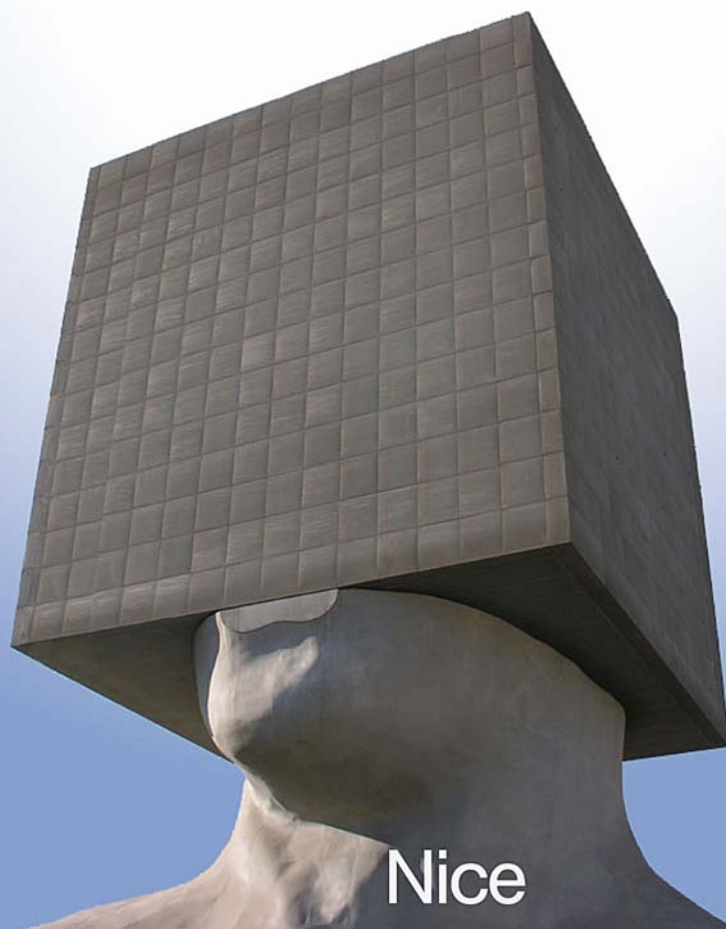


# Académie Méditerranéenne Interdisciplinaire des Connaissances



## ASTROCHIMIE ET ORIGINES DE LA VIE

Texte de la conférence du 22 janvier 2014  
de Louis Le Sergeant d'Hendecourt,  
Directeur de Recherches CNRS à l'Institut  
d'Astrophysique Spatiale, Université de Paris-Sud-Orsay



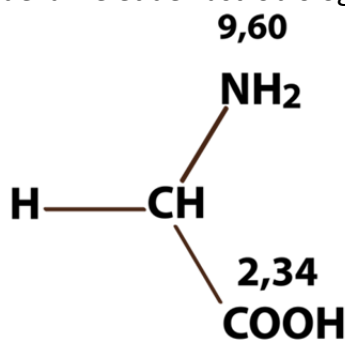
Nice

# ASTROCHIMIE ET ORIGINES DE LA VIE

*Texte de la conférence du 22 janvier 2014 à la Bibliothèque Louis Nucéra, Nice  
de Louis Le Sergeant d'Hendecourt, Directeur de Recherches CNRS à l'Institut d'Astrophysique Spatiale,  
Université de Paris-Sud - Orsay*

L'astrochimie est une thématique bien ancrée dans l'astrophysique. L'évolution de l'Univers entraîne bien évidemment une évolution physique telle que la formation des galaxies, des étoiles puis des systèmes planétaires. L'Univers se structure. Cette évolution impose aussi une évolution chimique importante qui se traduit par l'apparition d'éléments, de molécules de plus en plus complexes, majoritairement organiques, de matière solide à la base de la formation de planètes. En astrochimie, on constate que les molécules organiques sont généralement produites dans des environnements assez bien connus tels que les nuages moléculaires. Ces nuages, en s'effondrant sur eux-mêmes sous leur propre gravité, engendrent la formation d'étoiles et de disques circumstellaires où se forment les planètes. La présence d'abondantes quantités de glaces « sales », formées d'eau, de méthanol et d'ammoniac, est constatée par les observations en spectroscopie infrarouge de ces nuages moléculaires, observations qui permettent d'échafauder un scénario quant à la complexification moléculaire qui est la suite logique de l'évolution chimique de ces glaces, très évoluées sur un plan chimique et que l'on retrouve par ailleurs dans les comètes et, sur Terre, dans les météorites carbonées dites primitives, dont les corps parents datent de la formation du Système Solaire.

Autant l'astrochimie est une science reconnue en tant que discipline, autant le problème des origines de la vie et de l'astrobiologie est difficile à appréhender sur un plan méthodologique car il fait appel à un champ interdisciplinaire très vaste dont les contours sont mal définis. En un sens, lorsque l'on parle d'origine de la vie, il est très difficile, voire impossible, de hiérarchiser les thématiques à considérer.



## Glycine (Gly) G

**pH<sub>i</sub> = 5,97**

**M = 75 g/mol**

Cependant, depuis les cinq dernières années, s'est opérée une approche plus globale basée sur la chimie des systèmes qui montre que le passage de l'inerte au vivant peut être abordé d'une manière expérimentale pour passer de systèmes inertes à des systèmes semi-vivants, c'est-à-dire possédant certaines caractéristiques du vivant comme l'autoréplication et, semble-t-il, la capacité de suivre une évolution darwinienne.

Toutefois, n'oublions pas que depuis Pasteur, il n'est plus possible de parler de génération spontanée, ce qui rend le problème conceptuellement embarrassant pour les biologistes.

Dans les années 1962, Ilya Prigogine a montré qu'un système dissipatif peut contourner le Second Principe de la thermodynamique et est capable de réduire son entropie (désordre) grâce à la dissipation de la chaleur engendrée par les réactions chimiques en son sein. Ce système est dit « ouvert » et hors d'équilibre. Un tel système est-il applicable à une cellule vivante ? C'est une des grandes questions posées par l'approche physico-chimique du vivant.

De même, l'Univers, depuis le « Big Bang », dissipe son énergie sous forme de chaleur mais, avec l'écoulement du temps. Il se structure et s'ordonne en amas de galaxies, galaxies, étoiles, et planètes, structuration qui s'accompagne d'une augmentation de la complexité.

En effet, son expansion le refroidit de manière adiabatique (sans échange de chaleur avec un extérieur qui n'existe pas), en lui permettant en quelque sorte d'absorber ce désordre entropique et donc de rester dans son ensemble à entropie constante. On note cependant que localement, à l'échelle d'une galaxie, puis d'une étoile, puis d'une planète, l'entropie globale de chacun de ces objets décroît.

L'Univers est donc parfaitement apte à laisser se développer des structures pérennes de plus en plus complexes et ordonnées. La cellule vivante en est l'un des exemples le plus complexe où le désordre entropique est minimal.

La conjonction entre les idées de Schrödinger (les lois de la physique s'appliquent aux systèmes vivants et rien d'autre) et celles de Prigogine (la vie est l'expression d'une thermodynamique hors d'équilibre) montre bien que les systèmes biologiques sont subordonnés aux lois de la physique et non l'inverse.

Il n'y a pas de lois en biologie qui ne soient réductibles aux lois de la physique, c'est-à-dire aux quatre interactions (anciennement forces) décrivant tout système physique, avec cependant une particularité des systèmes vivants qui obéissent à la loi de l'évolution de Darwin.

Deux écoles se présentent. L'une, l'approche *top-down*, chère aux biologistes, consiste à tenter de remonter le temps jusqu'à LUCA (*Last Universal Common Ancestor*) –à ne pas nécessairement confondre avec la première cellule-. Le code génétique devait cependant être déjà établi à l'époque de LUCA. Pour les biologistes, tous les descendants de LUCA sont nos ancêtres selon un arbre phyllogénétique, l'arbre de la vie, établi patiemment par l'accumulation des connaissances en biologie moléculaire. LUCA correspond au premier point de divergence entre les lignées qui ont conduit aux bactéries, aux archées et aux eucaryotes. On pense généralement aujourd'hui que la première divergence a correspondu à la lignée des bactéries (les archées seraient nos sœurs et les bactéries seraient nos cousines).

L'autre école, dite *bottom-up*, -qui évidemment a ma préférence-, consiste, à partir de l'inerte, à reconstituer les conditions initiales ayant prévalu sur la Terre primitive en matière d'environnement (atmosphère, océans, rayonnement ...) pour comprendre comment des matériaux organiques ont pu s'accumuler et éventuellement faire évoluer la complexité moléculaire, en particulier vers des systèmes capables d'auto-réplication.

Ceci implique une approche non pas pluridisciplinaire, mais interdisciplinaire : trouver des chercheurs de disciplines différentes capables d'accepter de travailler ensemble. Ceci a été bien compris par le Sénat américain qui a financé des programmes de type « *Origins* » dans cet esprit pour structurer un ensemble de discipline vers la compréhension globale de nos origines.

Dans le modèle du *Big Bang*, on doit aussi accepter l'idée de « temps zéro » pour l'origine de l'univers et donc, nécessairement, que tous les objets et phénomènes dans l'univers aient une origine et une évolution. L'idée que la vie ait, par conséquent, elle aussi, eu une origine, en découle naturellement. L'Univers, à l'époque de Pasteur et des astronomes contemporains, était statique et immuable. Avec le *Big Bang*, tout a changé. Ce changement de paradigme, quittant un univers immuable, infini et statique pour un univers évoluant constamment, est comparable à la révolution copernicienne et date de la première moitié du XX<sup>ème</sup> siècle.

Sur le plan de l'évolution, et bien avant ces constatations cosmologiques, Darwin d'ailleurs proposait déjà qu'au tout début de l'évolution des espèces, la vie avait dû être spontanément engendrée par une succession de réactions chimiques au sein d'une « petite mare » où des réactions de plus en plus complexes auraient pu déboucher sur l'apparition d'organismes très simples, ancêtres de la vie.

On admet actuellement que le *Big Bang*, qui s'est produit il y a 13,78 milliards d'années, ce qui impliquait une température énorme, s'est aussitôt accompagné d'une expansion quasi-instantanée dans l'espace (l'inflation) et donc d'une diminution très rapide de sa température et de sa densité : ceci n'a pas autorisé la nucléosynthèse d'éléments chimiques lourds. Seuls furent alors fabriqués essentiellement l'hydrogène et l'hélium ainsi que le lithium. Tous les autres éléments du tableau de Mendeleïev à partir du carbone ont été produits par la nucléosynthèse stellaire des *supernovae*, étoiles massives à durée de vie courte dont l'explosion rejette dans le milieu interstellaire tous les éléments lourds nécessaires à l'apparition des planètes et de la vie. D'autres étoiles moins massives passent en fin de vie par une phase dite AGB dans laquelle se forment les grains de poussière solide qui, dans le milieu interstellaire, donneront naissance à des nuages diffus, puis denses et moléculaires et reformant des étoiles selon un cycle apparemment immuable mais où l'évolution chimique de l'ensemble apparaît nettement à l'observateur.

Pour faire simple, l'hydrogène et l'hélium dominent largement (99 % de la masse de la matière). Les atomes O, C, N constituent quasiment le 1 % restant et les matériaux plus lourds -dits réfractaires, que sont le silicium, le magnésium et le fer- constituent moins de 0,1 % de la masse des éléments.

On passe ensuite aux molécules qui sont beaucoup plus fragiles que les éléments. Les étoiles en fin de vie crachent de la matière qui se condense sous la forme de particules, de poussières interstellaires. Or la vie est essentiellement basée sur de la complexité moléculaire. Parmi ces molécules, il y a de nombreux acides aminés que l'on peut définir comme des briques élémentaires, appelées prébiotiques, même si la définition du mot prébiotique doit être considérée de manière beaucoup plus large, englobant molécules-briques et environnements primitifs sur les planètes présentes dans l'Univers.

Une molécule n'est capable d'être utile ou nécessaire à l'apparition de la vie que si elle a été placée sur Terre (ou ailleurs) dans un environnement favorable dont on ignore encore ce qu'il était, mais que l'on ne désespère pas de pouvoir reconstituer dans l'avenir.

Notre Système Solaire s'est organisé il y a 4,5 milliards d'années et on suppose que la vie a démarré sur Terre 4 à 500 millions d'années après la formation de la planète.

On observe une prépondérance des éléments formés en majorité dans la nucléosynthèse, à savoir l'hydrogène, l'hélium, le lithium, le carbone, l'oxygène, l'azote, le soufre, le phosphore, qui sont les éléments qui vont participer presque exclusivement à la formation des molécules prébiotiques. Ces atomes sont non seulement les plus abondants, mais surtout les plus disponibles pour faire une chimie complexe extrêmement riche, la chimie organique, qui va proposer un nombre presque infini d'espèces moléculaires différentes, une condition très probablement nécessaire pour une évolution de type darwinien.

En conséquence, les éléments constitutifs de la vie que sont l'ARN, l'ADN, les protéines, seront exclusivement constitués des six atomes H, O, C, N, S, P. Ceci peut nous conduire à proposer l'hypothèse suivante : c'est la chimie du milieu interstellaire qui a conduit à l'origine de la vie en facilitant l'apparition d'une chimie organique complexe, la seule compatible avec la vie telle qu'on la connaît sur Terre.

Ces molécules sont essentiellement organiques mais on ne détecte que les plus simples. Il est en effet extrêmement compliqué de trouver des spectres de molécules plus complexes, en particulier en radioastronomie, où le nombre d'atomes récemment identifiés ne dépasse pas la quinzaine.

Face à cette difficulté, il y a deux possibilités :

► La première est celle de la mission Rosetta qui prévoit d'aller prélever un échantillon de neige sale sur la comète Churiuov-Gerasimenko. L'agence spatiale européenne (ESA) a envoyé une sonde en 2004 à la poursuite de cette comète qu'elle a rejoint en 2014. La sonde spatiale de trois tonnes au lancement doit bientôt approcher de très près la comète et la suivre pendant plusieurs mois puis, après cette période d'observation, envoyer Philae, un petit atterrisseur de cent kg, se poser sur sa surface pour prélever des échantillons du sol de cet astre, vestige de la formation du système solaire et les analyser. Un certain nombre d'analyses chimiques, telle que l'expérience COSAC, permettront d'affiner la composition moléculaire organique de cette comète. Le Professeur Uwe Meierhenrich de l'Institut de Chimie de Nice est l'un des responsables de cette expérience très complexe.

► La deuxième a consisté à créer sur Terre une comète artificielle, ou « glace interstellaire cométaire simulée », afin d'analyser ses constituants par une équipe franco-allemande comprenant les groupes d'Uwe Meierhenrich et de Cornelia Meinert à l'Institut de Chimie de Nice (Université de Nice-Sophia Antipolis – CNRS) et de notre équipe, Paola Modica et Pierre de Marcellus, à l'Institut d'Astrophysique Spatiale (CNRS – Université de Paris Sud).

Après avoir fabriqué, en 2012, une micro-comète à l'Institut où nous avons simulé des conditions extrêmes semblables à celles de l'espace (-200°C et sous vide), nous avons condensé sur un morceau solide de fluorure de magnésium (MgF<sub>2</sub>), des composés existants dans le milieu interstellaire : de l'eau (H<sub>2</sub>O), de l'ammoniac (NH<sub>3</sub>) et du méthanol (CH<sub>3</sub>OH), en l'irradiant avec un rayonnement ultraviolet qui « casse » les molécules et les recompose en d'autres molécules de plus en plus grandes et complexes.

Au bout de dix jours qui correspondent à un million d'années dans l'espace, nous avons obtenu une centaine de microgrammes (10<sup>-6</sup> grammes) de matière organique artificielle qui ont été ensuite analysés à l'Institut de Chimie de Nice, avec une technique très performante : un chromatographe multidimensionnel en phase gaz installé à Nice en 2002, qui permet de détecter dix fois plus de molécules dans un échantillon qu'un chromatographe traditionnel dit « monodimensionnel ».

On a pu ainsi identifier seize acides aminés différents dont six acides di-aminés, avec surtout la N- (2 aminoéthyl) glycine qui pourrait être un des constituants essentiels de l'ancêtre de l'ADN terrestre, la molécule d'acide peptidique nucléique (APN), son squelette étant constitué d'une répétition de la molécule produite artificiellement.

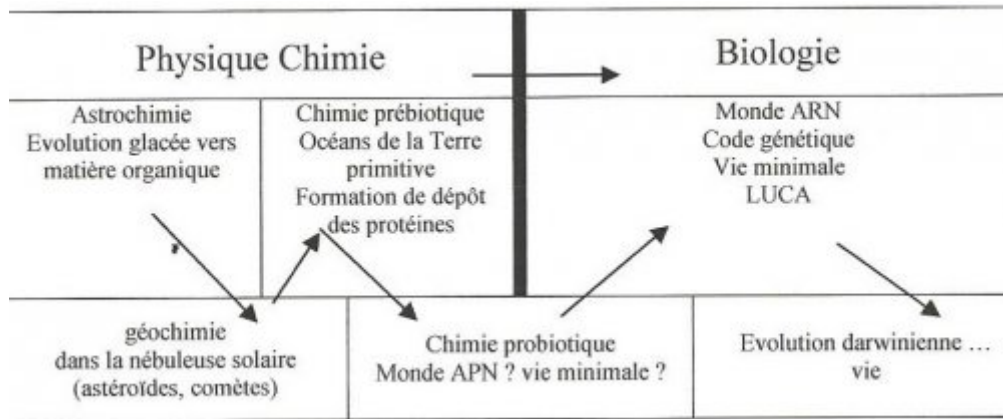
Ces résultats indiquent que les premières structures moléculaires utiles à la vie auraient pu se former dans le milieu interstellaire avant d'atterrir sur la Terre primitive, dans de l'eau liquide (solvant indispensable) lors de la chute de météorites et de comètes. Un peu comme si avant un monde ARN/ADN, il y avait eu un monde APN.

L'APN est un possible candidat au titre de lointain ancêtre de l'ARN (acide ribonucléique) toujours très utilisé par les cellules, notamment dans l'hérédité épigénétique, à côté de l'ADN (acide désoxyribonucléique) support de l'hérédité génétique à deux brins, considéré comme plus évolué et complexe que l'ARN. Ce dernier, composé d'un unique brin, a pu exister sous forme d'un « monde ARN » peuplé d'êtres simples aux frontières de la vie.

Nombre de biologistes estiment que l'apparition de la vie coïncide avec celle de l'ARN mais on peut en douter car l'ARN est déjà en soi une molécule d'une ahurissante complexité et son élaboration a certainement nécessité de nombreuses étapes intermédiaires non élucidées à ce jour.

En fait, il est difficile de définir ce qui est vivant ou non. Certains postulent l'existence d'un monde APN ou « monde peptidique ». Pour moi, la vie est un système moléculaire capable d'autoréplication,

d'autocatalyse et d'hétérotrophie, capable donc de s'intégrer dès l'origine à la théorie darwinienne (évolution, sélection).



Les processus physico-chimiques dans l'apparition de la vie obéissent aussi à la seconde loi de la thermodynamique qui implique une augmentation continue du désordre d'un système isolé. C'est pourquoi je ne pense pas que la vie soit apparue sur Terre à l'issue de centaines de millions d'années d'évolution ; je pencherais plutôt pour une apparition extrêmement rapide à un moment donné de l'évolution de la Terre primitive où les conditions furent favorables et irréversibles.

Celle-ci s'est créée avec une économie de moyens surprenante : vingt acides aminés homochiraux seulement, parmi les centaines connus dans la nature, ne comptant que six éléments : carbone, hydrogène, oxygène, azote, soufre et phosphore.

Il est possible que la vie soit apparue sur des planètes extrasolaires bien que notre système solaire démontre que, parmi les planètes telluriques situées dans la zone habitable, ainsi que les très nombreux satellites de planètes géantes, il a fallu que la seule qui héberge la vie réunisse des conditions nécessaires extraordinairement précises. Toutefois, les conditions initiales et surtout l'influence de celles-ci sur l'émergence de la vie ne sont pas, *a priori*, connues. Finalement, il semble bien que la primo-évolution des planètes joue elle aussi un rôle très important dans le maintien (et l'évolution) de la vie. La connaissance de tous ces paramètres est un objectif majeur des recherches actuelles.