

# LA MISSION EUROPÉENNE JUICE EN ROUTE VERS LE SYSTÈME DE JUPITER

Cécile Ferrari, Professeure à l'Université Paris Cité,  
& Institut de physique du globe de Paris, CNRS, F-75005 Paris, France

*Une description détaillée du programme de la mission JUICE ayant comme objectif prioritaire d'essayer d'expliquer les conditions d'émergence de la vie.*

Grâce aux acteurs du Centre spatial guyanais de Kourou, l'Agence spatiale européenne ESA, le Centre national d'études spatiales CNES et la société Ariespace, la sonde JUICE aura triomphalement été lancée par la mémorable fusée Ariane 5 le 14 avril 2023 à 14 h 14 heure de Paris. Quelle fierté de savoir l'Europe en 2023 toujours capable, dans un monde secoué à l'échelle globale par de nombreuses mutations, de lancer une fusée d'une telle puissance et d'une exceptionnelle fiabilité ! Le moteur Vulcain sera toujours de la partie dans la version 6 de la fusée Ariane, désormais appuyé pour la poussée du deuxième étage, d'un moteur Vinci. Une fine équipe espérons-le. Il aura fallu un court épisode de suspens aux abords du survol de l'Australie, dans l'attente de l'émission radio de la sonde libérée de son propulseur, pour nous rappeler, si nécessaire, que ces lancements restent des prouesses scientifiques et humaines.

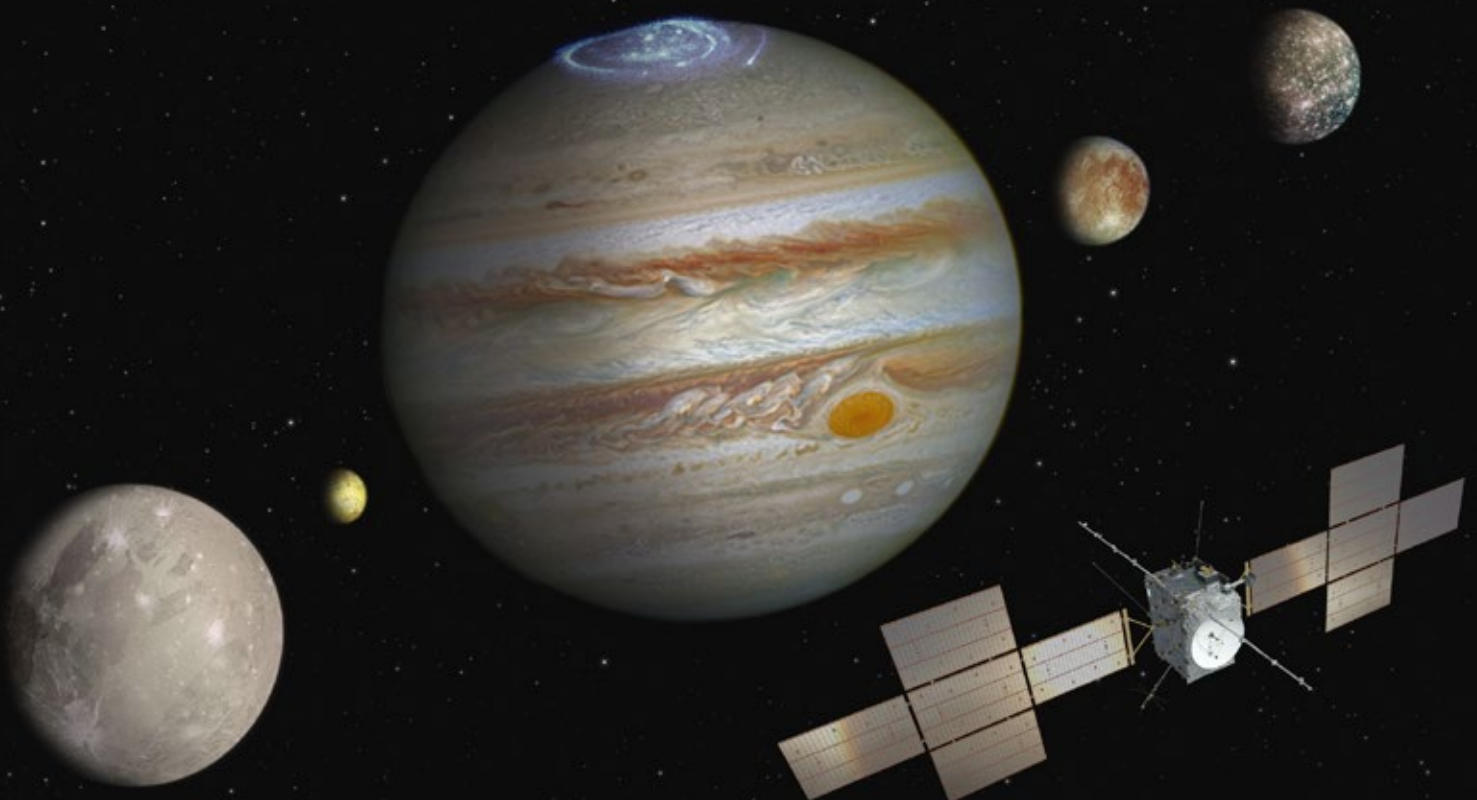
Pour accélérer la sonde et viser une insertion en orbite autour de Jupiter en juillet 2031, l'ESA a planifié 3 survols de la Terre et un survol de Vénus jusqu'en 2029. Après sept ans et demi de croisière, la sonde entamera une série de 35 survols des satellites galiléens, Callisto (21), Ganymède (12) et Europe (2), dont la chronologie peut être visionnée sur le site de l'ESA à :

[https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Videos/2022/03/Juice\\_s\\_journey\\_and\\_Jupiter\\_system\\_tour](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2022/03/Juice_s_journey_and_Jupiter_system_tour).

Elle sera mise en orbite autour de Ganymède en décembre 2034 jusqu'en septembre 2035 date à laquelle elle sera amenée à s'écraser à sa surface.

**Anatomie d'une sonde.** La sonde JUICE, dès sa libération du lanceur, a commencé le déploiement de ses panneaux solaires pour atteindre son autonomie énergétique. À l'instar de la sonde Juno, elle est aussi équipée de

Fig.1. Vue d'artiste de Jupiter et des satellites galiléens Ganymède, Io, Europe et Callisto (de gauche à droite). La sonde JUICE apparaît avec ces panneaux solaires et l'antenne du radar RIME déployés (Crédits spacecraft : ESA/ATG medialab ; Jupiter : NASA/ESA/J. Nichols (University of Leicester) ; Ganymede : NASA/JPL ; Io : NASA/JPL/University of Arizona ; Callisto and Europa : NASA/JPL/DLR).



panneaux solaires, de 85 m<sup>2</sup> de surface, qui lui fourniront 850 W pour fonctionner. La sonde de 6,3 tonnes emporte 3,6 tonnes de propergol pour les corrections de trajectoire lors de la mission, 2,4 tonnes de masse pour le système et 300 kg environ de charge utile scientifique. La charge instrumentale est conséquente, celle d'un vaisseau amiral en mission longue durée vers les satellites galiléens.

**JUICE, JUpiter ICy moons Explorer.** La sonde est effectivement destinée à l'exploration prioritaire de Ganymède, le plus gros satellite du Système solaire, mais aussi de Callisto et d'Europe. D'ici là les instruments vont être allumés et testés, le planning des observations par les différents instruments va être affiné pour atteindre les objectifs scientifiques fixés. Les grands télescopes au sol ou le télescope spatial James Webb (JWST) permettront dans le même temps d'affiner nos connaissances sur ces cibles. Même si la résolution spatiale va être limitée en

comparaison, les scientifiques vont pouvoir affiner leur modèle aux contacts de nouvelles données plus récentes ou plus riches que la dernière mission spatiale de la NASA Galileo (1995-2003), dédiée à l'étude de ces lunes.

## Les grandes questions

De nombreuses questions taraudent les esprits des scientifiques engagés dans cette mission auxquelles ils vont tenter d'apporter des réponses avec les instruments embarqués et la trajectoire choisie. Un des grands enjeux de la recherche actuelle en géophysique et en astrophysique est la compréhension des conditions d'émergence de la vie, l'exobiologie au-delà de nos frontières terrestres. Les pistes de recherche de forme de vie ailleurs dans le Système solaire se glissent dans les réservoirs d'eau liquide que nous savons exister sous la croûte glacée de certains satellites des planètes géantes

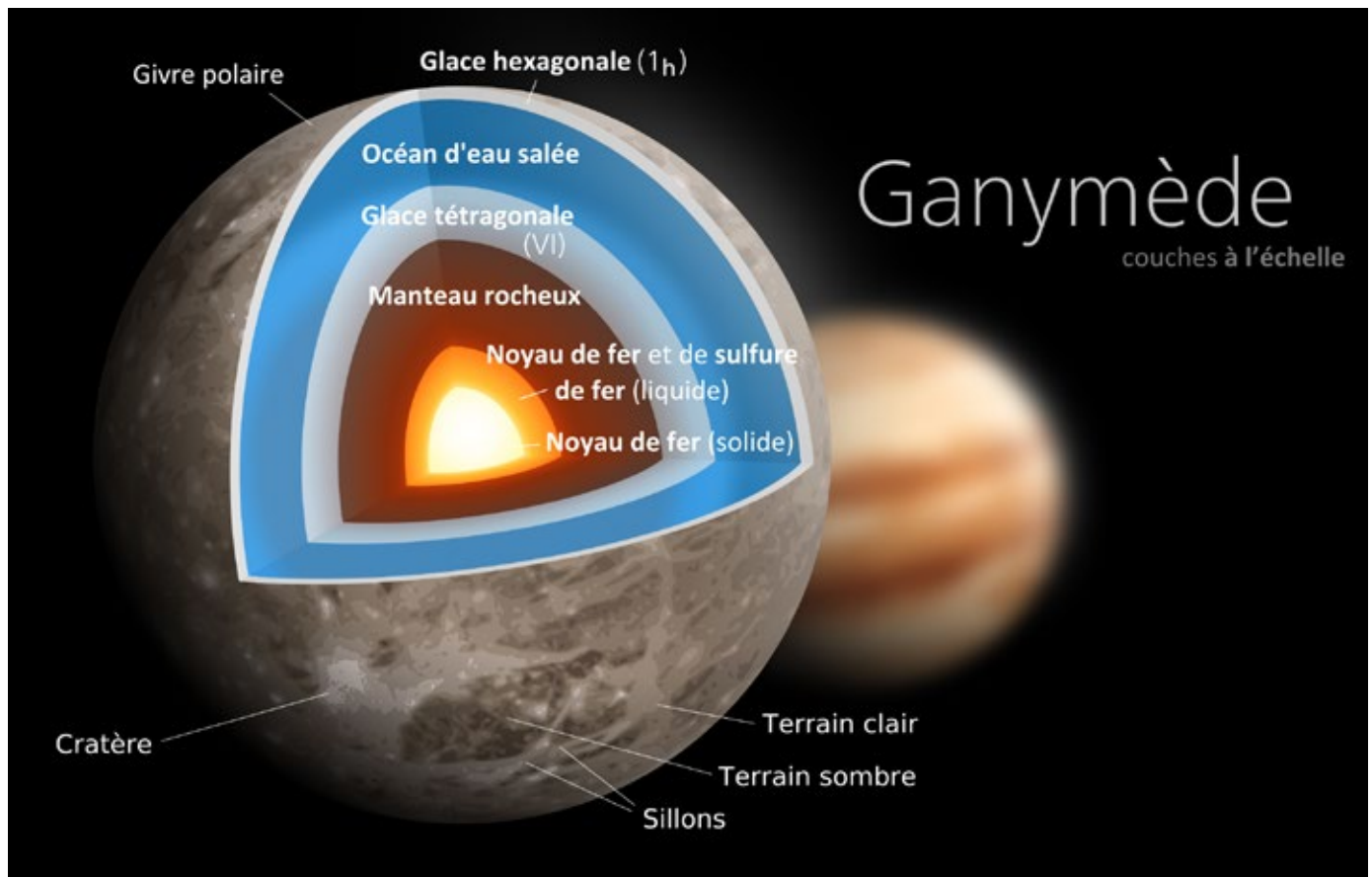


Fig.2. Illustration de la structure interne possible de Ganymède montrant un océan d'eau liquide entre deux couches de glace, au-dessus d'un noyau de fer liquide en partie, apte à générer le champ magnétique propre connu du satellite (image Kelvinsong, traduction Flappiefh).

Jupiter et Saturne. Certes il s'agit de potentiels habitats en profondeur et non en surface. Ces surfaces-là semblent en effet invivables car exposées depuis des lustres aux rayonnements et particules de haute énergie, entre autres. À une profondeur de 10 km dans la fosse des Mariannes dans l'océan Pacifique, quelques aventuriers n'ont-ils pas réussi l'exploit d'y observer quelques poissons... Il ne s'agit certes pas (encore) de réaliser cet exploit sous les

glaces des lunes Europe ou Encelade. Évidemment cet enjeu-là n'est pas le moteur unique de l'investissement fait pour aller jusque là-bas. Ces lunes d'eau glacée-là, nous fascinent depuis les survols des sondes Voyager il y a 50 ans. Des mondes pleins d'énergie, tant il en faut pour maintenir l'eau à l'état liquide alors qu'il ne fait pas plus de -180 °C ou -140 °C en plein soleil.

## Des océans souterrains

Les lunes Europe, Ganymède et Callisto ont des masses volumiques comprises entre 1800 et 3000 kg/m<sup>3</sup>, typiques d'un mélange de roche et de glace. Grâce à la mission NASA-Galileo, la morphologie de la surface d'Europe, en particulier ses zones chaotiques d'icebergs, ces fissures et la présence de sels détectée en leur sein, de possibles geysers détectés par le télescope spatial Hubble et la détection d'un champ magnétique local induit par le champ magnétique jovien dans une eau salée souterraine conductrice de courant (par la loi de Lenz), prouvent la présence d'un océan souterrain. Les questions en suspens sont de savoir quelle est l'épaisseur de la croûte glacée, les mécanismes de chauffage et de maintien de cet océan, la température en profondeur et l'état de la glace. Les modèles de structure interne estiment pour l'instant l'épaisseur de la croûte de glace à une quinzaine de kilomètres, un océan d'une centaine de kilomètres de profondeur qui reposerait sur un noyau rocheux. Si la mission JUICE effectuera deux survols d'Europe seulement, le satellite sera la cible unique de la mission Europa-Clipper de la NASA qui sera lancée en octobre 2024 et arrivera en avril 2030 pour entamer 45 survols de la lune à des altitudes comprises entre 25 et 2 700 km.

Pour Ganymède et Callisto, l'état des lieux pour l'instant est un peu différent. Si de l'eau liquide peut exister en sous-surface de Ganymède, elle ne serait pas en contact avec le noyau rocheux (figure 2). Callisto pourrait ne pas être différencié, c'est-à-dire être un mélange relativement homogène de glace et de roche. Ce sont les multiples

$$U(r) \sim \frac{GM_L}{r} (1 - K_1 \times J_2 + K_3 \times C_{22})$$

où  $G$  est la constante de la gravitation,  $M_L$  la masse de la lune,  $K_1$  et  $K_3$  sont calculables analytiquement étant données les coordonnées de la sonde. Les grandeurs  $J_2$  et  $C_{22}$  sont proportionnelles à ce nombre de Love  $k_2$  et peuvent être estimées à partir de l'accélération mesurée par la sonde en fonction de la distance  $r$  au satellite lors des survols. Une valeur de  $k_2$  peut en être déduite et comparée à des valeurs théoriques calculées à partir du profil de densité de la lune en fonction de la profondeur ainsi que des propriétés rhéologiques des différentes couches présentes. Ainsi le suivi de l'accélération de la sonde à partir du décalage Doppler de son faisceau radio de communication lors de multiples survols de la lune permet-il de contraindre sa structure interne.

*Le radar RIME pour l'exploration des lunes glacées* apportera certainement les mesures les plus innovantes

survol de Ganymède et Callisto qui vont permettre de préciser leur structure interne possible.

**L'instrument 3GM** (Gravity and Geophysics of Jupiter and the Galilean Moons) apportera de nouvelles mesures de haute précision sur le champ de gravité des lunes, grâce au suivi de la porteuse radio de la sonde lors des courtes approches et de l'effet Doppler qu'elle subira du fait des accélérations subies à ces endroits-là. Le potentiel gravitationnel d'une lune dépend de sa structure interne et de son inhomogénéité qui peuvent être contraintes à partir de l'accélération de la sonde mesurée en fonction de la distance au centre de la lune. Un modèle de structure interne qui prend en compte :

- la structure du noyau ;
- le degré de mélange entre roches et glace ;
- la quantité d'eau liquide ;
- l'épaisseur des différentes couches ;
- les échanges thermiques entre elles ;
- les sources de chaleur internes (radioactivité ; dissipation des effets de marée, apports énergétiques au moment de l'accrétion initiale ;
- l'état de la matière aux températures et pressions internes.

doit pouvoir reproduire la densité volumique globale de la lune ainsi qu'un coefficient noté  $k_2$ , nombre de Love, qui intervient dans l'expression du potentiel gravitationnel  $U(r)$  pour une lune déformée par la rotation ou les effets de marée ou bien encore inhomogène :

quant à l'exploration des lunes glacées, en particulier pour le sondage de leur sous-surface, la structure interne et l'épaisseur des croûtes potentielles de glace. À l'instar du radar MARSIS sur les dépôts de la calotte polaire Sud de Mars (figure 3), RIME a été construit pour sonder la sous-surface d'Europe, Callisto et Ganymède. La glace d'eau est en effet assez transparente aux ondes radio de basses fréquences  $n$ , aux alentours du MHz.

L'atténuation de l'onde radio est de l'ordre de 1 dB/km d'épaisseur à  $n = 1$  MHz lorsque la température de la glace est de 150 K. Cependant elle augmente avec la fréquence utilisée. Par ailleurs, afin de pouvoir à la fois mesurer la distance et la direction relative de la lune par rapport à la sonde au cours de la mesure radar, le signal radio doit être modulé en fréquence autour de la fréquence

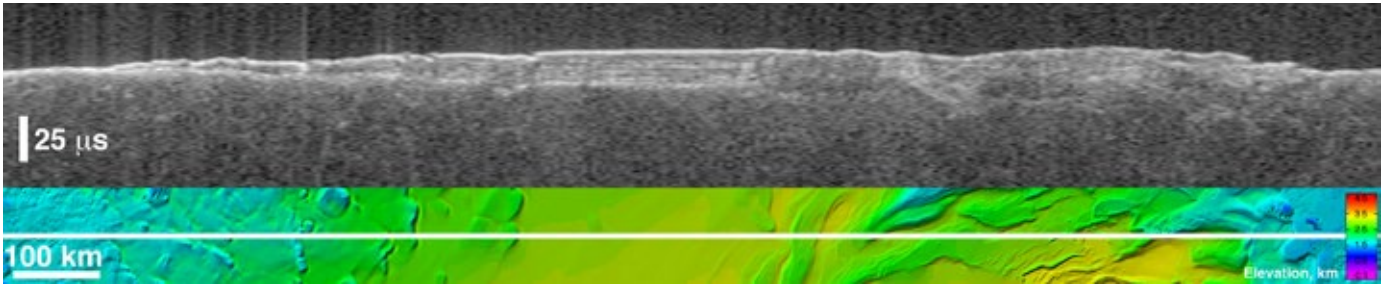


Fig.3. Image composée d'un radargramme du radar MARSIS embarqué sur la sonde Mars Express (haut) et d'une image de la calotte polaire Sud de Mars en fausses couleurs (bas), barrée d'une ligne blanche qui figure la trajectoire suivie par le faisceau du radar leur du survol de la sonde. Le radargramme constitue une image en profondeur de la surface à l'aplomb de cette ligne. L'échelle verticale est donnée ici en temps qui peut être convertie en distance connaissant les propriétés du milieu. On y distingue les différentes couches superposées renvoyant un écho de puissance variable. La ligne fait 1 500 km de long et les couches les plus profondes observées sont à 2,7 km de profondeur (Crédits NASA/JPL/ASI/ESA/Univ. of Rome/MOLA Science Team).

centrale  $n_0$ , qui sera de 9 MHz pour le radar RIME. Le signal envoyé est riche en fréquences, c'est un « chirp » dont la largeur de bande  $B$  est de l'ordre du MHz. Si la traduction littérale correspond à un « gazouillis » (à l'instar de twitt !), ce terme signifie en fait « Compressed High Resolution Pulse radar » et constitue aussi une technique astucieuse pour utiliser des fréquences aptes à pénétrer la glace en profondeur et en même temps à pouvoir séparer facilement dans le signal de retour les échos des différentes couches éventuellement présentes en sous-surface.

Le théorème de Shannon règle cependant le temps minimal  $t_E$  qui doit séparer deux signaux « chirps », la contrainte étant  $t_E \geq 1/2B$ . La vitesse de propagation de

l'onde radar dans les couches de glace est  $V_P = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$  où  $c$

est la vitesse de la lumière dans le vide et  $\epsilon_r$  la permittivité relative de la glace d'eau. Entre deux « chirps » envoyés, séparés du temps  $t_E$ , l'onde parcourt une distance

$$h = V_P t_E = \frac{c}{2B\sqrt{\epsilon_r}},$$

distance minimale d'échantillonnage spatial du radar. La résolution spatiale d'un radar qui observe donc au nadir (« à l'aplomb » de la cible) est d'autant meilleure (petite) que sa bande passante  $B$  est grande. Cette bande passante ne peut cependant pas être plus grande que la fréquence de la porteuse  $n_0$  qui, elle-même, ne peut pas être trop importante pour que le radar reste « pénétrant ». Il faut donc trouver un compromis entre une atténuation

raisonnable et une largeur de bande  $B$  la plus grande possible. Pour des fréquences de l'ordre du MHz, la permittivité relative de la glace  $\epsilon_r$  est de l'ordre de 3 à 4. Le radar RIME possède deux modes d'observation, basse et haute résolution pour deux largeurs de bande  $B$  de 1 et 3 MHz, qui porteront donc sa résolution spatiale verticale entre 150 et 50 m respectivement. Si des couches d'au moins cette épaisseur, de propriétés physiques et chimiques différentes structurent la sous-surface, elles renverront chacune des échos d'amplitude et de temps de retour différents. Ces échos seront figurés dans un radargramme, à l'instar de ce qui a été fait pour le radar Marsis (figure 3) qui est un radar pénétrant de performances comparables. Espérons que le déploiement, qui rencontre à cette heure quelques difficultés, pourra être mené à son terme.

La route de JUICE est encore longue mais elle le sera tout juste assez pour la génération d'ingénieurs et de chercheurs désormais en charge de préparer les observations et d'assurer le succès de son exploitation scientifique. Un certain nombre d'entre eux ont appris à naviguer ou se sont aguerris sur le vaisseau amiral CASSINI. Gageons que cela sera une grande réussite. Bon vent. ■