

Rosetta et ExoMars sur les traces des origines moléculaires de la vie

Résumé

La plus récente mission spatiale cométaire, *Rosetta*, était équipée d'instruments capables de caractériser les molécules organiques de la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko avec une précision sans précédent. Les spectromètres de masse ont révélé une grande diversité de molécules organiques et indiquent que 67P contient à la fois des entités moléculaires primitives, probablement issues du nuage moléculaire parent du Soleil, et d'autres, transformées dans l'environnement du disque protoplanétaire lors de sa formation. La présence de glycine et d'autres molécules organiques à intérêt « prébiotique » renforce l'idée selon laquelle comètes et astéroïdes auraient pu apporter les briques moléculaires de la vie sur Terre. La mission *ExoMars*, quant à elle, va analyser la surface martienne pour chercher de potentielles traces de vie passée (ou présente) sur la planète rouge, à travers les rapports énantiomériques des principales molécules prébiotiques chirales, essentiellement des acides aminés et/ou des sucres. Cet article donne une vue d'ensemble de la chimie interstellaire, des grands nuages sombres aux petits corps de notre système solaire qui sont les témoins directs de la chimie de ces origines. Le but est de retracer les possibles origines moléculaires de la vie sur Terre, dans un cadre défini par l'astrochimie et l'astrophysique. Un paragraphe est consacré au déroulement de la mission *Rosetta*, ses résultats les plus importants et leurs implications pour l'apport extraterrestre de molécules organiques sur la Terre primitive. Enfin, un intérêt particulier est porté au chromatographe en phase gazeuse de l'instrument MOMA à bord de l'astromobile *Rosalind Franklin* du programme *ExoMars*, qui devrait arriver à destination début 2023.

Mots-clés

Rosetta, *ExoMars*, nuage moléculaire, comète, chiralité, origine de la vie.

Abstract

Rosetta and ExoMars: looking for the molecular origins of life

The most recent cometary space mission, *Rosetta*, carried instruments designed to characterize the organic molecules in comet 67P/Churyumov-Gerasimenko with unprecedented detail. The mass spectrometers revealed a great variety of molecules and indicate that 67P contains both primitive organic entities, probably from the parent molecular cloud of the Sun, and others, transformed in the environment of the protoplanetary disc during its formation. The presence of the glycine and other organic molecules of "prebiotic" interest reinforces the idea that comets and asteroids brought the building blocks of life to Earth. The *ExoMars* mission, on the other hand, will analyze the Martian surface to look for potential traces of past (or present) life on the red planet, through the enantiomeric ratios of the main chiral prebiotic molecules, mainly amino acids and/or sugars. This article gives an overview of interstellar chemistry, from giant dark clouds to the small bodies of our solar system that are the direct witnesses of the chemistry of its origins. The goal is to trace back the molecular origins of life on Earth, within a framework defined by astrochemistry and astrophysics. A section is dedicated to details about the *Rosetta* mission, its most important results, and their implications for the extraterrestrial contribution of organic molecules to the early Earth. Finally, a particular interest is given to the gas chromatograph of the MOMA instrument on board of the *Rosalind Franklin* rover of the *ExoMars* program, who should arrive at destination early 2023.

Keywords

Rosetta, *ExoMars*, molecular cloud, comet, chirality, origin of life.

La chimie interstellaire, ou astrochimie, est un domaine scientifique relativement nouveau, à l'intersection entre l'astrophysique et la chimie. Elle est l'étude des abondances atomiques et moléculaires et des réactions qui en découlent dans l'Univers, en particulier dans notre Galaxie où les nuages moléculaires proches sont accessibles à l'observation de plus en plus précise et exhaustive, ce qui permet l'étude de leur évolution chimique. En règle générale, la chimie du gaz interstellaire dans ces objets concerne principalement une chimie à deux corps, stimulée, mais aussi limitée, par de nombreuses interactions avec toutes sortes de radiations (rayonnements X, UV et rayonnements cosmiques divers). L'identification des spectres rotationnels (fréquences radio), vibrationnels (infrarouge) et électroniques (visible et UV) a montré la présence d'une grande variété de molécules polyatomiques, d'ions et de radicaux dans le milieu interstellaire, en phase gaz mais aussi dans le solide, généralement sous forme de glaces sales que l'on peut considérer être des solides de van der Waals dans ces environnements très froids [1].

La matière interstellaire est constituée d'environ 99 % de gaz, principalement d'hydrogène et d'hélium primordiaux, et 1 % de particules très fines (taille inférieure à 1 micron) appelées grains de poussière interstellaire, composés principalement de silicates anhydres ou amorphes, d'oxydes métalliques, mais aussi de carbone quasiment pur. Ces grains de poussière sont les vestiges de la fin de l'évolution stellaire qui se caractérise par une importante perte de masse des étoiles et la formation subséquente de très petits grains. Notons aussi que dans le milieu interstellaire, les éléments à l'origine des molécules observées obéissent à la règle des abondances cosmiques, liée à la nucléosynthèse et à l'évolution stellaire. Il est important alors de remarquer que dans ces abondances, on note la présence des éléments volatils H, O, C, N, S (et dans une moindre mesure P) dans une proportion de 1 pour H et de 10^{-3} pour la somme des autres, ce qui entraîne automatiquement la prédominance d'une riche chimie organique dans ce milieu et rappelle, au passage, que les éléments constitutifs de la vie ne sont autres que les plus abondants : H, C, O, N, S

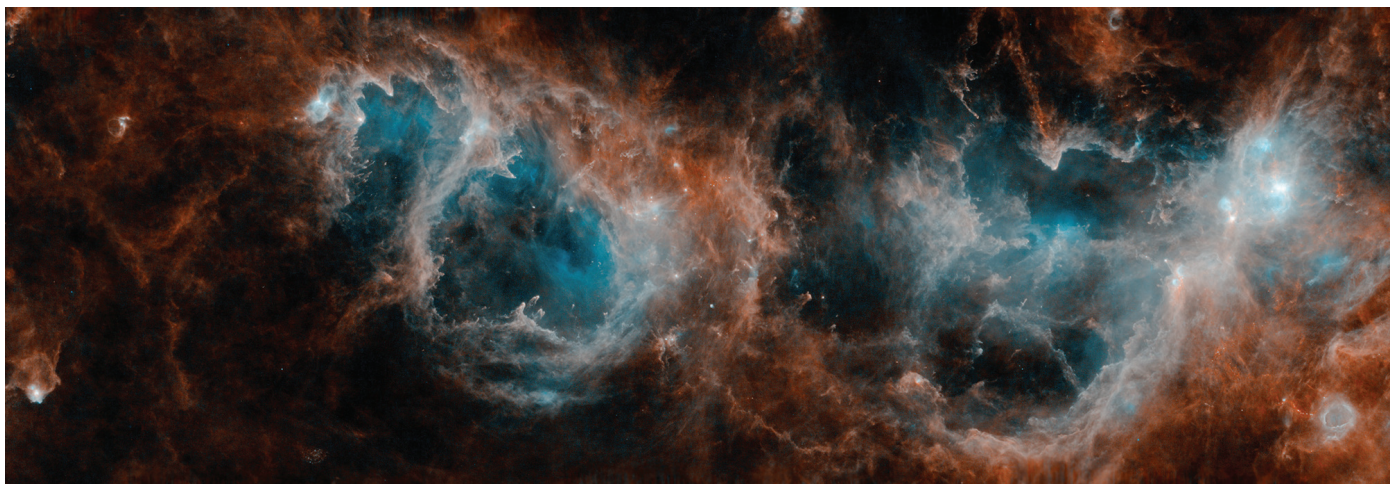


Figure 1 - Vue d'étoiles naissantes et de nuages moléculaires par le télescope spatial infrarouge Herschel. Les bulles ont été sculptées par les vents et les explosions de supernovæ d'étoiles massives. © ESA/Herschel/NASA/JPL-Caltech, CC BY-SA 3.0 IGO.

et P [2]. Les grains interstellaires réfractaires⁽¹⁾ (silicates) sont responsables de l'extinction interstellaire, ce qui entraîne la présence de nuages sombres où sont observées les molécules, protégées du rayonnement. En s'effondrant, ces nuages vont former de nouvelles étoiles, des disques protoplanétaires, et finalement des planètes et toutes sortes de débris d'accrétion : les petits corps du système solaire. Ces phénomènes peuvent être considérés comme « universels » et surviennent lors de la formation stellaire dans les nuages moléculaires, même s'il est vrai que, dans d'autres systèmes exoplanétaires, la présence de tels petits corps n'est pas encore observée.

Les observations à distance par télescopes (spatiaux ou au sol) et les mesures *in situ* faites par les précédentes missions spatiales ont fortement amélioré notre connaissance sur la structure et la composition du milieu interstellaire d'une part, et des comètes et astéroïdes d'autre part. La communauté scientifique a récemment porté un grand intérêt à ces deux derniers types d'objets car il est devenu de plus en plus clair qu'ils ont eu, d'une façon ou d'une autre, un rôle à jouer dans l'émergence de la vie sur Terre par l'apport de matériaux extraterrestres, organiques en particulier, mais aussi incluant l'eau liquide, abondante à la surface de notre planète. En complément de ces observations, la possibilité de simuler en laboratoire l'évolution des glaces interstellaires, universellement observées dans les nuages moléculaires et dans les comètes, a permis de montrer expérimentalement la progressive complexification de ces glaces vers la matière organique. En effet, l'irradiation UV de glaces cométaires artificielles en laboratoire, pour recréer l'environnement interplanétaire, a montré que des molécules organiques complexes peuvent s'y former [3-4]. Des acides aminés [5], et plus récemment du ribose et autres molécules de sucres apparentées [6], ont également été trouvés dans ces analogues de glaces interstellaires irradiées par UV. Cela renforce l'hypothèse que les comètes aient pu aider à acheminer les briques moléculaires élémentaires nécessaires à la vie sur Terre pendant ou juste à la fin du Grand bombardement tardif [7].

Nuages moléculaires : naissance de la complexité chimique

Le milieu interstellaire est loin d'être homogène et vide comme nous avons pu le penser. En effet, au cours des quarante dernières années, les astronomes ont découvert un

grand nombre de molécules en phase gaz dans l'espace. Le milieu interstellaire est composé principalement d'hydrogène et d'hélium, avec des traces de carbone, azote, oxygène et autres éléments lourds [8]. Les grandes structures les plus denses du milieu interstellaire sont appelées nuages moléculaires ; elles sont les berceaux d'étoiles en formation (figure 1). Ces nuages froids et denses tiennent leur nom du fait que l'hydrogène y est trouvé sous sa forme moléculaire (H₂) en leur sein, avec une abondance H/H₂ d'environ 10⁻⁴ [9]. Leur densité varie entre 10² et 10⁶ particules/cm³, ce qui reste quinze ordres de grandeur moins dense que sur Terre au niveau de la mer (10¹⁹ particules/cm³).

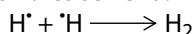
Nous pensons que notre système solaire, ainsi que tout autre système stellaire, se sont formés à partir de l'effondrement gravitationnel d'une partie particulièrement dense d'un de ces nuages. Notre nuage originel avait une densité d'environ 10⁶ particules/cm³ et une température de 10-20 K (ou environ - 260 °C). Dans ces grands nuages sombres, l'extinction dans le visible et l'UV est importante, entraînant ces températures très faibles. Les photons sont absorbés par les couches externes du nuage et son cœur en devient sombre et extrêmement froid (seulement quelques degrés au-dessus du zéro absolu).

Dans ces conditions de densité et de température, il a longtemps été admis que les réactions chimiques étaient extrêmement limitées et rares. Cependant, les observations ont depuis permis d'identifier plus de 200 molécules, essentiellement organiques, dans ces structures. Nous savons maintenant que même si les rayonnements UV et visibles sont absorbés par la région extérieure du nuage, les très énergétiques rayons cosmiques peuvent eux y pénétrer beaucoup plus facilement. Ces rayons cosmiques sont principalement des protons de très haute énergie (ayant une vitesse relativiste) qui circulent dans le milieu interstellaire ; leurs sources sont les étoiles mais aussi les supernovæ ou encore les trous noirs actifs. Ils entraînent l'ionisation d'atomes et molécules et apportent l'énergie nécessaire pour démarrer une chaîne complexe de réactions chimiques.

À très basse température et à densité suffisamment élevée, les grains de poussière submicroniques sont l'endroit parfait pour l'adsorption des espèces en phase gaz, due aux interactions de van der Waals, interactions polaires ou liaisons ioniques. Ce régime de température permet aux atomes et molécules de venir se condenser et s'accréter sur ces grains pour former un

manteau de glace interstellaire. Ce manteau agit alors comme un réservoir de molécules où la probabilité que des particules interagissent sont beaucoup plus élevées qu'en phase gaz. L'accrétion d'une molécule (H₂) et d'un atome (H) d'hydrogène sur un simple grain de 0,1 µm arrive environ toutes les dix secondes et une fois par jour respectivement. L'hydrogène peut ensuite réagir par diffusion avec un autre réactif sur la surface du grain de poussière, formant une nouvelle espèce avant le prochain impact.

Les couches de glaces ainsi créées avec des molécules déposées et transformées peuvent atteindre une épaisseur de 0,1 µm, soit autant que la taille du noyau du grain et donc dix fois plus que son volume, ce qui est en outre comparable avec les abondances cosmiques relatives des fameux CHNOPS dans la glace et les éléments Si, Mg, Al, Fe (et autres) des noyaux réfractaires. Cependant, à des températures aussi basses (10-20 K), des réactions exothermiques ayant des énergies d'activation très faibles ont majoritairement lieu. Par exemple, le couplage de deux espèces radicalaires a la particularité d'être sans barrière énergétique, ce qui signifie qu'il peut se produire efficacement même dans des conditions extrêmes, tant que les radicaux réactifs sont proches les uns des autres. En d'autres termes, l'énergie d'activation pour une réaction radicalaire peut être considérée comme étant nulle, car aucune excitation interne des réactifs n'est requise pour que les deux électrons libres se lient :

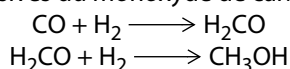


Notons que cette réaction ne peut se faire qu'en présence d'une surface qui permet d'évacuer sous forme de chaleur l'énergie considérable de la formation de la molécule (4,5 eV). Puisque H₂ est la première molécule à partir de laquelle toutes les autres molécules de la phase gaz se forment, on comprend alors l'importance du rôle des grains interstellaires dans la chimie des nuages denses et, au-delà, dans la chimie des disques protoplanétaires.

L'hydrogène est de loin l'élément le plus abondant ; en omettant l'hélium qui est un élément à couche fermée et ne participe pas aux réactions moléculaires, les éléments lourds les plus présents (C, N et O) ne sont, au total, qu'au nombre de 1 pour 1 000 atomes d'hydrogène [10]. En conséquence, on s'attend à trouver principalement des espèces saturées dans ces glaces interstellaires, telles que du méthane (CH₄), de l'ammoniac (NH₃), ou encore de l'eau (H₂O).

La très grande abondance de l'hydrogène moléculaire dans ces nuages est due à la poussière interstellaire, servant de catalyseur pour la réaction entre deux atomes d'hydrogène (équation au-dessus). La seconde molécule la plus abondante est le monoxyde de carbone (CO), qui est la seule autre molécule diatomique extrêmement stable utilisant les éléments les plus présents dans ces nuages et qui est formée en phase gaz [11]. La grande partie des molécules plus complexes se forme ensuite par hydrogénation, qui est la réaction d'un composé avec une molécule de dihydrogène. Ces réactions se produisent principalement sur la surface des grains de poussière, car une catalyse est nécessaire pour amener à la rupture préalable de la très forte liaison H-H.

C'est ainsi que l'une des molécules les plus présentes dans la glace interstellaire est le méthanol (CH₃OH), produit d'hydrogénations successives du monoxyde de carbone :

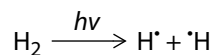


Cela explique également l'abondance du formaldéhyde, qui est le produit de la première hydrogénation de CO.

Les rayons cosmiques peuvent avoir des énergies très différentes, dépendant principalement de leur vitesse. Si les plus énergétiques ionisent facilement atomes et molécules, d'autres vont uniquement les exciter.

Il se trouve que le principal apport de photons UV dans ces nuages se fait via l'excitation électronique par les rayons cosmiques moins énergétiques des molécules de dihydrogène, qui vont ensuite émettre un photon UV en se désexcitant. Ces photons vont être absorbés par d'autres molécules, les excitant à leur tour.

Même si les rayonnements UV sont trop faibles pour ioniser des molécules, ils sont à des fréquences suffisantes pour amener les électrons des liaisons moléculaires vers des niveaux d'énergie supérieure (orbitales moléculaires non liantes). Ceci fragilise la liaison en augmentant la distance entre les deux atomes et peut mener à sa rupture, créant deux nouveaux radicaux :



Ceci est appelé une photolyse, qui signifie « brisé par la lumière ».

Les radicaux produits peuvent ensuite se recombiner avec d'autres éléments comme vu précédemment. Une recombinaison radicalaire étant exothermique, l'énergie rejetée par ces réactions peut ensuite engendrer d'autres, créant une sorte de réaction en chaîne. À des doses énergétiques et des épaisseurs de glace suffisamment élevées, un résidu polymère réfractaire complexe de molécules organiques se forme. Notons aussi que l'évolution vers la complexité moléculaire dans les glaces est favorisée par cette chimie de l'état solide qui, contrairement à ce qu'il se passe dans le gaz dilué, permet de protéger et finalement de concentrer les molécules formées qui vont alors constituer ces polymères et toute cette complexité organique.

C'est ainsi que grâce à leurs spectres d'émissions rotationnels en radiofréquences, nous avons pu observer des molécules telles que l'acide acétique CH₃COOH, l'acétone (CH₃)₂CO, et même un sucre : le dihydroxyacétone (CH₂OH)₂CO [12]. Il est remarquable que dans les conditions physiques extrêmes qui règnent dans les nuages moléculaires, des molécules organiques aussi complexes aient pu se former.

Les comètes comme réservoirs de molécules organiques

Formation

Le noyau d'une comète est un agrégat poreux de particules de poussières entourées de glaces et de matériel réfractaire. Très peu dense, il a un rayon de plusieurs kilomètres et est composé de gaz gelés tels que H₂O, CO, CO₂, HCN, NH₃ et de grains interstellaires (*figure 2*). Les comètes se forment par agrégation de ces grains de poussières glacés lors de l'effondrement gravitationnel du nuage originel, dans les régions éloignées et plus froides de la nouvelle protoétoile. Dans un environnement toujours opaque, l'intérieur de ces agrégats change très peu de la composition du nuage moléculaire d'origine, et c'est la raison pour laquelle les comètes sont considérées comme les corps célestes les plus « purs » du système solaire.

Après l'effondrement complet du nuage, l'étoile et les planètes nouvellement formées ont fini d'accréter le gaz ambiant, laissant le milieu interplanétaire transparent au rayonnement.

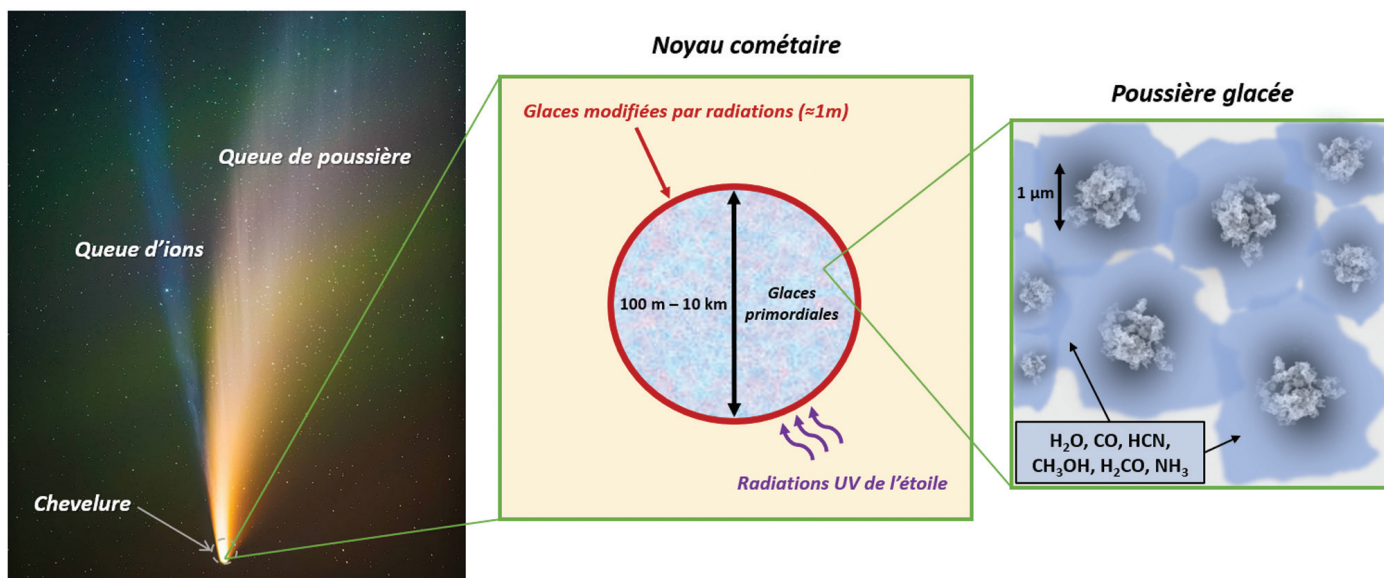


Figure 2 - Image de la comète C/2020 F3 (NEOWISE), annotée pour mettre en évidence les différentes parties d'une comète active. © 2020 Matt Dieterich Photographie (www.mattdieterich.com).

Le nouvel afflux d'UV venant de l'étoile ou des étoiles environnantes induit des réactions photochimiques dans les couches superficielles des comètes. Grâce à ce nouvel apport d'énergie, une chimie complexe se produit à des vitesses beaucoup plus élevées qu'auparavant [13].

Les rayons cosmiques, ainsi que les radiations interstellaires et solaires (surtout dans le cas d'un passage proche du Soleil), vont modifier la composition de la surface des comètes, mais leur noyau devrait préserver les informations liées à leurs origines. Étant donné que même les rayons cosmiques ne peuvent pénétrer au-delà des couches extérieures (jusqu'à environ 1 mètre de profondeur), la grande majorité du volume d'une comète n'a pas subi de processus thermique important. À l'intérieur de la comète, la seule source de radiation est la désintégration de radionucléides présents dans les grains ou les glaces ; ce phénomène est pour l'instant supposé négligeable pour ce qui est des comètes. Ainsi, la majorité des molécules organiques d'une comète auraient été produites avant sa formation, pendant l'exposition des grains glacés à l'intérieur du dense nuage interstellaire, puis dans et en surface du disque protoplanétaire encore opaque.

Voyage

L'environnement présent sur la Terre primitive et celui de la formation des comètes et astéroïdes étant très différents, la composition chimique en résultant l'est également.

Le consensus scientifique est qu'il manquait à la chimie prébiotique plusieurs précurseurs nécessaires à l'apparition de la vie sur Terre il y a 4 milliards d'années, en particulier les sucres.

Les astéroïdes et les comètes sont des candidats parfaits pour apporter ces composés absents durant cette période, à savoir celle du Grand bombardement tardif. Aujourd'hui notre principale protection face à ces corps célestes grâce à son attraction gravitationnelle immense, Jupiter a été lors de sa dernière migration la cause de gigantesques pluies de météorites qui se sont abattues sur Terre, en déviant un nombre conséquent d'astéroïdes et de comètes en direction du système solaire interne. Cette théorie est connue sous le nom d'apport exogène de matière organique.

Lorsque le noyau cométaire s'approche du Soleil, sa surface se réchauffe, sublimant les molécules les plus volatiles et créant

la chevelure de la comète, de forme sphérique. Durant ce processus de sublimation, une partie du matériau réfractaire est également emporté, faisant de la chevelure un mélange de gaz et de poussières [14]. La chevelure d'une comète peut atteindre un diamètre de 80 000 km, soit presque douze fois celui de Mars. Lorsqu'une comète s'approche du Soleil et que sa chevelure apparaît, on dit qu'elle est active.

La queue de la comète, quant à elle, est le résultat de la pression de radiation venant du Soleil et des vents solaires ; c'est principalement cela que nous pouvons observer depuis la Terre, et qui donne aux comètes leurs formes très singulières (figure 2). Cette queue peut s'étendre jusqu'à plusieurs millions de kilomètres, soit plus que la taille du Soleil !

Les molécules de la chevelure sont soumises à des irradiations importantes d'UV, surtout proches du Soleil, et la plupart des molécules organiques « parentes » se photodissocient en des molécules « filles ». Le petit noyau cométaire étant caché par la grande chevelure depuis la Terre, il est difficile d'en observer sa composition directement.

Glaces cométaires artificielles

Compte tenu de l'extrême complexité de la chimie des glaces à l'état solide que l'on peut retrouver dans les comètes, des simulations de comètes « artificielles » sont réalisées en laboratoire, à l'échelle microscopique pour l'essentiel. Il s'agit en effet de reproduire les principaux processus menant des glaces à la formation de matière organique : les molécules qui composent majoritairement les nuages interstellaires (telles que l'eau, le monoxyde de carbone, l'ammoniac ou le méthanol) sont nébulisées sous vide poussé à des températures très basses, condensées sur une fenêtre inerte et simultanément irradiées par différentes sources énergétiques pour simuler le milieu interstellaire [15]. Ces analogues de glaces sont ensuite analysés par des méthodes de chromatographie en phase gazeuse ou liquide à haute performance, ce qui permet l'identification et la quantification des molécules formées dans cet environnement [16].

Rosetta : rendez-vous avec une comète

Rosetta est une mission spatiale de l'Agence spatiale européenne (ESA) lancée en 2004, dont l'objectif était de

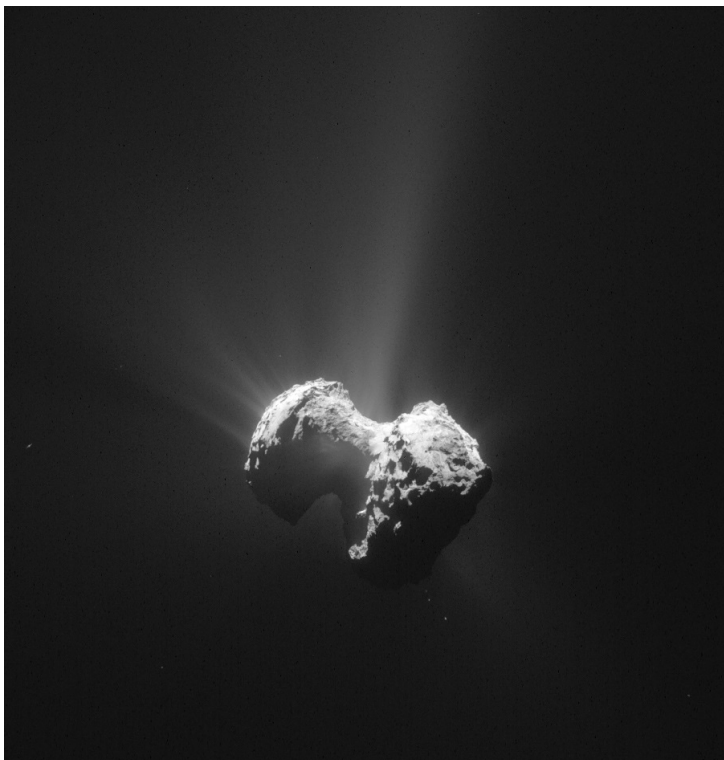


Figure 3 - Image de la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko prise par la caméra de navigation de *Rosetta* le 28 avril 2015, à une distance de 171 km du noyau de la comète. © ESA/Rosetta/NAVCAM, CC BY-SA IGO 3.0.

recueillir des données *in situ* sur la composition du noyau de la comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko (67P ou « Tchouri »). Son objectif scientifique premier était l'étude de l'origine des comètes, des relations existantes entre les milieux cométaire et interstellaire et des implications de celles-ci sur l'origine du système solaire. Elle a été la première sonde spatiale à orbiter autour d'un noyau cométaire et à examiner de si près l'activité d'une comète gelée pendant son réchauffement par le Soleil. La mission a ensuite réalisé le premier atterrissage contrôlé sur une comète avec son unité d'atterrissage *Philae*.

67P/Tchouri

67P est une comète périodique de notre système solaire, originaire de la ceinture de Kuiper, avec une période orbitale actuellement de 6,45 ans, une période de rotation d'environ 12,4 heures et une vitesse maximale de 135 000 km/h (38 km/s) [17]. Elle mesure environ 4,3 par 4,1 km dans ses dimensions les plus longues et larges, car son noyau est bilobé ; elle est constituée de deux lobes connectés par un cou plus fin (figure 3).

Son point le plus proche du Soleil (périhélie) est aujourd'hui à 1,28 UA⁽²⁾, mais son orbite a significativement évolué au cours du temps. Tchouri n'est devenue active que récemment, après deux approches de Jupiter en 1840 et 1959 qui ont causé l'ellipticité actuelle de son orbite et ainsi la régression de son périhélie, jusqu'à atteindre des températures assez élevées pour qu'une chevelure se forme et soit visible lors de son entrée dans le système solaire interne.

En utilisant la lumière infrarouge émise par Tchouri, sa température de surface moyenne a été déterminée à 200 K (-73 °C) lorsqu'elle était encore à plus de 3 UA du Soleil, où le flux de lumière est dix fois moins élevé que sur Terre. C'est presque 30 K plus chaud que les prédictions pour une comète entièrement recouverte de glace à cette distance du Soleil. En réalité,

tout comme la comète 1P/Halley, 67P possède une surface extrêmement sombre, avec un albédo⁽³⁾ moyen de seulement 6 %. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, les noyaux cométaires sont en général les corps les plus sombres de notre système solaire, ce qui traduit par ailleurs la présence de carbone à l'état réduit à la surface de ces corps.

Résumé de la mission

La mission *Rosetta* a été lancée le 3 mars 2004 et a atteint la comète Tchouri le 6 août 2014. L'orbiteur a pu analyser continuellement pendant plusieurs mois la composition de la chevelure de 67P, notamment grâce à ROSINA [18], un double spectromètre de masse. Les résultats les plus importants concernant l'origine de la vie sur Terre ont été la détection de phosphore et de l'acide aminé glycine (C₂H₅NO₂) dans la chevelure par ROSINA [19], ainsi que la mesure du ratio isotopique deutérium/hydrogène de la comète en comparant la quantité d'eau semi-lourde (HDO) avec celle de l'eau ordinaire (H₂O) [20]. Le ratio D/H ainsi mesuré est plus de trois fois supérieur à celui des océans terrestres, ce qui indique que l'eau terrestre n'a pas été apportée par des comètes comme Tchouri, ou du moins qu'elles n'ont pas participé à plus de 10 % de son contenu [21]. Cette valeur du ratio D/H est en accord avec plusieurs autres mesures faites à distance sur d'autres comètes, qui ont toutes des valeurs nettement supérieures à la valeur terrestre.

En effet, une hypothèse dominante concernant les prémices de la Terre il y a 4,6 milliards d'années stipule que toute son eau se serait évaporée à cause des très hautes températures qui y régnaient à cette époque. Il aurait donc fallu des apports externes d'eau, après le refroidissement de la planète, pour expliquer la quantité d'eau sur Terre aujourd'hui. Cela renforce la théorie selon laquelle ce seraient les astéroïdes, dont le rapport D/H est très proche de celui de la Terre, qui seraient à l'origine de l'eau terrestre, bien que leur teneur en eau soit moins élevée que pour les comètes. Il faut d'ailleurs noter que si l'abondance globale de l'eau sur Terre est très faible comparée à sa masse (de l'ordre de 0,2 à 0,6 %), l'eau liquide domine à la surface de la planète, représentant une couche moyenne de 3 km d'épaisseur, ce qui est, pour l'instant, tout à fait particulier à la Terre en tant que planète tellurique et en faveur de l'hypothèse d'un apport d'eau extraterrestre [22].

La détection de l'acide aminé le plus simple, la glycine, a confirmé qu'une chimie complexe se produit sur les grains de poussières dans la nébuleuse protosolaire. Notons tout de même que, même avec la sophistication d'une sonde spatiale telle que *Rosetta*, les analyses moléculaires *in situ* restent difficiles et loin d'être exhaustives : la présence de plus de 80 acides aminés dans une météorite primitive telle que Murchison en témoigne.

L'unité d'atterrissage *Philae* s'est détachée de *Rosetta* le 12 novembre 2014 à 08:35 UTC et a approché Tchouri à une vitesse relative de 1 m/s. Sa descente a duré 7 h, mais à cause de plusieurs problèmes techniques, elle a rebondi sur la surface du noyau à deux reprises, le plus long rebond ayant duré 2 h !

En effet, au moment du contact avec la surface, deux harpons devaient être déployés, ainsi qu'un petit propulseur conçu pour maintenir la sonde au sol, car la vitesse de libération⁽⁴⁾ à la surface de Tchouri n'est que de 50 cm/s. Malheureusement, il a été confirmé que les deux instruments ont mal fonctionné, causant les multiples rebonds. *Philae* s'est finalement arrêtée dans l'ombre d'une falaise et dans une position suboptimale

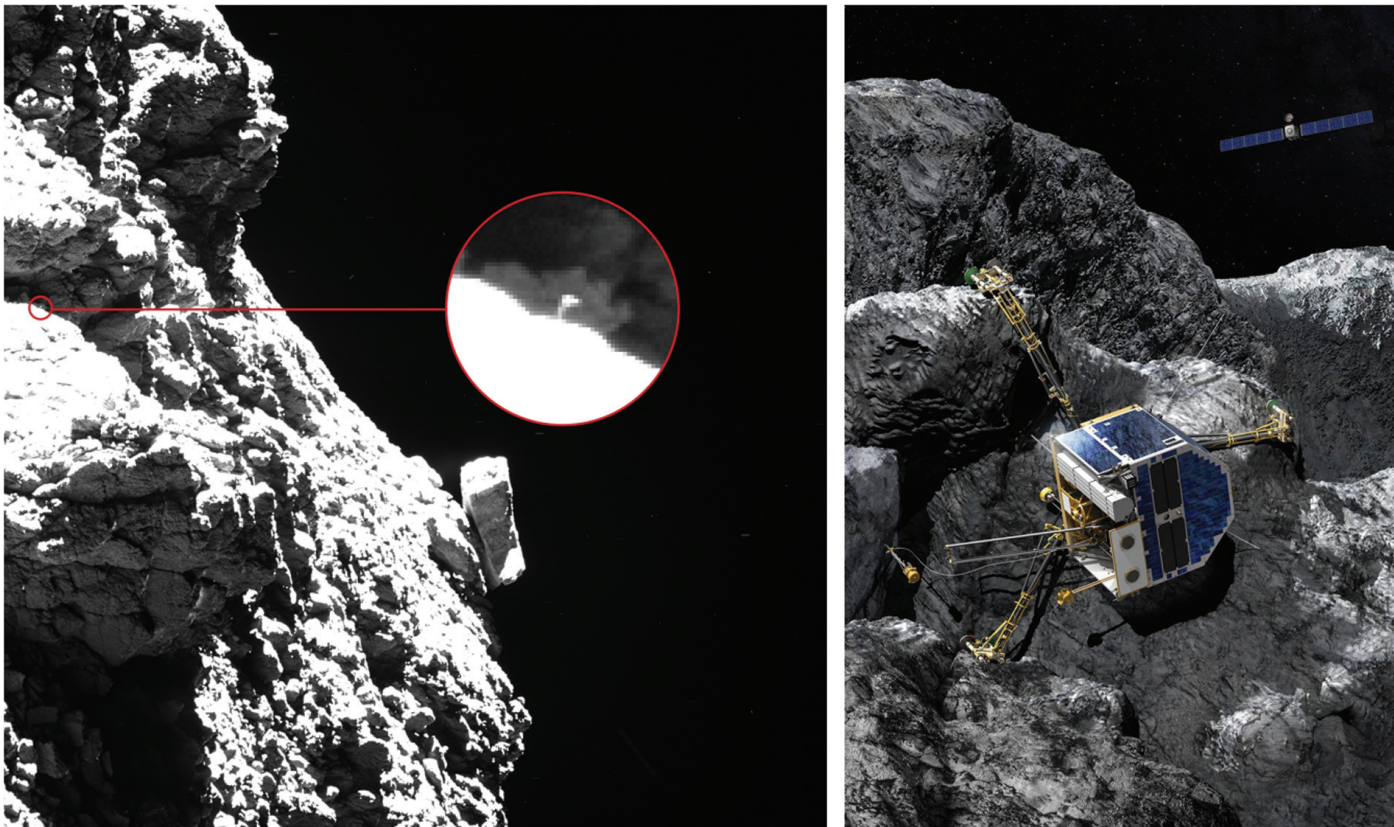


Figure 4 - (Gauche) « *Philae* nous fait un signe » : l'une des trois pattes de *Philae* se dresse derrière un rocher, après que le robot ait rebondi à deux reprises sur la surface de la comète. © ESA/Rosetta/MPS, CC BY-SA 4.0. (Droite) Image d'artiste montrant *Philae* sur 67P (position estimée d'après les données reçues) avec *Rosetta* orbitant au loin (dans la réalité, *Rosetta* ne serait pas aussi proche). © CNES/A. Torres – IAS/JP. Bibring – Illustration D. Ducros, DR.

par rapport au sol (figure 4). Sans la possibilité de recharger sa batterie à l'aide de ses panneaux solaires, seules les expériences primordiales ont été exécutées pendant les deux jours avant que *Philae* ne s'éteigne. L'une d'elles était le forage du noyau cométaire pour distribuer $< 1 \text{ cm}^3$ de matériau à l'instrument d'analyse COSAC. Ce dernier est un chromatographe en phase gazeuse couplé à un spectromètre de masse par temps de vol, permettant de respectivement séparer puis identifier les différents composés chimiques [23]. Cependant, à cause de la position de la sonde, la foreuse n'a pu perforer la surface correctement et le chromatogramme résultant n'a permis la détection d'aucune molécule. L'instrument a tout de même pu détecter une grande variété de composés réfractaires en utilisant uniquement son spectromètre de masse en plein vol, après avoir excavé la surface en rebondissant [24].

Le chromatographe était équipé d'une colonne chirale, c'est-à-dire que dans de bonnes conditions, les énantiomères d'une molécule chirale auraient pu être séparés. Ceci est très important pour les théories sur l'origine de la vie sur Terre, car les molécules du vivant sont asymétriques.

ExoMars : l'asymétrie moléculaire comme biomarqueur

Dans les processus biologiques, un seul des deux énantiomères est utilisé. Les acides aminés constituant les protéines sont tous de configuration L. À l'inverse, les deux sucres à la base de l'ADN et de l'ARN – le 2-désoxyribose et le ribose – ne s'y retrouvent qu'en configuration D [15].

Si nous arrivons à retracer cette asymétrie aux premiers processus photochimiques de formation dans les nuages moléculaires, cela serait un argument de poids pour l'ensemencement

de la Terre primitive en matière organique par les petits corps du système solaire. Plusieurs observations de lumière circulairement polarisée (et donc chirale, car polarisée gauche ou droite) dans des nuages moléculaires où se forment étoiles et systèmes planétaires renforcent cette hypothèse [25].

D'une « chimie du plus proche voisin » dans les nuages froids à une chimie beaucoup plus avancée dans la chaleur des surfaces ou intérieurs planétaires, l'origine moléculaire de la vie est un domaine passionnant qui nécessite de retourner avant même la formation de notre système solaire.

Par ailleurs, l'asymétrie moléculaire ou homochiralité est, semble-t-il, une conséquence inévitable de la vie : c'est donc un possible biomarqueur [26]. La détection d'excès énantiomériques importants (tendant vers l'homochiralité) autre part que sur Terre serait un argument de taille pour attester la présence de vie présente ou passée. C'est le but de l'instrument MOMA à bord de l'astromobile *Rosalind Franklin* de la mission *ExoMars* (figure 5). Tout comme COSAC avec *Philae*, MOMA est un chromatographe en phase gazeuse possédant une colonne chirale, permettant de séparer, quantifier et identifier les énantiomères [27].

ExoMars, après plusieurs délais, sera lancée en 2022 en direction de la planète rouge pour un atterrissage prévu début 2023. L'astromobile va perforer le sol martien jusqu'à une profondeur de 2 mètres pour que MOMA, entre autres, analyse en détail la composition de la surface et de la sous-surface martienne. La séparation énantiomérique des molécules organiques chirales permettra de détecter une potentielle asymétrie de la composition chimique martienne sur des molécules chirales d'intérêt prébiotique, comme les acides aminés. Si c'est le cas, et couplées avec les résultats des autres instruments à bord, des conclusions pourront être tirées sur la présence de vie, même très primitive, sur Mars.

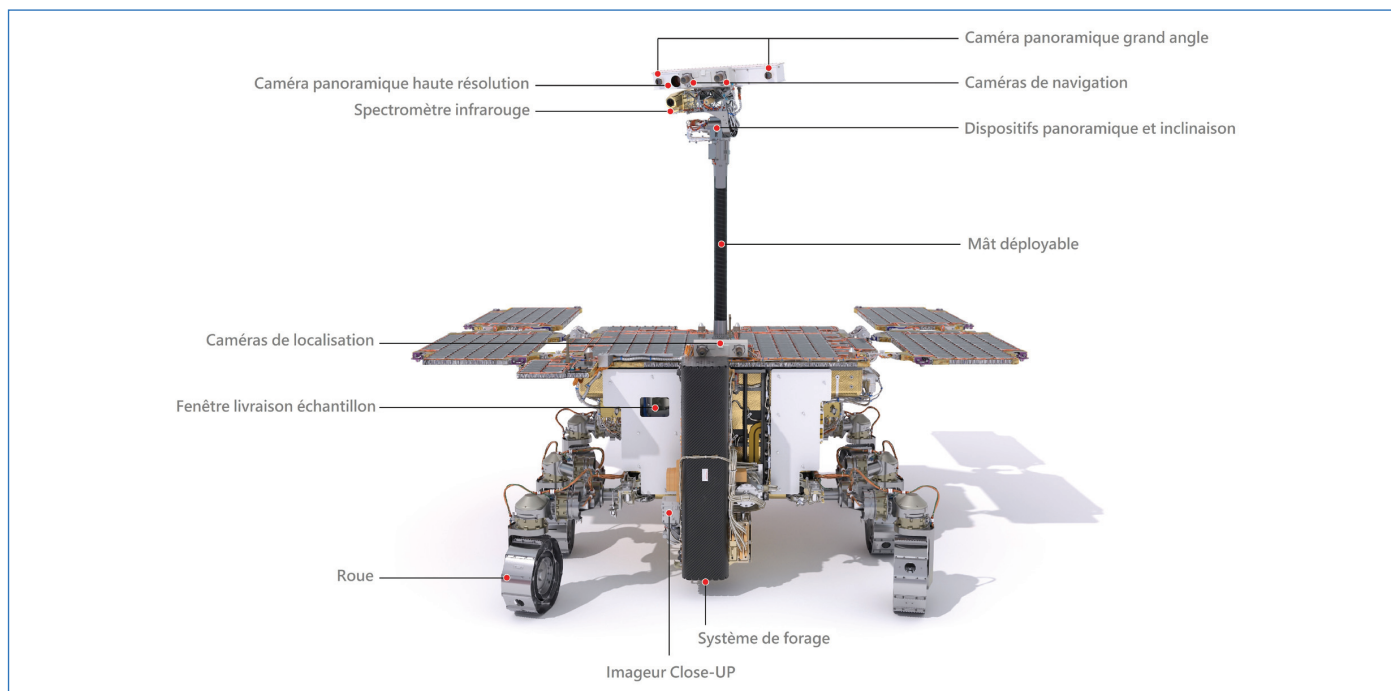


Figure 5 - Image d'artiste de l'astromobile *Rosalind Franklin* d'ExoMars montrant une vue de face avec la foreuse en position verticale. © ESA/MLspace.

Les auteurs remercient l'Agence nationale de la recherche (ANR) pour UCA^{EDI} (ANR-15-IDEX-01, ANR-16-CE29-0015 et ANR-18-CE29-004) et le Conseil européen de la recherche (ERC StG 804144).

(1) *Réfractaire* : matériau avec une forte résistance à la chaleur.

(2) *UA*, unité astronomique : distance Terre-Soleil.

(3) *Albédo* : pouvoir réfléchissant d'une surface ; plus il est faible, plus le matériau est noir.

(4) *Vitesse de libération* : vitesse minimale que doit atteindre un projectile pour échapper définitivement à l'attraction gravitationnelle d'un astre ; pour la Terre, elle est de 11,2 km/s (ou 40 320 km/h).

[1] T. Chiavassa *et al.*, La chimie des glaces interstellaires : à la recherche des molécules du vivant ?, *L'Act. Chim.*, **2005**, 283, p. 12-18.

[2] L. Le Sergeant d'Hendecourt, Molecular complexity in astrophysical environments: from astrochemistry to "astrobiology", *EPJ Web Conf.*, **2011**, 18, <https://doi.org/10.1051/epjconf/20111806001>

[3] L.J. Allamandola, S.A. Sandford, G.J. Valero, Photochemical and thermal evolution of interstellar/precometary ice analogs, *Icarus*, **1988**, 76, p. 225-252, [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(88\)90070-X](https://doi.org/10.1016/0019-1035(88)90070-X)

[4] K.-J. Chuang *et al.*, H-atom addition and abstraction reactions in mixed CO, H₂CO and CH₃OH ices: an extended view on complex organic molecule formation, *MNRAS*, **2016**, 455, p. 1702-1712, <https://doi.org/10.1093/mnras/stv2288>

[5] G.M. Muñoz Caro *et al.*, Amino acids from ultraviolet irradiation of interstellar ice analogues, *Nature*, **2002**, 416, p. 403-406, <https://doi.org/10.1038/416403a>

[6] C. Meinert *et al.*, Ribose and related sugars from ultraviolet irradiation of interstellar ice analogs, *Science*, **2016**, 352, p. 208-212, <https://doi.org/10.1126/science.aad8137>

[7] R. Gomez, H. Levison, K. Tsiganis, A. Morbidelli, Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets, *Nature*, **2005**, 435, p. 466-469, <https://doi.org/10.1038/nature03676>

[8] E. Herbst, Chemistry in the interstellar medium, *Annu. Rev. Phys. Chem.*, **1995**, 46, p. 27-54, <https://doi.org/10.1146/annurev.pc.46.100195.000331>

[9] A.G.G.M. Tielens, The molecular universe, *Rev. Mod. Phys.*, **2013**, 85, 1021, <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.85.1021>

[10] E.B. Jenkins, Element Abundances in the Interstellar Atomic Material, *Interstellar Processes*, D.J. Hollenbach, H.A. Thronson Jr. (eds), Springer, **1987**, p. 533-559, https://doi.org/10.1007/978-94-009-3861-8_20

[11] L.B. d'Hendecourt, L.J. Allamandola, J.M. Greenberg, Time dependent chemistry in dense molecular clouds. I. Grain surface reactions, gas/grain interactions and infrared spectroscopy, *A&A*, **1985**, 152, p. 130-150.

[12] S.L. Widicus Weather, G.A. Blake, 1,3-dihydroxyacetone in Sagittarius B2(N-LMH): the first interstellar ketose, *Astrophys. J. Lett.*, **2005**, 624, p. L33-L36, <https://doi.org/10.1086/430407>

[13] K.I. Öberg, Photochemistry and astrochemistry: photochemical pathways to interstellar complex organic molecules, *Chem. Rev.*, **2016**, 116, p. 9631-9663, <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00694>

[14] U.J. Meierhenrich, *Comets and their Origin: The Tools to Decipher a Comet*, Wiley-VCH, **2014**.

[15] L.B. d'Hendecourt, L.J. Allamandola, R.J.A. Grim, J.M. Greenberg, Time-dependent chemistry in dense molecular clouds. II. Ultraviolet photoprocessing and infrared spectroscopy of grain mantles, *A&A*, **1986**, 158, p. 119-134.

[16] A.D. Garcia *et al.*, L'asymétrie de la vie : une origine extraterrestre ?, *L'Act. Chim.*, **2019**, 446, p. 34-40.

[17] <https://sci.esa.int/wbBaanw>

[18] H. Balsiger *et al.*, Rosetta orbiter spectrometer for ion and neutral analysis-ROSINA, *Adv. Space Res.*, **1998**, 21, p. 1527-1535, [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(97\)00945-9](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00945-9)

[19] K. Altwegg *et al.*, Prebiotic chemicals - amino acid and phosphorus - in the coma of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko, *Sci. Adv.*, **2016**, 2, e1600285, <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600285>

[20] K. Altwegg *et al.*, 67P/Churyumov-Gerasimenko, a Jupiter family comet with a high D/H ratio, *Science*, **2015**, 347, 1261952, <https://doi.org/10.1126/science.1261952>

[21] N. Dauphas, F. Robert, B. Marty, The late asteroidal and cometary bombardment of Earth as recorded in water deuterium to protium ratio, *Icarus*, **2000**, 148, p. 508-512, <https://doi.org/10.1006/icar.2000.6489>

[22] G. Danger, L. Le Sergeant d'Hendecourt, De la chimie du milieu interstellaire à la chimie prébiotique : l'évolution de la matière organiques vers le vivant ?, *L'Act. Chim.*, **2012**, 363, p. 31-35.

[23] F. Goesmann, H. Rosenbauer, R. Roll, H. Böhnhardt, COSAC onboard Rosetta: a bioastronomy experiment for the short-period comet 67P/Churyumov-Gerasimenko, *Astrobiology*, **2005**, 5, p. 622-631, <https://doi.org/10.1089/ast.2005.5.622>

[24] F. Goesmann *et al.*, Organic compounds on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko revealed by COSAC mass spectrometry, *Science*, **2015**, 349, aab0689, <https://doi.org/10.1126/science.aab0689>

[25] J. Bailey, Astronomical sources of circularly polarized light and the origin of homochirality, *Orig. Life Evol. Biosph.*, **2001**, 31, p. 167-183, <https://doi.org/10.1023/A:1006751425919>

[26] U.J. Meierhenrich, *Amino Acids and the Asymmetry of Life: Caught in the Act of Formation*, Springer, **2008**.

[27] F. Goesmann *et al.*, The Mars organic molecule analyzer (MOMA) instrument: characterization of organic material in Martian sediments, *Astrobiology*, **2017**, 17, p. 655-685, <https://doi.org/10.1089/ast.2016.1551>

Guillaume LESEIGNEUR^{1*}, doctorant, **Adrien D. GARCIA**¹, doctorant, **Cornelia MEINERT**¹, chargée de recherche au CNRS, **Louis LE SERGEANT D'HENDECOURT**², directeur de recherche au CNRS, et **Uwe J. MEIERHENRICH**¹, professeur.

*guillaume.leseigneur@univ-cotedazur.fr

¹Institut de Chimie de Nice, Université Côte d'Azur, CNRS, UMR 7272.

²Laboratoire de Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires, Aix-Marseille Université, CNRS, UMR 7345.