

**NATHALIE A.
CABROL**

**À
L'AUBE DE
NOUVEAUX
HORIZONS**



À l'aube
de nouveaux horizons

NATHALIE A.
CABROL

À l'aube
de nouveaux horizons



© Éditions du Seuil, 2023

Le Code de la propriété intellectuelle interdit les copies ou reproductions destinées à une utilisation collective. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite par quelque procédé que ce soit, sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite et constitue une contrefaçon sanctionnée par les articles L335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

In Memoriam



Edmond A. Grin
(26 janvier 1920 - 17 août 2022)

Qui aurait pu imaginer que trente-six ans passeraient si vite. Nous faisons tout ensemble, à tel point que beaucoup aujourd'hui me disent qu'ils ne pouvaient penser à l'un sans penser à l'autre, et ils étaient sûrs que lorsqu'ils en voyaient un, l'autre n'était jamais bien loin. Nous étions une équipe, des âmes sœurs, mariés et meilleurs amis, peut-être tout simplement un seul esprit dans deux corps. Ensemble, nous avons escaladé des montagnes, exploré des déserts, et même Mars ! Nous pouvions aussi regarder l'océan en silence, dans les bras l'un de l'autre, ou le ciel étoilé au sommet des volcans immenses des Andes. Tu as transformé la jeune femme timide que j'étais en aventurière, et souri quand j'ai enfilé ma combinaison pour plonger dans le lac du Licancabur à presque 6 000 mètres d'altitude. Ce jour-là, je t'ai dit « C'est de ta faute ! » et nous avons ri comme des enfants. Je ne sais pas où mon chemin de vie m'emmène à présent, mais où que j'aille, je sais qu'il me ramènera à toi. Photo © Nathalie A. Cabrol

Le 11 juillet 2022, le James Webb Space Telescope (JWST) envoyait ses premières images, pénétrant le mur du temps pour nous faire découvrir l'Univers quelques centaines de millions d'années seulement après sa formation. Avec une merveilleuse ironie cosmique, cette plongée au plus profond de nos origines nous propulse dans l'avenir, un futur où s'annonce une révolution en astronomie, en cosmologie et en astrobiologie – la recherche de la vie dans l'Univers.

JWST arrive après quelques décennies d'exploration spatiale et planétaire au cours desquelles nous avons découvert d'innombrables environnements habitables dans notre Système solaire, pour la vie (simple) telle que nous la connaissons, mais aussi des milliards d'exoplanètes dans notre galaxie, dont certaines sont situées dans la zone habitable de leur étoile parente.

Nous vivons un âge d'or en astrobiologie, le début d'une odyssée fantastique dans laquelle l'essentiel reste encore à écrire mais où nos premiers pas apportent déjà la promesse de découvertes prodigieuses. C'est cette fabuleuse aventure humaine que je souhaite partager avec vous dans ce livre

– les découvertes, bien sûr, mais aussi les questions qui restent aujourd’hui encore en suspens : quelle est l’origine de la vie ? Sommes-nous seuls dans l’Univers ? Ces questions sont aussi vieilles que l’humanité mais nous n’avons jamais été aussi proches de pouvoir y apporter une réponse.

SOMMAIRE

<i>Avant-propos</i>	13
1. Vue d'ensemble	23
2. Étincelles de vie	45
3. Vénus et son voile de secrets	73
4. Des crépuscules bleus	96
5. Rivages planétaires	142
6. Un monde d'inconnus	171
7. De nouveaux horizons	196
8. Révolutions dans le ciel nocturne	228
9. Visions de Tatooine et Mordor	253
10. Échos de vagues cosmiques	286
11. Relier des points bleus	318
12. Paradoxes, paradigmes, et la grammaire de la vie	347
13. Le temps comme miroir cosmique	376
<i>Remerciements</i>	397
<i>Notes et références</i>	401
<i>Lectures complémentaires</i>	407

AVANT-PROPOS

Je suis de cette génération née deux ans à peine après le début du programme Apollo, en 1961. Contrairement à mes parents, voir la Terre depuis l'espace était déjà dans mes gènes. Il m'est aussi naturel de la regarder se lever sur l'horizon d'une autre planète qu'il l'était pour eux de voir la Lune se lever sur l'horizon. J'ai fait de l'astrobiologie, la recherche de la vie dans l'Univers, le but de ma vie, gardant les yeux fixés sur les étoiles tout en explorant des paysages planétaires déjà familiers. À quelques jours de mon vingt-sixième anniversaire, Voyager 2 survola Neptune. La sonde passa à moins de 5 000 kilomètres du pôle Nord de cette autre planète bleue, nous renvoyant des images historiques qui firent la une des journaux dans le monde entier. C'était le point le plus éloigné jamais atteint par l'humanité (même si c'était par le biais d'une sonde robotique). Ce fut le dernier survol de Voyager 2 avant qu'il ne quitte à jamais l'héliosphère bien des années plus tard, le 5 novembre 2018, six ans après Voyager 1. Quand on y pense, à peine plus de soixante ans s'étaient écoulés entre le moment où Spoutnik

avait été mis en orbite autour de la Terre et le moment où les deux Voyager naviguèrent hors des limites du Système solaire – un battement de cils à l'échelle cosmique. L'humanité commençait à peine à prendre conscience de son voisinage planétaire, mais avec une curiosité grandissante.

En 1996, j'ai assisté au premier atelier d'astrobiologie à NASA Ames Research Center, en Californie, où j'étais jeune chercheuse. Deux ans plus tard, c'est là aussi que j'ai vu naître l'institut d'astrobiologie de la NASA (le NASA Astrobiology Institute, ou NAI). Les unes après les autres, les missions montraient que le Système solaire était peuplé de mondes où une vie simple microbienne aurait pu apparaître dans leur passé lointain. Peut-être certains l'étaient-ils encore ? L'astrobiologie est née de ces interrogations. Elle est aujourd'hui au cœur de l'ambition de toutes les nations spatiales. Le NAI est resté basé à NASA Ames jusqu'à la fin de son mandat vingt ans plus tard, et il a aujourd'hui évolué sous la forme de réseaux coordonnés de recherche qui couvrent l'ensemble des grands thèmes de l'astrobiologie.

En 1998, à quelques kilomètres seulement de NASA Ames, je suis entrée dans une salle de conférences de l'institut SETI à Mountain View. C'était un après-midi de fin d'été et mon cœur battait la chamade. De l'autre côté de la table se trouvait l'astronome Frank Drake. Il m'a invitée à m'asseoir et, d'une voix douce, il a engagé la conversation sur mon parcours professionnel et mes recherches. Il m'a posé des questions sur

leur lien avec « l'équation de Drake » et les programmes de la vie dans l'Univers à l'institut, qui s'étendent de l'origine de la vie à la recherche d'intelligence extraterrestre. Christopher Chyba était alors le directeur en charge du Carl Sagan Center, la division de recherche de l'institut SETI où j'avais postulé, mais il était en déplacement cette semaine-là. Ce fut donc Frank qui me fit passer l'entretien et me recruta à un poste de chercheuse à l'institut.

En 2003, je suis devenue membre de l'équipe scientifique d'un programme de recherche dirigé par Christopher Chyba, qui avait été sélectionné et financé par le NAI. J'allais y mener ma propre exploration, qui devint le « Projet des hauts lacs » et marqua le début de mon odyssée dans les Andes où, avec mon équipe, nous essayons de comprendre l'habitabilité planétaire et le type de vie qui a pu exister sur Mars autrefois, et qui existe peut-être encore aujourd'hui. Nous étudions également ses signatures géologiques et biologiques en explorant des « analogues uniques » de la Planète rouge dans des environnements terrestres extrêmes.

Douze ans plus tard, ce fut à mon tour de diriger un projet multidisciplinaire pour le NAI à l'institut SETI. Notre but était de développer des techniques pour l'exploration planétaire capables de détecter des signatures de la vie, ou « biosignatures ». Et c'est aussi en 2015 que je fus nommée directrice scientifique du Carl Sagan Center à l'institut SETI. Ce poste m'a permis de continuer mes recherches sur le terrain avec mon

équipe, tout en m'offrant un environnement et une stimulation intellectuelle à même de favoriser l'élaboration d'une vision stratégique pour la recherche de la vie dans l'Univers dans un institut entièrement dédié à cette quête depuis sa création.

Quand je pense à l'histoire de l'institut SETI, à la présence de Carl Sagan dans son conseil d'administration peu avant sa mort, et à ce que Carl représentait pour l'astrobiologie et bien au-delà, c'est sans aucun doute le plus grand honneur que j'aie jamais reçu. Mais l'une de mes devises dans l'existence est que les titres ne valent que ce que nous en faisons. Fidèle à cet esprit, en prenant mes fonctions, j'ai accroché un portrait de Carl à côté de mon bureau pour m'assurer que ce serait la première chose que je verrais en arrivant le matin. J'ai choisi un portrait en noir et blanc, sur lequel il paraissait un peu songeur mais avait un regard bienveillant et concentré, son menton reposant sur sa main. Au-delà du temps qui passe, il reste pour nous autres, astrobiologistes, une source infinie d'inspiration. C'est aussi un clin d'œil à mon passé, un pont me reliant à mes années en France, quand Carl contribua à consolider ma passion déjà bien réelle pour la recherche de la vie dans l'Univers lors de notre rencontre à Paris en novembre 1986. C'est enfin un rappel constant que, dans ce bureau comme dans la vie, il ne faut pas craindre d'avoir des idées ambitieuses, car « nous jugeons de nos progrès par le courage de nos questions et la profondeur de nos réponses, et notre volonté d'embrasser ce

qui est vrai plutôt que ce qui plaît », comme il l'a écrit. Évidemment, pour être bien sûr de ne pas s'égarer dans la spéculation, cette citation doit être immédiatement suivie par une autre, « des affirmations extraordinaires demandent des preuves extraordinaires », aussi connue sous le nom de « principe de Sagan ». Cette idée, une variation d'autres affirmations formulées en leur temps par de grands penseurs tels que Fournoy, Laplace, Hume ou Jefferson, est une nécessité en science à chaque étape, et elle se doit plus que jamais d'être au cœur de notre quête de la vie dans l'Univers.

Décembre 2016. J'étais debout sur l'estrade d'une des grandes salles de conférences du Moscone Center à San Francisco, où quelques centaines de mes collègues étaient réunis. J'avais le trac. L'American Geophysical Union venait de m'honorer en m'invitant à présenter la conférence « Carl Sagan », un prix annuel récompensant les chercheurs qui incarnent l'intérêt de Carl pour l'astrobiologie et sa passion pour la vulgarisation scientifique. Le prix rend aussi hommage à sa vie et à son rôle de leader dans la création de l'astrobiologie. C'était d'autant plus significatif pour moi que sa remise coïncidait avec deux dates anniversaires importantes. La conférence eut en effet lieu pratiquement trente ans jour pour jour après notre rencontre à Paris, et nous étions à quelques semaines de l'anniversaire des vingt ans de son décès. J'avais aussi été nommée directrice scientifique du Carl Sagan Center de l'Institut SETI seize mois plus tôt.

En guise d'introduction à cette conférence, je décidai donc de parler de notre rencontre de 1986, de l'importance de Carl dans ma vie, mais aussi de la façon dont il continue étrangement de l'influencer même si longtemps après sa mort. Au cours de notre brève rencontre à Paris, il m'avait parlé avec passion de la recherche de la vie dans l'Univers, de résilience, de ne jamais laisser personne dicter ce que je pouvais faire ou qui je pouvais devenir. J'ai souri quand il insista pour que je reste toujours fidèle à la science et aux données plutôt qu'aux opinions, même quand elles vont à l'encontre de l'ordre établi. Il parla pendant un moment de sa propre passion et d'un seul coup, j'avais devant mes yeux le grand Sagan, mais bien mieux encore, je l'avais rien que pour moi.

Je poursuivis ensuite avec ma conférence intitulée « La coévolution de la vie et de l'environnement et la quête astrobiologique ». La présentation était centrée sur l'exploration de Mars car la Planète rouge était à l'époque au cœur de ma recherche, avec un projet financé par le NAI. La conclusion ouvrait sur des considérations plus larges concernant la recherche de la vie dans l'Univers et sur la façon dont l'intelligence artificielle pourrait devenir un outil central de cette science. Je conclus sur l'importance capitale de ramener la notion de coévolution de la vie et de son environnement à notre propre planète et à sa biosphère, la seule que nous connaissions à ce jour. Je soulignai enfin le besoin urgent d'utiliser les technologies de pointe développées

pour l'exploration planétaire afin d'accélérer et de renforcer la surveillance des changements dans l'environnement terrestre et de gérer leurs conséquences pour les générations futures.

La préparation de cette conférence m'amena à réfléchir à ce qui avait changé depuis la vision de Carl des « rivages de l'océan cosmique » développée dans sa série *Cosmos* des années 1980. La réponse est ambiguë : à la fois beaucoup et très peu. Ce qui a changé de façon spectaculaire, c'est sans aucun doute le nombre de missions, le volume de données, la technologie, les systèmes et les instruments dont nous disposons. En seulement quelques décennies, nous avons assisté à des progrès vertigineux appuyés par une innovation constante qui accélèrent de façon exponentielle nos connaissances et la création de nouveaux moyens d'exploration. L'astrobiologie est aussi devenue la discipline officielle dédiée à cette recherche. Depuis les années 1970, la quantité de données accumulées par les missions et leur interprétation appellent une approche multidisciplinaire et holistique. L'astrobiologie fournit cette nouvelle plateforme pour la recherche de la vie dans l'Univers et a révolutionné la façon de faire de la science, en rassemblant divers domaines de recherche, leurs perspectives et leurs méthodes. Cette vision systémique de l'astrobiologie a démontré de nombreuses fois depuis à quel point le tout est infiniment plus puissant que la somme de ses composantes.

Mais il y a aussi le revers de la médaille. Alors que cette exploration nous apporte une

abondance de données, la création de nouvelles structures de pensées se fait à une cadence beaucoup plus lente. La communauté astrobiologique se réunit régulièrement pour élaborer des visions stratégiques, des documents techniques et des enquêtes décennales qui incluent les dernières données, les découvertes les plus récentes, et l'agenda du futur de la science, de la technologie, et de l'exploration de la vie dans l'Univers. Cependant, bien que notre connaissance du cosmos et de son potentiel pour abriter la vie ait été complètement transformée ces quarante dernières années, des questions fondamentales relatives à l'origine de la vie et à sa nature restent aujourd'hui sans réponse. Peut-être qu'une partie du problème réside dans le fait que, dans cette recherche, nous sommes à la fois l'expérience et l'expérimentateur, la vie qui s'interroge sur son origine. Cette relation intime nous ouvre à une perception inconsciente de notre relation avec notre planète et avec l'Univers qui nous entoure, et plus nous avançons, plus la séparation devient floue et plus la peur de nous immerger dans l'immensité de sa profondeur disparaît.

Même si aujourd'hui nous ne savons toujours pas vraiment où cette quête nous emmène, et ce que nous cherchons exactement, ce n'est pas ce qui importe. Les réponses se présenteront au fur et à mesure que nous avançons. L'important, c'est que nous soyons en route, à la fois acteurs et spectateurs de l'odyssée la plus extraordinaire jamais entreprise par l'humanité. Nous sommes

à la recherche de nos origines et d'un écho cosmique qui un jour, enfin, nous révélera que nous ne sommes pas seuls dans l'Univers.

Nathalie A. CABROL
Le 29 septembre 2022



Prise à bord d'Apollo 8 par Bill Anders, cette image emblématique montre la Terre au-delà de la surface lunaire alors que le premier vaisseau spatial avec équipage faisait le tour de la Lune le 24 décembre 1968.
Source : NASA/Bill Anders

CHAPITRE 1

VUE D'ENSEMBLE

Les astronautes décrivent souvent un sentiment d'émerveillement lorsqu'ils regardent la Terre depuis l'espace. Ils l'appellent « l'effet de vue d'ensemble », une expression qui tente de traduire l'impact émotionnel profond provoqué par la vue de notre planète suspendue dans l'obscurité sidérale avec pour seul bouclier protecteur une fine pellicule d'atmosphère. Depuis l'espace, les frontières des États disparaissent. Le tumulte de l'agitation humaine s'évanouit dans un silence assourdissant pour laisser place à une prise de conscience : nous sommes tous à bord du même vaisseau, unis par un même destin. Toute autre considération est futile. La plupart des astronautes reviennent sur Terre avec un sens aigu des responsabilités envers notre environnement et une compréhension accrue de la vulnérabilité de la vie. Nombreux sont ceux qui parlent de leur expérience ; certains deviennent militants. L'effet de vue d'ensemble est peut-être l'héritage le plus profond de notre génération pour celles qui suivront. Elle marque un tournant dans l'histoire de l'humanité, un changement de perspective qui intervient à un moment clé, alors qu'il nous

incombe de décider si nous voulons disparaître dans les abysses du temps ou prendre notre envol dans l'immensité cosmique.

Quelle est notre place dans l'espace ? Sommes-nous seuls dans l'Univers ? D'où vient la vie ? Ces questions sont aussi vieilles que l'humanité. Cependant, notre génération est la première à voir la Terre depuis l'espace et au-delà de son atmosphère. Cette perspective s'accompagne de nouvelles connaissances et de quelques messages en forme d'avertissements, comme celui donné par les premiers astronautes en route vers la Lune qui parlèrent de notre berceau planétaire et du lieu d'origine de l'humanité, de l'indivisibilité d'une biosphère fragile et de notre responsabilité envers elle en tant qu'espèce dominante, révélées alors pour la première fois sous nos yeux.

UN POINT BLEU PÂLE

Il y eut d'autres effets de vue d'ensemble dans les décennies qui suivirent, et leurs messages nous parvinrent de beaucoup plus loin. Le 14 février 1990, Carl Sagan fit orienter la caméra de Voyager 1 vers la Terre. Le vaisseau spatial se trouvait alors à presque 6 milliards de kilomètres de notre planète. Dans une image à jamais immortalisée sous le nom de « Point bleu pâle », la Terre ne représentait à peine qu'un pixel – « un grain de poussière suspendu dans un rayon de soleil ». Le message insistait à nouveau sur la fragilité de notre planète et sur le besoin de protéger « la seule demeure que nous n'ayons jamais connue »,

comme l'affirma Carl Sagan. Elle parlait d'unité et enjoignait notre espèce à cesser de se battre « pour une fraction d'un point ». La mission Voyager nous fournit également un portrait de groupe, première perspective de notre place au sein de notre famille planétaire dans notre voisinage du Système solaire.

Depuis, d'autres sondes spatiales se sont tournées vers la Terre et la Lune, ce duo improbable dans l'océan cosmique. Mais la vision du point bleu pâle restera à jamais la première, le prélude à quelque chose de beaucoup plus grand : une révolution astronomique qui allait se dessiner quelques années plus tard à peine, et s'étendre bien au-delà de notre banlieue galactique. En janvier 1992, les astronomes Aleksander Wolszczan et Dale Frail annoncèrent la découverte de deux planètes en orbite autour du pulsar PSR B1257+12, à quelque 2 300 années-lumière de la Terre. Ils venaient de découvrir les deux premières exoplanètes. En 1995, Michel Mayor et Didier Queloz découvrirent 51 Pegasi b, une exoplanète en orbite autour d'une étoile semblable au Soleil et distante de cinquante années-lumière. Plus de vingt-cinq ans plus tard, des télescopes spatiaux comme Kepler, le Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS), Hubble et maintenant le James Webb Space Telescope (JWST), nous ont permis de répertorier près de 5 200 exoplanètes à ce jour. Certaines sont de type terrestre et une fraction d'entre elles sont situées dans la zone habitable de leurs étoiles parentes. Mais les télescopes spatiaux ne sont pas les seuls à participer à cette révolution. Les instruments au sol ont atteint un tel

degré d'avancement technologique qu'ils contribuent aussi de manière critique à ces découvertes grâce à l'imagerie directe et à la spectroscopie. Dans leur champ de vision, ces mondes lointains n'occupent souvent guère plus d'un pixel, tout comme notre point bleu pâle dans la caméra de Voyager 1 autrefois.

L'effet de vue d'ensemble, où qu'il se produise, correspond à un changement de perspective à partir duquel aucun retour en arrière n'est plus possible. Copernic a montré il y a longtemps que la Terre n'est ni au centre de l'Univers, ni au centre du Système solaire. Harlow Shapley et Swan Leavitt ont démontré que le Système solaire n'occupe aucune place particulière dans notre galaxie – il est simplement niché au cœur du bras d'Orion dans la Voie lactée, à 27 000 années-lumière de son centre, dans la banlieue galactique. Notre Soleil est une étoile relativement commune, située dans une galaxie propulsée à deux millions de kilomètres par heure dans un Univers visible qui compte peut-être 125 milliards de ces îles cosmiques, à plus ou moins quelques milliards près. Dans cette immensité, la mission Kepler nous a appris que les systèmes planétaires sont la règle et non pas l'exception.

SEULS DANS L'UNIVERS ?

Et c'est ainsi qu'en à peine un quart de siècle, nous nous sommes retrouvés à explorer un Univers peuplé d'autant de planètes que d'étoiles. Pourtant, en regardant haut et loin dans ce qui

semble être un océan infini de possibilités, les seuls échos que nous ayons reçus de nos explorations jusqu'à présent sont des paysages planétaires stériles et un silence assourdissant. Sommes-nous les seuls invités à la table cosmique ? Peut-être. En tant que scientifique, je ne peux pas entièrement écarter cette hypothèse, mais c'est très improbable et ce serait définitivement « un gâchis terrible d'espace » (Carl Sagan) – pour plusieurs raisons.

Pour commencer, les composantes élémentaires (les briques) de la vie que sont le carbone, l'hydrogène, l'azote, l'oxygène, le phosphore et le soufre sont communes dans l'Univers. Ce n'est pas par hasard si elles servent de fondation à notre biologie. Ce sont les poussières d'étoiles dont parlait Carl Sagan, ces poussières qui composent tout ce que nous connaissons, que ce soit l'Univers, le corps humain ou « les tartes aux pommes », comme il s'amusait à le préciser. On trouve des molécules organiques et des substances volatiles à la surface de Mars, dans les geysers d'Encelade (la petite lune de Saturne), dans la stratosphère de Triton et dans les comètes. Nous en avons également découvert dans des astéroïdes, sans oublier les planètes naines Cérès et Pluton, pour ne citer que quelques exemples. Bien plus loin encore, près de 200 types de molécules organiques complexes prébiotiques (les précurseurs de la vie) ont été détectés dans des nuages interstellaires proches du centre de notre galaxie. Certaines d'entre elles pourraient jouer un rôle dans la formation des acides aminés – les éléments constitutifs de la vie telle que nous la connaissons. Certes, les molécules organiques ne sont pas la vie, mais ce

sont les éléments de base que la vie utilise pour sa charpente de carbone et d'hydrogène, et elles sont absolument partout.

Ce nombre incalculable de possibilités ajoute à la probabilité d'une abondance de vie dans l'Univers. Une simple extrapolation des données de la mission Kepler sur le nombre d'exoplanètes existant uniquement dans notre galaxie suggère que des milliards de planètes de type terrestre pourraient être situées dans la zone habitable d'étoiles semblables au Soleil. Si même une seule planète sur un milliard a développé un type de vie complexe et intelligent, notre galaxie pourrait être peuplée d'une dizaine de civilisations avancées. Même s'il n'y en avait qu'une pour cent galaxies, le total s'élèverait à quelques milliards dans l'Univers. Et, comme la probabilité de distribution dans la nature prédit qu'il existe plus de flaques d'eau que de grands lacs, plus de petites collines que de chaînes de montagnes, plus de petites planètes que de grandes et plus de vie simple que de vie complexe, il s'ensuit qu'en toute probabilité, l'Univers abonde de planètes abritant une vie simple microbienne. Ce qui précède est un raccourci évident, mais c'est une conclusion qui n'est pas déraisonnable, et plusieurs scénarios sont envisageables.

Peut-être la Terre n'est-elle pas représentative de la vitesse à laquelle la vie se développe ailleurs dans l'Univers. Peut-être ne sommes-nous qu'une version de biologie relativement lente. Après tout, il a fallu près de 80 % de l'évolution géologique de notre planète pour que la vie atteigne un stade complexe. Mais si nous regardons les choses un

peu différemment, peut-être sommes-nous, au contraire, un exemple de vie placée sur une voie express. Aujourd'hui, des études semblent indiquer que la vie aurait pu apparaître très rapidement, un peu moins de 200 millions d'années après le refroidissement de la croûte terrestre. Dans les faits, tout est relatif et dépend du type de vie auquel nous faisons référence. Notre connaissance est encore très imparfaite, et elle l'est en particulier parce que nous manquons de données pour ces temps géologiques reculés, la tectonique des plaques et l'érosion ayant détruit une grande partie des roches de cette époque. Il est aussi possible qu'une partie de la réponse à cette question se trouve au-delà de notre planète, et que la vie soit le résultat d'un processus générationnel associé à la formation d'étoiles spécifiques – dans notre cas, des étoiles ressemblant au Soleil.

Notre galaxie s'est formée il y a environ 13,6 milliards d'années, soit à peine 200 millions d'années après le Big Bang, mais des étoiles comme le Soleil ne furent pas produites immédiatement dans cet Univers jeune. Les astronomes pensent aujourd'hui que les étoiles les plus anciennes (connues sous le nom de « population III ») étaient chaudes, massives et lumineuses, et avaient une durée de vie courte, de deux à cinq millions d'années. Ces étoiles formées très tôt dans l'Univers n'auraient pratiquement pas eu de composés métalliques (des éléments autres que l'hydrogène et l'hélium). Leur existence est demeurée hypothétique pendant longtemps, seulement déduite d'observations indirectes d'une galaxie découverte par effet de lentille gravitationnelle dans une région éloignée

de l'Univers. Mais l'analyse récente d'une galaxie lointaine faite à partir du télescope Gemini North paraît confirmer leur existence passée et pourrait indiquer que ces étoiles titanesques avaient une masse jusqu'à 300 fois plus importante que celle de notre Soleil !

La population II, plus récente, était pauvre en métaux et distribuée entre le renflement proche du centre de notre galaxie et son halo. La destruction des étoiles de population II produisit les éléments plus lourds, ceux qui sont actuellement utilisés par la vie telle que nous la connaissons.

La population I, des étoiles riches en composantes métalliques, est la plus jeune des populations stellaires. Notre Soleil en fait partie, et les éléments biogéniques (les éléments qui font la vie sur Terre) sont aujourd'hui abondants. Ils ont été produits par la disparition des générations d'étoiles qui l'ont précédé, à l'exception du phosphore, qui aurait été incorporé à la Terre pendant la période de bombardement intensif qui accompagna la formation de notre planète. Sa transformation chimique en fit un composant structural essentiel de notre code génétique et du métabolisme.

Il semble ainsi que les briques de la vie aient été produites il y a très longtemps. Mais si la vie s'est développée sur Terre et, qui sait, ailleurs, c'est peut-être parce qu'elles sont devenues suffisamment abondantes avec la population I d'étoiles plus récentes comme notre Soleil. Si c'est le cas, la vie pourrait être associée à un phénomène de génération et à des étoiles spécifiques nées à un moment particulier dans l'histoire de l'Univers. D'autre part, ces éléments biogéniques sont si

anciens qu'ils ont connu une histoire chimique longue et complexe avant d'être incorporés dans la biochimie terrestre, ce qui pourrait être une autre forme d'aspect générationnel de la vie. Nous ne savons toujours pas aujourd'hui si cette histoire a joué un rôle direct ou indirect dans l'origine de la vie sur Terre. Mais si la vie telle que nous la connaissons est le résultat d'un processus générationnel, il se pourrait alors que l'Univers commence seulement à se peupler de berceaux planétaires vivants dont la structure biochimique ne nous serait pas complètement étrangère.

LA COÉVOLUTION, UN PRINCIPE ESSENTIEL

Cette hypothèse ne prend en compte que la vie telle que nous la connaissons et les planètes semblables à la Terre comme les seuls mondes ayant le potentiel de développer la vie. Mais rien, à ce stade, ne nous permet d'affirmer que l'origine de la vie se limite à ces critères. Des décennies d'exploration dans l'espace et dans des environnements terrestres extrêmes ont élargi, plutôt que réduit, nos horizons de recherche. Ils nous ont aidés à affiner notre compréhension de l'habitabilité planétaire et des habitats possibles pour la vie. Ils ont également souligné le rôle d'un concept fondamental en astrobiologie : la coévolution de la vie et de son environnement.

L'évolution de la vie et celle de l'environnement sur Terre sont étroitement liées et inséparables. Aujourd'hui, nous tenons cette conception pour acquise, mais cela n'a pas toujours été le cas.

Il y a trois siècles à peine, on pensait encore que l'environnement se maintenait de façon dynamique au cours du temps et que les espèces étaient adaptées une fois pour toutes. Puis, au XIX^e siècle, le naturaliste Charles Darwin affirma que l'environnement était en constante évolution, obligeant la vie à s'adapter ou à disparaître, les organismes les mieux adaptés réussissant à survivre et à se reproduire. C'est la fameuse « loi du plus fort ». Aujourd'hui, nous comprenons que les changements de l'environnement et de la vie sont directionnels et interdépendants. En d'autres termes, les modifications dans l'environnement accompagnent les changements dans l'histoire de la vie, soit en tant que causes, soit en tant qu'effets, et ils se produisent à toutes les échelles de l'espace et du temps.

À une grande échelle temporelle, l'habitabilité de notre planète est étroitement liée à l'activité solaire, qui fut variable dans le temps. Notre étoile s'est formée il y a 4,6 milliards d'années et a connu une enfance troublée avant d'entrer dans sa séquence principale. Cette période, appelée « phase T-Tauri », fut marquée par des vents stellaires intenses qui soufflèrent pendant quelques millions d'années. Aujourd'hui, le Soleil en est environ à la moitié de son existence. Pendant l'Archéen, il y a 3,8 à 2,5 milliards d'années, sa luminosité n'aurait pu correspondre qu'à 75 % de celle d'aujourd'hui. En théorie, les températures auraient été trop basses pour permettre à l'eau de demeurer liquide à la surface de la Terre (et l'eau est le solvant essentiel dans le développement de la vie). Pourtant, les premiers fossiles prouvent que

malgré tout, la vie prit racine. L'une des raisons possibles est qu'à cette époque, notre planète avait moins de masses continentales qu'aujourd'hui. Des étendues océaniques plus vastes auraient pu absorber plus de lumière solaire et stocker plus d'énergie, compensant ainsi un Soleil plus faible. L'atmosphère de l'Archéen était également enrichie en dioxyde de carbone et en méthane, deux puissants gaz à effet de serre capables de maintenir la température de surface entre 0 et 40 °C.

En revanche, vers la fin de sa vie, dans près de 7 milliards d'années, le Soleil entrera dans une phase de géante rouge. Son enveloppe s'étendra alors au-delà de l'orbite de la Terre, peut-être jusqu'à celle de Mars. Mais la vie sur Terre commencera à faire face à de sérieux problèmes bien avant que son étoile ne l'incinère. Au fur et à mesure que le Soleil avance en âge, sa luminosité augmente de 10 % à chaque milliard d'années qui passe. Ce processus entraîne des changements dans la zone habitable du Système solaire, définie comme une région où l'eau peut rester liquide à la surface d'une planète. Une augmentation de 10 % signifie que les températures deviendront trop élevées pour maintenir l'eau liquide au cours du prochain milliard d'années. Les océans commenceront à s'évaporer, entraînant l'accumulation de davantage de vapeur d'eau dans l'atmosphère, et la formation d'un effet de serre qui accélérera la hausse des températures, déclenchant encore plus d'évaporation. Notre planète sera alors confrontée à l'emballement de cet effet de serre auquel la vie finira par ne plus pouvoir s'adapter. Plus proche

du Soleil que la Terre, Venus a déjà fait face à un tel scénario.

Un milliard d'années, c'est à la fois loin dans le futur et très peu de temps à l'échelle géologique. Il suffit de penser que l'odyssée de la vie sur Terre est déjà vieille de quatre milliards d'années, soit environ 80 % de son temps de résidence possible sur notre planète. Pour l'instant, l'énergie solaire permet de la maintenir, mais elle n'est pas la seule. La Terre elle-même produit une gamme de sources d'énergie variées, y compris les énergies géothermique et géochimique, l'oxygène et la radiolyse, cette dernière produisant de l'hydrogène et des oxydants que certains microbes utilisent comme nutriments. Ces sources d'énergie jouent un rôle important dans la diversification et la complexité des organismes vivants. Avec le temps, alors que la vie se développe, se diversifie et devient plus complexe, l'inventaire organique de la Terre change et transforme le cycle du carbone, le climat, les écosystèmes et le niveau d'oxygène dans l'atmosphère. C'est ainsi que les changements dans la biodiversité sont essentiels à l'évolution des cycles géochimiques de notre planète. Les mutations sont une partie essentielle de ce processus. En modifiant le code génétique des organismes, elles sont une condition indispensable à l'évolution de la vie. Dans la plupart des cas, ces mutations apparaissent spontanément sans qu'aucune cause précise ne puisse être identifiée. Et ainsi, en façonnant la diversité de la vie, elles déterminent également l'impact de la biodiversité sur l'environnement et sur l'habitabilité planétaire par le biais de leur rôle dans les cycles biogéochimiques.

D'autres exemples de modification de l'environnement par la vie marquent les deux extrémités de l'échelle temporelle de l'évolution, chacune avec des répercussions à l'échelle planétaire. Lorsque la Terre s'est formée, son atmosphère manquait d'oxygène libre. Il y a environ 2,45 milliards d'années, la photosynthèse apparut chez les cyanobactéries, qui utilisèrent la lumière du Soleil et le dioxyde de carbone pour produire du glucose et libérer de l'oxygène dans l'atmosphère. Il fallut 200 millions d'années supplémentaires pour que l'oxygène produit par les cyanobactéries s'y accumule. C'est ainsi que l'air que nous respirons aujourd'hui est le résultat de l'une des transformations les plus dramatiques de l'environnement par la vie. De nos jours, nous sommes l'illustration la plus visible de ce processus. En raison de l'activité humaine, le niveau de dioxyde de carbone dans l'atmosphère est en train de battre un record datant du Pliocène, il y a trois millions d'années. La concentration de méthane a plus que doublé depuis l'époque préindustrielle. L'augmentation des gaz à effet de serre a pour résultat des températures de surface plus élevées (c'est le réchauffement climatique) et des changements dans l'habitabilité de notre planète à l'échelle globale, dont la conséquence est la perte d'innombrables espèces et une grave altération des écosystèmes. Par une bien triste ironie, l'espèce la plus avancée de notre planète est en train de couper la branche sur laquelle elle est assise, détruisant chaque jour, sciemment, l'environnement propice à son essor et à son développement.

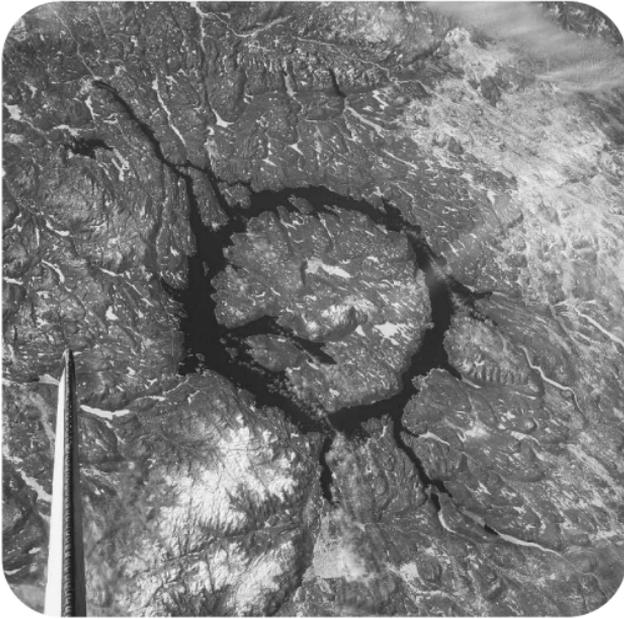
CYCLES NATURELS ET MENACES COSMIQUES

Les cycles naturels, l'environnement, les caractéristiques physiques et chimiques de la Terre furent initialement déterminés par la composition des poussières, des gaz et des glaces du disque protoplanétaire dont elle est issue, ainsi que sa distance au Soleil et d'autres paramètres astronomiques. Ici, trois cycles jouent un rôle fondamental dans l'évolution de l'habitabilité de notre planète : l'excentricité, l'obliquité et la précession. Le premier décrit la déviation de l'orbite de la Terre par rapport à un cercle parfait ; le second est l'inclinaison de l'axe de la Terre perpendiculairement au plan de son orbite (l'écliptique) ; et le troisième décrit l'oscillation de la Terre due aux effets de marées engendrés par la gravité du Soleil et de la Lune. Ces cycles sont connus sous le nom de « cycles de Milankovitch » (du nom du physicien serbe qui développa cette théorie).

Individuellement et collectivement, ces cycles naturels influencent le climat sur des dizaines de milliers d'années, entraînant des périodes glaciaires et interglaciaires. Ils sont parfois perturbés par des forces extérieures et des accidents qui transforment l'environnement et la vie pendant quelques années ou plusieurs millions d'années. Ils peuvent être d'origine cosmique, comme les astéroïdes et les comètes qui ont régulièrement frappé notre planète tout au long de son histoire et ont affecté l'évolution de la vie à plusieurs reprises. Quand nous observons l'histoire des impacts sur Terre au cours des 260 derniers millions d'années, un pic apparaît tous les 27,5 millions

d'années, qui semble bien s'aligner avec un cycle connu d'extinctions en masse. Cinq des six plus grands cratères d'impact identifiés au cours de cette période, y compris celui qui contribua à l'extinction des dinosaures, ont été formés dans le même laps de temps que ces extinctions. Certains y voient une relation de cause à effet car tous les 27,5 millions d'années, le Système solaire traverse le plan médian dense de la Voie lactée. Il est alors possible que des interactions gravitationnelles expulsent des comètes du nuage de Oort, où elles résident normalement, et les envoient sur une trajectoire de collision avec les planètes intérieures. Des étoiles vagabondes passant près du nuage de Oort pourraient avoir le même effet mais avec beaucoup moins de prévisibilité.

Récemment, seuls des objets de taille relativement faible nous ont surpris. Malgré tout, l'explosion aérienne de Tcheliabinsk, le 15 février 2013, et les débris d'un objet mesurant entre 15 et 20 mètres de long ont suffi à faire des ravages dans toute la ville. Le 30 juin 1908, l'évènement de la Toungouska fut également attribué à une explosion aérienne d'un bolide de 100 à 200 mètres de diamètre qui traversa l'atmosphère terrestre à environ 75 000 km/h, détruisant 80 millions d'arbres dans un rayon de 20 kilomètres et provoquant des dégâts sur une centaine de kilomètres à la ronde. La puissance de l'explosion fut estimée à l'équivalent de dix à quinze mégatonnes de TNT, soit mille fois la puissance de la bombe d'Hiroshima, mais elle se produisit haut dans l'atmosphère terrestre et ne laissa aucun cratère au sol.

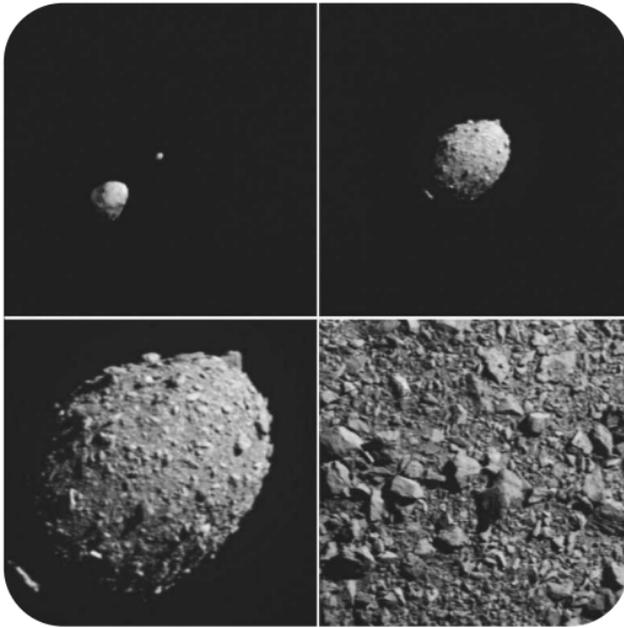


Cratère de Manicouagan (Québec, Canada). Ce grand lac annulaire marque l'emplacement d'un cratère d'impact de 100 kilomètres de diamètre. Formé il y a près de 212 millions d'années lorsqu'un astéroïde frappa la Terre, le cratère a depuis été érodé par de nombreuses avancées et reculs des glaciers. Le réservoir est drainé par la rivière Manicouagan, qui s'écoule du réservoir et se jette dans le Saint-Laurent, à près de 483 kilomètres au sud. Source : NASA, STS009-048-3139. Image prise durant la mission STS-9 de la navette Columbia (décembre 1983).

Ces évènements sont une constante dans l'histoire de notre planète. Il n'y a aucun doute sur le fait que d'autres impacts surviendront dans le futur. Le tout est de pouvoir s'y préparer et, dans ce domaine, il y a des bonnes et des mauvaises nouvelles. La bonne nouvelle est que plus la dimension des astéroïdes ou des comètes est

importante, moins ils sont nombreux et moins les risques d'impact sont fréquents. La mauvaise nouvelle est qu'il en suffit d'un seul pour déclencher une extinction en masse contre laquelle nous ne sommes pas encore bien préparés. Nous connaissons déjà plus de 18 000 objets géocroiseurs. Leur orbite autour du Soleil les amène près de la Terre et les rend donc potentiellement dangereux. L'un d'entre eux est l'astéroïde Toutatis, d'un diamètre de 2,5 kilomètres. Quant à Apophis, 365 mètres de diamètre, il devrait passer à environ 30 000 kilomètres de la Terre le 13 avril 2029, plus près que beaucoup de nos satellites géostationnaires. Et pour ceux qui sont superstitieux, oui, ce sera bien un vendredi.

Comprendre et modéliser les trajectoires de ces objets, caractériser leurs dimensions, leur forme, leur masse, leur composition et la dynamique de leur rotation, est essentiel pour nous aider à prédire les risques qu'ils représentent et nous donner le temps de réagir. C'est pourquoi de nouvelles initiatives ont été prises pour développer un programme de défense planétaire de détection et de surveillance des objets géocroiseurs qui constituent une menace pour la Terre, ainsi que d'anticiper des solutions (destruction avant impact ou modification de leur trajectoire). La mission DART (Double Asteroid Redirection Test) de la NASA nous a offert un premier aperçu des possibilités dans ce domaine. Elle avait pour but de comprendre comment dévier des astéroïdes en faisant s'écraser une sonde spatiale sur Dimorphos, une petite lune en orbite autour du géocroiseur Didymos, que la mission atteignit le 26 septembre 2022. L'impact lui-même



L'approche de DART à Dimorphos. Avec une précision absolue, la sonde a frappé de plein fouet un objet de 170 mètres de diamètre situé à dix millions de kilomètres de la Terre ! La séquence d'images montre DART à environ 10 minutes de l'impact. Didymos et sa petite lune Dimorphos sont clairement visibles (en haut à gauche) ; Dimorphos couvert d'éjecta, une texture de surface qui n'est pas sans rappeler celle de Bennu et Ryugu, deux astéroïdes explorés par les missions Osiris-Rex (NASA) et Hayabusa-2 (JAXA) (en haut à droite) ; l'approche finale (en bas à gauche) et la dernière image de la surface avant l'impact (en bas à droite). La sonde parcourut les dix derniers kilomètres en une seconde ! Source : NASA/Johns Hopkins University APL

fut un succès, la sonde frappant de plein fouet, et avec une précision absolue, le petit astéroïde de 170 mètres situé à 10 millions de kilomètres de la Terre. La collision fut enregistrée par LICIACube,

8. <i>Révolutions dans le ciel nocturne</i>	228
Vers un pluralisme cosmique	229
Des points dans la nuit, ou comment détecter des exoplanètes	232
Premières détections	238
Des observatoires dans le ciel	242
La révolution Kepler	244
De nouvelles missions exaltantes	247
9. <i>Visions de Tatooine et Mordor</i>	253
Des exoplanètes variées et toujours plus nombreuses	253
Les planètes vagabondes	259
Quand la réalité rencontre la fiction	264
En quête d'une deuxième Terre	269
TRAPPIST-1	273
L'intelligence artificielle au service de la détection des exoplanètes	276
La vision de Carl Sagan	279
10. <i>Échos de vagues cosmiques</i>	286
À la recherche de vie complexe : l'équation de Drake	288
Les candidats aux civilisations technologiquement avancées	297
Le paradoxe de Fermi	304
La Terre rare	307
Hypothèses radicales	313
11. <i>Relier des points bleus</i>	318
Scénarios de civilisations superintelligentes ...	318
Les projets SETI	324
Sonder l'océan cosmique à la recherche des signaux	334
À propos des phénomènes aériens non identifiés	338

12. <i>Paradoxes, paradigmes, et la grammaire de la vie</i>	347
Sandwich en main	348
La plomberie de la vie	352
Des définitions controversées	359
Artificiel et vivant ?	364
Intelligence artificielle, transhumanisme et dilemmes éthiques	368
Il n'y a pas de hasard	372
13. <i>Le temps comme miroir cosmique</i>	376
Vers quelle destinée ?	377
Corriger la trajectoire	381
Interstellaires	388
Remerciements	397
Notes et références	401
Lectures complémentaires	407