

Xavier PINTAT

*Président de la Fédération nationale des collectivités concédantes et régies (FNCCR),
Président du Syndicat départemental d'énergie électrique de la Gironde (SDEEG), Sénateur
de la Gironde*

Nous avons le plaisir d'accueillir M. Jean-Pierre Luminet, grand scientifique qui fait honneur à notre pays dans un domaine de recherche à la fois fascinant et déterminant pour l'avenir. Il a notamment travaillé sur les trous noirs, les comètes et les astéroïdes. Notre avenir réside dans ces travaux de recherche et dans ces dimensions qui bien souvent nous dépassent. Notre vision du futur est en effet parfois trop ancrée dans le présent. Nous devons apprendre à voir plus loin. C'est le rôle de personnalités comme M. Jean- Pierre Luminet de nous y aider. Il est l'auteur de nombreux ouvrages scientifiques et de vulgarisation, et l'un de ces passeurs de sciences qui nous permettent de croire, à défaut de le comprendre, en ce qui se passe dans l'univers.

Durant les trois jours, la FNCCR multiplie ses travaux sur les services publics. Nous tentons de trouver les meilleures solutions dans un monde qui change, et comment gérer des ressources rares (eau, énergie, etc.). Ces réflexions ont besoin d'être éclairées par un moment différent, un moment de respiration. C'est le sens de votre intervention, qui pourra faire le lien entre cet avenir qui nous semble très lointain et notre uni- vers qui nous paraît parfois limité et agité par de multiples secousses et menaces.

Les ressources EN EAU ET EN ENERGIE DANS LE COSMOS

Jean-Pierre LUMINET

Astrophysicien, écrivain et poète, Directeur de recherches au CNRS, membre du Laboratoire Univers et théories (LUTH) de l'observatoire de Paris-Meudon.

Je souhaite vous entretenir d'astrophysique autour d'une problématique fascinante, celle de l'eau et de l'énergie à l'échelle de la planète et de l'univers.

o L'élément eau dans l'Antiquité

L'eau a toujours joué un rôle symbolique fondamental dans l'idée que les philosophes et les savants se sont forgée de la constitution du monde. L'un des premiers philosophes de l'Antiquité grecque, Thalès (6e siècle avant Jésus-Christ), a essayé de rationaliser les visions du cosmos qui dominaient en son temps - on pensait alors que le cosmos était entièrement gouverné par les caprices des dieux. Pour cela, il a fait appel à la physique (1). Pour lui, l'eau était le fondement de toute chose. Thalès avait quelques idées aujourd'hui dépassées. Il pensait, par exemple, que la Terre était un corps flottant sur de l'eau et que l'eau était « la cause matérielle de toute chose ». Ces idées ont été développées par les philosophes grecs, notamment Platon et Aristote qui ont essayé de penser le cosmos en termes d'éléments constitutifs fondamentaux : la terre, l'eau, l'air, le feu, et un cinquième élément qu'ils ont appelé la cinquième essence ou la quintessence. Cette dernière était censée représenter un fluide extrêmement subtil qui remplissait le ciel et dans lequel se mouvaient les astres.

Ces visions ont abouti à une construction intellectuelle de l'organisation du cosmos qui plaçait la terre au centre et en bas, l'eau au-dessus de la terre, l'air au-dessus de l'eau, le feu au-dessus de l'air, puis les sphères célestes et planétaires. Cette conception a perduré jusqu'à la vision copernicienne du 16e siècle.

o L'eau dans l'univers depuis l'astronomie moderne

Aujourd'hui, l'on sait que l'univers s'étend très au-delà de notre système solaire. Ce dernier est centré sur le soleil autour duquel gravitent un ensemble de corps. Par rapport au soleil, ces corps sont situés à des distances qui jouent un rôle très important sur la possible présence d'eau à l'état liquide.

La Terre

Parmi ces corps, la Terre est la troisième planète la plus importante de notre système solaire. On l'appelle la planète bleue depuis les premières missions lunaires et les premières vues de la planète entière depuis l'espace. 70 % de la surface terrestre sont recouverts d'eau. La Terre n'est toutefois pas une planète aqueuse puisque la masse totale d'eau est extrêmement faible par rapport à la masse totale de la planète (de l'ordre de 0,025 %). Seule la couche très superficielle de la Terre peut abriter de l'eau. 97,2 % de l'eau terrestre est de l'eau salée, contenue dans les océans et les mers, et 2,8 % est de l'eau douce. Cette dernière est essentiellement située dans les calottes polaires et les glaciers, puis dans les eaux souterraines, les lacs et les cours d'eau et enfin dans l'atmosphère.

La planète Mars

Les clichés astronomiques de la planète Mars font apparaître une calotte brillante au pôle Nord, signe de la présence de glace. Il aurait pu s'agir de glace de gaz comme le dioxyde de carbone, mais les missions spatiales récentes ont confirmé la présence de glace d'eau sur la planète rouge.

Mars fait l'objet de nombreux fantasmes, notamment celui de l'existence de civilisations avancées sur la planète pouvant y vivre grâce à la présence d'eau à l'état liquide. À la fin du 19e siècle, les astronomes équipés de télescopes à la résolution encore moyenne ont observé des structures sur Mars qu'ils ont interprétées comme étant des canaux artificiels remplis d'eau, résultats selon eux d'une civilisation qui aurait tenté de canaliser l'eau liquide restant sur la planète. Les cartes produites se sont ensuite avérées totalement inexactes. Cette mauvaise interprétation est à la fois due à un facteur psychologique - les astronomes avaient envie de voir ces canaux artificiels sur Mars - et à un facteur physiologique - celui de la fatigue de l'œil qui au fil de l'observation des structures a eu tendance à créer des liens artificiels entre ces structures. Il a fallu de nombreuses observations, notamment à l'observatoire de Meudon, pour infirmer l'existence de ces canaux martiens.

Il y a cependant des structures sur la planète Mars. Plusieurs engins spatiaux se sont posés sur Mars. Ils ont confirmé l'absence d'eau sur cette planète qui est en réalité un désert très aride. En moyenne, la température y est de - 60 °C. S'il existe des traces d'eau, celle-ci ne peut être que congelée, dans les pôles ou contenue dans des poches souterraines.

o La présence d'eau liquide et de vies sur Mars

Cependant, en prenant un peu de recul, les cartographies de Mars montrent la présence abondante d'eau liquide sur la planète dans le passé puisqu'elles font apparaître des lits de grandes rivières asséchés, des fonds océaniques, de vastes lacs, etc. Il s'agit là d'une bonne nouvelle, au regard de nos interrogations constantes concernant l'existence d'autres formes de vie dans l'univers. Il n'existe pas de bonnes définitions de la vie, cependant nous savons que quelques conditions doivent au moins être réunies: l'une de ces conditions est la présence d'eau à l'état liquide. En effet, la vie s'est fondée sur la chimie du complexe, c'est-à-dire la chimie organique², et sur la capacité de propagation des interactions électromagnétiques d'une molécule à l'autre grâce à la présence d'un fluide - l'eau - et de l'énergie. On estime que, s'il y a eu de l'eau liquide sur Mars, il y a eu aussi de l'énergie ainsi que de la chimie du

carbone - le carbone étant universel - et, par conséquent, que la vie a existé sur la planète à l'époque où elle réunissait ces conditions favorables.

Il est intéressant par analogie de s'interroger sur la vie terrestre. Il y a 4 milliards d'années, sur la Terre alors âgée d'environ 500 millions d'années, se sont formées les prébiotiques, c'est-à-dire les super-macromolécules qui constituent les acides aminés, les nucléotides, etc., qui ont pu interagir entre elles grâce à l'eau liquide. La vie est quant à elle apparue il y a 3,8 milliards d'années à travers les premières bactéries. Le passage entre le prébiotique et le vivant reste encore mystérieux mais l'on est certain que la vie est née au fond des océans, dans l'eau avec comme source d'énergie celle de la Terre (3). On estime que les millions d'espèces connues sur Terre ne représentent que 10 % de toutes celles qui existent. Parmi les 90 % d'espèces inconnues, figurent notamment des bactéries extrémophiles, capables de vivre dans des conditions extrêmement hostiles (par exemple, dans les geysers du parc Yellowstone aux États-Unis à 200-300 °C).

S'il existe des formes de vie telles que les bactéries extrémophiles sur Terre, on peut imaginer que des formes de vie existent ou aient existé sur Mars.

1 Thalès appartenait effectivement à une école philosophique appelée les Physiciens de Milet

2 Le carbone est le seul atome capable de s'accrocher à de nombreux autres atomes pour former des super-molécules.

3 Les explorations très profondes des fosses océaniques révèlent la présence de sources hydrothermales (jaillissements d'énergie à travers les failles du magma terrestre) et la présence de formes de vie extraordinaires qui s'y sont développées dans des conditions d'obscurité totale et de pression atmosphérique immense. 4 La zone d'habitabilité autour d'une étoile est la zone qui n'est ni trop près ni trop loin de l'étoile de façon à ce que la température moyenne soit comprise entre 0 et 100 °C, laissant la possibilité à l'eau d'exister à l'état liquide.

o Le destin de la planète Mars

Toutefois, si les différentes planètes du système solaire sont nées dans les mêmes conditions, leurs destins ont rapidement divergé. Leur distance par rapport au soleil en est l'une des raisons : Vénus est sur le bord interne de la zone d'habitabilité (4) du soleil, Mars sur son bord externe et la Terre au milieu de celle-ci. Mais le destin de ces trois planètes, formées dans les mêmes conditions, a bifurqué essentiellement en fonction de leur masse. Vénus et la Terre ont des masses comparables mais plus importantes que celle de Mars. La pesanteur étant trop faible sur Mars, la pression atmosphérique de la planète a diminué en quelques centaines de millions d'années jusqu'à ce que l'atmosphère disparaisse complètement. Or, sans pression atmosphérique, une partie des rivières s'envole et l'autre partie se congèle. Vénus ne présente pas non plus d'eau liquide en raison de la très forte présence de Gaz à effet de serre (GES), à l'origine d'une température moyenne de 450 °C sur la planète.

Mars a donc abrité au mieux des formes de vie primitive il y a 3,8 milliards d'années, lorsque la vie est apparue sur Terre - cette thèse repose toutefois sur l'hypothèse scientifiquement raisonnable que la vie est le résultat de conditions physiques et chimiques favorables (eau, carbone et énergie). Si la vie sur Mars a existé, elle est probablement microbienne et fossilisée depuis quelques milliards d'années.

Actuellement, Mars fait l'objet d'explorations pour tenter de trouver ces traces de vie fossiles. Les dernières images obtenues par la mission spatiale Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) font apparaître des ravinements d'eau, signe qu'il y a encore des résurgences aqueuses (5). Ces ravinements datent peut-être de quelques millions d'années mais restent relativement récents à l'échelle de la planète. Ils laissent imaginer qu'il peut encore y avoir des bactéries extrémophiles dans les couches profondes des lacs gelés de Mars, capables de renaître au moment des résurgences.

On ne sait toujours pas si Mars abrite des bactéries fossiles. Plus qu'intéressante scientifiquement, une telle découverte répondrait à la question de la pluralité de planètes habitées, et aurait des conséquences d'ordre métaphysique, philosophique, idéologique, religieuse, etc. Il suffit de trouver un seul exemple de vie extra-terrestre, aussi primitive soit-elle, pour avoir la certitude que le miracle de la vie ne s'est pas produit que sur la Terre.

o L'eau dans les satellites

Sur un magnifique cliché de Mars, figure un cratère d'une vingtaine de kilomètres de diamètre creusé par le choc d'une comète. Au fond de ce cratère, l'on voit une énorme couche de glace (5 km de diamètre et 400 m d'épaisseur). Il ne s'agit en fait pas d'eau martienne mais d'eau provenant de la comète. Les comètes sont composées de 50 % d'eau et, lorsqu'elles s'écrasent sur une planète, y laissent leur eau (6).

Dans le système solaire, Mars n'est peut-être pas la meilleure planète pour abriter de la vie. Depuis que des sondes spatiales permettent d'explorer le système solaire lointain, on s'aperçoit que les grosses planètes gazeuses (Jupiter, Saturne, Uranus, etc.) sont entourées de très nombreux satellites naturels (certains aussi grands que la Lune et que la Terre). La surface de ces satellites est recouverte de glace.

Par exemple, le satellite de Jupiter, Europa, est recouvert d'une banquise. Celle-ci présente des craquelures et des fractures, parce que le cœur d'Europa est chaud. On peut donc imaginer qu'il existe un océan liquide entre la banquise et le cœur chaud du satellite. De l'eau liquide se trouve donc bien dans le système solaire. Europa dispose également d'une source d'énergie, son énergie interne, et abrite également du carbone (élément abondant partout). Nous découvrirons peut-être un jour la présence de bactéries dans cet océan subglaciaire d'Europa.

Le satellite de Saturne, Encelade, est lui aussi entièrement recouvert de glace. Il y a quelques années, la sonde spatiale Cassini a photographié quatre volcans de glace entrant en éruption, c'est-à-dire laissant s'échapper de la vapeur d'eau. Ce document constitue une autre preuve de la présence d'eau liquide à l'intérieur d'Encelade. La sonde, par ailleurs équipée d'un analyseur chimique, a révélé que la vapeur contenait également quelques molécules organiques.

o L'eau dans les comètes

L'eau semble être présente partout dans le système solaire, et ce depuis l'origine. Cette idée est confortée par l'observation des comètes. Les comètes sont les vestiges du système solaire primitif. Ce sont des roches amalgamées de glace de différents gaz. Lorsque ces roches s'approchent du soleil, elles s'évaporent et déploient ce que l'on désigne comme la chevelure des comètes (7). Les chevelures cométaires sont composées d'au moins 50 % d'eau et de plusieurs composés, y compris organiques; y ont même été trouvés des acides aminés. Les comètes seraient donc des vecteurs transportant les ingrédients fondamentaux de la vie dans différents endroits du système solaire. Les comètes datent de l'origine du système solaire et n'ont pas évolué depuis. Elles fournissent donc des informations précieuses sur l'histoire du système solaire et sa composition il y a 4 milliards d'années.

La mission spatiale Rosetta, actuellement menée par l'Agence spatiale européenne (ASE), a l'ambition de déchiffrer la première écriture chimique du système solaire (8). Partie en 2004, une sonde se posera sur le noyau d'une comète en 2014, lorsque celle-ci sera au niveau de l'orbite de Jupiter et s'approchera du soleil. Elle pourra alors analyser la constitution du gaz qui s'échappera de la comète, et par conséquent la constitution du système solaire primitif.

Ces différentes missions conduisent à penser que les composés favorables au vivant, puisqu'ils se trouvent dans les comètes, ont été présents à l'origine du système solaire.

o La formation du système solaire

Il existe, dans l'univers, de très vastes nuages de gaz - essentiellement composés d'hydrogène, ils constituent ce que l'on appelle le milieu interstellaire - dont certaines parties se contractent parfois. La condensation de ces vastes nuages d'hydrogène donne naissance aux étoiles (elles-mêmes essentiellement des boules d'hydro- gène).

Notre système solaire est né de la nébuleuse présolaire qui date d'environ 5 milliards d'années. Une étoile située à proximité de la nébuleuse pré-solaire a explosé - ce phénomène très violent est appelé supernova. L'onde de choc produite a déclenché une instabilité dans la nébuleuse pré-solaire et l'a fait se contracter. Le début de la contraction a été suivi par un aplatissement général, dû au mouvement de rotation induit. La condensation centrale a donné naissance au soleil. La gravitation a entraîné la réunion de la matière - du gaz et des poussières - dans des anneaux au sein desquels se sont formés des grumeaux. Ces grumeaux en excès de densité ont grossi sous l'effet de la gravité: les planètes se sont ainsi formées⁹. L'analyse de météorites et d'autres outils ont permis de dater très précisément l'origine du système solaire et de la Terre à 4,566 milliards d'années.

o Le ciel, à l'origine de l'eau sur Terre

Pendant les premiers temps agités du jeune système solaire (environ 600 millions d'années), la Terre a été bombardée par un véritable déluge de météorites et de comètes qui y ont apporté de l'eau et des matériaux organiques. Des rapports isotopiques de l'eau présente sur Terre, récemment réalisés, ont révélé la présence d'un isotope naturel et rare de l'hydrogène: le deutérium. Ces rapports ont été comparés aux observations de la composition de l'eau présente ailleurs dans le système solaire, comparaison qui a montré que l'eau sur Terre présentait le même rapport isotopique que l'eau trouvée dans les comètes, les astéroïdes, etc. Il est donc probable que toute l'eau présente sur Terre provienne du système solaire (10).

Un article récemment publié par une équipe française décrit les 160 premiers millions d'années de l'histoire du système solaire: pendant 30 millions d'années, les grumeaux se sont agglomérés et ont grossi pour former les planètes; 30 millions d'années après, un impact géant a conduit à la formation de la Lune à partir de la Terre; après une certaine accalmie, la Terre a connu une époque de bombardements intenses de quelques dizaines de millions d'années - c'est durant cette période que l'eau serait arrivée sur Terre.

o Les astéroïdes, futures mines de l'espace

Les comètes, essentiellement composées d'eau, ne sont pas les seules à avoir apporté de l'eau sur Terre. Des corps plus rocheux, composés d'un peu moins d'eau, sont également tombés sur notre planète : les astéroïdes (11).

Le système solaire est composé du soleil situé en son centre, des planètes internes (de la plus proche du soleil à la plus éloignée : Mercure, Vénus, la Terre puis Mars) et des autres planètes plus lointaines (Jupiter, Saturne, Uranus, etc.). Mars et Jupiter sont séparées par une plus grande distance que les autres planètes, et par des millions de petits astéroïdes alors que, selon la théorie des anneaux, il devrait y avoir une planète entre elles. Ce serait en fait la masse énorme de Jupiter qui aurait perturbé la formation du système solaire et empêché l'agrégation de tous ces petits corps pour former une planète. Le plus petit astéroïde mesure quelques mètres de diamètre, et le plus gros 1 000 km. Ces petits corps transportent un petit peu d'eau mais surtout des matières premières.

Les astéroïdes rocheux sont les futures mines de l'espace. Ils comportent tous les éléments présents sur Terre dans des proportions différentes. Les éléments de la Terre, qui était à

l'origine liquide, se sont différenciés: les éléments lourds sont tombés au fond de la planète (fer, nickel, etc.). Ils sont donc moins abondants en surface, et incorporés dans des alliages et difficiles à extraire (ce qui renvoie à la problématique d'épuisement des ressources). À la différence de la Terre, les astéroïdes n'ont jamais fondu, car ils sont trop petits. Les éléments présents depuis l'origine sur les astéroïdes - et dans des proportions similaires à la Terre dans ses premiers millions d'années - y sont donc restés, y compris en surface. Lorsque les ressources en matières premières seront épuisées sur Terre ou deviendront trop coûteuses à extraire, il sera peut-être plus simple d'aller recueillir sur la surface des astéroïdes de l'or, du cobalt, du platine, etc. L'exploitation industrielle des astéroïdes commence à être très sérieusement envisagée. 1 km³ d'astéroïde à demeure représenterait 100 000 milliards d'euros de matières premières. Très récemment, des start-up américaines ont identifié des astéroïdes relativement proches de la Terre : les astéroïdes géocroiseurs, dont la trajectoire au lieu d'être calée entre Mars et Jupiter les amène très près de la Terre. Ces sociétés ont calculé qu'il sera possible d'ici quelques années d'entamer une exploitation industrielle de ces petits astéroïdes. Il s'agit par exemple de la société Planetary Resources fondée en 2012 (qui compte parmi ses investisseurs les Présidents- directeurs généraux de Google), et de la société Deep Space Industries créée en 2013 - celle- ci prévoit le départ de premiers vaisseaux d'ici quatre ou cinq ans.

5 Le robot Curiosity, déposé sur Mars par la NASA en août 2012, a également pris une photographie révélant des structures caractéristiques d'un écoulement aqueux d'après les géologues spécialistes

6 La présence de réserves d'eau sur Mars est une bonne nouvelle dans la mesure où lorsque l'homme s'y installera - dans des bases scientifiques d'abord, puis dans des bases habitées -, il n'aura pas besoin de transporter de l'eau depuis la Terre

7 La chevelure des comètes peut s'étaler sur plusieurs centaines de millions de kilomètres_

8 D'où son nom, choisi en référence à la pierre de Rosette_

9 Ce scénario de formation des planètes du système solaire est confirmé par de nombreuses observations d'autres systèmes solaires en cours de formation dans l'univers_

10 À une époque, l'on pensait que la majorité de l'eau présente sur Terre y avait été formée par des processus géologiques_

11 Jean-Pierre Luminet est l'auteur d'un ouvrage consacré aux astéroïdes intitulé Astéroïdes : la Terre en danger et publié en 2012 aux éditions Le Cherche Midi

o Les exoplanètes

Chaque étoile étant analogue à notre soleil, il est logique de penser que des planètes gravitent autour de chacune d'elle (12). Ces planètes sont appelées exoplanètes, ou planètes extrasolaires. Les moyens considérables développés depuis une quinzaine d'années permettent de détecter chaque semaine de nouvelles planètes extrasolaires.

Il y a deux ou trois ans, un nouveau télescope spatial, baptisé Kepler, a été inauguré. Il doit permettre de détecter plus spécifiquement les exoterres, c'est-à-dire des planètes extrasolaires qui seraient situées dans la zone d'habitabilité d'étoiles ressemblant à notre soleil. Par exemple, dans le système Kepler-62, ont été détectées au moins cinq planètes dont deux se situent dans la zone d'habitabilité.

La question de l'existence possible de la vie dans l'univers n'est plus seulement philosophique. Elle devient réellement scientifique. À terme, l'on espère avoir les moyens de détecter à distance la vie dans l'univers, ou plus précisément sa signature à travers deux éléments fondamentaux : l'eau et l'oxygène. Imaginons que des astronomes extraterrestres s'interrogent comme nous sur l'existence d'autres formes de vie dans l'univers, qu'ils mesurent avec leurs instruments la composition chimique de l'atmosphère des planètes du système solaire, et qu'ils s'aperçoivent de la présence sur Terre de dioxyde de carbone (gaz présent dans toutes les

atmosphères planétaires) mais aussi de vapeur d'eau et d'ozone. Les biochimistes ont montré que la présence de ces trois gaz était une signature de vivant: c'est en effet parce qu'il y a de la vie sur la Terre (essentiellement la synthèse chlorophyllienne) que ces gaz sont présents. Un projet nommé Darwin doit nous permettre, à l'horizon 2025-2030, de réaliser ces mesures pour les planètes extrasolaires voisines de la Terre et, peut-être, de révéler la présence de la vie sur celles-ci.

o Le milieu interstellaire

La couleur des étoiles reflète leur âge et la température à leur surface (13). Contrairement à ce que l'on peut penser, les étoiles ne sont pas dans le vide mais elles baignent dans un milieu, appelé milieu interstellaire, dont on ne voit pas la lumière à moins de l'observer avec un puissant télescope avec un long temps de pose. Le milieu interstellaire est essentiellement du gaz, composé à 90 % d'hydrogène et de traces d'autres éléments. Il s'agit d'un milieu très turbulent.

La nébuleuse d'Orion, l'une des plus belles situées dans la constellation d'Orion, est relativement jeune et donne naissance à des étoiles. Grâce à des télescopes spatiaux très sophistiqués, il est possible de mettre en évidence la présence d'éléments chimiques à partir d'observations à distance. Des mesures ont ainsi montré la présence d'eau et de composés organiques (monoxyde de carbone, dioxyde de soufre, méthanol, etc.) dans cette nébuleuse. De l'eau se forme en permanence dans les nuages interstellaires : par exemple, la nébuleuse d'Orion produit chaque jour l'équivalent de 60 fois la quantité d'eau présente sur Terre.

o L'eau dans les étoiles

L'eau est donc un élément omniprésent dans l'univers et provient de l'énergie. L'énergie est elle aussi présente partout dans l'univers, et tout d'abord dans les étoiles. La température au centre du soleil s'élève à 15 000 °C. Le soleil agit comme une centrale nucléaire à fusion: la fusion de quatre noyaux d'hydrogène à très haute température conduit à la formation d'un noyau d'hélium et à la perte d'un peu de masse qui se transforme en énergie; celle-ci est évacuée à travers les couches. La moitié de l'énergie produite l'est sous forme d'énergie électromagnétique (la lumière véhiculée par des photons), et l'autre moitié sous forme de particules appelées neutrinos.

Une étoile ordinaire comme notre soleil consomme chaque seconde 600 millions de tonnes d'hydrogène. Sa durée de vie est estimée à 10 milliards d'années - aujourd'hui, le soleil est âgé de 4,5 milliards d'années. Il arrivera un moment où le soleil n'aura plus d'hydrogène en son centre. L'hélium se mettra alors lui-même à fusionner, produisant du carbone et de l'oxygène et une chute du débit d'énergie nucléaire. L'étoile entrera alors dans la fin de sa vie normale. On appelle « étoile moribonde » une étoile qui, après l'épuisement de ses réserves, s'est démesurément dilatée et est devenue une étoile géante rouge - ce que notre soleil deviendra dans 4 milliards d'années. Les couches extérieures de l'étoile s'étant éloignées du centre, se désolidarisent et finissent par se diluer dans le milieu interstellaire. Le cœur de l'étoile s'éteint alors progressivement et se contracte pour donner naissance à un cadavre d'étoile, appelé naine blanche.

La mort d'une étoile peut être beaucoup plus violente et spectaculaire : c'est l'explosion de supernova. Les étoiles significativement plus massives que le soleil - environ 10 % des étoiles - évoluent plus rapidement et, à la fin de leur vie, se dilatent et explosent très violemment. L'explosion de supernova dégage une énergie extraordinaire. Pendant quelques jours, cette énergie est équivalente à l'énergie émise par le soleil durant toute sa vie. Lorsqu'une supernova explose dans notre galaxie, elle peut être vue à l'œil nu.

La supernova, lorsqu'elle explose, fabrique tous les éléments chimiques de la table de Mendeleïev. Ces éléments se retrouvent alors dans le vestige gazeux de supernova qui se propage dans l'espace. Lorsqu'un nuage interstellaire rencontre ce vestige gazeux, il est déstabilisé et donne naissance à de nouvelles étoiles alorsensemencées de tous les éléments chimiques dégagés. Parmi tous les éléments chimiques, figure l'oxygène. L'oxygène, élément fondamental de l'eau, trouve donc son origine dans l'évolution des étoiles.

L'hydrogène n'est quant à lui pas formé dans les étoiles, puisque celles-ci sont initialement formées d'hydrogène. Son origine est donc antérieure à l'existence des étoiles. Depuis le Big Bang, l'univers - très dense et très chaud initialement - s'est dilaté et refroidi. La dilatation et le refroidissement de l'univers se sont accompagnés de la formation de grumeaux (étoiles, galaxies, etc.). Trois minutes à peine après l'expansion du Big Bang (il y a 13,8 milliards d'années), la température moyenne de l'univers a chuté à 10 milliards de degrés : les particules élémentaires de l'univers ont alors commencé à s'agréger pour former les premiers noyaux d'hydrogène, d'hélium et de leurs isotopes. C'est ce que l'on appelle la nucléosynthèse (synthèse atomique primordiale).

Ainsi, il y a 13,8 milliards d'années, ont été formés les atomes d'hydrogène. Quelques milliards d'années plus tard, les étoiles ont commencé à fabriquer l'oxygène. Puis ces molécules se sont combinées dans les grands nuages interstellaires pour ensuite se retrouver dans les systèmes solaires naissants, les comètes et les anneaux de planète.

12 Il y a 400 ans, Galilée et Kepler ont été les premiers à comprendre que les étoiles étaient des soleils

13 Les étoiles bleues sont des étoiles jeunes et chaudes, les rouges et orange sont des étoiles plus âgées, et les jaunes sont des étoiles de type solaire

o L'énergie dans les étoiles

Il existe dans l'univers des phénomènes énergétiques beaucoup plus puissants que ceux auxquels on peut assister sur Terre. À la fin de leur vie, les grandes étoiles explosent en supernova en libérant en quelques jours des énergies équivalentes à 10 milliards d'années de vie d'une étoile comme le soleil. Or une étoile sur 10 000 environ a une masse énorme (plus de 100 fois la masse du soleil). Par exemple, l'étoile Eta Carina - située dans une autre galaxie et condamnée à très court terme (dans 100 ou 1000 ans) - est tellement massive qu'en explosant elle donnera naissance à un phénomène parmi les plus énergétiques que l'univers aura connu: une hyper- nova (plus de 1 000 fois plus énergétique qu'une supernova). Aujourd'hui, on observe des explosions d'hypernova un peu partout dans l'univers sous la forme d'éclairs de rayonnement de très haute énergie (rayonnement gamma), que l'on appelle des sursauts gamma et qui durent un dixième de secondes à 50 secondes. Dans cet intervalle de temps, l'énergie émise est équivalente à l'énergie des 100 milliards d'étoiles d'une galaxie. Lors d'une hypernova, le cœur de l'étoile est tellement massif qu'en se contractant, il donne naissance à l'objet le plus fascinant de la physique - le trou noir - et libère une énergie phénoménale (14).

Les trous noirs sont donc une source d'énergie extraordinaire, au moment de leur formation mais aussi une fois formés. Si le trou noir en lui-même ne libère pas d'énergie, son environnement est le lieu de processus énergétiques considérables. En effet, le trou noir attire la matière et l'avale. Avant d'être avalée, la matière est comprimée et chauffée, et émet des rayonnements extrêmement énergétiques. La plupart des étoiles vivent dans des systèmes de plusieurs étoiles (le plus souvent de deux étoiles). Dans un couple stellaire, l'une des deux étoiles peut exploser et donner naissance à un trou noir ; l'autre étoile reste à l'état gazeux et est progressivement aspirée par le trou noir. Se produit alors un transfert de gaz de l'étoile gazeuse vers le trou noir. Le gaz auparavant chauffé libère du rayonnement X.

Les galaxies sont de gigantesques rassemblements d'étoiles (15). Certaines galaxies sont très brillantes, car elles ont des cœurs extrêmement énergétiques. Les plus connues d'entre elles sont les quasars. Certains quasars libèrent une puissance de 1040 watts (soit 10 000 milliards de milliards de luminosité solaire) parce qu'ils entourent un trou noir géant qui représente plusieurs milliards de fois la masse du soleil et est capable d'avaler des étoiles entières.

La question est de savoir s'il sera un jour possible de récupérer ces débauches d'énergie. Les trous noirs tournent sur eux-mêmes. On a imaginé des processus - que seules des civilisations plus avancées technologiquement que la nôtre pourront toutefois développer - qui permettraient d'envoyer des ordures et des déchets dans un trou noir, et de récupérer l'équivalent de leur masse en énergie ainsi qu'une fraction de l'énergie rotationnelle du trou noir, en jetant les ordures dans le sens contraire au sens de rotation du trou noir.

Evidemment, dans l'histoire de l'univers, la source principale d'énergie reste le Big Bang lui-même. L'histoire de l'univers s'articule en deux phases. La première a duré environ 400 000 ans. Durant cette période, l'univers était très dense et très chaud, opaque et sans lumière. Il est invisible au télescope. Dans la seconde phase qui nous amène à aujourd'hui, l'univers est transparent. L'apparition de la lumière dans l'histoire de l'univers a constitué une transition entre ces deux phases et permet d'observer la lumière résiduelle (rayonnement fossile) au télescope. En 2013, le télescope européen Planck a cartographié le rayonnement fossile du jeune univers, au moment où il a émis pour la première fois de la lumière. L'analyse précise des caractéristiques du rayonnement fossile permet aujourd'hui de connaître la composition énergétique de l'univers et de savoir où l'énergie est stockée dans l'univers, au-delà de la matière (étoiles qui explosent, galaxie, hypernova, trou noir, etc.). L'ensemble des étoiles dans l'univers ne représente que 0,5 % de toute l'énergie présente dans l'univers. La lumière à l'état pur ne représente que 0,05 % de l'énergie. Les neutrinos renferment quant à eux autant d'énergie que la matière. La matière ordinaire (composée d'atomes) mais dite noire, car n'émettant pas de lumière, abrite environ 4 % de l'énergie - il y a 10 fois plus de matière ordinaire dans l'univers que d'étoiles. La matière noire (qui n'est pas composée d'atomes comme nous) représenterait 27 % de l'énergie. Le reste de l'énergie (68 %) est ce qu'on appelle l'énergie noire, ou énergie sombre. Cette énergie est diffuse dans l'espace - il n'est donc pas envisageable aujourd'hui de la récupérer - et gouverne le destin de l'univers: on sait que l'univers est en expansion et que cette expansion s'accélère, car l'énergie noire a tendance à faire exploser l'espace en allant contre la gravitation engendrée par la matière. L'énergie noire remplit l'espace et accélère sa vitesse de dilatation.

Le Centre européen pour la recherche nucléaire (CERN), grâce aux accélérateurs de particules, tente de reconstituer des phénomènes de très haute énergie, que l'univers a dû connaître dans son histoire, à travers la collision de particules élémentaires. C'est ainsi que des chercheurs ont observé le boson de Higgs, particule qui n'a pu exister que dans l'univers primordial et qui aurait joué un rôle fondamental à cette époque.

Finalement, depuis le début presque de l'univers, l'essentiel de l'énergie vient du vide. L'énergie du vide n'est pas nulle et est potentiellement une richesse extraordinaire. Elle fluctue et l'on pense que ces fluctuations ont produit tout ce qui existe dans l'univers, et aurait même produit l'univers lui-même. Chaque fluctuation de l'énergie du vide représente la probabilité de matérialisation de cette énergie en un espace temps matière, c'est-à-dire un univers. Cela suggère qu'il n'existe pas seulement notre univers mais un multivers - les autres univers n'ayant pas les mêmes caractéristiques que le nôtre.

ECHANGES AVEC LA SALLE

De la salle

Vous parlez de consensus concernant le modèle du Big Bang. Pourtant d'autres hypothèses ont récemment été développées en Allemagne en particulier.

Jean-Pierre LuMINeT

Par consensus, je désigne le courant majeur de la recherche aujourd'hui en faveur du modèle du Big Bang. Cela ne veut pas dire pour autant qu'il s'agisse de la vérité mais qu'aucun modèle alternatif ne fonctionne. Les voix discordantes existent heureusement. Elles permettent soit de faire des découvertes majeures et de s'orienter vers un autre modèle, soit pour les partisans du modèle en cours de l'améliorer et de l'affiner.

14 Selon l'équivalence $E = mc^2$ (E étant l'énergie ; m , la masse ; et c , la vitesse de la lumière), une petite masse est capable de libérer une quantité d'énergie phénoménale

15 On estime à 1 000 milliards le nombre de galaxies existant dans l'univers aujourd'hui observables