

Ciel & espace

TEST

LE CANON EOS Ra :
UN HYBRIDE SPÉCIAL
PHOTO ASTRO

DÉBAT

LA VIE EST-ELLE
RÉPANDUE DANS
L'UNIVERS ?

HISTOIRE

LÉONARD DE VINCI
ET SES CAHIERS
D'ASTRONOME

REPORTAGE

COMMENT LE SPATIAL
PRIVÉ DRAGUE
LES SCIENTIFIQUES

SUPERNOVAE

LES FORGES DU COSMOS

LA VIE EST-ELLE UN IMPÉRATIF COSMIQUE ?

L'apparition du vivant est-elle une conséquence obligatoire de l'évolution de l'Univers, ou un accident qui a bien peu de chance de s'être reproduit ailleurs ? À l'occasion de notre série de podcasts consacrée à l'origine de la vie, nous avons demandé à un biologiste et à une astrophysicienne de confronter leur point de vue.



Sucres, acides aminés, protéines même ⁽¹⁾ : chaque découverte dans l'espace d'une nouvelle molécule organique d'intérêt biologique suscite l'enthousiasme chez les passionnés du ciel. Associées à l'avènement des exoplanètes, toujours plus nombreuses, elles parviennent assez facilement à nous convaincre à chaque fois qu'un

nouveau pas a été fait vers les origines de la vie et la découverte de la vie ailleurs... Mais cet enthousiasme n'est pas unanime. Chez les biologistes en particulier, on fait souvent remarquer que la vie est un phénomène complexe et hautement improbable. Y voir ses prémices dans quelques molécules errantes (ou regarder les planètes lointaines comme autant de havres fertiles) serait d'une grande naïveté ! L'astronome Cecilia Ceccarelli, de l'Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble, et le biochimiste Juan Fontecilla, de l'Institut de biologie structurale (IBS), ont des vues radicalement différentes sur ce sujet. Spécialiste d'astrochimie, la première est à

JUAN FONTECILLA

Né au Chili, Juan Fontecilla soutient une thèse à l'université d'Alabama en 1980, avant d'être recruté au CNRS. En 1991, il fonde au sein du CEA à Grenoble un laboratoire de cristallographie des protéines. Il y découvre avec son équipe la structure de plusieurs d'entre elles. © P. Jacquet/OSUG

l'origine du projet *Seeds Of Life In Space*, dans lequel elle utilise l'interféromètre Noema (lire *C&E* n° 567) pour traquer les molécules organiques dans les régions de formation d'étoiles. Directeur de l'unité Métalloprotéines de l'IBS entre 1992 et 2015, le second réfléchit depuis longtemps aux origines de la vie, sujet sur lequel il a publié plusieurs articles scientifiques. Les deux ont participé récemment à notre série de podcasts sur l'origine de la vie (2). Nous avons voulu aller plus loin...

Ciel & espace : Les premières expériences sur l'origine de la vie remontent aux années 1950. Mais malgré un intérêt récent, le sujet reste marginal en science, tant chez les astronomes que chez les biologistes. Comment en êtes-vous venu à vous intéresser à ces questions et à la vie ailleurs en général ?

Cecilia Ceccarelli : Comme beaucoup de monde, je crois, je me suis toujours intéressée à ces sujets. Mais c'est en arrivant à Grenoble que j'ai commencé à m'intéresser à l'astrochimie (3). Il y a une vingtaine d'années, grâce aux radiotélescopes, des molécules interstellaires complexes ont commencé à être découvertes en direction du centre de la Galaxie, dans un nuage sombre appelé Sagittarius B2. "Complexes" du point de vue de la chimie

interstellaire, je le précise ! Parce qu'avec leurs onze atomes, elles restent extrêmement simples pour un biochimiste. Avec mes collègues, nous nous sommes mis à les chercher dans les protoétoiles, convaincus que ces molécules pourraient être les briques de la vie. Aujourd'hui, bien sûr, notre but n'est pas de donner une explication à l'origine de la vie. Notre travail se situe en amont : nous voulons recenser les molécules qui sont produites dans l'Univers et essayer de comprendre comment elles se forment. En particulier celles qui jouent un rôle dans le vivant et qui auraient pu ensemenner la Terre.

Juan Fontecilla : Mon intérêt pour l'origine de la vie date de la lecture d'Alexandre Oparine, à l'université [ce biochimiste russe, auteur de *L'Origine de la vie* en 1924, est le premier à avoir fait l'hypothèse d'une chimie organique "prébiotique", précédant l'apparition de la vie, NDLR]. Après ma thèse en cristallographie des protéines aux États-Unis, je me suis intéressé aux métalloprotéines : des protéines qui incluent des métaux comme le soufre, le fer, le nickel... Le nickel est intéressant parce qu'il est lié à un événement important dans l'histoire de la vie, la Grande Oxydation il y a 2,4 milliards d'années, quand l'atmosphère terrestre est devenue riche en oxygène (O₂). Quant au fer et au soufre, on les trouve dans une protéine appelée hydrogénase, qui

est capable de fournir des électrons à partir de l'hydrogène moléculaire pour fixer le carbone du CO₂ et fabriquer des molécules essentielles à la vie, telles que les sucres et les protéines. Cela nous ramène à une époque encore plus lointaine, quand l'atmosphère était largement composée de CO₂. Le rôle des métaux est si important en biochimie que je suis convaincu que la vie est apparue sur une surface minérale, sur Terre, et *via* des processus métaboliques simples comme ceux qui impliquent l'hydrogénase. Pour moi, les sucres et les acides aminés découverts



CECILIA CECCARELLI
Après une thèse en cosmologie à l'université La Sapienza à Rome, Cecilia Ceccarelli s'intéresse à l'astrochimie, domaine dans lequel elle devient une spécialiste internationalement reconnue. Elle a obtenu en 2006 le prix Irène Joliot-Curie de la femme scientifique de l'année.



Des molécules organiques ont été observées dans les nuages sombres, comme ici LDN1251 dans la constellation de Céphée. Représentent-elles le premier pas sur le chemin de la vie ? Ou bien la Terre a-t-elle connu un destin unique ? © B. Delsaert

dans l'Univers n'ont rien à voir avec l'apparition de la vie. Et je ne suis pas très optimiste sur ses chances d'être présente ailleurs.

C&E : Pour quelles raisons pensez-vous que la vie extraterrestre a peu de chance d'exister ?

J. F. : L'évolution est gouvernée par la contingence. Sa marche est une

succession de hasards, d'événements qui auraient très bien pu ne pas se produire. Si la Pangée ne s'était pas disloquée il y a 200 millions d'années, si une météorite n'avait pas anéanti les dinosaures il y a 65 millions d'années, nous autres êtres humains ne serions sûrement pas là pour en parler. Ce raisonnement peut s'appliquer à l'origine de la vie

L'évolution du cosmos est-elle gouvernée par une succession de hasards? Et si c'est le cas, cela rend-il l'apparition de la vie forcément improbable?

elle-même. Sans la Lune, qui stabilise l'axe de rotation de la Terre, le climat de notre planète serait complètement erratique. Or, la Lune est née de la collision de la jeune Terre avec un corps céleste, Theia. Là encore, c'est le fruit du hasard!

C. C. : Moi, je suis optimiste sur les chances d'apparition de la vie ailleurs. Je suis d'accord avec cette phrase du biologiste Christian de Duve : *"Life is an obligation written in the fabric of the cosmos"* [*"La vie est une obligation inscrite dans la trame du cosmos."* Dans son ouvrage *Poussières de vie*, de Duve se prononce en faveur d'un Univers dans lequel la vie, et même la pensée, sont des "impératifs cosmiques", NDLR]. Dès le big bang, l'évolution de l'Univers ne pouvait que conduire à la vie. Pourquoi? Parce que cette évolution est soumise aux lois de la physique! La vie sur Terre, c'est de la chimie organique. Elle repose sur de petites molécules, toutes les mêmes, dont le squelette est fait de carbone. Elle a aussi besoin d'eau. L'eau est un excellent solvant, mais elle a aussi une excellente capacité calorifique — qui peut protéger les molécules des trop grosses variations d'environnement —, elle absorbe les ultraviolets, et elle reste liquide dans un grand intervalle de température. Bref : les trois éléments les plus importants pour la vie sont l'hydrogène, l'oxygène et le carbone. Or quels sont les trois éléments les plus abondants autour de nous? L'hydrogène, l'oxygène et le carbone. Cela veut dire que la vie a utilisé ce qui était à disposition.

Si les éléments les plus abondants dans l'Univers avaient été totalement différents de ceux que la vie utilise, on pourrait défendre l'idée qu'elle est exceptionnelle, accidentelle. Mais ce n'est pas le cas! On peut même aller plus loin : la vie apparaît sur les planètes, et les planètes sont les restes de la formation des étoiles, qui elles-mêmes naissent par effondrement de nuages moléculaires en cœurs de gaz denses. Pour que ces cœurs se forment, il faut que le gaz se refroidisse jusqu'à 10 K [-263 °C], par rayonnement. Quelles sont les espèces qui s'en chargent? Le carbone et l'oxygène! Bref : l'Univers, avec ses lois, si on lui donne du carbone, de l'oxygène et l'hydrogène, il fabrique la vie. Dans ce sens, je pense que la vie ailleurs est en effet une obligation.



Un fragment de la météorite de Murchinson, tombée le 28 septembre 1969 près du village australien du même nom, et où des dizaines d'acides aminés ont été découverts. © Museums Victoria

J. F. : Mais là, vous défendez l'idée selon laquelle l'Univers est fait pour que la vie puisse exister. Et même, en allant plus loin, le principe anthropique pour lequel l'Univers doit conduire à l'homme! Pour moi, c'est de la téléologie : on donne une intentionnalité à un phénomène purement physicochimique. C'est le même propos que l'*Intelligent Design* : si nous sommes là, êtres pensants, c'est parce que l'évolution était programmée pour ça. En tant que biologiste, ce n'est pas acceptable. Il n'y a pas d'intention derrière notre présence dans l'Univers!

C. C. : Mais je n'ai jamais dit qu'il y avait une intention, pas du tout! Je dis simplement que, les lois de la physique étant déterministes, les processus qui ont conduit à l'apparition de la vie sur Terre ont dû se reproduire ailleurs et souvent. D'ailleurs, je voudrais revenir sur cette histoire de météorite qui a tué les dinosaures. On la brandit partout pour dire combien notre présence est le fruit du hasard. Très bien, sauf qu'il faut quand même bien réaliser que la chute de météorites sur une planète, c'est une conséquence directe du processus de formation des systèmes planétaires. En réalité, ça n'a rien d'exceptionnel.

J. F. : On est quand même passé plusieurs fois tout près d'une extinction totale de la vie sur Terre. Pour un "impératif cosmique", pardon!

C&E : Si la vie était apparue plusieurs fois sur Terre, on pourrait peut-être plus facilement défendre l'idée qu'il



La vie est-elle partout présente dans l'Univers ou reste-t-elle une exception ? Les scientifiques sont encore très partagés sur la question. Les astrophysiciens étant généralement plus optimistes que les biologistes.

© P. Jacquet/OSUG

s'agit d'une conséquence inévitable de l'évolution cosmique. A-t-on des indications à ce propos ?

C. C. : Je ne suis pas une spécialiste, mais c'est une hypothèse qui est envisagée par certains chercheurs.

J. F. : En tout cas, du virus à l'éléphant, tous les êtres vivants fonctionnent de la même manière. Nous avons tous le même code génétique, ce qui montre que nous venons tous d'un ancêtre unique. Unique parce qu'il est le seul à être apparu, ou bien parce qu'il est le seul à avoir survécu ? Personne ne peut répondre à ça. Mais jusqu'à preuve du contraire, la vie est rarissime. On n'en connaît qu'un seul exemple.

C&E : Une petite centaine d'acides aminés a été découverte dans la célèbre météorite de Murchinson, indiquant une synthèse dans l'espace, hors de la Terre. Pour vous Cecilia Ceccarelli, c'est un argument fort en faveur de l'universalité de la vie. Pour vous au contraire, Juan Fontecilla, cela ne nous dit rien sur

l'origine de la vie. Pourquoi donc ?

J. F. : Pour vous répondre, il faut remonter à l'année 1953 et à l'expérience que réalise à cette époque le chimiste Stanley Miller. En soumettant un mélange de méthane, d'ammoniac, d'eau et d'hydrogène à des décharges électriques pendant quelques jours, il parvient à synthétiser des molécules organiques, dont des acides aminés. L'expérience fait beaucoup de bruit, car son mélange est censé reproduire l'atmosphère primitive de la Terre. Tout le monde croit qu'on a fait un pas de géant vers l'explication de l'origine de la vie ! Mais on sait aujourd'hui que l'atmosphère primitive n'avait pas du tout cette composition. Bref, ces acides aminés n'ont rien à voir avec la vie. L'expérience a été reproduite souvent et la conclusion est sans appel : la chimie mise en œuvre n'est pas du tout spécifique, elle n'a pas de rapport direct avec la biochimie. Pour la météorite de Murchinson, c'est la même chose : on y trouve 90 acides aminés différents,

mais seulement cinq ou six ont un intérêt biologique. Et encore ! Dans Murchinson, comme dans l'expérience de Miller, on les trouve sous deux formes stéréochimiques différentes, alors que le vivant, lui, n'en utilise qu'une seule. Que des acides aminés ou des sucres puissent être fabriqués hors de la Terre, ça ne me pose pas de problème. Mais quel rapport avec la vie ? Imaginez qu'une météorite avec ses centaines, ses milliers de molécules, tombe dans l'eau. Comment sont sélectionnées les réactions qui vont conduire à l'apparition d'un métabolisme primordial ?

C. C. : Il y a des réactions chimiques qui sont plus probables, ou bien qui se produisent plus vite que d'autres. Toutes les espèces ne vont pas réagir !

J. F. : Peut-être, mais à mon avis, il y a quand même trop de monde pour qu'une chimie fine comme la chimie du vivant puisse tirer son épingle du jeu. Pour moi, la chimie du vivant doit partir d'un stade beaucoup plus basique, sur Terre, avec des molécules

plus simples que celles que l'on observe dans l'espace. La complexification s'est faite sur Terre, par l'apparition très tôt d'un métabolisme simple. Encore une fois, je pense que la présence de molécules organiques relativement complexes dans l'espace n'a aucun lien direct avec la vie terrestre.

C&E : Vous avez insisté sur le rôle du hasard dans l'évolution, Juan Fontecilla, tandis que vous, Cecilia Ceccarelli, avez mis en avant le déterminisme des lois de la physique. Votre désaccord n'est-il pas le reflet de votre parcours ?

J. F. : Comme l'a écrit Jacques Monod [biologiste et prix Nobel de médecine en 1965, NDLR], ce qui définit complètement l'évolution, c'est le hasard et la nécessité. Le hasard, c'est le mécanisme de mutation. La nécessité, c'est de pouvoir survivre. Je suis complètement d'accord avec ça. L'évolution n'a pas de direction. Elle est, un point c'est tout. Mon problème avec le déterminisme, c'est qu'il implique une capacité à voir l'avenir. Or, je ne crois pas que l'on puisse déterminer quoi que ce soit concernant la vie. La vie, c'est

beaucoup plus compliqué que les lois de la physique où, si je tape dans un ballon, je vais pouvoir déterminer sa trajectoire !

C. C. : C'est vrai que les physiciens sont formés intellectuellement pour trouver des lois. Leur but, c'est de se libérer des détails pour identifier des structures profondes. Quand on tape dans un ballon, en réalité il ne va pas toujours au même endroit. Ça dépend de la façon dont on le frappe, du relief du terrain, du vent, etc. Et pourtant, on peut déterminer une loi générale qui gouverne son mouvement ! Pour la vie, à mon avis, c'est la même chose. La chute d'une météorite, le fait qu'il y ait la Lune ou pas pour stabiliser l'axe de rotation de la Terre, etc. ce sont des détails qui ne doivent pas nous masquer la loi profonde : la vie est une conséquence naturelle de l'évolution de l'Univers. Donc il n'est pas mystérieux qu'elle soit apparue sur Terre et il n'y a aucune raison qu'on ne puisse pas la trouver ailleurs. J'ajoute qu'il y a une différence entre la physique et la biologie : c'est qu'en physique, on fait beaucoup de modélisations, depuis longtemps, alors qu'en biologie — qui traite de

systèmes plus complexes, nous n'en sommes qu'au début. Quand on sera capable de simuler l'évolution de systèmes chimiques complexes, de type prébiotique, on se rendra peut-être compte que la solution la plus probable est l'apparition de la vie. Dans mon esprit, quand Christian de Duve parle d'obligation cosmique (notez en passant que c'est un biologiste !), c'est ça qu'il veut dire : compte tenu des lois de l'Univers, l'apparition de la vie est très probable un peu partout.

C&E : Pensez-vous que l'on découvrira d'abord la vie extraterrestre, ou la façon dont la vie est apparue sur Terre ?

J. F. : Pour un biologiste, ce serait un rêve de débarquer sur une autre planète et pouvoir y étudier une autre forme de vie. Jusqu'à quel point serait-elle différente ? S'appuierait-elle aussi sur les acides nucléiques ? Malheureusement, la chaîne d'événements dans l'apparition de la vie paraît tellement complexe qu'il me semble très difficile qu'elle se soit reproduite souvent. Nous aurons du mal à la découvrir dans l'immensité du cosmos.

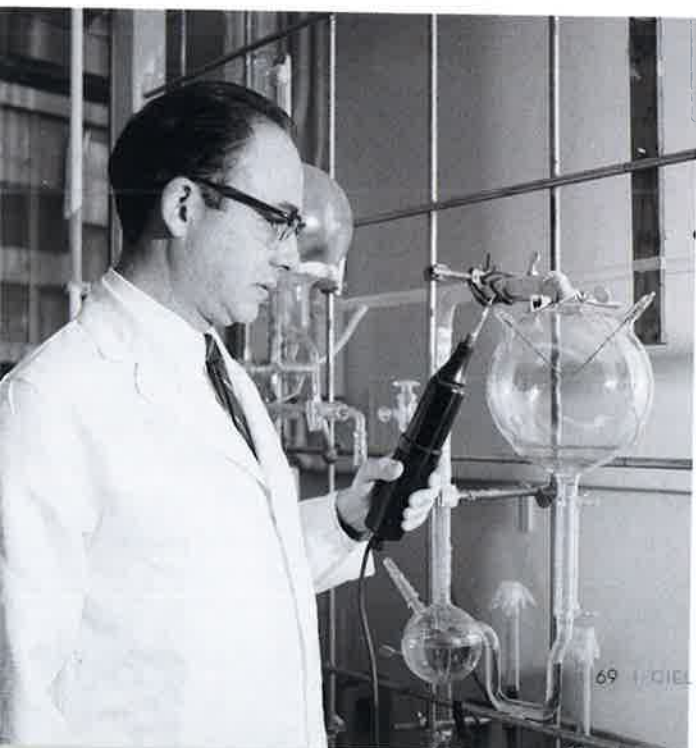
C. C. : Je suis de l'avis contraire. Attention, je ne parle pas de civilisation extraterrestre, je parle bien de microorganismes ! Mais on la trouvera, et probablement bien avant d'avoir compris comment la vie est apparue sur Terre.

PROPOS RECUEILLIS PAR DAVID FOSSÉ

(1) La découverte d'une protéine dans une météorite a été annoncée le 22 février 2020 par trois chercheurs américains. Elle reste toutefois à confirmer.

(2) Voir <https://www.cieletespace.fr/actualites/l-origine-de-la-vie-en-dix-podcasts>

(3) Grenoble est le siège de l'Institut de radioastronomie millimétrique (Iram), qui gère les radiotélescopes avec lesquels on observe, notamment, les molécules interstellaires.



Même si l'on sait aujourd'hui qu'elle ne reproduisait pas les conditions de la Terre primitive, l'expérience de Stanley Miller a véritablement lancé les recherches en chimie prébiotique. DR