservation et à la complexification de la matière organique, étapes essentielles à l'émergence des propriétés du vivant. ([Thèse Ulysse Pedreira-Segade 2018](#))

### 3. Chimie hydrothermale

L'eau de mer du plancher océanique à une température moyenne de 2°C et un pH de 8.2. Dans ces zones, l'infiltration de l'eau dans les parties supérieures de la lithosphère associée à un volcanisme sous-marin, engendre donc des variations de températures (60 à 300°C) et de pH (3 à 8) importantes permettant de générer des réactions physico-chimiques uniques. ([Marie-Laure Pons, ENS Lyon](#))

Les mesures des événements hydrothermaux des roches ultrabasiques des rides médio-océaniques ont révélé des phases gazeuses riches en méthane et en composés organiques de masse moléculaire élevée ([Charlou et Donval, 2002](#)). Ces systèmes hydrothermaux constituent donc le réservoir de cinq atomes de base C, O, H, N et S et offrent des conditions favorables à la formation en abiogénèse de certains composés organiques hydrosolubles. Voyons les différentes réactions identifiées dans ces zones :

La production de dihydrogène ( $H_2$ ) est obtenue par la substitution minérale Fe et Mg au cours de la serpentinisation due à l'altération des roches ultrabasiques en contact avec l'eau de mer ([Palandri et Reed, 2004](#) ; [Sleep et al., 2004](#)). Ce composé est porteur d'un pouvoir réducteur intéressant pour la vie (oxydation de  $H_2$  dans diverses réactions cellulaires du métabolisme). Il peut être également impliqué dans la formation abiotique de composés organiques : recombéné avec du dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) également présent au niveau du champ hydrothermal, le dihydrogène peut former du méthane ( $CH_4$ ) par réaction de type Fischer-Tropsch.

Les systèmes hydrothermaux sont également le lieu d'une synthèse de formaldéhyde (HCHO), notamment par oxydation de méthane ( $CH_4$ ) ou par réduction de formiate aqueux ( $HCOO^-$ ) ou de  $CO_2$  ([Cleaves et al., 2008](#)). Le formaldéhyde est un précurseur de la synthèse prébiotique d'acides aminés briques des protéines, et de la synthèse de bases azotées (ADN).

D'autres molécules organiques, comme certains acides (ex. acide acétique  $CH_3COOH$ ), sont synthétisées en contexte hydrothermal océanique. Ces réactions sont également catalysées par des sulfures de fer et de nickel, produits de la serpentinisation, comme la greigite et la

mackinawite, ainsi que des alliages de fer et nickel comme l'awaruite (également connue sous le nom de Joséphinite). (Marie-Laure Pons, ENS Lyon)

De plus, les fluides hydrothermaux contiennent de l'ammoniac  $\text{NH}_3$  ainsi que du cyanure d'hydrogène  $\text{HCN}$ , qui peuvent intervenir dans la synthèse d'oligomères azotés via la réaction de Strecker, synthèse observée en milieu hydrothermal alcalin (pH élevé). L'hydrolyse à pH basique et température  $\sim 100^\circ\text{C}$  de ces oligomères conduit à la formation de nouvelles molécules azotées utiles au vivant : l'adénine, la guanine, la thymine et la cytosine sont détectées autour de ces sources hydrothermales. Le cyanure d'hydrogène  $\text{HCN}$  permet également d'obtenir des acides aminés (Ferris et al., 1978).

Enfin, des expérimentations récentes démontrent la faisabilité de la formation d'acides aminés aromatiques par réaction de Friedel-Craft en milieu abiotique dans les conditions retrouvées autour de sources hydrothermales et catalysées par des roches riches en fer également présentes dans ces zones (saponites) (Bénédictte Ménez et al., 2018).

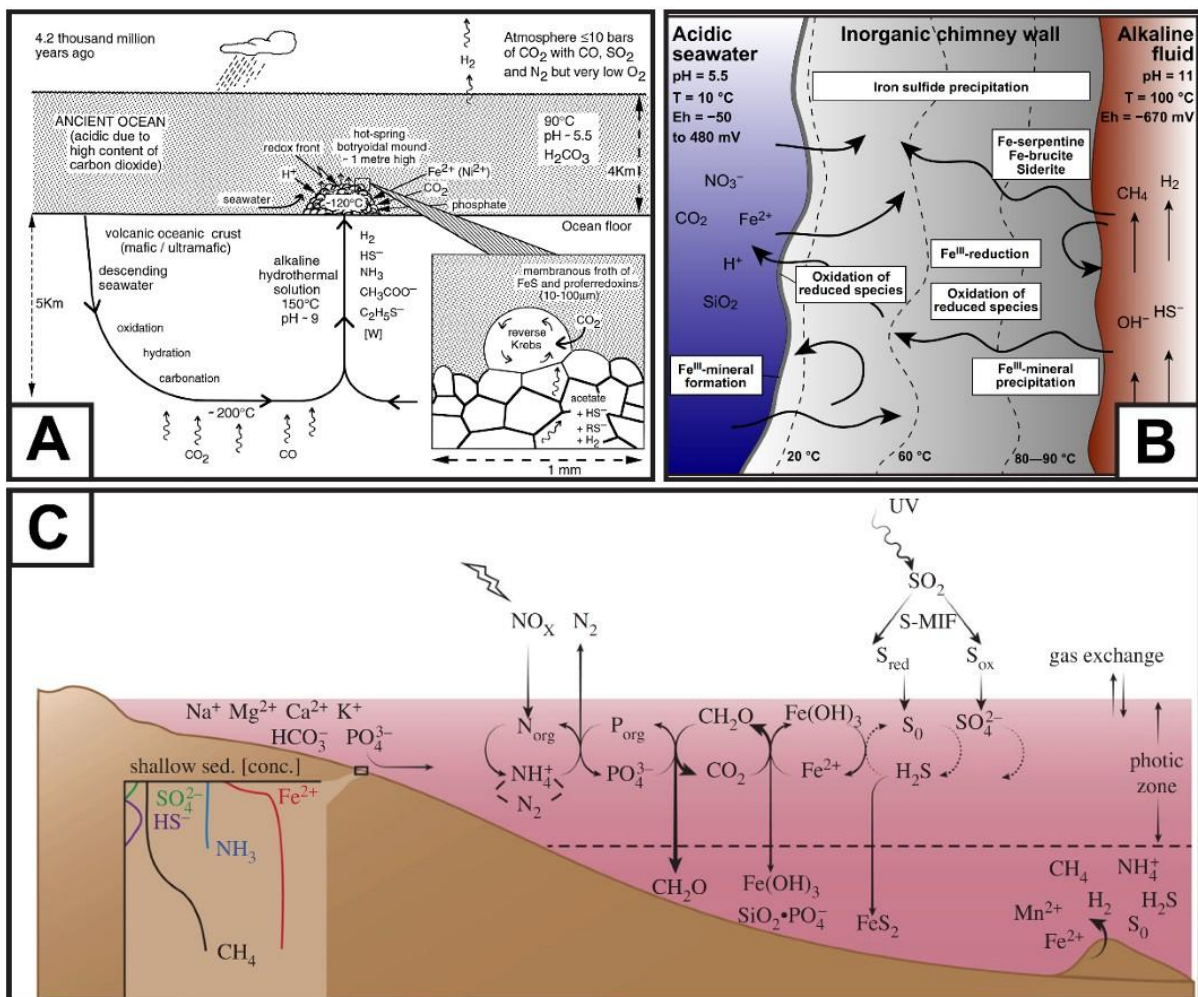


Figure 35, A) Hypothèse de l'émergence d'un système métabolique primitif lié à un système hydrothermal en contexte de serpentinisation (d'après Russell and Hall, 1997). B) Représentation schématique d'une coupe de paroi d'un événement hydrothermal et distribution spatiale des espèces inorganiques et des réactions redox potentielles (d'après Shibuya et al., 2016). C) Ecosystème marin Archéen dans l'océan sulfidique. L'épaisseur des flèches indique l'importance écologique des réactions (d'après Knoll et al., 2016).

#### 4. Une origine de l'émergence de la vie la plus plausible ?

Cette hypothèse repose sur trois raisons majeures : (1) L'organisme le plus primitif trouvé à ce jour est un **hyperthermophile**<sup>20</sup>, (2) L'océan de la Terre primitive est resté longtemps dans des conditions réductrices contrairement à l'atmosphère qui a connu un grand nombre de changements, et (3) Seuls les fonds sous-marins ont pu être protégés des impacts des météorites, qui se sont produits en grande quantité au début de l'histoire de la terre, et protégés de la vaporisation partielle de l'océan (Holm, 1992 cf. [Thèse Michaël Franiatte 2018](#)).

Nous l'avons vu, les systèmes hydrothermaux se comportent comme des réacteurs chimiques pour la synthèse abiotique de molécules organiques : les fluides de la réaction de serpentinisation fournissent les réactifs (H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>...) et certains minéraux issus de cette altération hydrothermale jouent le rôle de catalyseurs. En outre, la structure même des minéraux participe à ce caractère d'enceinte réactionnelle.

La serpentinisation de la partie supérieure de la lithosphère océanique répond donc de façon abiotique aux principales contraintes du vivant, à savoir :

- Le confinement des molécules du vivant (assuré chez les organismes par la membrane cellulaire)
- L'apport d'énergie pour le métabolisme
- L'apport de précurseurs du support de l'information génétique (Bases azotés -> ADN/ARN)
- L'apport de précurseurs des protéines (Acides aminées -> protéines), molécules assurant la majorité des fonctions cellulaires.

Toutes ces propriétés, réunies dans l'espace et le temps, créent un environnement favorable à l'émergence de la vie sur Terre ... et potentiellement ailleurs ...

## D. Discussions sur la présence potentielle de vie sur Europe

Comme évoqué précédemment, le développement de la vie nécessite au minimum la présence d'eau à l'état liquide, des éléments chimiques essentiels comme briques de molécules biologiques et une source d'énergie, avec la puissance et la disponibilité dans le temps, permettant de maintenir un métabolisme capable d'assurer le développement et la reproduction d'organismes (voir figure 36), ([Chyba et al., 2001](#) ; [Kevin Peter Hand et al., 2009](#) ; [K.P. Hand et al., 2020](#)).

---

<sup>20</sup> Les hyperthermophiles sont généralement définis comme des micro-organismes qui se développent de manière optimale à des températures supérieures à 80 °C

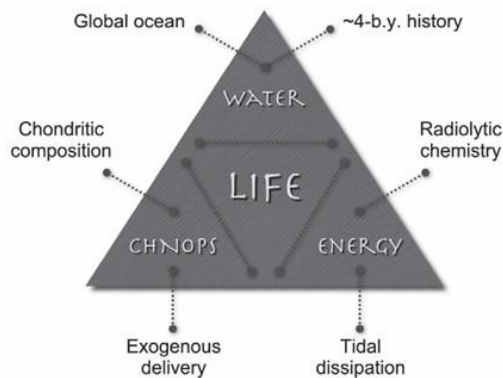


Figure 36, Représentation de l'habitabilité d'Europe. À l'heure actuelle, notre compréhension des conditions nécessaires à la vie peut être ramenée à trois grandes exigences : (1) un environnement d'eau liquide durable, (2) une série d'éléments essentiels à la construction de la vie (par exemple, C, H, N, O, P, S, etc.), et (3) une source d'énergie qui peut être utilisée par la vie. Nous suggérons ici comment ces « clés de voûte de l'habitabilité » s'entrecroisent avec notre compréhension actuelle des conditions sur et à l'intérieur d'Europe. Crédit : Kevin P. Hand et Al., 2009

Voici en résumé ce qu'il a été observé sur Europe et ce que les modèles ou conclusions par observations indirectes proposent.

Ce qui a été observé :

- Présence d'une couche d'eau glacée en surface présentant des zones d'activité récentes et donc géologiquement active.
- Détection sur la surface glacée des entités chimiques suivante (% hors H<sub>2</sub>O) 60% acide sulfurique hydraté [H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> • 8H<sub>2</sub>O]; 5% mirabilite [Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> • 10H<sub>2</sub>O]; 12% hexahydrate [MgSO<sub>4</sub> • 6H<sub>2</sub>O]; 12% [MgCl<sub>2</sub> • 10H<sub>2</sub>O]; 5% epsomite [MgSO<sub>4</sub> • 7H<sub>2</sub>O]; 5% [CO<sub>2</sub>], (Brown and Hand, 2013, Dalton *et al.*, 2012, Johnson *et al.*, 2009) et les composés mineurs: 10<sup>-3</sup> méthane [CH<sub>4</sub>]; 10<sup>-4</sup> acétylène [C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>]; 10<sup>-4</sup> éthane [C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>]; 10<sup>-4</sup> formaldéhyde [H<sub>2</sub>CO]; 10<sup>-4</sup> méthanol [CH<sub>3</sub>OH]; 10<sup>-5</sup> cyanure d'hydrogène [HCN]; et 10<sup>-6</sup> benzène [C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>]. (Waite *et al.*, 2009)
- SO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, et de sels chlorés Mg(ClO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.6(H<sub>2</sub>O), MgCl<sub>2</sub>.2(H<sub>2</sub>O).
- Exosphère ténue composée principalement d'eau, d'hydrogène et de dioxygène.

Ce que l'on interprète avec de forte probabilité par observation indirecte ou des modèles :

- Présence d'un océan subglaciaire salé d'une centaine de kilomètres.
- Fond de l'océan en contact avec une couche rocheuse.
- Marée périodique source potentielle d'énergie.
- Présence de sel de type Chlorure de Sodium (NaCl).
- Des travaux de laboratoire indiquent que la chimie radiolytique de surface sur Europe pourrait entraîner la synthèse de composés prébiotiques tels que les acides aminés et les bases nucléiques.

Ce que l'on interprète avec des modèles par déduction ou proposition :

- Renouvellement de la glace et échange moléculaire entre la surface et l'océan.

- Présence de zone hydrothermale au niveau du plancher océanique avec des conditions de température, pression et composition chimique favorables au développement de la vie dans un espace relativement concentré (vs un océan dilué non actif).
- Radioactivité comme source d'énergie.
- Composition chondritique et serpentinisation du fond océanique jouant le rôle de catalyseur potentiel, de zones de concentration et présence de composés réduits et des métaux pour la formation de macromolécules.
- Présence de fumerolles permettant un échange entre fond océanique, océan, couche de glace et exosphère.

Donc si l'on reprend le minimum requis liées à l'apparition de la vie au regard des observations, modèles prédictifs et observations indirectes :

- La présence d'un océan salé, est très fortement probable mais reste à valider à ce jour, ainsi que sa composition.
- Une ou des sources d'énergie comme les marées liées à la présence de l'océan (aux regards des structures à la surface d'Europe) et l'énergie lié à la désintégration radiative sont très probables et restent à quantifier.
- Concernant les sources de molécules prébiotiques, en dehors des composés détectés en surface, la composition du fond océanique se base sur des modèles prenant en compte les pourcentages de présence des atomes en fonction de la distance au soleil dans le disque d'accrétion solaire primitif ainsi que de la composition rocheuse terrestre. Il y a également de forte probabilité que ces modèles soient vérifiés.

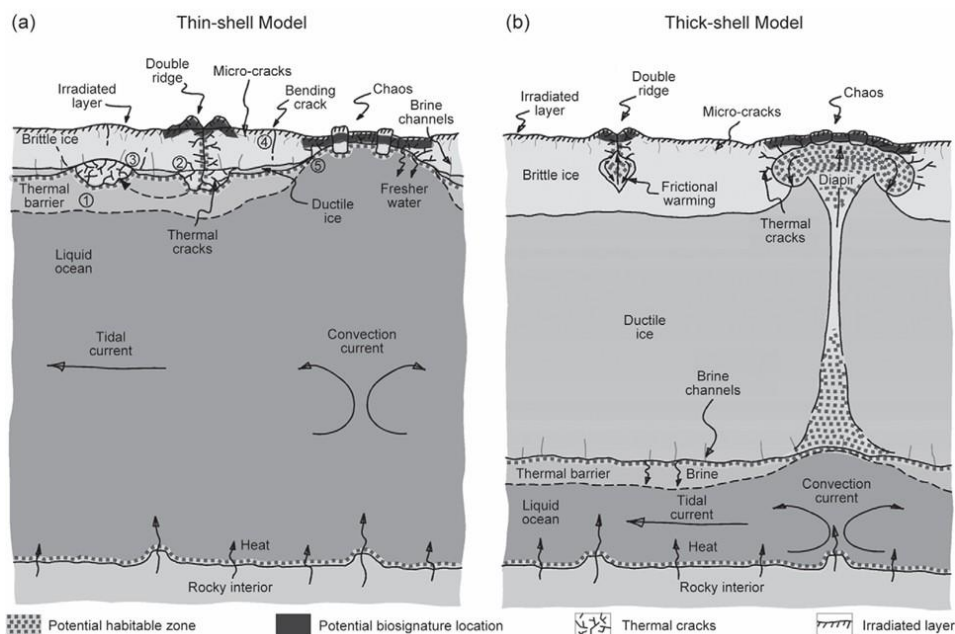


Figure 37, Coupes transversales schématisques de l'enveloppe glacée, de l'océan et du plancher océanique d'Europe montrant les habitats et les biosignatures possibles. (a) Les modèles de coque glacée mince et (b) de coque glacée épaisse sont présentés à titre de comparaison, mais dans les deux cas, les régions qui devraient être les plus propices à la vie sont les interfaces chimiquement riches à la limite fond marin-océan et à la limite glace-océan. Les régions situées à l'intérieur de la coquille glacée peuvent également être habitables. Les régions de surface où les biosignatures peuvent être exprimées sont également représentées. Crédit : Figueredo et al., 2003

En première approche Europe semble donc être la lune glacée la plus propice au développement de la vie, les 3 exigences nécessaires étant fortement probables (Figure 37). Mais elles ne sont pas suffisantes et de nombreuses interrogations demeurent, certains points notamment peuvent anéantir les espoirs d'une vie foisonnante :

- L'âge de la formation des différentes strates d'Europe : un modèle suggère que cette formation a eu lieu tardivement et que le temps géologique nécessaire au développement de la vie est plus court que ce qui a été prédit ([Kevin T. Trinh et al., 2023](#)).
- L'activité volcanique du fond océanique : une activité constante est nécessaire au développement de la vie tel que décrit en chapitre 3 afin d'avoir des zones hydrothermales actives. Europe est-elle encore géologiquement active ?
- La lune recouverte en totalité d'une couche de glace épaisse donc un système océanique en vase clos contrairement à la Terre où des échanges avec l'atmosphère ont lieu et permettent également la photosynthèse.
- Les réactions d'oxydoréductions permanentes, dépendant de la composition/pH de l'océan et de ces échanges avec le milieu extérieur.
- En surface, un environnement non propice à la stabilité de molécules organiques complexes dû au bombardement permanent de molécules ionisées provenant du champ magnétique de Jupiter.

Les prochaines missions comme Europa Clippers en priorité et JUICE pourront affiner/confirmer un certain nombre de ces modèles sans pour autant répondre à l'ensemble des zones d'ombres évoquées ci-dessus car les observations/analyses restent à distance. Une petite chance cependant demeure de pouvoir détecter par spectroscopie des biosignatures à distance au niveau des structures en chaos (couche de glace fine). En effet des blocs de glace pourraient se retourner et ainsi laisser la possibilité d'identifier des biomolécules, d'origine océanographique ou sous la couche de glace, non détériorées par la radioactivité ([Carr et al., 1998](#) ; [Greenberg et al., 1999](#)).

Mais de manière générale, seul un atterrissage avec analyses d'échantillons sur site pourrait apporter des certitudes d'autant plus que la zone d'atterrissage pourrait permettre un accès à l'océan (zone de Chaos notamment, voir plus haut) ([web site : NASA, JPL](#)).

# Conclusion

Les mondes océans dans le système solaire sont les endroits les plus appropriés pour rechercher une vie potentielle en dehors de la Terre. Au regard des connaissances actuelles, les meilleures conditions pour son émergence et sa stabilité dans le temps sont réunies sur Europe, satellite Galiléen de Jupiter. Il reste cependant de nombreuses incertitudes quant à son habitabilité et la plupart des analyses à disposition restent indirectes ou liées à des modèles prédictifs.

La mission Europa Clipper semble être la mieux armée pour consolider ces analyses, avancer sur les conditions d'habitabilité de cette lune et potentiellement relever des biosignatures à distance. Cette mission reste cependant une mission d'approche pour préparer un autre projet plus ambitieux d'atterrisseur en identifiant un terrain potentiel et en définissant les instruments/analyses à prioriser afin d'identifier de potentielles traces de vie.

La connaissance de l'émergence de la vie sur Terre est également une recherche essentielle afin d'identifier tous les facteurs et entités chimiques nécessaires à son développement, des petites molécules aux premiers organismes primitifs. Les origines de la vie terrestre étant encore incertaines, il est cependant possible d'envisager une combinaison entre synthèse abiotique terrestre de molécules organiques autour de sources hydrothermales du plancher océanique (avec un rôle majeur de la serpentinisation) et un ensemencement par des molécules organiques d'origine extraterrestre. Ces 2 phénomènes restent envisageables sur Europe.

Si nous découvriions une seconde origine à la vie, nous transformerions l'univers d'une étendue stérile dans laquelle la vie est unique à la Terre, en un univers biologique dans lequel la vie peut apparaître partout où les conditions sont appropriées. Regarder les étoiles s'illuminer le soir au coucher du soleil prendrait alors une tout autre dimension.



# Bibliographie

J.J. Buffo *et al.*

Characterizing the ice-ocean interface of icy worlds: A theoretical approach.

***Icarus***, Volume 360 (2021)

<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114318>

V. Lainey *et al.*

A recently formed ocean inside Saturn's moon Mimas

***Nature*** 626, 280–282 (2024)

<https://doi.org/10.1038/s41586-023-06975-9>

Neil F. Comins

A la découverte de l'univers, Introduction à l'astronomie et à l'astrophysique. Edition De Boeck

James O'Donoghue *et al.*

Sub-Auroral Heating at Jupiter Following a Solar Wind Compression

***Geophysical research letter***, Volume 52, Issue 7 (2025)

<https://doi.org/10.1029/2024GL113751>

Bruce G. Bills *et al.*

Rotation models for the Galilean satellites

***Planetary and Space Science*** Volume 219, (2022)

<https://doi.org/10.1016/j.pss.2022.105474>

Ludivine Leclercq

De l'exosphère à la magnétosphère des objets planétaires faiblement magnétisés: optimisation de modélisations parallélisées pour une application à Ganymède

***Université Paris Saclay*** (COMUE), (2015)

<https://insu.hal.science/tel-01256191v2>

Robin M Canup *et al.*

Origin of Europa and the Galilean satellites

***Europa***, publié par Robert T. Pappalardo, William B. page 59-83 (2009)

Carl B. Pilcher *et al.*

Galilean Satellites: Identification of Water Frost

***Science***, Vol 178, Issue 4065 pp. 1087-1089 (1972)

[DOI: 10.1126/science.178.4065.1087](https://doi.org/10.1126/science.178.4065.1087)

Tim Van Hoolst *et al.*

Geophysical Characterization of the Interiors of Ganymede, Callisto and Europa by ESA's JUpiter ICy moons Explorer

***Space science reviews***, Volume 220, article number 54, (2024)

<https://doi.org/10.1007/s11214-024-01085-y>

W. S. Kurth *et al.*

Juno Plasma Wave Observations at Europa

**Geophysical research letter**, Volume 50, Issue 24 (2023)

<https://doi.org/10.1029/2023GL105775>

Gianrico Filacchione *et al.*

Serendipitous infrared observations of Europa by Juno/JIRAM

**Icarus**, Volume 328, Pages 1-13 (2019)

<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.03.022>

Peter Addison *et al.*

Magnetic Signatures of the Interaction Between Europa and Jupiter's Magnetosphere During the Juno Flyby

**Geophysical research letter**, Volume 51, Issue 2 (2024)

<https://doi.org/10.1029/2023GL106810>

C. J. Hansen *et al.*

Juno's Close Encounter With Ganymede—An Overview

**Geophysical research letter**, Volume 49, Issue 23 (2022)

<https://doi.org/10.1029/2022GL099285>

Oliver King *et al.*

Global Modeling of Ganymede's Surface Composition: Near-IR Mapping From VLT/SPHERE

**Journal of geophysical research: Planets** 127(12) (2022)

DOI:[10.1029/2022JE007323](https://doi.org/10.1029/2022JE007323)

Steven D. Vance *et al.*

Geophysical Investigations of Habitability in Ice-Covered Ocean Worlds

**JGR planets** Volume 123, Issue 1 Pages 180-205 (2018)

<https://doi.org/10.1002/2017JE005341>

Alyssa Rose Rhoden

Obliquity, Precession, and Fracture Mechanics: Implications of Europa's Global Cycloid Population

**JGR planets** Volume 126, Issue 3 Pages

<https://doi.org/10.1029/2020JE006710>

Elodie Lesage

Etude du cryovolcanisme sur Europe.

**Planétologie et astrophysique de la terre** [astro ph.EP]. Université Paris-Saclay, (2020).

<https://theses.hal.science/tel-03150075v2>

Loïc Mével

Analyse des structures de la surface d'Europe (satellite de glace de Jupiter): conséquences dynamiques, rhéologiques et thermiques.

**Géologie appliquée**. Université de Nantes, (2003)

<https://theses.hal.science/tel-00006231v1>

Margaret G. Kivelson *et al.*

Galileo Magnetometer Measurements: A Stronger Case for a Subsurface Ocean at Europa  
**Science** Vol 289, Issue 5483 pp. 1340-1343 (2000)

[DOI: 10.1126/science.289.5483.1340](https://doi.org/10.1126/science.289.5483.1340)

Samantha K. Trumbo *et al.*

Sodium chloride on the surface of Europa  
**Science Advances** Vol 5, Issue 6 (2019)

[DOI: 10.1126/sciadv.aaw7123](https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw7123)

Xianzhe Jia *et al.*

Evidence of a plume on Europa from Galileo magnetic and plasma wave signatures  
**Nature Astronomy**, volume 2, pages 459–464 (2018)

<https://doi.org/10.1038/s41550-018-0450-z>

Louise M. Prockter *et al.*

Dark Terrain on Ganymede: Geological Mapping and Interpretation of Galileo Regio at High Resolution

**Icarus**, Volume 135, Issue 1, Pages 317-344 (1998)

<https://doi.org/10.1006/icar.1998.5981>

M.G. Kivelson *et al.*

The Permanent and Inductive Magnetic Moments of Ganymede  
**Icarus**, Volume 157, Issue 2, Pages 507-522 (2002)

<https://doi.org/10.1006/icar.2002.6834>

Joachim Saur *et al.*

The search for a subsurface ocean in Ganymede with Hubble Space Telescope observations of its auroral ovals

**JGR Space physics**, Volume 120, Issue 3 Pages 1715-1737 (2015)

<https://doi.org/10.1002/2014JA020778>

Federico Tosi *et al.*

Characterization of the Surfaces and Near-Surface Atmospheres of Ganymede, Europa and Callisto by JUICE

**Space science reviews**, Volume 220, article number 59, (2024)

<https://doi.org/10.1007/s11214-024-01089-8>

A. Galli *et al.*

Callisto's Atmosphere and Its Space Environment: Prospects for the Particle Environment Package on Board JUICE

**Earth and space science**, Volume 9, Issue 5 (2022)

<https://doi.org/10.1029/2021EA002172>

Corey J. Cochran *et al.*

Stronger Evidence of a Subsurface Ocean Within Callisto From a Multifrequency Investigation of Its Induced Magnetic Field

**AGU Advances**, Volume 6, Issue 1 (2025)

<https://doi.org/10.1029/2024AV001237>

Robert T. Pappalardo *et al.*

Science Overview of the Europa Clipper Mission

**Space science review**, Volume 220, article number 40, (2024)

<https://doi.org/10.1007/s11214-024-01070-5>

I. J. Daubar *et al.*

Planned Geological Investigations of the Europa Clipper Mission

**Space science review**, Volume 220, article number 18, (2024)

<https://doi.org/10.1007/s11214-023-01036-z>

T. M. Becker *et al.*

Exploring the Composition of Europa with the Upcoming Europa Clipper Mission

**Space science review**, Volume 220, article number 49, (2024)

<https://doi.org/10.1007/s11214-024-01069-y>

Richard Meitzler *et al.*

Investigating Europa's Radiation Environment with the Europa Clipper Radiation Monitor

**Space science review**, Volume 219, article number 61, (2023)

<https://doi.org/10.1007/s11214-023-01003-8>

O. Grasset *et al.*

Jupiter ICy moons Explorer (JUICE): An ESA mission to orbit Ganymede and to characterise the Jupiter system

**Planetary and Space Science**, 78, 1–21 (2013)

<https://doi.org/10.1016/j.pss.2012.12.002>

Pierre Thomas

L'origine de la vie sur Terre vue par un géologue : quoi de neuf depuis 2015 ?

**Laboratoire de Géologie de Lyon / ENS de Lyon**

[L'origine de la vie sur Terre vue par un géologue : quoi de neuf depuis 2015 ? — Planet-Terre](#)

Elizabeth A. Bell *et al.*

Potentially biogenic carbon preserved in a 4.1 billion-year-old zircon

**Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences** Vol. 112 | No. 47 (2015)

<https://doi.org/10.1073/pnas.1517557112>

Edmund R. R. Moody *et al.*

The nature of the last universal common ancestor and its impact on the early Earth system

**Nature Ecology & Evolution** volume 8, pages1654–1666 (2024)

<https://doi.org/10.1038/s41559-024-02461-1>

Ulysse Pedreira-Segade

Nucléotides à l'interface minéral-eau et réactivité des acides aminés en conditions hydrothermales dans le contexte des origines de la vie.

**Sciences de la Terre. Université de Lyon**, (2017).

<https://theses.fr/2017LYSEN067>

Clémence Schvartzman.

From structure to bioactivity: exploring confinement effects in multicompartment and multicomponent vesicles. *Polymers*.

**Université de Bordeaux**, (2023).

<https://theses.hal.science/tel-04397683v1>

Stanley L. Miller *et al.*

A Production of Amino Acids Under Possible Primitive Earth Conditions

**Science**, Vol 117, Issue 3046, pp. 528-529 (1953)

DOI: [10.1126/science.117.3046.528](https://doi.org/10.1126/science.117.3046.528)

Eva Wollrab *et al.*

Chemical Analysis of a “Miller-Type” Complex Prebiotic Broth

**Orig Life Evol Biosph** 46, 149–169 (2016).

<https://doi.org/10.1007/s11084-015-9468-8>

Jamie E. Elsila *et al.*

Meteoritic Amino Acids: Diversity in Compositions Reflects Parent Body Histories

**ACS Cent. Sci.** 2, 6, 370–379 (2016)

<https://doi.org/10.1021/acscentsci.6b00074>

Kathrin Altwegg *et al.*

Prebiotic chemicals—amino acid and phosphorus—in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko

**Science Advances**, Vol 2, Issue 5 (2016)

DOI: [10.1126/sciadv.1600285](https://doi.org/10.1126/sciadv.1600285)

Anaïs Bardyn *et al.*

Carbon-rich dust in comet 67P/Churyumov-Gerasimenko measured by COSIMA/Rosetta

**Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Volume 469, Issue Suppl\_2, Pages S712–S722 (2017)

<https://doi.org/10.1093/mnras/stx2640>

Jamie E. Elsila *et al.*

Meteoritic Amino Acids: Diversity in Compositions Reflects Parent Body Histories

**ACS Cent. Sci.**, 2, 6, 370–379 (2016)

<https://doi.org/10.1021/acscentsci.6b00074>

Adrien D Garcia *et al.*

L’asymétrie de la vie: une origine extraterrestre?

**L’Actualité Chimique**, (2019)

<https://hal.science/hal-02526268v1>

Addy Pross *et al.*

The origin of life: what we know, what we can know and what we will never know

**Open biology** Volume 3, Issue 3 (2013)

<https://doi.org/10.1098/rsob.120190>

Marie-Laure Pons

Serpentinisation océanique et vie primitive

**ENS de Lyon - Laboratoire de Géologie de Lyon** (2014)

[Serpentinisation océanique et vie primitive — Planet-Terre](#)

John B. Corliss *et al.*

The chemistry of hydrothermal mounds near the Galapagos Rift

**Earth and Planetary Science Letters**, Volume 40, Issue 1, Pages 12-24 (1978)

[https://doi.org/10.1016/0012-821X\(78\)90070-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(78)90070-5)

Deborah S. Kelley *et al.*

The Lost City Hydrothermal Field Revisited

**Oceanography** Vol. 20, No. 4, (2007)

<https://www.jstor.org/stable/24860149>

Deborah S. Kelley *et al.*

A Serpentinite-Hosted Ecosystem: The Lost City Hydrothermal Field

**Science** Vol 307, Issue 5714pp. 1428-1434 (2005)

DOI: [10.1126/science.1102556](https://doi.org/10.1126/science.1102556)

J.L Charlou *et al.*

Geochemistry of high H<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> vent fluids issuing from ultramafic rocks at the Rainbow hydrothermal field (36°14'N, MAR)

**Chemical Geology** Volume 191, Issue 4, Pages 345-359 (2002)

[https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00134-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00134-1)

James L Palandri *et al.*

Geochemical models of metasomatism in ultramafic systems: serpentinization, rodingitization, and sea floor carbonate chimney precipitation

**Geochimica et Cosmochimica Acta** Volume 68, Issue 5, Pages 1115-1133 (2004)

<https://doi.org/10.1016/j.gca.2003.08.006>

N. H. Sleep *et al.*

H<sub>2</sub>-rich fluids from serpentinization: Geochemical and biotic implications

**PNA Evolution** Volume 101, No. 35 (2004)

<https://doi.org/10.1073/pnas.0405289101>

H. James Cleaves II

The prebiotic geochemistry of formaldehyde

**Precambrian Research** Volume 164, Issues 3–4, Pages 111-118 (2008)

<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2008.04.002>

J. P. Ferris *et al.*

HCN: A plausible source of purines, pyrimidines and amino acids on the primitive earth

**Journal of molecular evolution**, Volume 11, pages 293–311, (1978)

<https://doi.org/10.1007/BF01733839>

Bénédicte Ménez *et al.*

Abiotic synthesis of amino acids in the recesses of the oceanic lithosphere

**Nature volume** 564, pages 59–63 (2018)

<https://doi.org/10.1038/s41586-018-0684-z>

Michaël Franiatte.

Etude théorique et expérimentale de la biogenèse des systèmes hydrothermaux marins : une contribution à la recherche sur l'origine de la vie.

**Sciences de la Terre. Université Henri Poincaré - Nancy 1**, (2011)

<https://hal.science/tel-01746196/>

Christopher F. Chyba *et al.*

Possible ecosystems and the search for life on Europa

PNAS volume 98, no. 3, 801– 804 (2001)

<https://doi.org/10.1073/pnas.98.3.801>

Kevin P. Hand *et al.*

Astrobiology and the Potential for Life on Europa

**Europa**, publié par Robert T. Pappalardo, William B. page 589-629 (2009)

Kevin P. Hand *et al.*

On the Habitability and Future Exploration of Ocean Worlds.

**Space Sci Rev** 216, 95 (2020).

<https://doi.org/10.1007/s11214-020-00713-7>

Kevin T. Trinh *et al.*

Slow evolution of Europa's interior: metamorphic ocean origin, delayed metallic core formation, and limited seafloor volcanism

**Science Advances** Vol 9, Issue 24 (2023).

DOI: [10.1126/sciadv.adf3955](https://doi.org/10.1126/sciadv.adf3955)

Michael H. Carr *et al.*

Evidence for a subsurface ocean on Europa

**Nature** volume 391, pages 363–365 (1998)

<https://doi.org/10.1038/34857>

Richard Greenberg *et al.*

Chaos on Europa

**Icarus**, Volume 141, Issue 2, Pages 263-286 (1999)

<https://doi.org/10.1006/icar.1999.6187>

