



Vie terrestre

Le Soleil et la Lune lui ont donné un sens

> ENJEUX

Quelles conditions physico-chimiques ont été nécessaires à l'émergence de la vie sur Terre ? Pour répondre à cette grande question, les scientifiques ont établi une longue liste : bonne distance du Soleil, taille suffisante pour la Terre, présence d'eau, d'atmosphère, etc. Mais l'une de ces conditions est un peu plus étrange que les autres : l'homochiralité des acides aminés. Loin d'être un détail, le fait que toutes les biomolécules aient la même orientation géométrique (à gauche) est peut-être l'indice clé qui permettra de retracer la genèse de la vie sur Terre.

C'est une étrange particularité des acides aminés : ils sont orientés à gauche. Une "homochiralité" nécessaire à la vie, qui défiait les chercheurs depuis un siècle. Jusqu'à ce qu'ils se tournent vers le Soleil et la Lune...

Par Stéphanie Delage

Le Soleil et la Lune figurent maintenant au premier rang des suspects. Expériences en laboratoire à l'appui, des chercheurs sont en train de pointer du doigt ces deux astres comme étant les deux principaux responsables de l'affaire. Une affaire pour le moins délicate tant les controverses demeurent vives entre les différentes équipes de détectives chargées d'élucider l'énigme et qui, constituées de biologistes, de chimistes, d'astrophysiciens et autres géologues, rivalisent d'imagination pour

échafauder chacune un scénario différent. Il faut dire que l'enquête ne manque pas d'ampleur : il s'agit de remonter très loin le cours du temps, au moment de la création de notre système solaire et de notre planète, afin de comprendre comment les briques élémentaires de la vie sont apparues sur Terre. Autrement dit, comment et où ont été forgées ces molécules précédant le vivant, comme les acides aminés constituant les protéines : sur Terre ? Au fond des océans ? Dans l'espace ? →

A.M. ROSARIO/ICCN/CORBIS

fondamental > BIOCHIMIE

DES PISTES MOINS CONVAINCANTES

Même s'il semble le plus efficace, le rayonnement polarisé circulairement n'est pas le seul effet physique à pouvoir induire l'asymétrisation des biomolécules : coupler un rayonnement non-polarisé avec un champ magnétique de direction opposée en est aussi capable. Testé par Geert Rikken, du Laboratoire national des champs magnétiques pulsés à Toulouse, cet effet provoque un déséquilibre de 1 pour 1 million. Reste

à savoir si une aussi faible valeur suffit à basculer vers l'homochiralité... Autre piste : le caractère asymétrique peut-il être lié à la brisure de symétrie matière-anti-matière initiée par la force nucléaire faible (une des quatre forces fondamentales de la nature) ? Sans doute pas, analyse Alexandra MacDermott de l'université de Cambridge, car la prépondérance estimée d'une forme sur l'autre est dans ce cas infime : une molé-

cule gauche en excès pour 10^{17} molécules. Dernière option : celle d'un processus basé sur le hasard, impliquant donc une sorte de darwinisme. En clair, l'homochiralité serait si nécessaire à la vie qu'elle aurait été naturellement sélectionnée : les êtres vivants exploitant les deux configurations à la fois auraient été éliminés. Un scénario rejeté par la plupart des scientifiques, qui privilégient une approche plus déterministe.

→ Comme dans toute bonne enquête, un indice doit mettre les fins limiers sur la piste. Ici, il s'agit d'un détail géométrique exceptionnel propre aux molécules du vivant, une sorte d'empreinte digitale à laquelle chaque scénario suspect doit être confronté : l'homochiralité, qui fascine les scientifiques depuis sa mise en évidence par Pasteur à la fin du XIX^e siècle. Pour comprendre cette propriété des molécules du vivant, il suffit de regarder nos deux mains : elles ne se superposent pas, mais sont l'image l'une de l'autre dans un miroir. C'est ce que l'on appelle la chiralité. Or, à l'instar de nos mains, les acides aminés existent sous

logique voudrait donc que ces deux configurations soient équitablement réparties dans la nature. Or il n'en est rien ! La vie utilise exclusivement des acides aminés... de configuration G. Que ce soient au sein des plantes ou des êtres vivants, les biomolécules sont toutes de version gauche. Une "homochiralité" qui s'est même avérée nécessaire au développement de la vie. Pour une bonne raison : si une protéine était constituée indifféremment d'acides aminés gauche et droit, elle pourrait prendre tellement de formes différentes qu'elle ne pourrait avoir de fonction déterminée. Le processus de la vie n'aurait alors pas pu

Pour expliquer la vie, il faut expliquer cette homochiralité des biomolécules

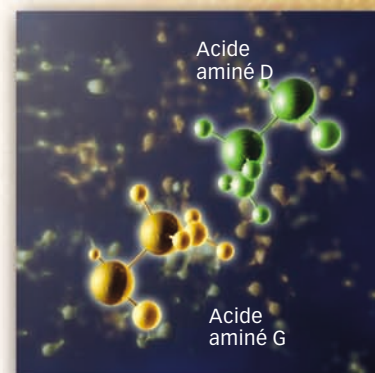
deux formes droite (D) ou gauche (G), suivant la disposition de leurs atomes (que l'on peut distinguer selon la façon dont ils réfléchissent la lumière). D'ailleurs, lorsque les chimistes les synthétisent, ils obtiennent un mélange "racémique", c'est-à-dire équilibré entre ces deux configurations. La

s'enclencher. D'ailleurs, les très rares acides aminés D présents dans la nature (par exemple, dans l'eau de mer) ne sont pas utilisés par la vie : ingérés par mégarde, ils sont relégués par notre organisme au rang de déchets indésirables et accumulés dans des sites "poubelles" comme les os ou les dents.

84 SCIENCE & VIE > JUIN > 2006

Première étape : le Soleil favorise les acides aminés orientés à gauche

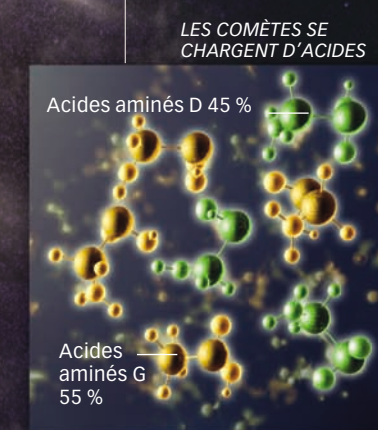
Un acide aminé est une biomolécule présentant deux formes chimiquement identiques, mais géométriquement distinctes, telles nos deux mains. Il y a ainsi les acides aminés droit (D) et gauche (G). Dans les nébuleuses, il naît autant de D que de G. Mais, sur Terre, cet équilibre est rompu au profit des G, d'abord par l'action du Soleil, puis par celle de la Lune (voir p. 86).



1-Le Soleil détruit les acides D

Lors de la création du système solaire, il y a 4,7 milliards d'années, la lumière de notre étoile, tel un tire-bouchon, avançait en tournant à droite sur elle-même. Dans cette configuration, la lumière détruit plus facilement les acides aminés droit que gauche.

Comète



2-La symétrie est rompue

Les acides aminés s'accumulent peu à peu sur les comètes. Avec le temps, s'installe un déséquilibre significatif entre les molécules de type gauche et celles de type droit (respectivement de l'ordre de 55 % contre 45 %).

Parce qu'elle s'est forcément mise en place très tôt dans l'histoire du vivant, cette homochiralité moléculaire apparaît donc comme l'une des clés de l'énigme : tout scénario de formation des biomolécules se doit de justifier l'apparition de cette mystérieuse asymétrie nécessaire au développement de la vie sur Terre. Or, pour la première fois, une reconstitution de leur processus de formation est justement en mesure d'expliquer pourquoi elles ont toutes pris une configuration gauche. Et, dans ce scénario, le Soleil et la Lune jouent un rôle de premier plan, quoique à des titres différents.

La première partie de l'histoire se joue au-dessus de nos têtes, dans l'espace interstellaire. L'idée est simple : l'origine de l'asymétrie qui a favorisé la configuration G des acides aminés impliquerait les rayonnements interstellaires. Par quelle magie ? "Parce que le

rayonnement du Soleil serait lui-même asymétrique", propose Laurent Nahon, du synchrotron Soleil, qui a mis au point l'expérience. De fait, un tel rayonnement asymétrique a été repéré en 1998 par le télescope anglo-australien AAT en provenance de la nébuleuse d'Orion, véritable pouponnière d'étoiles : sa lumière est polarisée circulairement. Tel un tire-bouchon, le champ électromagnétique associé à ces particules de lumière tourne ainsi soit vers la droite, soit vers la gauche au fur et à mesure que la particule avance (voir Jargon). "Si la lumière des étoiles n'est à l'origine pas polarisée, des processus interstellaires complexes de diffusion et de réflexion sont capables de la transformer en une lumière polarisée circulairement, le sens gauche ou droit de cette polarisation dépendant de différents paramètres", explique Uwe Meierhenrich, professeur au laboratoire de chimie

des molécules bioactives et des arômes de Nice. Et ce détail change tout. Car tout porte à croire que notre système solaire a lui aussi été le siège de radiations semblables lors de sa formation. Cette dissymétrie dans la polarisation de la lumière du Soleil a-t-elle alors affecté différemment les acides aminés gauche et droit, qui se sont assemblés dans l'espace avant d'avoir été transportés par des comètes sur la Terre ? Un tel processus a-t-il pu initier l'homochiralité des biomolécules ? C'est cette hypothèse que Laurent Nahon et Uwe Meierhenrich ont décidé de tester.

LE SOLEIL N'EXPLIQUE PAS TOUT...

Pour cela, les deux cosmochimistes ont mis à contribution l'accélérateur de particules Super-ACO du Laboratoire pour l'utilisation du rayonnement électromagnétique, installé à Orsay : des électrons circulent dans un an-

> JARGON

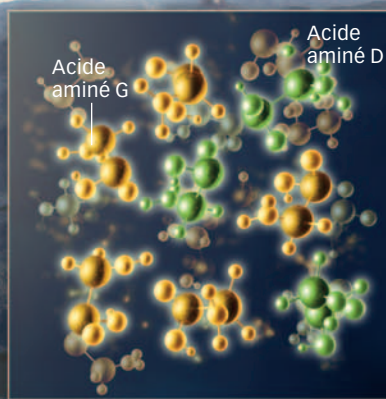
Lumière polarisée circulairement : la lumière est une onde électromagnétique, c'est-à-dire qu'elle est constituée d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Tous deux sont représentés par un vecteur perpendiculaire à la direction de propagation de la lumière. Sa polarisation dans l'espace des deux champs, est circulaire si le vecteur associé tourne sur lui-même au fur et à mesure que la lumière se propage. Ces champs décrivent donc dans l'espace des hélices orientées, soit vers la gauche, soit vers la droite, comme les tire-bouchons pour droitiers et pour gauchers.

2006 > JUIN > SCIENCE & VIE 85

fondamental > BIOCHIMIE

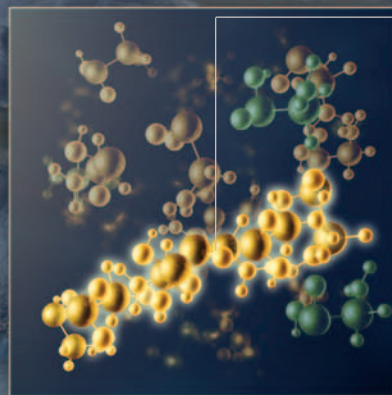
Seconde étape : sur Terre, la Lune amplifie le déséquilibre

Comète



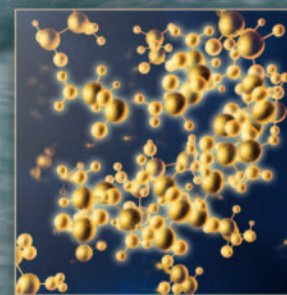
1-Les comètes apportent sur Terre des acides aminés G

Il y a 4 milliards d'années, la Terre est soumise à de fortes marées dues à la Lune. A marée descendante, se forment dans l'atmosphère des acides aminés aussi bien G que D. Mais les comètes qui croisent la Terre apportent un surplus de G.



2-Les acides se lient à leurs semblables

A marée montante, les acides aminés s'assemblent en peptides composés pour les uns uniquement de formes G, pour les autres uniquement de formes D. Parfois, les acides aminés D, piégés par un peptide G, se trouvent modifiés en G et inversement.



3-Les acides aminés D sont éliminés peu à peu

Parce qu'ils étaient minoritaires au départ, les acides D finissent par être éliminés de ce cycle en moins de 500 ans. L'homochiralité s'impose. La vie peut commencer...

→ neu de 72 mètres de circonférence à une vitesse proche de celle de la lumière et émettent un rayonnement qui peut à l'envi être polarisé à gauche ou à droite. Restait à choisir le cobaye de cette expérience. C'est la leucine, un acide aminé répandu dans les protéines du corps humain, qui a été

mière polarisée circulairement à droite", déclare le physicien. La preuve est donc faite: le rayonnement interstellaire est capable de briser la symétrie droite-gauche. Un rayonnement polarisé à droite a tendance à détruire plus facilement les molécules de configuration gauche, et inversement. D'où le

afin qu'elle traque en 2014 des excès de l'une ou l'autre forme sur la comète Churyumov-Gerassimenko. Mais l'excès obtenu lors de l'expérience est d'ores et déjà comparable aux données extraites d'une météorite riche en acides aminés tombée en Australie: des analyses effectuées en 1997 ont révélé la présence d'environ 70 sortes d'acides aminés, dont 6 avec un excès en forme G compris entre 1 et 9%. Cependant, si cet excès est significatif, il ne peut expliquer à lui seul notre réalité biologique, où presque 100% des acides aminés présentent la même chiralité.

LAISSER TOURNER LA LUNE

Si un rayonnement polarisé est bien à l'origine de l'asymétrie moléculaire, une amplification du phénomène a également été nécessaire. Et justement, de récents travaux indiquent qu'une telle amplification a pu être réa-

lisée directement sur notre planète. Cette fois, l'enquête est menée par Auguste Commeyras, Robert Pascal et leur équipe de l'université de Montpellier II. Retour il y a quatre milliards d'années: la terre primitive, formée d'océans et de continents émergés, est soumise à de gigantesques marées dues à la Lune (alors beaucoup plus proche de la Terre) et baignée dans une atmosphère où le rayonnement solaire et les éclairs lui procurent sans cesse de l'énergie. Des conditions à l'origine d'une machinerie complexe que les chimistes s'attachent à décrire depuis dix ans (voir *Science & Vie* n° 935). D'après leurs expériences, ces conditions permettent de produire en grand nombre des acides aminés, qui viennent s'ajouter à ceux apportés par les comètes. En outre, elles sont suffisantes pour que ces acides s'accrochent les uns aux autres et forment des chaînes

peptidiques qui, en s'allongeant, deviendront des protéines. La Lune joue ici un rôle clé: "Durant les phases sèches, à marée descendante, l'atmosphère encourage la formation d'acides aminés prêts à se combiner, explique Auguste Commeyras. Mais cette transformation acidifie le milieu, ce qui empêche les acides aminés de se lier entre eux. Il faut attendre la marée montante pour que l'acidité chute et favorise la synthèse des peptides." Or, les chimistes français ont justement montré en 2004 comment ce modèle chimique de création des briques élémentaires de la vie mène inévitablement à la disparition des acides aminés D.

Concrètement, la dynamique de ces réactions est guidée par deux facteurs principaux. Tout d'abord, lors de la formation d'une petite chaîne d'acides aminés, le dernier maillon a tendance à réagir de préférence avec une molécule de même configuration, formant ainsi des chaînes composées exclusivement soit de molécules G, soit de molécules D. Mais, lorsque le réservoir de molécules n'est plus capable de fournir la configuration qui convient, ce sont deux acides aminés de type différent qui se lient. Ce qui enclenche un nouveau type de réaction chimique: "Le dernier acide aminé qui s'accroche peut changer sa configuration en fonction de l'acide aminé précédent", explique Auguste Commeyras. Ainsi, un D qui s'accroche à un G se transforme parfois en G! D'après leurs modélisations et leurs expériences, ces deux types de réactions suffisent à enclencher une dynamique chimique complexe qui mène à une émergence spontanée de l'homochiralité: "Des systèmes prébiotiques réels formés de dérivés d'acides aminés sont capables d'atteindre spontanément en quelques siècles un état stable énantiomériquement pur, c'est-à-dire formé d'acides aminés de même configuration", notent-ils dans leur publication. Autre-

ment dit, il suffit de laisser faire le temps et tourner la Lune pour qu'un seul type de configuration prenne le dessus. Et c'est là que les deux parties de l'enquête se combinent: les comètes tombées sur Terre apportant un surplus d'acides aminés de configuration gauche, cela suffit à faire pencher la balance. La configuration D doit capituler (voir infographie). Voilà comment l'excès initial en configurations G a pu se trouver amplifié. Voilà comment le Soleil et la Lune ont pu progressivement imposer sur Terre cette homochiralité si nécessaire à la vie.

UN SCÉNARIO À CONFIRMER

Si ce scénario est séduisant, l'enquête est loin d'être bouclée. Car d'autres processus susceptibles de déclencher l'homochiralité sont étudiés en parallèle, même s'ils semblent moins efficaces que la polarisation de la lumière solaire (voir encadré p. 84). Par ailleurs, d'autres pistes vont chercher au fond de l'océan ou d'une "soupe" prébiotique dans l'atmosphère terrestre les conditions propices à la formation des acides aminés, même si elles restent incapables de passer, à ce jour, le test de l'homochiralité... Le manque de témoignages du passé rend de toute façon le jugement difficile et la chasse aux indices doit continuer. Peut-être que les mesures récoltées depuis un an par la sonde *Huygens* sur Titan, une des lunes de Saturne dont l'atmosphère est similaire à celle de la Terre, permettront d'en savoir plus sur les processus du développement des molécules prébiotiques (voir *SC&V* n° 1061, p. 70). Mais il faut pour l'instant se satisfaire de ce que l'on sait: la lente action conjuguée et complexe du Soleil et de la Lune est capable de causer l'homochiralité des acides aminés. Reste à savoir si c'est vraiment ainsi que s'est joué le miracle de l'asymétrie des biomolécules, qui a façonné les premiers êtres vivants microscopiques. ■

Les mesures récoltées depuis un an sur Titan devraient livrer d'autres indices

retenue. "Afin d'approcher au plus près des conditions interstellaires, elle a été irradiée en phase solide, une première expérimentale!", souligne Laurent Nahon. Après plusieurs heures d'irradiation d'un mélange de leucine initialement constitué de 50% de molécules G et 50% de molécules D, le résultat attendu était au rendez-vous: "Nous avons obtenu un excès de 2,6% de la configuration droite avec une lu-

scénario proposé: lors de sa formation, une partie de notre système solaire a été irradiée par une lumière polarisée à gauche, ce qui a induit un excès d'acides aminés gauche (voir infographie p. 85). Pour vérifier l'hypothèse, Uwe Meierhenrich est en train de programmer pour 2011 en partie la mission Exomars pour détecter les acides aminés et leur chiralité sur la planète rouge. Et il doit aussi préparer la sonde *Rosetta*