

DAVID LOUAPRE

# MAIS QUI A ATTRAPÉ LE BISON DE HIGGS ?

PRIX  
DU LIVRE  
SCIENTIFIQUE



Champs sciences

DAVID LOUAPRE

## Mais qui a attrapé le bison de Higgs ?

Un atome, c'est petit comment ? Pourquoi le pastis se trouble-t-il quand on y ajoute de l'eau ? Mais d'où vient la Lune ?

Si les premiers hommes, le Big-Bang et le boson de Higgs vous intriguent, si vous fourmillez de questions sans toujours oser les poser à haute voix, alors ce livre est fait pour vous ! Laissez le créateur de la chaîne YouTube « Science étonnante » vous révéler ses découvertes préférées, au travers d'une vingtaine de questions innocentes posées par ses filles.

Vous n'avez qu'une vague idée de ce qu'est une particule, un gène ou une probabilité ? Embarquez, vous en savez bien assez !

Docteur en « gravité quantique », **David Louapre** se consacre à intégrer la science dans les jeux vidéo. Passionné de vulgarisation scientifique et brillant touche-à-tout, il crée en 2010 le blog « Science étonnante », prolongé par une chaîne YouTube à succès. Il est l'auteur chez Flammarion de *Insoluble mais vrai!* (2017).

Illustrations de Lison Bernet.

En couverture: illustration d'après une image  
© Evgo1977/Shutterstock

Flammarion

MAIS QUI A ATTRAPÉ  
**LE BISON**  
**DE HIGGS?**



DAVID LOUAPRE

Illustrations de Lison Bernet

MAIS QUI A ATTRAPÉ  
**LE BISON  
DE HIGGS?**

... et autres questions que  
vous n'avez jamais osé poser à haute voix...

Champs sciences

Infographies : Laurent Blondel/Corédoc

© Flammarion, 2015

© Flammarion, 2022, pour l'édition « Champs »

ISBN : 978-2-0802-7542-4

## Avant-propos

**D**ès mon plus jeune âge, je crois que j'ai toujours voulu devenir un scientifique. Oh bien sûr, j'ai dû avoir ma période « pompier » ou « cosmonaute », mais finalement, j'ai eu la chance que ma vocation se dessine très tôt. De la science, oui, mais pour quoi faire exactement ? Je suis resté longtemps indécis, si bien que le déclic ne m'est venu que vers dix-huit ans.

Cloué plusieurs jours dans un lit d'hôpital, j'avais pour principale occupation la lecture d'un livre, *Une brève histoire du temps*, le best-seller de Stephen Hawking. Le célèbre astrophysicien britannique y aborde les débuts de l'Univers, la théorie du Big-Bang, les trous noirs et tant d'autres choses stupéfiantes sur l'espace et le temps. Ma décision était prise : moi aussi, je voulais me faire astrophysicien !

Quelques années plus tard et après bien du labeur, la chance m'a souri : je commençai un doctorat sur un sujet fascinant, la « gravité quantique ». Ce domaine de la physique théorique s'efforce de répondre à la délicate question de l'unification des

théories de l'infiniment grand et de l'infiniment petit. Je participai donc à ma manière – et à ma petite échelle – à la recherche d'une « théorie du tout », indispensable pour mieux comprendre les premiers instants du Big-Bang et la structure de l'espace-temps ; cette même théorie dont parlait Hawking dans son livre, et qu'il a continué à bâtir depuis.

Travailler dans un tel domaine était excitant, quoique redoutable : après trois ans d'investigations, j'avais certes accompli quelques progrès mais, comme souvent, ce n'étaient que de minuscules éléments de l'échafaudage conduisant à cette fameuse théorie. Par ailleurs, continuer dans cette voie et surtout trouver un emploi stable dans cette discipline semblait presque impossible tant les places étaient rares. Une fois mon doctorat en poche, je décidai donc de changer mon fusil d'épaule.

Jadis, plusieurs de mes mentors me l'avaient déjà conseillé : il faut avoir un plan B. Deux options s'offraient à moi : devenir enseignant, ou me reconverter dans la recherche appliquée. Après moult hésitations, j'optai pour la seconde solution et je me résolus donc à aller toquer à la porte de l'industrie.

Mon poste dans le centre de « R&D » d'un grand groupe industriel français m'a fait découvrir deux choses essentielles, sans lesquelles ce livre n'existerait peut-être pas. La première, c'est qu'il est possible de pratiquer une science passionnante en dehors des trous noirs et du Big-Bang. À l'époque de mon



doctorat, je ne jurais que par la physique fondamentale et les autres champs me semblaient bien fades, mais croyez-moi, la physico-chimie des mousses liquides, les mathématiques appliquées ou la mécanique des matériaux sont des sujets tout aussi exaltants...

La seconde révélation, c'est que j'aime vulgariser. Une des différences fondamentales entre la R&D industrielle et la recherche académique, c'est qu'à l'université, on s'adresse en général à ses pairs, alors qu'en entreprise, on passe son temps à expliquer ses travaux à des gens qui ne sont pas des chercheurs. Et c'est par ce biais que j'ai pris conscience que j'appréciais cet exercice pédagogique, et que j'y étais plutôt bon...

Il y a cinq ans, j'ai donc choisi de me lancer dans la vulgarisation scientifique « grand public » comme un passe-temps, juste pour le plaisir. Ce fut d'abord sous la forme d'un blog, puis quelques années après en format vidéo, via une chaîne sur YouTube. Vulgariser me permet de transmettre ma passion pour la science tout en satisfaisant à un but plus profond. Nous vivons dans un monde où la science et la technique tiennent une place de plus en plus vaste, mais où la culture scientifique fait cruellement défaut. Une illustration édifiante ? Prononcez le mot « culture » et la plupart des gens penseront « littérature », « peinture », « musique classique » ou « histoire »... mais presque jamais « science » ! Comme si la culture scientifique ne faisait pas partie de la

culture générale. Conséquence ? En France – mais le diagnostic est probablement vrai dans bien d'autres pays –, la science ne suscite plus de vocations. Les jeunes élèves, les étudiants ne rêvent plus de devenir « savants », ce qui a de quoi inquiéter dans un monde où nombre de spécialistes considèrent que la prospérité économique viendra de la recherche et de l'innovation. Bref, pour moi, vulgariser la science c'est essayer de – modestement – changer le monde.

Ce livre a été écrit pour toutes ces raisons. J'ai voulu y parler de science en général, sans me concentrer sur un domaine particulier ; c'est pourquoi vous y trouverez de la physique, mon domaine de prédilection, mais aussi de la biologie, des mathématiques et même un peu de sciences sociales. L'ordre des sujets n'obéit à aucune logique : chaque chapitre peut être lu indépendamment des autres et présente une idée scientifique qui me captive, une de ces pépites qui me font chérir la science et que j'aime partager.

Une précision importante : nul besoin d'avoir fait de longues études scientifiques pour comprendre le contenu de ce livre. Vous avez une vague idée de ce qu'est un atome ? Un gène ? Une probabilité ? Vous en savez bien assez !

Vous vous posez quantité de questions que vous n'avez jamais osé formuler à haute voix ? Ce livre est fait pour vous ! L'idée de vous plonger dans les mystères de l'évolution ou les subtilités du boson de Higgs vous effraie ? Rassurez-vous, chaque chapitre

commence en douceur, par un dialogue... avec des enfants ! J'ai en effet la chance d'avoir trois filles qui me sondent souvent sur mon métier de chercheur ou ma passion de la vulgarisation. Et parler science avec elles est une bonne manière de ne pas perdre le fil de mes explications...

Pour ceux qui souhaiteraient aller plus loin, j'ai proposé à la fin du livre une liste de références, certaines introductives et d'autres plus techniques (généralement des publications scientifiques en anglais). Une fois la dernière page tournée, sachez que vous pouvez aussi me retrouver sur Internet, puisque c'est là que tout a commencé pour moi, notamment sur les réseaux sociaux (@dlouapre sur Twitter) et sur ma chaîne YouTube « Science étonnante ».



# 1

## **Y a-t-il plus d'étoiles dans l'Univers que de grains de sable sur Terre ?**

**23 décembre 2014**

**C**'était la veille de Noël, le dernier que nous devions passer en France avant le grand départ. Après plusieurs mois d'organisation, la famille était enfin prête à partir pour Boston. Tout s'était arrangé à merveille. Mon entreprise m'avait proposé d'aller travailler plusieurs années dans son centre de recherche au Massachusetts. De son côté, ma femme avait trouvé un laboratoire de l'université Harvard où elle pourrait poursuivre ses recherches.

Nous avons trois filles, trop jeunes pour mesurer l'importance de ce changement de situation, mais c'était tant mieux, elles s'adaptent d'autant plus vite à leur nouvel environnement.

Après avoir vidé notre appartement, nous avons décidé de passer Noël en famille au bord de la mer en Bretagne. Seule ombre au tableau, il pleuvait depuis des jours et des jours, et les enfants commençaient à tourner comme des lions en cage, condamnés à rester enfermés toute la journée.

Ce soir-là, le vent avait chassé les nuages pour dégager un ciel d'une pureté stupéfiante. Il faisait nuit, la marée était basse, nous décidâmes de braver le froid pour descendre sur la plage à la lueur de frontales. Saisi par la beauté du ciel, j'éteignis ma lampe, suivi par toute la petite troupe.

Le spectacle était à couper le souffle.

Nous étions dans un coin de Bretagne privilégié, un de ces rares endroits dénués de pollution lumineuse. La Voie lactée se déployait face à nous, sublime.

Charlotte était bouche bée, sidérée par la multitude de points lumineux qui scintillaient devant elle. Jusqu'au moment où elle se mit à les compter tout haut, comme pour éprouver ce qu'elle avait appris à l'école. À côté d'elle, Marine, sa sœur aînée, bientôt 8 ans, me prit brusquement à partie et me demanda tout de go :

— Papa, combien il y a d'étoiles en tout dans l'Univers ?

— En tout ?

— Oui ! Combien ? Des milliards et des milliards ?

— Je dirais plutôt des milliards DE milliards !

Perplexe, elle fixa son regard sur les vagues qui mouraient lentement sur la plage. Elle prit alors une poignée de sable qu'elle égrena entre ses doigts malgré le froid ; puis tout à coup, son visage s'anima et elle me défia en souriant :

— À ton avis, est-ce qu'il y a plus d'étoiles dans l'Univers ou de grains de sable sur la Terre ?

Au premier abord, la question de Marine peut paraître bien difficile à trancher. Je ne vais quand même pas compter toutes les étoiles et tous les

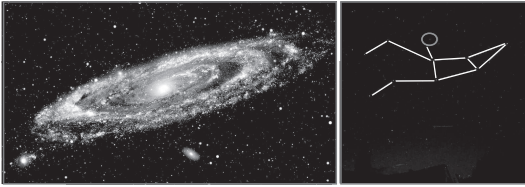
grains de sable un à un pour lui répondre ! Et pourtant, comme souvent en sciences, il est possible de se faire une bonne idée sur la question, au prix de quelques approximations.

Et vous, qu'en dites-vous : plus d'étoiles ou plus de grains de sable ?

## **L'immensité de l'Univers**

Commençons par les étoiles. Comme vous le savez probablement, dans l'Univers celles-ci sont regroupées en galaxies. Quand vous regardez le ciel nocturne à l'œil nu, toutes les étoiles que vous pouvez distinguer appartiennent à une seule et même galaxie : la Voie lactée, notre galaxie dont le Soleil n'est qu'une insignifiante étoile parmi les autres. Depuis plus d'un siècle, nous savons qu'il existe une multitude d'autres galaxies dans l'Univers, mais elles sont toutes impossibles à distinguer sans télescope, à l'exception de notre plus proche voisine, la galaxie d'Andromède, visible à l'œil nu près de la constellation du même nom (Figure 1).

Pour recenser les étoiles de l'Univers, il nous faut répondre à deux questions. Premièrement : combien une galaxie contient-elle d'étoiles en moyenne ? Et ensuite : combien y a-t-il de galaxies dans l'Univers ? D'après les observations effectuées par les astronomes sur la galaxie d'Andromède, celle-ci contiendrait environ 1 000 milliards d'étoiles. Pour notre Voie lactée, c'est un peu plus difficile d'en faire le compte – puisqu'on se trouve précisément à l'intérieur –,



**Figure 1.** La galaxie d'Andromède, photographiée par le télescope GALEX (à gauche). Elle porte le nom de la constellation d'Andromède au bord de laquelle elle se situe (à droite) et est visible à l'œil nu ou avec une simple paire de jumelles. Cette proximité dans le ciel n'est toutefois qu'apparente : les étoiles de la constellation appartiennent à notre Voie lactée et sont à quelques centaines d'années-lumière de nous, tandis que la galaxie d'Andromède est située à 2,5 millions d'années-lumière.

mais on estime qu'elle en hébergerait environ 400 milliards.

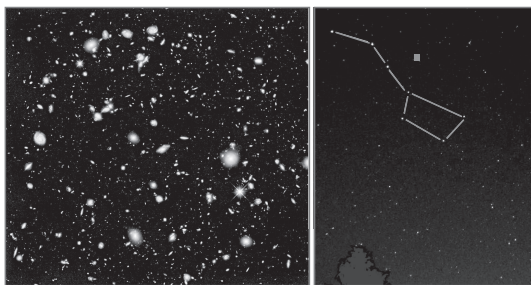
C'est un chiffre colossal ! Vous vous souvenez de ces discussions pour savoir à qui appartient la Lune ? Eh bien, imaginez que si l'on partageait les étoiles de la Voie lactée entre tous les terriens, chacun d'entre nous en recevrait une cinquantaine en pleine propriété. De quoi régler tous les problèmes de voisinage !

Bien entendu, toutes les galaxies ne sont pas de taille identique : on en connaît même qui sont cent fois plus peuplées que la nôtre. Mais comme la galaxie d'Andromède et la Voie lactée semblent être assez typiques, retenons pour faire simple le chiffre global d'environ 1 000 milliards d'étoiles par galaxie.

Passons maintenant à la question du nombre de galaxies dans l'Univers. Il n'est pas question d'en faire l'inventaire détaillé tant elles sont nombreuses, mais heureusement il y a *Hubble*, le célèbre télescope spatial ! En 2004, les astronomes se sont amusés à le pointer



dans un minuscule coin extrêmement sombre du ciel, et à prendre la photo la plus précise possible de ce qu'ils y voyaient : c'est ce qu'on appelle le champ profond de *Hubble* (Figure 2). Avant de vous plonger dans cette image, arrêtez-vous un instant : si l'on y réfléchit bien, vous contemplez en effet l'une des photos les plus extraordinaires jamais réalisées par l'Homme...



**Figure 2.** Le champ profond de *Hubble* (à gauche). Cette photo a été obtenue en combinant l'équivalent de près de 300 heures d'exposition, et on a pu y compter pas moins de 10 000 galaxies. La zone du ciel où cette image a été prise est minuscule (à droite). Elle est située à proximité de la constellation de la Grande Ourse.

Dans cette petite zone sombre du ciel – où à l'œil nu vous ne verriez que du noir –, le télescope *Hubble* a pu observer une multitude de taches lumineuses qui sont presque toutes des galaxies. En analysant finement les données ainsi recueillies, les astronomes ont identifié dans ce seul cliché pas moins de 10 000 galaxies ! Et tout cela dans une photo qui ne couvre qu'un morceau minuscule du

ciel : à peu près l'équivalent de la surface d'une tête d'épingle que vous tiendriez à bout de bras. Une surface si petite qu'il faudrait faire plus de 10 millions de photos comme celle-ci pour couvrir l'intégralité du ciel au-dessus de nos têtes.

Imaginons un instant qu'on dispose effectivement de ces 10 millions de photos : si chacune contient aussi en moyenne 10 000 galaxies, cela nous ferait un total de 100 milliards de galaxies visibles avec *Hubble* dans le ciel au-dessus de nos têtes.

Nous voilà au bout de notre recensement : il y aurait donc 100 milliards de galaxies dans l'Univers, chacune contenant en moyenne 1 000 milliards d'étoiles. En multipliant ces deux nombres, cela nous fait un total de...

... 100 000 000 000 000 000 000 000 étoiles !

Un 1 suivi de 23 zéros, c'est ce nombre que l'on note  $10^{23}$  et que l'on prononce « 10 puissance 23 ». Il s'agit d'une quantité apparemment inconcevable ! Mais pour essayer de se la représenter quand même, faisons maintenant la comparaison avec le nombre de grains de sable qu'on pourrait trouver sur Terre.

## **Des grains de sable à la pelle**

Aussi paradoxal que cela puisse paraître, compter les grains de sable sur Terre est un peu plus difficile que de compter les étoiles de l'Univers... Pour s'en faire tout de même une idée, n'ayons pas peur de

recourir à des approximations – souvenez-vous que l'on cherche seulement un ordre de grandeur.

Pour simplifier, supposons que toutes les côtes du monde soient bordées par une belle plage rectiligne de 100 mètres de large, et de 10 mètres de profondeur. Pour estimer le volume total de sable que cela représente, il nous faut aussi connaître la longueur totale des côtes de la Terre. Grâce aux observations satellites, on peut l'estimer à environ 1 million de kilomètres<sup>1</sup>.

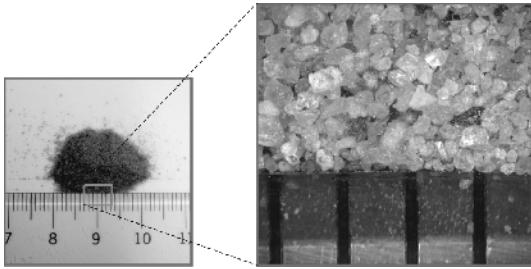
Un million de kilomètres de long, 100 mètres de large, 10 mètres de profondeur : en multipliant ces trois dimensions, on obtient un volume total de sable sur les plages de la planète d'environ 1 000 milliards de mètres cubes.

Maintenant, il nous reste à estimer le nombre de grains contenus dans un mètre cube de sable. Cela dépend bien sûr de la taille des grains : ramassez une poignée de sable sur la plage, vous pourrez en général les distinguer à l'œil nu, et pourtant ils sont la plupart du temps plus petits qu'un millimètre (Figure 3). Si on considère une taille moyenne d'un quart de millimètre, on peut calculer qu'un mètre cube doit en contenir environ 100 milliards.

En définitive, il y aurait approximativement 1 000 milliards de mètres cubes de sable sur Terre,

---

1. Vous savez peut-être que mesurer la longueur d'une côte n'a rien d'un problème simple, car la réponse dépend de l'échelle à laquelle on observe. Une constatation qui, d'ailleurs, inspira au mathématicien français Benoît Mandelbrot le concept de fractal.



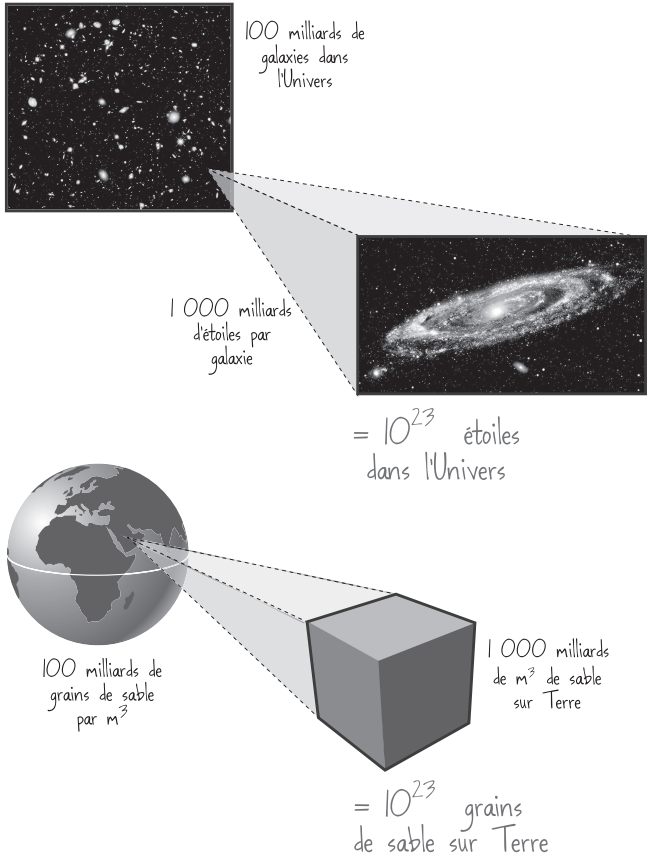
**Figure 3.** Quelques grains de sable ramassés sur une plage et observés au microscope. Sur cet échantillon, les grains ont une taille moyenne d'environ un quart de millimètre.

chacun de ces mètres cubes contenant environ 100 milliards de grains. Je vous laisse faire la multiplication : cela nous fait un total de  $10^{23}$  grains de sable sur Terre. Le même ordre de grandeur que le nombre d'étoiles dans l'Univers (Figure 4) !

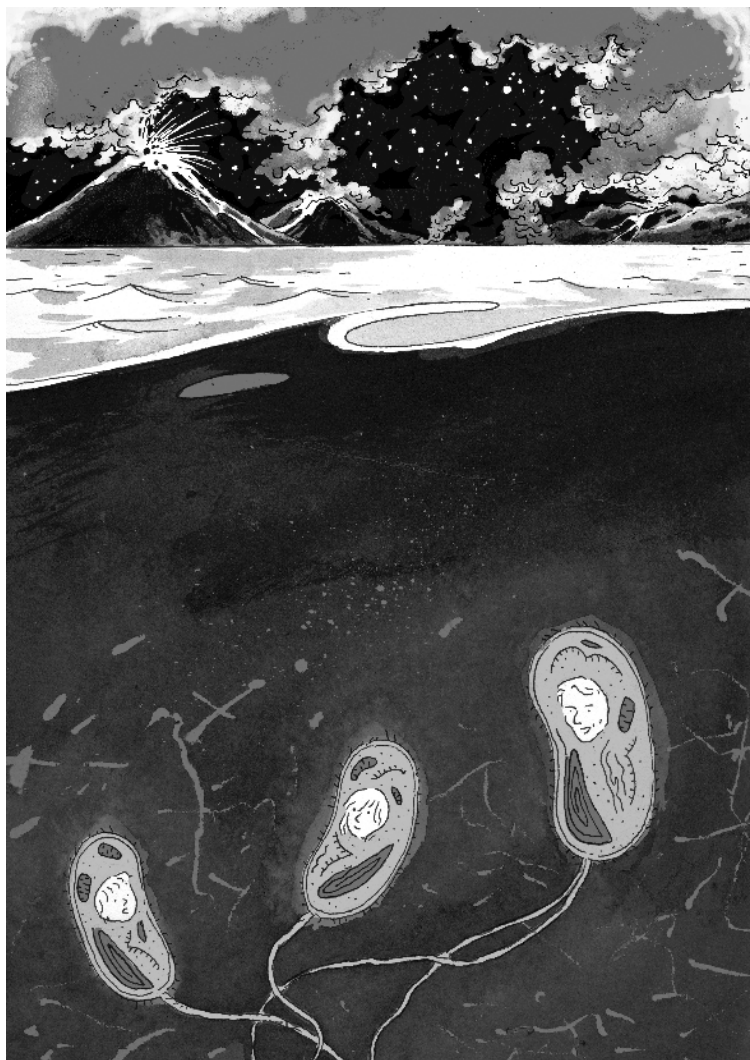
Tout compte fait, la question de Marine n'était pas si saugrenue ! Bien sûr, souvenez-vous que les calculs que nous avons menés sont très approximatifs et ne donnent que des ordres de grandeur – nous n'avons même pas pris en compte les déserts ou les fonds marins...

... mais par ailleurs, nous n'avons aussi compté que les galaxies de l'Univers visible !

En effet, nous savons aujourd'hui qu'il existe des pans entiers de l'Univers que l'on ne peut pas observer avec nos télescopes, car la lumière émise par les galaxies qui s'y trouvent n'a pas encore eu le temps de nous atteindre. De ce qu'on en connaît aujourd'hui, il est même parfaitement envisageable que l'Univers soit infini... alors finalement, qu'est-ce qu'un zéro de plus ou de moins ?



**Figure 4.** Le nombre d'étoiles dans l'Univers visible est approximativement égal au nombre de grains de sable sur Terre.



## Comment sont apparues les premières petites bêtes ?

30 décembre 2014

**Q**uel bonheur après une si longue attente ! L'avion volait à 10 000 mètres d'altitude au-dessus de l'océan Atlantique et nous filions vers Boston.

L'aventure était une première pour toute la petite famille, mais pas tout à fait pour moi. Douze ans plus tôt, au moment où je commençais ma thèse à Lyon, j'avais déménagé pour poursuivre mes recherches outre-Atlantique à cause d'un événement, ou plutôt d'une occasion inattendue.

Mike Lazaridis, PDG et fondateur de l'entreprise BlackBerry, avait offert cent millions de dollars de sa fortune personnelle pour créer un institut de recherche en physique théorique. Baptisé le Perimeter Institute et implanté près de Toronto, au Canada, l'établissement se concentrait sur les questions de la physique fondamentale : l'infiniment grand, l'infiniment petit, la nature de l'espace et du temps, ainsi qu'un domaine appelé la gravité quantique, qui était justement celui de ma thèse. Le Perimeter Institute avait décidé de recruter plusieurs

chercheurs réputés du monde entier, notamment mon directeur de thèse. J'avais eu la chance de le suivre en Amérique du Nord pendant près de trois ans.

Douze ans s'étaient écoulés, et je voyageais maintenant avec ma femme, Céline, et nos trois enfants. La traversée était longue, mais les filles se montraient calmes. Elles avaient profité des dessins animés diffusés sur les écrans et il ne nous restait plus qu'une heure de vol avant l'atterrissage. Pour passer le temps, Marine avait eu la bonne idée de lire à ses sœurs un des livres qu'elle avait reçus pour Noël : un imagier d'animaux du monde entier.

— Vous voyez, ça, c'est le zèbre, expliquait-elle. Là, le lion. Et ici, l'éléphant.

— Est-ce qu'il y avait déjà des animaux avant ? demanda Charlotte d'un air candide.

— Non. Avant, il n'y avait pas d'animaux sur la Terre, juste des poissons dans la mer.

— Ah... et avant les poissons ?

— Je crois qu'il y avait de toutes petites bêtes dans la mer, tenta d'expliquer Marine.

À la fois curieux et ému, je tendis l'oreille. Marine semblait songeuse, jusqu'au moment où elle se tourna vers moi :

— Dis, Papa, les premières petites bêtes dans la mer, elles sont arrivées comment ?

Aussi fondamentale qu'elle soit, la question de l'apparition de la vie sur Terre reste encore largement mystérieuse. Nous savons que tout a commencé dans l'eau et que les premiers organismes étaient unicellulaires, c'est-à-dire composés d'une unique cellule – ce



sont ceux que Marine appelait naïvement les « toutes petites bêtes ». Mais à ce jour, il n'existe pas de scénario parfaitement établi pour expliquer comment ces premières cellules ont pu apparaître.

Si on écarte l'idée selon laquelle des aliens seraient venus sur Terre dans leur vaisseau spatial afin d'y déposer ces organismes primordiaux, il faut se résoudre à envisager que la vie a pu apparaître spontanément. Mais comment ?

## **L'hypothèse d'Oparine**

On estime aujourd'hui que l'Univers est âgé d'environ 13,8 milliards d'années. En comparaison, la Terre fait figure de jeunette puisqu'elle n'affiche que 4,5 milliards d'années au compteur ! Mais une fois la Terre formée, la vie y est apparue relativement rapidement, puisque les plus anciennes traces dont nous disposons seraient celles de bactéries ayant vécu il y a environ 3,5 milliards d'années.

Pour expliquer l'existence de la vie sur Terre, l'hypothèse la plus naturelle est d'imaginer qu'elle soit apparue spontanément et sous l'effet du hasard : des réactions chimiques élémentaires ont pu se produire, constituer diverses molécules qui, avec le temps, se sont rencontrées et assemblées pour donner les premiers êtres unicellulaires.

Un scénario plausible, et pourtant, l'idée d'une émergence spontanée de la vie sur Terre a longtemps été considérée comme improbable. On sait en effet



**Figure 1.** Une vue d'artiste de la Terre il y a 4 milliards d'années. À cette époque, notre planète était soumise à de fréquents bombardements de météorites, et la Lune se trouvait vraisemblablement deux fois plus près de nous qu'elle ne l'est aujourd'hui. Elle paraissait donc deux fois plus grosse.

qu'en conditions naturelles, c'est-à-dire hors des cellules, les molécules de base du vivant, comme les protéines ou l'ADN, sont très facilement endommagées par la présence d'oxygène. Il s'agit du phénomène dit d'oxydation, celui-là même qui fait rouiller le fer.

Or notre atmosphère et nos océans sont riches en oxygène... Il est donc impensable que les premières briques du vivant aient eu le temps de se former et de s'assembler en cellules avant d'être détruites par l'oxydation. C'est pourquoi de nombreux scientifiques ont promu la théorie dite de la panspermie, selon laquelle les premières cellules vivantes auraient pu arriver sur Terre dans des météorites.

C'est alors que, dans les années 1920, le biochimiste russe Alexandre Oparine fit une suggestion audacieuse en faveur de l'idée de l'émergence spontanée de la vie : et si l'atmosphère terrestre n'avait pas toujours été ce qu'elle est aujourd'hui ? Et si, il y a 3,5 milliards d'années, elle avait été dépourvue d'oxygène ? Dans ces conditions, les molécules de base du vivant auraient pu se former et s'assembler sans être dégradées. Une idée simple, mais qui ne fut testée que trente ans plus tard.

## L'expérience de Miller

Afin de valider la proposition d'Oparine, Stanley Miller a effectué en 1952 une expérience fascinante et dont le principe semble simple : recréer en miniature dans son laboratoire les conditions qui régnaient sur Terre à l'époque de l'apparition de la vie.

Pour cela, Miller utilisa trois ingrédients : une fiole remplie d'eau chauffée, pour simuler l'océan ; des décharges électriques, sous forme d'étincelles pouvant figurer l'impact d'éclairs ; et un mélange de gaz censé représenter l'atmosphère terrestre primitive. Pour composer son atmosphère, Miller fit appel à de l'hydrogène ( $H_2$ ), du méthane ( $CH_4$ ) et de l'ammoniac ( $NH_3$ ). Bien sûr, conformément à l'idée d'Oparine, Miller s'assura que ce mélange infernal ne contenait pas d'oxygène (Figure 2).

Qu'a-t-il constaté ? Tout d'abord que son liquide changeait progressivement de couleur pour devenir