

De la chimie du milieu interstellaire à la chimie prébiotique

L'évolution de la matière organique vers le vivant ?

Grégoire Danger et Louis Le Sergeant d'Hendecourt

Résumé

La formation et l'évolution de la matière organique commencent en grande partie au sein des nuages moléculaires denses. Ces nuages sont principalement formés de gaz (H_2 et diverses molécules) et de grains interstellaires pouvant inclure une partie importante de la matière organique du milieu interstellaire piégée dans des glaces constituées de molécules simples (H_2O , CH_3OH , NH_3 ...). Lors de l'évolution de ces grains au sein d'un nuage, ces molécules simples se transforment en matière organique en subissant de nombreuses modifications chimiques dues aux processus énergétiques (photons ultraviolets, protons énergétiques...) pour aboutir progressivement à une complexification de la glace originale vers une matière organique mal précisée mais probablement sous une forme macromoléculaire. Dans certaines zones, le nuage moléculaire va s'effondrer sous son propre effet gravitationnel pour former une nébuleuse préstellaire qui évoluera vers la formation d'une étoile, d'un disque d'accrétion protoplanétaire et potentiellement vers un système planétaire tel que le système solaire. Au cours de cette évolution, les grains interstellaires vont s'agglomérer pour former de petits objets incluant la matière organique originelle qui, suivant leur évolution autour de l'étoile, pourront être qualifiés de comètes ou d'astéroïdes. Ces petits objets pourront servir de réservoir de matière organique et d'eau pour le développement d'une chimie prébiotique à la surface de planètes telluriques telle que la planète Terre, prélude à l'émergence de biosystèmes, au moins dans un cas connu, celui de notre planète.

Mots-clés

Astrophysique, astrochimie, chimie prébiotique, milieu interstellaire, matière organique, endogène, exogène, MIEC-JIREC 2011.

Abstract

From interstellar chemistry to prebiotic chemistry: organic matter evolution toward the life

The formation and evolution of organic matter start mostly in dense molecular clouds. These clouds are mainly composed of interstellar grains, including most of the organic matter of the interstellar medium embedded in molecular ices. During the evolution of these grains, this organic matter will undergo many chemical changes (ion bombardment, UV irradiations, and thermal effect) to achieve a true complexity of the organic matrix. In some areas, the cloud will collapse gravitationally on itself to form a "solar nebula" that will evolve into a protostar and potentially to a planetary system like our own. During this evolution, the interstellar grains will agglomerate to form small objects including the original organic matter, which from their evolution around the star can be described as comets or asteroids. These small objects can serve as a reservoir of organic matter for the development of prebiotic chemistry on the surface of terrestrial planets like the Earth, a prelude to the emergence of biosystems as it has indeed been the case on the Earth.

Keywords

Astrophysics, astrochemistry, prebiotic chemistry, interstellar medium, organic matter, endogenous, exogenous, MIEC-JIREC 2011.



Un organisme vivant pourrait être défini comme un ensemble de processus chimiques lui permettant de se maintenir hors équilibre par des échanges de matière et d'énergie avec son environnement, ainsi que de se reproduire et d'évoluer au sein de ce même environnement. L'interaction entre un ensemble de molécules et un environnement donné est donc à la base du fonctionnement d'un organisme vivant. Le vivant ne peut exister et évoluer sans processus chimiques, alors qu'une réaction chimique peut avoir lieu sans la nécessité du vivant. La chimie peut être considérée comme « universelle », toutefois les connaissances actuelles de notre galaxie ne semblent pas montrer que l'émergence de la vie soit un phénomène vraiment répandu et inéluctable. Actuellement, les seules formes de vie connues ne résident que sur le seul astre qu'est la planète Terre. Pour déterminer si d'autres systèmes

planétaires pourraient mener à l'émergence d'une biochimie, il semble important de retracer l'histoire de l'évolution chimique de la matière. Ceci permettra de comprendre quels processus chimiques ont pu être mis en place, dans quels environnements et à partir de quelles sources de matière et d'énergie. La connaissance de cette évolution chimique permettra d'apporter des indices sur la possibilité de trouver d'autres environnements susceptibles de mener à une émergence de biosystèmes, car c'est au sein de cette histoire de l'évolution de la matière qu'ont pu émerger des systèmes biochimiques à la surface de la Terre [1].

L'astrochimie : étude de l'évolution de la matière organique dans le milieu interstellaire

L'histoire qui nous intéresse commence au sein des nuages moléculaires denses (10^3 à 10^5 molécules d'hydrogène par cm^3), qui sont constitués de gaz et de poussières (figure 1). Ces dernières ne représentent que 1 % de la masse totale de ces nuages, mais elles portent la majeure partie des espèces moléculaires qui se trouvent en leur sein. Ces poussières sont formées d'un noyau réfractaire froid de silicates et/ou de matière carbonée dont la taille est inférieure au micromètre. Ces noyaux qui baignent dans le gaz interstellaire froid (10 à 50 K) vont pouvoir accrêter⁽¹⁾ à leur surface un ensemble de molécules pour former un manteau de « glaces », un phénomène observé dans la plupart des nuages moléculaires.

L'ensemble noyau + glace forme un grain interstellaire. Les observations par spectrométrie infrarouge, essentiellement à l'aide de satellites, ont permis de déterminer que ces glaces interstellaires sont majoritairement formées d'eau, de méthanol, de monoxyde et de dioxyde de carbone, ainsi que d'ammoniac et de molécules organiques comme le formaldéhyde et l'urée [2]. Ces grains interstellaires ont une importance considérable dans les processus d'évolution chimique de la matière organique interstellaire qui nous intéresse, car à la différence de la phase gaz où les éléments moléculaires sont extrêmement dilués, la formation de ces glaces permet une concentration des molécules organiques à la surface des grains, ce qui facilite la réactivité et la complexification de la matrice organique originelle. Ces grains interstellaires peuvent être ainsi considérés comme des réacteurs chimiques, car suivant l'évolution stellaire, ces glaces interstellaires vont pouvoir subir de nombreuses évolutions chimiques.

Dans certaines zones du nuage moléculaire dense, celui-ci va s'effondrer sur lui-même pour mener à la formation d'une protoétoile. Cette protoétoile va évoluer et émettre divers rayonnements qui vont irradier l'enveloppe protostellaire, c'est-à-dire les grains interstellaires et le gaz entourant la zone de formation de la protoétoile. Ces rayonnements, associés aux rayonnements cosmiques (ions énergétiques chargés), vont altérer les molécules constitutives des glaces interstellaires. Les rayonnements ultraviolets (> 4 eV) vont activer les molécules en cassant les liaisons chimiques, permettant ainsi leur recombinaison, qui sera d'autant plus importante que la diffusion de ces

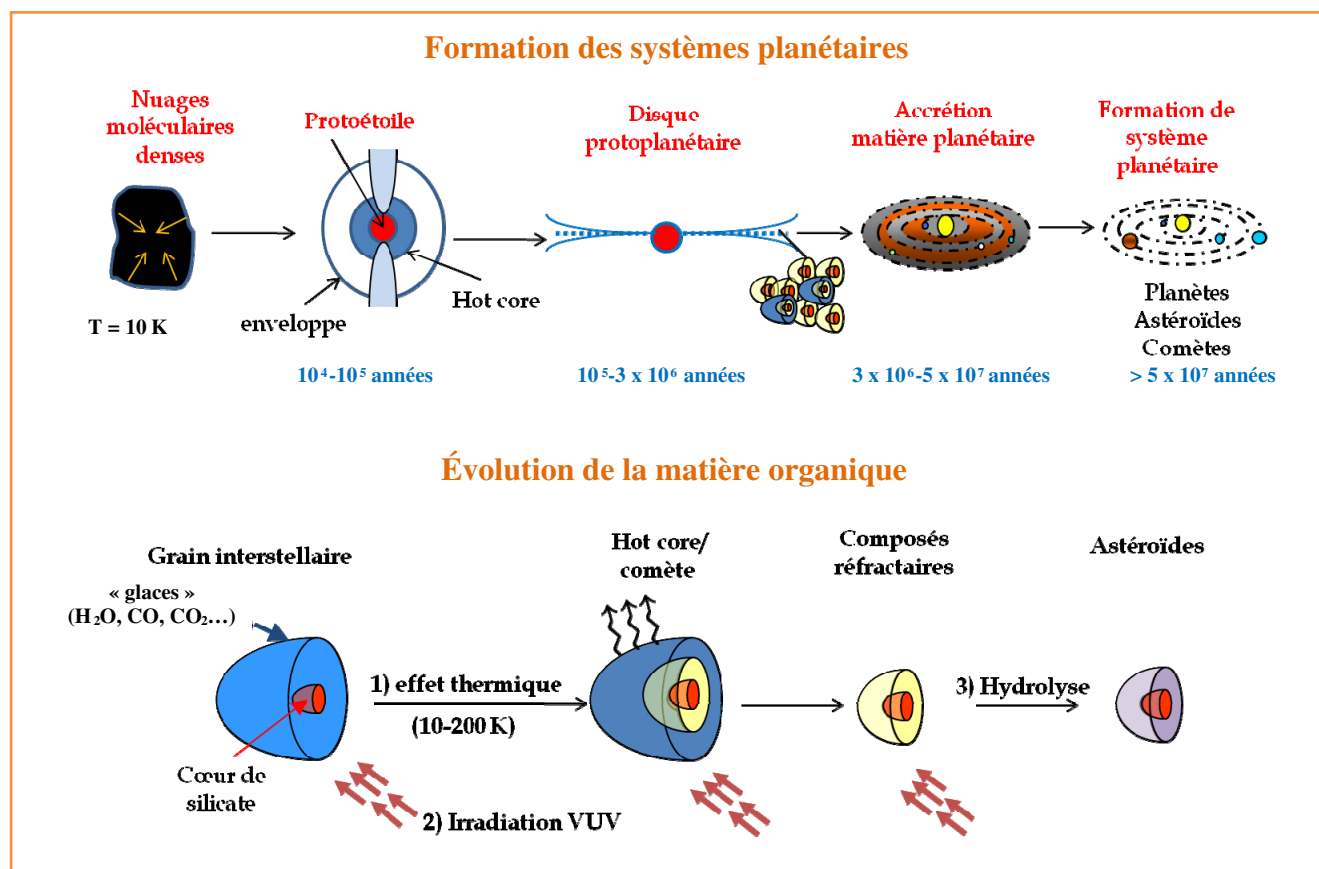


Figure 1 - Représentation schématique de l'évolution de la matière organique portée par les grains interstellaires lors de l'évolution stellaire. Dans le nuage moléculaire dense, les grains interstellaires sont entourés d'une glace de composés qui vont être activés par irradiation UV et réchauffés sous l'effet du rayonnement infrarouge lors de la formation de la protoétoile. Par la suite, ces grains plus ou moins évolués vont s'agglomérer pour aboutir *in fine* à la formation d'un système planétaire.

molécules à la surface des grains sera facilitée par le réchauffement occasionnel de ceux-ci sous l'effet des rayonnements des étoiles environnantes et du constant transport de matière dans de tels nuages. Ainsi, l'altération et la recombinaison des molécules se trouveront majoritaires au sein de zones dites de « cœurs chauds », où les températures peuvent atteindre 200 K. Il faut d'ailleurs noter que dans ces cœurs chauds, la radioastronomie détecte un plus grand nombre de molécules dans la phase gazeuse dont l'origine semble bien provenir de l'évaporation partielle des grains.

Par la suite, les grains interstellaires qui auront été plus ou moins altérés vont se retrouver dans le plan moyen de la protoétoile pour former un disque protoplanétaire. Suivant la position de ces grains vis-à-vis de la protoétoile, les molécules constitutives vont pouvoir continuer à être altérées. De plus, ils pourront perdre une partie de leurs espèces volatiles pour aboutir à la formation de composés réfractaires. Les grains vont entrer en collision au sein de ce disque protoplanétaire et s'agglomérer pour aboutir à la formation de planétésimaux⁽²⁾ et d'autres petits corps permettant de faire évoluer le disque protoplanétaire vers la formation d'un système planétaire tel que le système solaire. Ce processus d'évolution se produit sur plusieurs dizaines de millions d'années.

Au sein de ce système planétaire, la matière organique originelle va principalement se retrouver constitutive des comètes et d'astéroïdes, petits objets formés loin de la protoétoile et donc peu altérés. Ces objets sont principalement formés de glace d'eau, de silicates et de composés organiques présumés représentatifs des grains interstellaires originels. La récente mission Stardust de la NASA a montré que certains astéroïdes partagent beaucoup de propriétés avec les comètes dont ils constituent probablement un stade évolutif plus tardif où la glace s'est évaporée en partie. Les astéroïdes carbonés (riche en carbone) ont en outre subi une altération plus importante. Dans la plupart des cas, ils ont en effet subi des processus thermiques plus importants ayant mené à une perte d'espèces volatiles telles que l'eau, ainsi qu'à la présence d'une phase aqueuse liquide en leur sein. Il en découle que la matière organique qu'ils portent a été plus altérée que celle présente au sein des comètes. Enfin, la matière organique la plus altérée va se trouver à la surface des planètes, et notamment à la surface de planètes telluriques, dont la planète Terre est le meilleur exemple. En présence d'eau liquide et d'une atmosphère primitive, et grâce à des temps d'évolution très longs, ces surfaces constituent des lieux favorables à une chimie plus complexe que l'on peut réellement nommer « prébiotique ». Si ce scénario n'est pas définitivement admis, il n'en reste pas moins l'un des plus élaborés compte tenu de nos connaissances de plus en plus précises de la Terre primitive, et de l'indéniable fait que la vie s'y est développée.

L'astrochimie expérimentale : l'exemple des excès énantiomériques météoritiques

L'étude de l'évolution chimique de la matière organique dans les milieux astrophysiques est une des principales préoccupations de l'astrochimie [3]. Les recherches en astrochimie peuvent se faire sur la base d'observations d'objets astrophysiques qui sont de plus en plus associées à

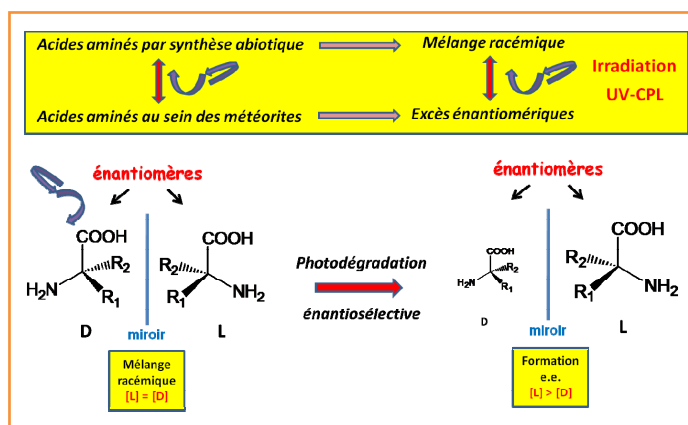


Figure 2 - Utilisation d'un rayonnement ultraviolet circulairement polarisé pour expliquer la détection d'acides aminés présentant des excès énantiomériques au sein des météorites.

Un acide aminé peut exister sous deux formes nommées énantiomères, qui ont la particularité d'absorber de manière différente une lumière circulairement polarisée. Si un mélange racémique d'acides aminés est soumis à un tel rayonnement dans le domaine de l'ultraviolet, suivant la polarisation de la lumière, l'un des deux énantiomères sera dégradé préférentiellement, aboutissant à la formation d'un excès énantiomérique.

des simulations expérimentales effectuées en laboratoire, et que l'on nomme « astrochimie expérimentale ». Un exemple de recherche récemment publié dans ce domaine concerne l'origine des excès énantiomériques des acides aminés détectés après hydrolyse de la phase soluble des météorites chondritiques⁽³⁾ [4]. Pourquoi le fait de détecter des excès énantiomériques au sein des météorites est-il intéressant ?

En laboratoire, une synthèse abiotique utilisant les composés les plus abondants au sein des glaces interstellaires (eau, méthanol, dioxyde de carbone, ammoniac), composés ne présentant pas de caractères d'asymétrie chirale, soumis à un rayonnement ultraviolet linéairement polarisé, mène uniquement à la formation d'un mélange racémique d'acides aminés [5]. Or les analyses des acides aminés météoritiques ont montré qu'il est indéniable que ces acides aminés sont d'origine abiotique [6]. Ils ne devraient donc pas présenter d'excès énantiomérique (figure 2). Dans ces conditions, le seul moyen de former un excès énantiomérique est d'ajouter lors de la synthèse un facteur physique ou chimique extérieur permettant d'induire une asymétrie. Dans un scénario astrophysique, une hypothèse pour mener à la formation d'excès énantiomérique est l'utilisation d'un rayonnement ultraviolet circulairement polarisé [7-8]. En effet, deux énantiomères absorbent différemment une lumière circulairement polarisée [9-10]. Si un mélange initialement racémique est soumis à un tel rayonnement dans l'ultraviolet à une longueur d'onde permettant de casser des liaisons chimiques (Lyman α), l'énantiomère qui absorbera préférentiellement ce rayonnement sera détruit. Il y aura une photodégradation énantiosélective et la formation d'un excès énantiomérique (figure 2).

Le système solaire aurait ainsi pu se former dans une région proche d'une étoile massive, cette dernière étant à l'origine de la formation d'un rayonnement circulairement polarisé effectivement observé, par exemple dans la nébuleuse d'Orion. Ce scénario a été testé expérimentalement en laboratoire dans des conditions proches des milieux astrophysiques [11-12]. Sur la ligne DESIRS du synchrotron SOLEIL, un mélange de méthanol, d'eau et d'ammoniac a été déposé à 77 K sous un rayonnement ultraviolet circulairement

polarisé durant 48 h, formant ainsi un analogue de glace interstellaire. Cet analogue a ensuite été réchauffé lentement pendant 24 h, toujours sous rayonnement ultraviolet circulairement polarisé, pour aboutir à la formation à température ambiante d'un résidu réfractaire. Ce résidu est ensuite hydrolysé en utilisant un protocole identique à ceux utilisés pour l'hydrolyse de la matière organique météoritique. L'analyse montre la présence d'acides aminés présentant des excès énantiomériques dépendant de la polarisation de la lumière utilisée. Ces simulations montrent donc la possibilité dans des conditions astrophysiques de former des excès énantiomériques à partir d'un mélange de molécules symétriques.

Un autre point intéressant concernant ces excès énantiomériques météoritiques réside dans le fait que le résidu présente un excès de même configuration que l'homochiralité (configuration L pour les acides aminés) observée au sein des protéines des organismes vivants. En tenant compte de phénomènes d'amplification de ces excès énantiomériques qui auraient pu avoir lieu sur Terre, cette asymétrie présente au sein de la matière organique extraterrestre aurait pu servir de support asymétrique pour l'émergence de l'homochiralité à la surface de la Terre [13].

La chimie prébiotique : la transition de l'abiotique au biotique

Une fois le système planétaire formé, deux réservoirs de matière organique peuvent être distingués : l'un exogène, l'autre endogène. Le réservoir exogène inclut la matière organique extérieure aux planètes, c'est-à-dire celle qui est la moins altérée et que l'on peut retrouver au sein des objets interplanétaires que sont les comètes et les astéroïdes. Cette matière organique exogène aurait pu être délivrée à la surface des planètes telluriques par l'impact de comètes, d'astéroïdes ou de poussières interplanétaires à leur surface. La meilleure preuve de cet apport réside dans la récupération de météorites à la surface de la Terre, qui sont les résultantes d'astéroïdes ayant traversé l'atmosphère terrestre. L'analyse de la composition de ces météorites a montré, notamment pour les chondrites carbonées, qu'elles présentent une quantité importante de matière organique abiotique plus ou moins évoluée, suivant qu'elle soit soluble ou insoluble, et que cette matière organique est constituée de molécules et macromolécules intéressantes pour la formation de systèmes biochimiques [14-15]. Par exemple, l'hydrolyse de la phase soluble de ces météorites mène à la formation d'un grand nombre d'acides aminés ainsi qu'à d'autres molécules pouvant jouer un rôle dans l'émergence de systèmes biochimiques, puisque la biochimie telle que nous la connaissons sur Terre est pour une part basée sur la condensation d'acides aminés pour former des protéines.

L'autre réservoir de matière organique est dit endogène et comprend la matière organique qui peut être formée au sein des planètes par des processus atmosphériques et géochimiques. L'expérimentation la plus connue pour démontrer la possibilité de former des molécules organiques complexes dans une atmosphère de type Terre primitive est l'expérience célèbre connue sous le nom de Miller-Urey [16]. En soumettant un mélange gazeux de méthane, d'ammoniac, d'eau et de dihydrogène à des décharges électriques, ils ont pu détecter la formation d'acides aminés. Même si le mélange gazeux initial est actuellement remis en question, il n'en reste pas moins que même en conditions plus oxydantes, la formation d'acides aminés est aussi observée [17].

La matière organique provenant de ces deux réservoirs va donc pouvoir être utilisée au sein des planètes pour développer une chimie plus complexe qui, suivant les conditions chimiques et physiques du milieu, va mener à l'émergence de systèmes biochimiques. Cependant, la transition de systèmes abiotiques, tels que représentés par l'astrochimie ou l'expérience de Miller, vers les systèmes biochimiques est loin d'être triviale. Cette transition de processus chimiques abiotiques, tels qu'ils peuvent peut-être observés actuellement sur Titan, vers une chimie de plus en plus complexe, que ce soit au niveau de la composition moléculaire ou des réseaux de réactions chimiques, caractérise la chimie prébiotique, c'est-à-dire les processus chimiques qui, partant d'environnements abiotiques, ont permis d'aboutir au développement d'environnements biotiques.

Cette chimie prébiotique ne peut se développer que dans des environnements spécifiques, c'est-à-dire présentant des conditions physico-chimiques permettant le développement de réseaux réactionnels dynamiques et hors équilibres, alimentés par un flux constant de matière et d'énergie. La Terre primitive a été, il y a 4,5 Ga, un exemple de réacteur chimique prébiotique qui a permis cette transition d'une Terre primitive abiotique vers l'apparition de premiers biosystèmes, il y a 3,8 Ga environ. Cependant, il est difficile de généraliser l'environnement de la Terre primitive comme unique environnement permettant le développement d'un système biochimique, même s'il est vrai que la présence d'eau à l'état liquide, de par ses propriétés physico-chimiques spécifiques, semble primordiale pour le développement d'une chimie prébiotique efficace, et à terme d'une biochimie. Il est par contre admissible que les environnements exogènes, même s'ils sont potentiellement riches en matière organique, soient peu propices au développement d'une chimie dite prébiotique du fait des conditions de température, de pression et de concentration moléculaire qui y règnent. En d'autres termes, les contraintes imposées aux systèmes chimiques peuvent s'avérer très nombreuses et sont, à l'heure actuelle, loin d'être toutes recensées.

Conclusion

La matière organique a longtemps été considérée, notamment à travers la théorie vitaliste, comme preuve de la présence de systèmes biochimiques. Mais comme nous avons pu le voir, tout au long de l'évolution stellaire, la matière organique peut être formée de manière abiotique, détruite ou disponible un peu partout dans l'Univers, sous des formes plus ou moins complexes. Ainsi la chimie basée sur le carbone, l'hydrogène, l'azote et l'oxygène en est universelle et non restreinte aux simples organismes vivants. Et ceci peut s'expliquer par les abondances cosmiques de ces quatre éléments, qui sont en fait les éléments réactifs parmi les plus abondants et les plus disponibles de l'Univers. Disposer de matière organique ne signifie donc pas l'émergence systématique d'une biochimie. La matière organique prend naissance au sein des nuages moléculaires denses et va pouvoir évoluer tout au long de la formation d'étoiles qui s'accompagne dans certains cas de la formation de systèmes planétaires. Au sein de ces systèmes planétaires, la matière organique originelle va se répartir entre les comètes, les astéroïdes et les planètes, et continuer ainsi ses processus d'évolution abiotique.

Comme nous le montre notre propre présence sur la planète Terre, dans certains environnements restreints capables de réunir les conditions favorables à l'apparition d'une chimie prébiotique, certains processus thermodynamiques et cinétiques ont permis la transition de l'abiotique au biotique. Une chimie du vivant va pouvoir émerger et donner naissance à une grande diversité d'espèces dont il faut cependant rappeler que toutes sont issues d'un ancêtre phylogénique commun, ce qui en soi constitue probablement l'extrême spécificité des réseaux chimiques à l'œuvre sur la Terre primitive. Ainsi la matière organique originelle, présente initialement dans les nuages moléculaires denses, se retrouve transformée au sein de systèmes et de réseaux chimiques extrêmement complexes que peuvent représenter les organismes vivants tels que l'être humain. Notre étoile, le Soleil, va continuer son évolution qui la mènera dans plusieurs milliards d'années à son expansion sous forme d'une géante rouge, puis à sa contraction sous forme d'une naine blanche. Quelle en sera l'évolution induite sur les biosystèmes encore présents à cette époque ?

Notes et références

- (1) L'*accrétion* désigne en astrophysique, en géologie, en médecine et en météorologie la constitution et l'accroissement d'un corps, d'une structure ou d'un objet par apport et/ou agglomération de matière, généralement en surface ou en périphérie de celui-ci (Wikipédia).
- (2) *Planétésimal* : corps céleste constitué dans un disque protoplanétaire ou un disque de débris (Wikipédia).
- (3) Les *chondrites* sont des météorites non différenciées, formées il y a 4,5 milliards d'années, et sont la mémoire du système solaire (http://www.carionmineraux.com/meteorite_chondrites.htm).
- [1] Pascal R., Martin H., Gargaud M., Purificacion L.-G., Montmerle T., *Le Soleil, la Terre... la vie : la quête des origines*, Belin, 2009, p. 304.
- [2] d'Hendecourt L., Dartois E., Interstellar matrices: the chemical composition and evolution of interstellar ices as observed by ISO, *Spectrochim. Acta. A*, 2001, 57(4), p. 669.
- [3] Chiavassa T., Borget F., Aycard J.-P., Dartois E., d'Hendecourt L., La chimie des glaces interstellaires : à la recherche des molécules du vivant ?, *L'Act. Chim.*, 2005, 283, p. 12.
- [4] Glavin D.P., Dworkin J.P., Enrichment of the amino acid L-isovaline by aqueous alteration on CI and CM meteorite parent bodies, *PNAS*, 2009, 106(14), p. 5487.
- [5] Bernstein M.P., Dworkin J.P., Sandford S.A., Cooper G.W., Allamandola L.J., Racemic amino acids from the ultraviolet photolysis of interstellar ice analogues, *Nature*, 2002, 416, p. 401.
- [6] Engel M.H., Macko S.A., Isotopic evidence for extraterrestrial non-racemic amino acids in the Murchison meteorite, *Nature*, 1997, 389(6648), p. 265.
- [7] Bailey J., Astronomical sources of circularly polarized light and the origin of homochirality, *Origins Life Evol. Biosphere*, 2001, 31(1-2), p. 167.
- [8] Bailey J., Chrysostomou A., Hough J.H., Gledhill T.M., McCall A., Clark S., Ménard F., Tamura M., Circular polarization in star-formation regions: implications for biomolecular homochirality, *Science*, 1998, 281, p. 672.
- [9] Balavoine G., Moradpour A., Kagan H.B., Preparation of chiral compounds with high optical purity by irradiation with circularly polarized light, a model reaction for the prebiotic generation of optical activity, *J. Am. Chem. Soc.*, 1974, 96(16), p. 5152.
- [10] Kagan H.B., Balavoine G., Moradpour A., Can circularly polarized light be used to obtain chiral compounds of high optical purity?, *J. Mol. Evol.*, 1974, 4(1), p. 41.
- [11] de Marcellus P., Danger G., Nahon L., Meierhenrich U., d'Hendecourt L., A possible astrophysical pathway to the origin of enantiomeric excess in primitive meteorites: laboratory simulations, *Origins Life Evol. Biosphere*, 2009, 39(3-4), p. 287.
- [12] de Marcellus P., Meinert C., Nuevo M., Filipi J.J., Danger G., Deboffle D., Nahon L., Le Sergeant d'Hendecourt L., Meierhenrich U.J., Non-racemic amino acid production by ultraviolet irradiation of achiral interstellar ice analogs with circularly polarized light, *Astrophys. J.*, 2011, 727, p. L27.
- [13] Bada J.L., Enhanced: extraterrestrial handedness?, *Science*, 1997, 275, p. 942.
- [14] Cronin J.R., Chang S., Organic matter in meteorites: molecular and isotopic analyses of the Murchison meteorite, *The Chemistry of Life's Origin*, J.M. Greenberg, C.X. Mendoza-Gómez, V. Pirronello (eds), Kluwer Academic Publishers, 1993, 416, p. 209-258.
- [15] Herd C.D.K., Blinova A., Simkus D.N., Huang Y.S., Taroza R., Alexander C.M.O., Gyngard F., Nittler L.R., Cody G.D., Fogel M.L., Kebukawa Y., Kilcoyne A.L.D., Hilts R.W., Slater G.F., Glavin D.P., Dworkin J.P., Callahan M.P., Elsila J.E., De Gregorio B.T., Stroud R.M., Origin and evolution of prebiotic organic matter as inferred from the Tagish lake meteorite, *Science*, 2011, 332(6035), p. 1304.
- [16] Miller S.L., Production of some organic compounds under possible primitive Earth conditions, *Science*, 1953, 117(3046), p. 2351.
- [17] Cleaves H.J., Chalmers J.H., Lazcano A., Miller S.L., Bada J.L., A reassessment of prebiotic organic synthesis in neutral planetary atmospheres, *Origins Life Evol. Biosphere*, 2008, 38(2), p. 105.



G. Danger

Grégoire Danger

est maître de conférences au laboratoire PIIM, Aix-Marseille Université*.

Louis Le Sergeant d'Hendecourt

est directeur de recherche CNRS, Équipe « Astrochimie et origines », Institut d'Astrophysique Spatiale et Université Paris-Sud, Orsay**.



L. Le Sergeant d'Hendecourt

* Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires (PIIM), Centre de Saint-Jérôme, UMR CNRS 7345, Avenue Escadrille Normandie-Niemen, F-13397 Marseille Cedex 20.

Courriel : gregoire.danger@univ-provence.fr

** Équipe « Astrochimie et origines », Institut d'Astrophysique Spatiale et Université Paris-Sud, UMR CNRS 8617, Campus d'Orsay, Bât. 121, F-91405 Orsay Cedex.

Courriel : louis.lesergeantdhendecourt@ias.u-psud.fr