

HOMO SAPIENS INFORMATICUS chronique de Gilles Dowek

Aplatir ou applatir ?

Avec le Web et les moteurs de recherche, tout un chacun pourrait faire des mesures lexicographiques. L'apprentissage de l'orthographe en bénéficierait.



Les enfants apprennent dans les dictionnaires que l'amphitryon prodigue des *cuisseaux* de veau mais des *cuissots* de chevreuil. Ils s'interrogent parfois sur les raisons d'être de telles particularités orthographiques. Les lexicographes, qui écrivent ces dictionnaires, avancent d'ordinaire deux types de raisons, les unes liées au passé de la langue, les autres à son présent.

Raisons liées au passé : les dictionnaires perpétuent une tradition et rappellent, par l'orthographe, l'étymologie des mots. Ainsi, contrairement à l'italien qui écrit *farmacia*, le français écrit *pharmacie*, parce que ce mot s'écrivait ainsi par le passé et pour rappeler qu'il vient du grec *φάρμακον*.

Raisons liées au présent : les dictionnaires ne font que décrire l'orthographe la plus courante des mots – ils indiquent l'orthographe *pharmacie*, et non *farmacie*, parce que c'est ainsi que nous écrivons habituellement ce mot.

Les raisons liées à l'histoire de la langue sont difficiles à soutenir, car, loin d'être des bastions de conservatisme, les dictionnaires évoluent très rapidement, pour suivre les transformations de la langue. Si le mot *dictionnaire*, par exemple, prend deux *n*, ce n'est sans doute pas par respect de la tradition, puisque le latin médiéval *dictio-narium* n'en prenait qu'un seul.

De ce fait, on présente souvent les dictionnaires comme étant d'abord des descriptions de l'état de la langue telle qu'elle

est utilisée. Le *Petit Robert* se considère ainsi comme un « observateur objectif » de la langue. Si la lexicographie est, à l'instar de l'astronomie, une science d'observation, nous devons alors nous poser la question du meilleur instrument à utiliser pour observer objectivement la langue.

La récente constitution du plus grand corpus de l'histoire, le Web, et la mise à disposition de tous d'outils permettant de le sonder changent la situation, car la lexicographie peut désormais s'automatiser, au moins partiellement.

Le Web et les outils permettant de le sonder changent la situation : la lexicographie peut désormais s'automatiser.

Selon les dictionnaires, les verbes *apostropher*, *aplanir*, etc. prennent un seul *p*. Comme attendu, le moteur de recherche *Google* nous apprend que seulement 1 % des occurrences de *apostropher*, dans les pages web en français, comportent deux *p*, et ce taux reste faible pour *aplanir*, *apercevoir* et *apaiser*. Mais il est de 7 % pour *apitoyer*, de 8 % pour *apeurer* et de plus de 10 % pour *aplatir*.

On peut en déduire que 10 % des utilisateurs du verbe *aplatir* se trompent, ou alors que les dictionnaires se trompent quand ils affirment que ce verbe n'a qu'une orthographe courante. Pour comparaison, le *Petit Robert*

donne deux orthographes pour le mot *chariot*, mais moins de 3 % des occurrences du mot *chariot* sur le Web comportent deux *r*.

Pour interpréter ces mesures, il faut se rappeler que les théories sur le comportement humain modifient souvent ce comportement. En particulier, de nombreux scripteurs utilisent un dictionnaire ou un correcteur orthographique, qui influe sur leur orthographe. Si, par exemple, la moitié des scripteurs se servent d'un correcteur orthographique, il s'ensuit que plus de 20 % de ceux qui n'en utilisent pas écrivent *aplatir* avec deux *p*. Il serait d'ailleurs intéressant d'observer l'évolution de ces mesures, si jamais les dictionnaires et les correcteurs orthographiques admettaient demain deux orthographes pour le verbe *aplatir*.

Cette popularisation de la lexicographie suggère aussi de nouvelles façons d'enseigner l'orthographe. Quand un élève demande à son professeur quelle est l'orthographe correcte, c'est-à-dire la plus courante, d'un mot, l'enseignant, au lieu d'une réponse dogmatique, pourrait, avec l'humilité d'un professeur de sciences, lui proposer de faire lui-même la mesure. L'apprentissage de l'orthographe étant la matrice de beaucoup d'apprentissages futurs, c'est tout notre rapport à la connaissance qui en serait changé. ■

Gilles DOWEK est chercheur à l'Inria et membre du conseil scientifique de la Société informatique de France.

CABINET DE CURIOSITÉS SOCIOLOGIQUES par Gérald Bronner



L'extension du domaine de la crédulité

Grâce à la rapidité de la circulation des messages sur Internet, les théories du complot prolifèrent.

Les attentats de janvier 2015 en France ont bouleversé très au-delà de nos frontières. Ils ont suscité une masse de commentaires – un des symptômes de l'importance de l'événement. L'un des aspects qui ont frappé les commentateurs a pu paraître plus anecdotique, étant donné la gravité des faits, mais il n'en est pas moins révélateur des grandes transformations de l'époque : le jour même des attentats, certaines théories du complot ont commencé à se répandre.

Par théorie du complot, il faut entendre simplement une interprétation des faits qui conteste la version officielle. Ainsi, on a pu lire sur les réseaux sociaux et certains sites coutumiers de ce type de mythologies que ces horribles crimes n'ont certainement pas été commis par ceux que l'on a accusés et certainement pas pour les raisons qu'on leur a attribuées. Pour étayer leur croyance, des internautes ont mis en exergue des faits qui leur paraissaient étranges. Par exemple, les rétroviseurs de la voiture que conduisaient les auteurs de la tuerie à *Charlie Hebdo* avaient changé de couleur sur certaines photos, François Hollande était arrivé si vite sur les lieux que cela prouve qu'il savait ce qui allait se passer, etc.

Aucun de ces arguments n'est solide, mais grâce à cette intelligence en essaim qui caractérise le travail collaboratif sur Internet, ils deviennent rapidement nombreux et intimidants. Ainsi, de nombreux sites relayaient, après quelques jours, des dizaines de points suspects selon eux. Prenons l'un d'entre eux au hasard : le chan-

gement de couleur des rétroviseurs. Il ne s'agit pas là d'un grand mystère, certains observateurs ont fait remarquer à juste titre que les rétroviseurs étant chromés, leur couleur apparente pouvait changer selon la luminosité extérieure et l'angle de prise de vue.

Internet rend plusieurs services à la crédulité contemporaine. D'abord, il dérègle le marché de l'information et il permet aux mythologies conspirationnistes de se



GRÂCE À INTERNET, les théories conspirationnistes fleurissent, et pas seulement pour des événements de grande importance tels que le 11-Septembre.

répandre facilement, ce qui n'était pas le cas auparavant. Ensuite, par le jeu de la collaboration des croyants motivés, il offre à ces mythologies une forme de plus en plus performante et intimidante, que l'on pourrait appeler un « millefeuille argumentatif ».

Enfin, et c'est un point essentiel, il accélère la diffusion de ces histoires qui, auparavant, ne se déployaient que par le bouche à oreille. Or ce vieux média a ses contraintes. D'une part, il s'appuie sur la mémoire humaine qui

est limitée ; d'autre part, il lui faut beaucoup de temps pour diffuser ses messages. Ainsi, quand le récit conspirationniste évoque des événements qui n'intéressent plus personne au moment où il se diffuse, il tend naturellement à disparaître par la sélection qu'exerce l'économie de l'attention.

Avant l'apparition d'Internet, seuls les événements très importants ou médiatiques (a-t-on marché sur la Lune ? Qui a assassiné le président Kennedy ? Comment Marilyn Monroe est-elle morte ? Etc.) pouvaient fournir des mythes du complot susceptibles de survivre à une telle sélection. Grâce à la célérité de l'information sur la Toile, l'imaginaire peut à présent se saisir d'événements plus modestes.

Ainsi, la mort du PDG de *Total*, Christophe de Margerie, ou celle de l'ancien directeur de *Sciences Po*, Richard Descoings, ont donné lieu à leur cortège de théories du complot, ce qui n'aurait pas été le cas avant l'ère d'Internet. On assiste donc à une extension du domaine de la crédulité.

Cette extension est fascinante dans la mesure où elle coexiste avec un progrès constant de la connaissance scientifique et une hausse du niveau d'études. Mais elle est aussi inquiétante parce que toutes ces fables peuvent s'agréger pour former un méta-récit inspiré par la méfiance, voire la haine de certains groupes ou communautés, ce qui ne présage rien de bon pour le vivre-ensemble. ■

Gérald BRONNER est professeur de sociologie à l'Université Paris-Diderot.



Offre PASSION

POUR LA
SCIENCE

Le magazine mensuel
Pour la Science (12 n^{os})



Le hors-série trimestriel
Dossier Pour la Science (4 n^{os})

76€ seulement
1 AN - 16n^{os}

**VOS AVANTAGES
ABONNÉ**

- ✓ 26 % d'économie et plus par rapport au prix en kiosque
- ✓ L'envoi des magazines en avant-première
- ✓ La garantie de ne manquer aucun numéro

BULLETIN D'ABONNEMENT

À compléter et à retourner, accompagné de votre règlement, dans une enveloppe non affranchie à : Groupe Pour la Science Service abonnements - Libre réponse 90 382- 75 281 Paris cedex 06

POUR LA
SCIENCE

OUI, je m'abonne à Pour la Science (12 n^{os}/an) + Dossier Pour la Science (4 n^{os}/an) :

☐ 1 an • 16 numéros • 76€ au lieu de 102,70€

26 % de réduction !

Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 16€ - autres pays 35€.

☐ 2 ans • 32 numéros • 143€ au lieu de 205,40€

+ de 30 % de réduction !

Tarif valable uniquement en France métropolitaine et d'outre-mer. Pour l'étranger, participation aux frais de port à ajouter : Europe 34€ - autres pays 72€.



Le mensuel

Le trimestriel

J'indique mes coordonnées :

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

CP : _____ Ville : _____

Pays : _____ Tél. : _____

Pour le suivi client (facultatif)

Je choisis mon mode de règlement :

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Par carte bancaire

Numéro de carte _____

Date d'expiration _____

Clé _____

(les 3 chiffres au dos de votre CB)

Signature obligatoire

Mon e-mail pour recevoir la newsletter Pour la Science (à remplir en majuscule).

_____ @ _____

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès du groupe Pour la Science. Par notre intermédiaire, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'organismes partenaires. En cas de refus de votre part, merci de cocher cette case ☐.

Des exoplanètes plus accueillantes que la Terre

Sur des planètes un peu plus grosses que la nôtre et en orbite autour d'étoiles plus petites que le Soleil, la vie trouverait des conditions plus favorables que sur Terre. De tels mondes existeraient par milliards.

René Heller

Habitions-nous le meilleur des mondes possibles ? Au XVII^e siècle, le philosophe allemand Leibniz pensait que la Terre offrait les conditions optimales pour la vie malgré ses défauts apparents. L'idée a été critiquée, en particulier par Voltaire dans son conte philosophique *Candide*, car il y voyait une construction non scientifique de la réalité pour satisfaire les désirs de Leibniz. La pensée du philosophe allemand trouve néanmoins un écho indirect chez les astronomes qui prennent la Terre comme étalon dans leurs études des planètes extrasolaires et dans la recherche d'autres mondes habitables.

Parce que nous ne connaissons qu'un monde habité (le nôtre), il est naturel d'utiliser la Terre comme référence pour chercher de la vie ailleurs, que ce soit sur Mars ou sur Europe, lune de Jupiter qui présenterait un océan d'eau liquide sous sa surface glacée. Mais aujourd'hui, la découverte de planètes potentiellement habitables en orbite autour d'étoiles autres que le Soleil (autrement dit, des

exoplanètes) remet en cause cette approche géocentrique.

Durant ces 20 dernières années, les astronomes ont découvert plus de 1800 exoplanètes et les statistiques suggèrent que la Galaxie en abrite au moins 100 milliards. Parmi les planètes découvertes à ce jour, la plupart sont très différentes de la Terre et exhibent une grande diversité de tailles, d'orbites, de compositions ou de nature de leurs étoiles hôtes (souvent plus petites et plus froides que le Soleil). En regardant de près les caractéristiques de ces exoplanètes, je pense (et je ne suis pas le seul) que la Terre pourrait ne pas être le *nec plus ultra* en termes d'habitabilité. Le fait que la vie y soit apparue ne suffit pas pour affirmer que les conditions y sont optimales. En fait, certaines exoplanètes très différentes de la Terre auraient de bien meilleures chances de développer et de conserver des biosphères stables. Ces « planètes superhabitable » seront les cibles les plus propices pour rechercher de la vie hors du Système solaire.



L'ESSENTIEL

- Les astrophysiciens recherchaient la vie sur des planètes similaires à la Terre autour d'étoiles semblables au Soleil.
- Il est plus facile de détecter de grosses « super-Terres » en orbite autour d'étoiles plus petites qui, en outre, sont plus fréquentes.
- Sur certaines de ces planètes, les conditions seraient plus favorables à la vie que sur Terre.
- Ces potentiels berceaux de la vie seraient rocheux et situés dans la zone habitable d'étoiles naines plus durables que le Soleil.

Bien sûr, la Terre a plusieurs caractéristiques qui, au premier abord, semblent idéales pour la vie. Elle tourne autour d'une étoile d'âge moyen plutôt tranquille, qui brille avec constance depuis des milliards d'années, ce qui a laissé le temps à la vie d'apparaître et d'évoluer. Elle a des océans d'eau liquide, berceaux de la vie, parce qu'elle est en orbite dans la « zone habitable », une mince région autour du Soleil où la lumière reçue de l'étoile n'est ni trop intense ni trop faible. Plus proche du Soleil, la Terre aurait été très chaude et l'eau n'aurait été présente qu'à l'état de vapeur ; si elle était plus éloignée, l'eau n'aurait été que de la glace.

La Terre a par ailleurs une taille propice à la vie : assez grosse pour retenir une atmosphère épaisse grâce à son champ gravitationnel, mais assez petite pour garantir que la gravité ne plaque pas sur la planète un manteau opaque et étouffant de gaz. La taille de la Terre et sa composition rocheuse favorisent aussi l'habitabilité par d'autres aspects, comme la présence d'une activité tectonique, qui régule le climat en participant au cycle du dioxyde de carbone, et celle d'un champ magnétique, qui protège la biosphère du rayonnement cosmique.

La Terre, un berceau médiocre pour la vie

Cependant, plus les chercheurs étudient l'habitabilité de la Terre, moins elle leur semble idéale. Les conditions sont très variables d'une région de la planète à l'autre et de vastes portions de la surface de la Terre sont presque dépourvues de vie : les déserts sont arides, l'océan du grand large est pauvre en nutriments et les régions polaires sont glaciales.

Par ailleurs, l'habitabilité de la Terre a varié dans le temps. Par exemple, durant l'essentiel de la période géologique du Carbonifère (il y a entre 360 et 300 millions d'années environ), l'atmosphère de la planète était plus chaude, plus humide et beaucoup plus riche en oxygène qu'aujourd'hui. Les crustacés, les poissons et les coraux bâtisseurs de récifs prospéraient dans les mers, de vastes forêts recouvraient les continents,

SUR UN MONDE SUPERHABITABLE en orbite autour d'une étoile naine, le paysage différerait de celui de la Terre. Le relief serait assez plat et les plantes seraient sombres, afin de mieux capter la lumière de l'astre.

les insectes et autres animaux terrestres atteignaient des tailles gigantesques. La Terre de l'ère carbonifère abritait probablement plus de biomasse que la planète d'aujourd'hui. On peut donc considérer la Terre actuelle comme moins hospitalière qu'à certaines époques passées.

De plus, nous savons que la Terre est amenée à devenir beaucoup moins accueillante. Dans environ cinq milliards d'années, le Soleil aura épuisé la majeure partie de son combustible, l'hydrogène, et l'hélium de son cœur commencera alors à fusionner. Cette réaction libérant une puissance plus importante que la fusion de l'hydrogène, l'étoile gonflera pour devenir une « géante rouge ». L'astre grossira tant qu'il engloutira peut-être la Terre. Mais la vie sur Terre aura disparu longtemps avant. Alors que le Soleil puisera dans ses dernières réserves d'hydrogène, la température de son cœur augmentera progressivement, et la luminosité totale du Soleil s'accroîtra lentement, d'environ dix pour cent tous les milliards d'années. Un tel changement signifie que la zone habitable du Système solaire n'est pas statique, mais dynamique : elle s'éloignera de plus en plus de l'étoile au fil du temps, et la Terre en sortira.

Des calculs récents suggèrent que la Terre d'aujourd'hui ne se trouve pas au milieu de la zone habitable, mais plutôt sur son bord interne : elle est déjà à la limite de la surchauffe (voir l'encadré page 30). Par conséquent, d'ici environ 500 millions d'années, le rayonnement solaire sera assez fort pour imposer un climat très chaud qui menacera la survie des organismes complexes de la surface terrestre. Dans 1,75 milliard d'années, la température sera si élevée que les océans s'évaporeront, et toute forme simple de vie subsistant encore à la surface disparaîtra.

Ainsi, l'habitabilité de la Terre diminue depuis longtemps et la biosphère se rapproche de sa fin. Tout bien considéré, il est raisonnable de dire que la Terre n'est plus que marginalement habitable.

En 2012, je travaillais sur l'habitabilité de lunes massives en orbite autour de planètes gazeuses géantes. Je me suis alors demandé si d'autres astres pouvaient être encore plus adaptés à la vie que la Terre. Dans le Système solaire, la plus grosse lune est Ganymède, satellite de Jupiter dont la masse est seulement 2,5 % de celle de la Terre. C'est insuffisant pour retenir une atmosphère comparable à celle de la Terre,

mais j'ai compris qu'il existe des scénarios plausibles pour la formation de lunes d'une masse approchant celle de la Terre dans d'autres systèmes planétaires. Ces lunes de taille terrestre seraient en orbite autour de planètes géantes situées dans la zone habitable de leur étoile. Elles pourraient alors avoir une atmosphère épaisse.

Des exolunes chauffées par les forces de marée

Pourquoi ces « exolunes » massives seraient-elles plus habitables que la Terre, ou superhabitable ? Contrairement à la vie terrestre, qui a pour principale source d'énergie le rayonnement solaire, la biosphère d'une exolune superhabitable pourrait non seulement tirer son énergie de son étoile, mais aussi de la lumière réfléchie et du rayonnement infrarouge émis par sa planète géante voisine. Il faut y ajouter l'influence gravitationnelle de la planète. Quand une lune tourne autour d'une planète géante, les forces de marée déforment périodiquement sa croûte, d'où une friction qui chauffe la lune de l'intérieur. Ce chauffage par les marées est probablement à l'origine des océans dont on soupçonne l'existence sous la surface gelée d'Europe (lune de Jupiter) et d'Encelade (lune de Saturne).

Cette diversité de sources énergétiques serait toutefois à double tranchant pour une exolune massive. Il suffirait d'un léger déséquilibre des sources d'énergie complémentaires pour faire basculer tout un monde dans un état inhabitable.

Aucune exolune, habitable ou non, n'a encore été détectée avec certitude, mais certaines pourraient se cacher dans les données en cours d'analyse du télescope spatial *Kepler*. Pour l'instant, l'existence et la possible habitabilité de ces objets restent du domaine de la spéculation.

En revanche, des planètes superhabitable se trouvent peut-être déjà dans notre catalogue d'exoplanètes confirmées ou en cours de confirmation. Les premières exoplanètes découvertes au milieu des années 1990 étaient toutes des géantes gazeuses, de masse comparable à celle de Jupiter, et dont l'orbite était bien trop proche de l'étoile pour abriter une quelconque forme de vie. Mais les astronomes ayant peu à peu amélioré les techniques de détection d'exoplanètes, ils ont découvert des planètes de plus en plus petites et sur des orbites plus clémentes car plus

L'AUTEUR



René HELLER est chercheur postdoctorant à l'Institut Origins de l'Université

McMaster dans l'Ontario [Canada], et membre du Programme canadien de formation à l'astrobiologie.

BIBLIOGRAPHIE

R. Heller et J. Armstrong, *Superhabitable worlds*, *Astrobiology*, vol. 14(1), pp. 50-66, 2014.

A. J. Rushby *et al.*, *Habitable zone lifetimes of exoplanets around main sequence stars*, *Astrobiology*, vol. 13(9), pp. 833-849, 2013.

R. Heller et R. Barnes, *Exomoon habitability constrained by illumination and tidal heating*, *Astrobiology*, vol. 13(1), pp. 18-46, 2013.

D. Spiegel *et al.*, *Habitable climates: the influence of obliquity*, *Astrophysical Journal*, vol. 691(1), pp. 596-610, 2009.

éloignées de leur étoile. La plupart des planètes identifiées ces dernières années sont ce que l'on nomme des super-Terres, des planètes jusqu'à dix fois plus massives que la nôtre et de rayon compris *grosso modo* entre celui de la Terre (6 371 kilomètres) et celui de Neptune (24 622 kilomètres). Ces planètes sont très répandues autour d'autres étoiles, mais nous n'avons rien de tel dans le Système solaire.

Les plus grosses super-Terres sont probablement dotées d'atmosphères épaisses, ce qui en fait plutôt des « mini-Neptunes » que des versions agrandies de la Terre. Mais certaines parmi les plus petites, peut-être jusqu'à deux fois plus massives que la Terre, auraient des compositions riches en fer et en roches, voisines de celle de la Terre. L'eau liquide pourrait abonder à leur surface si elles sont en orbite dans la zone habitable de leur étoile.

Nous savons aujourd'hui qu'un certain nombre de super-Terres potentiellement rocheuses tournent autour d'étoiles « naines de type M » ou « naines de type K », astres plus petits et moins brillants que le Soleil, mais dont la longévité est bien supérieure. En partie en raison de la durée de vie de leurs étoiles, ces grosses planètes sont actuellement les meilleures candidates au titre de monde superhabitable, comme je l'ai montré dans de récents travaux avec John Armstrong, physicien à l'Université d'État de Weber, dans l'Utah.

La longévité de l'étoile, un avantage

Notre idée s'est construite autour de la grande longévité comme critère essentiel de la superhabitabilité. Une biosphère planétaire a en effet peu de chances de survivre à la mort de son étoile. Le Soleil, âgé de 4,6 milliards d'années, se trouve à peu près à la moitié de son espérance de vie de 10 milliards d'années. S'il avait été un peu plus petit, il aurait été une étoile naine de type K, à la durée de vie bien supérieure. Ces étoiles naines ont moins de combustible nucléaire que les étoiles plus massives, mais les réactions se déroulant en leur cœur ont un meilleur rendement : l'hydrogène est consommé plus lentement, ce qui accroît la longévité de l'astre. Nous avons catalogué de nombreuses naines de type K qui sont des milliards d'années plus âgées que le Soleil et qui brilleront encore des milliards d'années après la mort de ce dernier. Une

telle longévité augmente les chances que la vie apparaisse et toute biosphère disposerait ainsi de beaucoup plus de temps pour évoluer et se diversifier.

La lumière d'une naine de type K apparaîtrait plus rouge que celle du Soleil, car elle serait davantage décalée vers l'infrarouge. La photosynthèse resterait possible à la surface de la planète malgré cette plage spectrale décalée, mais la végétation serait probablement plus sombre que sur Terre, afin d'absorber le maximum de rayonnement stellaire.

Le cas des naines de type M n'est pas aussi favorable, alors qu'elles sont encore plus petites et économes que les naines de type K. Elles peuvent briller durant des centaines de milliards d'années, mais elles brillent si faiblement que leur zone habitable est très proche de l'étoile. Cela expose les planètes qui s'y trouvent à de puissantes éruptions stellaires et à d'autres effets indésirables. Avec une plus grande longévité que le Soleil et une zone habitable sans risque, les naines de type K offrent le compromis idéal pour la superhabitabilité.

Certaines de ces étoiles à longue durée de vie pourraient abriter des super-Terres rocheuses depuis plusieurs milliards d'années. Une biosphère pourrait avoir vu le jour dans ces systèmes planétaires bien avant la naissance du Soleil, prospérant et évoluant pendant des milliards d'années avant que la première biomolécule n'émerge de la soupe primordiale de la jeune Terre.

Je suis fasciné par la possibilité que l'activité de la biosphère modifie son environnement, renforçant peut-être au passage l'habitabilité de la planète, comme cela a été le cas sur Terre. Par exemple, il y a environ 2,4 milliards d'années, notre planète a connu la « Grande Oxydation », une période où d'importantes quantités d'oxygène ont commencé à s'accumuler dans l'atmosphère, probablement en raison du métabolisme des algues océaniques. Cela a conduit à l'apparition d'organismes plus gourmands en énergie, de plus grande taille, plus durables et plus actifs, et a constitué une étape cruciale vers l'émergence progressive de la vie hors des océans et la colonisation des continents.

Si les biosphères extraterrestres modifient aussi leur environnement, peut-être leurs planètes deviennent-elles plus habitables en vieillissant ?

Des planètes superhabitables

se trouvent peut-être déjà dans notre catalogue d'exoplanètes.

LES ATOUTS DES SUPER-TERRES POUR HÉBERGER LA VIE

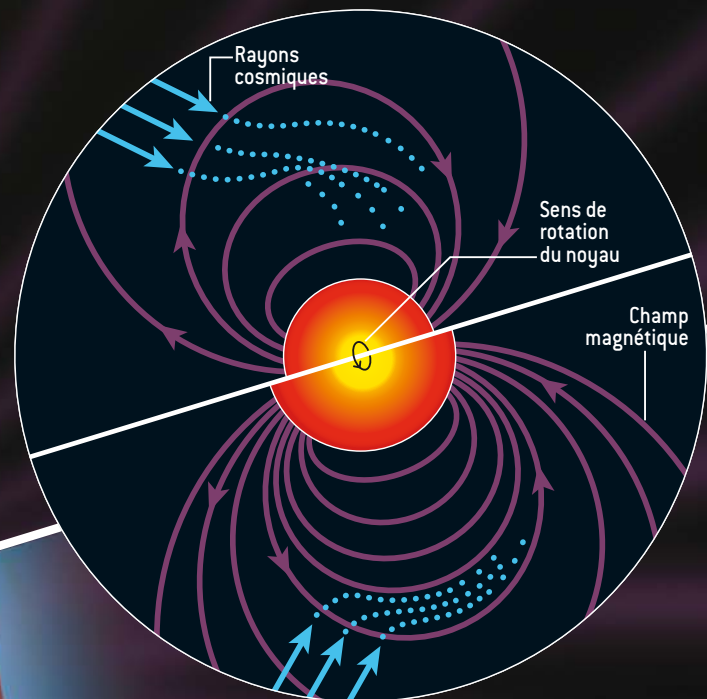
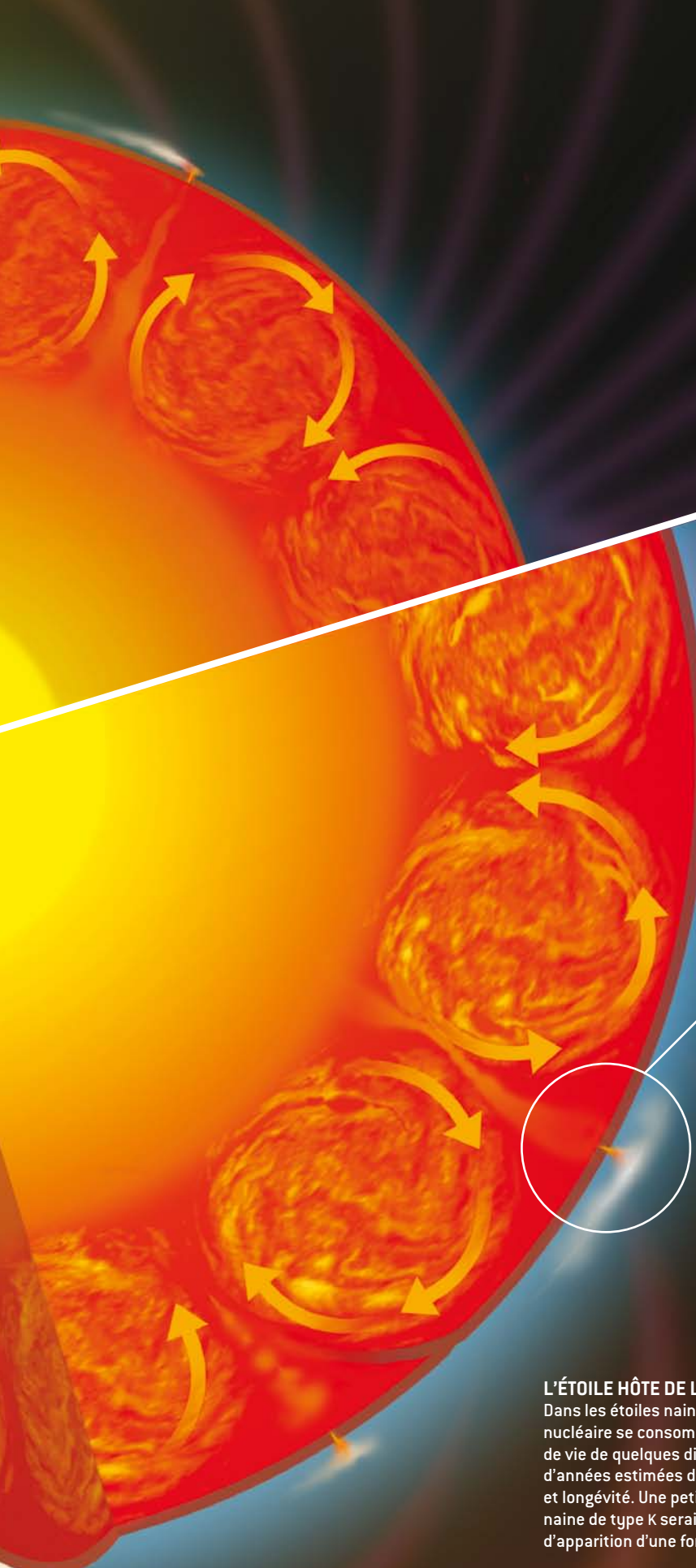
Les super-Terres sont des planètes plus grosses que la Terre et des candidates pour héberger la vie. Plus petites que les géantes gazeuses et jusqu'à dix fois plus massives que la Terre, elles sont potentiellement rocheuses. Les super-Terres d'environ deux masses terrestres sont des cibles prometteuses : leurs caractéristiques en feraient des mondes superhabitables, c'est-à-dire plus accueillants pour la vie que la Terre.

LA VIE SUR TERRE

La Terre se trouve dans la zone habitable autour du Soleil, une étoile stable d'âge moyen. Sa surface se partage entre un océan global et des continents où la vie s'est installée. La Terre est assez grosse pour retenir une atmosphère importante sans être trop dense. Essentiellement constituée de roches, notre planète renferme assez de chaleur interne pour entretenir un champ magnétique, véritable bouclier contre les rayons cosmiques, et une tectonique des plaques active, qui régule le climat.

LA VIE SUR UN MONDE SUPERHABITABLE

Une super-Terre rocheuse superhabitable, environ deux fois plus massive que la Terre, a une gravité plus forte à sa surface, ce qui se traduit par une atmosphère plus épaisse, plus d'érosion des reliefs et donc une topographie plus plate que sur Terre. Cette planète serait alors un « monde d'archipels » fait de mers peu profondes et constellées de chapelets d'îles. Une telle géographie serait avantageuse pour la vie, les archipels étant sur Terre parmi les endroits où la biodiversité est la plus importante et la plus variée.



UN CŒUR ACTIF

Une super-Terre rocheuse d'environ deux masses terrestres conserve une grande quantité de chaleur interne, vestige du processus initial de formation de la planète, mais aussi conséquence de la désintégration d'éléments radioactifs dans la roche. Ce réservoir de chaleur entretient un cœur fondu en rotation, semblable à celui de la Terre mais d'une longévité supérieure. Les mouvements du noyau externe liquide engendrent un champ magnétique planétaire, qui protège l'atmosphère et la surface du rayonnement cosmique.

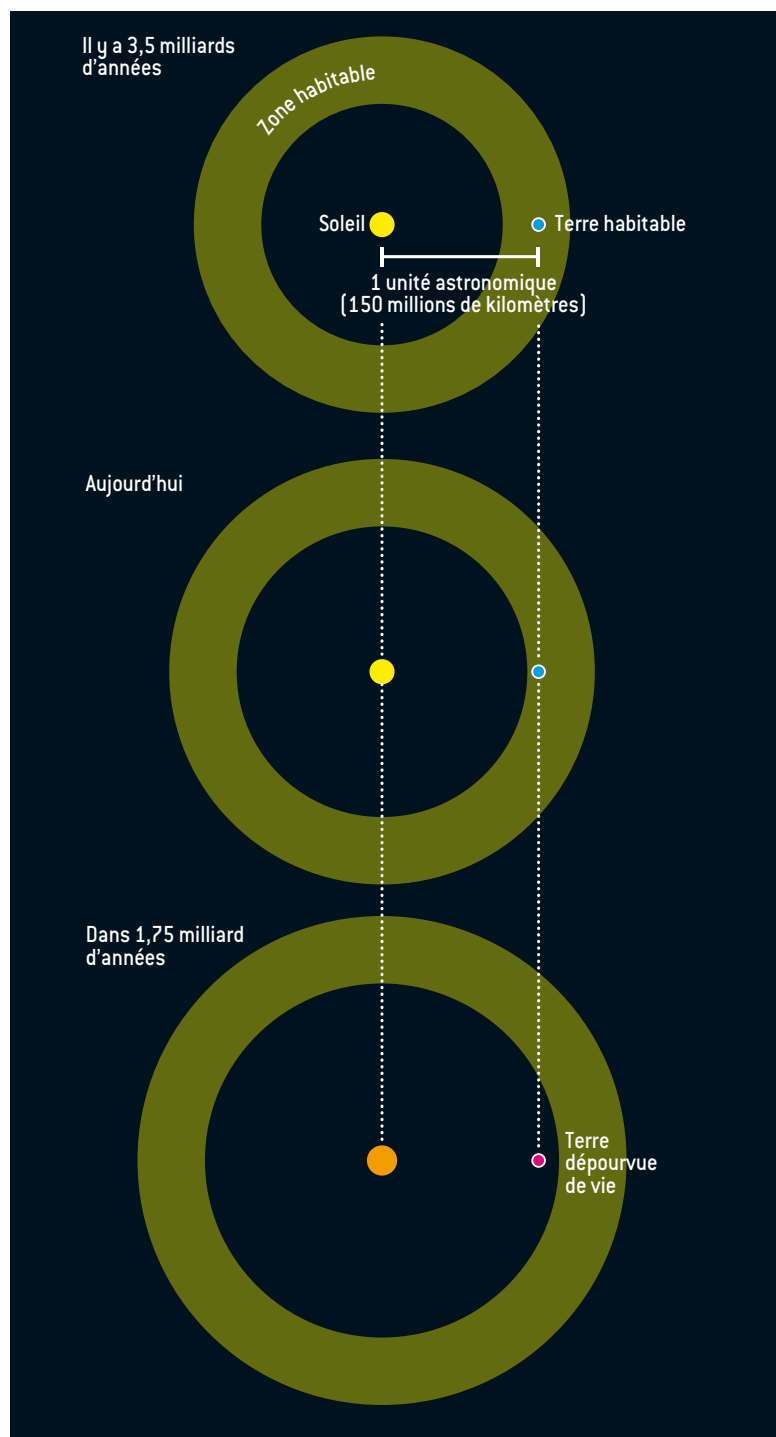
UN CYCLE DU CARBONE PERMANENT

Au sein d'une super-Terre, la chaleur convective (*flèches orange*) est plus importante et contribue à entretenir le volcanisme et la tectonique des plaques plus longtemps que sur Terre. Ces processus participent au cycle du carbone d'une planète et donc à son climat. Les volcans relâchent dans l'atmosphère du dioxyde de carbone qui y maintient une certaine température grâce à l'effet de serre. Capté par l'eau de pluie, le gaz est ensuite piégé dans les roches qui, par le biais de la tectonique, plongent dans le manteau planétaire et reparticipent au volcanisme.

L'ÉTOILE HÔTE DE LA PLANÈTE est un facteur déterminant pour l'habitabilité. Dans les étoiles naines de type K, plus petites que le Soleil, le combustible nucléaire se consomme de façon plus économe. Ces astres ont donc une durée de vie de quelques dizaines de milliards d'années, bien plus que les dix milliards d'années estimées du Soleil. Elles offrent le meilleur compromis entre luminosité et longévité. Une petite super-Terre en orbite dans la zone habitable d'une étoile naine de type K serait un havre de superhabitabilité, où les chances d'apparition d'une forme de vie seraient maximales.

LA ZONE HABITABLE DU SOLEIL SE DÉPLACE

À l'échelle humaine, la zone habitable autour du Soleil semble statique. Pourtant, en vieillissant, l'étoile chauffe de plus en plus et la zone habitable s'en éloigne. Les planètes habitables d'hier se retrouvent en dehors de ses limites. Aujourd'hui, la Terre se situe près du bord interne de la zone habitable du Soleil. Elle deviendra trop chaude pour abriter de l'eau liquide dans 1,75 milliard d'années. Les étoiles naines de type K brillent moins intensément mais plus longtemps que le Soleil, et leur zone habitable se déplace peu durant des dizaines de milliards d'années, ce qui augmente les chances que la vie apparaisse sur leurs planètes.



L'étoile hôte et la zone habitable ne sont pas les seuls critères pour rendre superhabitable une planète. Cette dernière doit aussi être plus massive que la Terre. Cela préviendrait deux catastrophes susceptibles de s'abattre sur les planètes rocheuses qui prennent de l'âge. Lesquelles ?

Si la Terre était située dans la zone habitable d'une naine de type K, l'intérieur de la planète se serait refroidi bien avant la mort de l'étoile. Ce serait un obstacle à l'habitabilité. En effet, la chaleur interne d'une planète entretient les mouvements de convection dans le manteau, auxquels sont dues les éruptions volcaniques et la tectonique des plaques. Ces processus reconstituent et recyclent le contenu de l'atmosphère en gaz carbonique. Sans eux, la quantité de dioxyde de carbone atmosphérique diminuerait régulièrement. La pluie le ramènerait au sol où il se fixerait dans les roches. À terme, l'effet de serre global, dépendant du dioxyde de carbone, serait insuffisant pour maintenir la température atmosphérique. La planète se retrouverait probablement dans un état de « boule de neige » inhabitable, dans lequel toute l'eau de surface serait gelée.

Les effets pervers d'une masse inadaptée

Au-delà de la diminution de l'effet de serre, le refroidissement de l'intérieur d'une planète rocheuse vieillissante pourrait aussi faire disparaître le champ magnétique qui protège la planète des rayons cosmiques nocifs. Ce champ est engendré par la rotation de la partie liquide de son cœur de fer, que la convection et les turbulences transforment en dynamo. Le cœur reste liquide à cause de la chaleur résiduelle de la formation planétaire, ainsi que de la désintégration des isotopes radioactifs qui y sont naturellement présents.

Quand la chaleur interne d'une planète rocheuse s'est dissipée, le cœur se solidifie, l'effet dynamo prend fin et le bouclier magnétique disparaît. Le rayonnement cosmique et les éruptions stellaires érodent la haute atmosphère, et les particules cosmiques de haute énergie parviennent jusqu'à la surface. En conséquence, les planètes âgées perdraient une bonne partie de leur atmosphère – qui sert aussi de bouclier contre le rayonnement cosmique –, et les niveaux élevés de rayonnement qui s'ensuivraient seraient délétères.

Les super-Terres rocheuses vieillissent plus lentement que la Terre, car elles conservent plus longtemps leur chaleur interne grâce à leur masse supérieure.

Des planètes trois à cinq fois plus massives que la Terre sont peut-être trop grosses pour manifester une tectonique des plaques : la pression et la viscosité de leur manteau seraient si élevées qu'elles empêcheraient les mouvements de convection interne. En revanche, une planète rocheuse deux fois plus massive présenterait une tectonique des plaques assez active pour entretenir des cycles géologiques et un champ magnétique pendant plusieurs milliards d'années. Une telle planète aurait aussi un diamètre supérieur d'environ 25 % à celui de la Terre : ses éventuels organismes vivants disposeraient donc d'une surface habitable plus étendue d'environ 56 %.

À quoi ressemblerait une planète superhabitable ? La pesanteur y serait plus forte, et une super-Terre moyenne aurait donc probablement une atmosphère plus dense que la Terre. L'érosion des montagnes serait alors plus rapide. En d'autres termes, une telle planète aurait un air plus épais et un relief plus plat. Si elle comporte des océans, le paysage planétaire aplani signifierait que l'eau y forme de nombreuses mers peu profondes parsemées de chapelets d'îles, plutôt que des océans abyssaux avec quelques rares gros continents. La biodiversité dans les mers terrestres étant plus riche dans les eaux peu profondes qui bordent les côtes, un tel « monde d'archipels » serait très avantageux pour la vie. L'évolution, plus active dans des écosystèmes insulaires isolés, stimulerait la biodiversité.

Privé de vastes continents, un monde d'archipels n'aurait-il pas une habitabilité globale plus faible ? Pas nécessairement. On remarque en effet que les régions centrales d'un continent sont souvent des déserts stériles, car trop éloignées de l'air océanique, humide et tempéré.

Sur Terre, certaines régions sont trop chaudes et d'autres trop froides pour qu'une vie abondante s'y développe. Une plus grande homogénéité climatique dépend en particulier de la direction de l'axe de rotation propre de la planète par rapport au plan de l'orbite de révolution. L'axe de rotation de la Terre, par exemple, a une inclinaison d'environ 23,4 degrés, ce qui est à l'origine des saisons et réduit un peu les écarts de température entre les régions équatoriales chaudes et les régions

polaires froides. La différence serait plus marquée si l'axe était perpendiculaire au plan orbital. Un monde d'archipels dont l'inclinaison de l'axe de rotation serait encore plus favorable que celle de la Terre pourrait avoir un équateur chaud sans être excessif, ainsi que des pôles relativement tempérés, sans glace. Et, grâce à la plus grande taille du globe et sa surface plus importante, les terres accueillantes pour la vie seraient plus nombreuses que s'il était composé de vastes continents.

Des mondes meilleurs... et plus nombreux !

Réunies, toutes ces réflexions sur l'habitabilité suggèrent que les planètes superhabitable sont un peu plus grosses que la Terre et qu'elles ont des étoiles hôtes un peu plus petites et moins brillantes que le Soleil. Si ce raisonnement est correct, sa conclusion est passionnante pour les astronomes, parce qu'il est beaucoup plus facile de détecter des super-Terres en orbite autour d'étoiles naines que des jumeaux du système Terre-Soleil. Jusqu'à présent, les statistiques sur les populations d'exoplanètes suggèrent que les super-Terres autour de petites étoiles sont bien plus répandues dans la Voie lactée que les analogues du système Terre-Soleil. Il semblerait donc que les astronomes aient beaucoup plus d'endroits où rechercher la vie qu'ils ne le pensaient.

Ainsi, la planète Kepler-186f serait superhabitable. Elle a un diamètre supérieur de 11 % à celui de la Terre et elle est probablement rocheuse, en orbite dans la zone habitable d'une étoile naine de type M. Elle serait âgée de plusieurs milliards d'années. Malheureusement, nous ne pouvons l'observer avec assez de détails pour étudier son habitabilité, car elle est distante d'environ 500 années-lumière.

Des candidats superhabitable plus proches de nous seront peut-être bientôt découverts grâce à divers projets, en particulier la mission *Plato* de l'Agence spatiale européenne, qui devrait être lancée d'ici 2024. Ces planètes seront aussi des cibles de choix pour le télescope spatial *James Webb*, un observatoire dont le lancement est prévu pour 2018.

Avec un peu de chance, nous serons bientôt capables de pointer du doigt une région du ciel où se cache une planète qui, contrairement à ce que pensait Leibniz, serait plus accueillante que la Terre. ■

Quelques chiffres

200 milliards d'étoiles
environ peuplent
la Voie lactée, notre galaxie.

3 à 4 fois
plus abondantes
que les étoiles de type
solaire, les naines de type K
ont une longévité comprise
entre 15 et 30 milliards
d'années.

1 013 exoplanètes
ont été découvertes par
le télescope spatial *Kepler*
jusqu'à présent.

4 175 candidates au titre
d'exoplanète figurent encore
dans les données de *Kepler*.

8 super-Terres de masse
comprise entre une et deux
fois celle de la Terre
et situées dans la zone
habitable de leur étoile
sont connues.

Pourquoi vous avez faim... ou pas !

Gilles Mithieux

Pour réguler la sensation de faim, le cerveau sonde en permanence les réserves énergétiques et nutritionnelles de l'organisme. Les échanges nerveux avec le système digestif joueraient un rôle clef.

L'ESSENTIEL

- La sensation de faim, qui pousse à s'alimenter, permet de prévenir les carences énergétiques et nutritionnelles.
- Cependant, elle ne doit pas occuper l'esprit en permanence, sous peine de conduire à des excès.
- On a longtemps cru que pour réguler la faim, le cerveau ne se fondait que sur la tension de l'estomac et les informations véhiculées par la circulation sanguine.
- On découvre aujourd'hui que d'autres interactions directes avec l'appareil digestif, *via* les nerfs périphériques, jouent un rôle essentiel.

© Pictive / Sideways Design/shutterstock.com



A large white plate is shown from a top-down perspective, with a small, artistic drizzle of red sauce on its left side. To the right of the plate, a silver butter knife is positioned vertically. The background is a plain, light color.

Midi approche. Vous sentez la faim vous envahir. Cette sensation remplit une fonction physiologique cruciale, puisqu'elle vous pousse à vous alimenter quand vous manquez d'énergie et de nutriments. Elle vous permet ainsi de survivre. Comment est-elle déclenchée ? Et comment est-elle atténuée peu à peu au fil du repas, puis neutralisée pendant plusieurs heures ? La question est d'importance, à l'heure où l'obésité explose à l'échelle planétaire – au point que l'Organisation mondiale de la santé (OMS) parle d'épidémie. Chez de nombreuses personnes en surpoids, la sensation de faim serait dérégulée.

On a longtemps pensé que, pour réguler cette sensation, le cerveau se fondait sur les informations hormonales véhiculées dans le sang, ainsi que sur des paramètres mécaniques tels que la tension de l'estomac. Cependant, les recherches récentes ont révélé des échanges complexes entre le cerveau et l'appareil digestif, *via* les nerfs périphériques.