Existe-t-il d'autres Terre ? p. 44
Comment est apparue la vie ? p. 46
Où faut-il chercher la vie sur Mars ? p. 48
Y a-t-il eu quelque chose avant le big bang ? p. 50

Les 7 énigmes

Les questions fondamentales, en astronomie, sont peu nombreuses. Nous en avons identifié sept, auxquelles les chercheurs rêvent de répondre, sept domaines dans lesquels ils investissent tous leurs efforts. Ces dernières années, les progrès ont été réels. L'occasion de faire un point accessible à tous.

1 Existe-t-il d'autres Terre ?

L'ÉNIGME : Aujourd'hui, on le sait : notre galaxie grouille de planètes ! Nous en connaissons déjà 600 ! Est-ce que, parmi cette multitude, se cache une jumelle de la Terre ?

LES PISTES : La variété des planètes déjà trouvées.

L'ENJEU : Cette autre Terre serait la meilleure candidate pour y chercher une forme de vie.

+ À écouter sur www.cieletespaceradio.fr/jui.752

Exoplanètes, le bon grain et l'ivraie avec Franck Selsis

TOUT s'est passé si vite : 552 planètes découvertes depuis 1995 (et même certainement davantage à l'heure où vous lisez ces lignes), alors qu'il avait fallu à l'humanité toute son histoire pour en découvrir seulement huit ! Autour de ces paisibles points blancs qui scintillent au-dessus de nos têtes, pullulent en réalité une nuée de planètes… Et dire que, dans ce fourmillement se cache sans doute une autre Terre ! "Sans doute", car il manque à en établir la preuve. La plupart des exoplanètes connues sont des géantes gazeuses du gabarit de Jupiter. Les planètes rocheuses, elles, ne sont que 34. Et dans ce maigre échantillon, hormis PSR 1257+12a, aussi minuscule que la Lune, toutes sont au moins deux fois plus massives que notre planète. Ce qui ne les classe pas tout à fait dans la même catégorie : les astronomes les qualifient de "super-Terre". Plus grosses, mais aussi beaucoup plus proches de leur étoile que nous du Soleil. Ainsi, Kepler 10c, une super-Terre 1,4 fois plus grande que notre planète, découverte en mai 2011 dans la constellation du Dragon, est si proche de son étoile qu'elle en fait le tour en 19 heures ! Il y fait si chaud que les roches de sa surface sont vraisemblablement en fusion : c'est une planète de lave, rouge incandescent !

Pour trouver une planète bleue, il faudrait plutôt creuser du côté de GJ1214 b, dans la constellation du Serpentaire. Sa densité globale estimée est plus proche de celle de l'eau que de celle de la pierre. Intégralement recouverte d'eau, elle serait une planète océan, une gigantesque perle bleue naviguant dans un espace noir d'encre… Seulement cette fois, elle est 6 fois plus massive que la Terre.

À l'évidence, la jumelle de la Terre ne fait pas partie du premier contingent découvert. Mais cela n'entame pas l'optimisme de Marc Ollivier, de l'Institut d'astrophysique spatiale : *"Certes, la majorité des exoplanètes observées sont des 'Jupiter chaudes'. Mais cet échantillon n'est pas le reflet de la réalité."* Selon lui, nous n'en sommes

Comment sont nées les premières galaxies ? p. 52

Le Soleil peut-il s'emballer ? p. 54

Où est passé l'Univers ? p. 55

de l'Univers

ESO/C&E Photos

qu'aux balbutiements de cette exploration. Il est donc logique que les planètes géantes se dévoilent les premières. En effet, jusqu'à 2009, la principale technique pour détecter les exoplanètes était indirecte : on déduit leur existence des mouvements de leur étoile. On trouve donc en priorité les planètes les plus massives, qui ont une influence gravitationnelle flagrante, et les plus proches de leur étoile : les fameuses "Jupiter chaudes".

Mais elles ne sont pas fatalement représentatives de la réalité. C'est même l'inverse : en 2009, le télescope spatial Kepler a été lancé par la Nasa pour chasser les exoplanètes. La technique consiste cette fois à se focaliser pendant plusieurs années sur une petite zone du ciel, entre la constellation du Cygne et de la Lyre. Kepler y mesure la luminosité de 156 000 étoiles sur plusieurs années. Si par moment celle-ci diminue, c'est qu'une planète est probablement passée dans le champ, éclipsant en partie l'étoile !

Aujourd'hui, l'équipe de Kepler annonce avoir trouvé 1 235 candidates planètes autour de 997 étoiles, qu'il faudra confirmer pour les ajouter aux 552 de la liste officielle. Mais le premier résultat est capital : les Jupiter chaudes sont minoritaires ! On compte beaucoup plus de "Neptune", également gazeuses, mais d'une quinzaine de masses terrestres.

Quant aux planètes telluriques… 68 auraient un diamètre inférieur à 1,25 fois celui de la Terre ! On touche au but, sauf si l'on a derrière la tête l'idée d'une vie possible, car alors la distance à l'étoile entre également en ligne de compte, ainsi que sa composition chimique, son atmosphère, son champ magnétique, etc. Bref, les astronomes du futur vont devoir rivaliser d'ingéniosité pour réussir à détecter tout ça à des milliers d'années-lumière de distance. Alors de là à y observer des rivières, des nuages, des montagnes, il faudra être patient.

En attendant, nous pouvons gonfler notre espoir en extrapolant à la Galaxie nos premières bribes de connaissance : la Voie lactée contient quelque 230 milliards d'étoiles, et un tiers d'entre elles pourraient être accompagnées de planètes telluriques. Cela laisse peu de doute sur le fait que les éclaireurs de l'espace que sont les astronomes pourront un jour s'écrier "Terre en vue !"

Benoît Rey

O. Dennet/C&E Photos

« L'avenir devrait nous montrer que les planètes de la taille de la Terre foisonnent »

Marc Ollivier, astrophysicien

2 Comment est apparue la vie ?

L'ÉNIGME : Comment et où se sont formées les premières briques de vie sur la Terre ?

LES PISTES : L'atmosphère, le fond des océans, ou l'espace.

L'ENJEU : Affiner notre recherche d'autres planètes capables d'accueillir une forme de vie.

Manchu/C&E Photos

Entre les nombreux éclairs et la pluie d'astéroïdes, les conditions violentes de l'atmosphère terrestre primordiale ont pu favoriser l'apparition des briques de la vie : des molécules organiques complexes, dont la synthèse nécessite de grosses quantités d'énergie.

LA vie sur Terre a existé bien avant nous. Elle a même passé 90 % de son histoire à patauger dans l'océan, avant d'émerger il y a 500 millions d'années... Mais avant ? Comment tout cela a-t-il commencé ? Sous quelle forme est-elle née ? André Brack, du Centre de biophysique moléculaire du CNRS, à Orléans, fait l'état des lieux sur ce sujet.

Ciel & Espace : Avant tout chose, qu'est-ce que la vie ?

André Brack : La définition de la vie dépend de la profession. Pour nous, les exobiologistes, la vie a commencé lorsque des systèmes chimiques alimentés en matière première et en énergie ont été capables pour la première fois de s'autoreproduire et d'évoluer. C'était il y a environ 4 milliards d'années.

C&E : À quoi ressemblaient ces premiers organismes ?

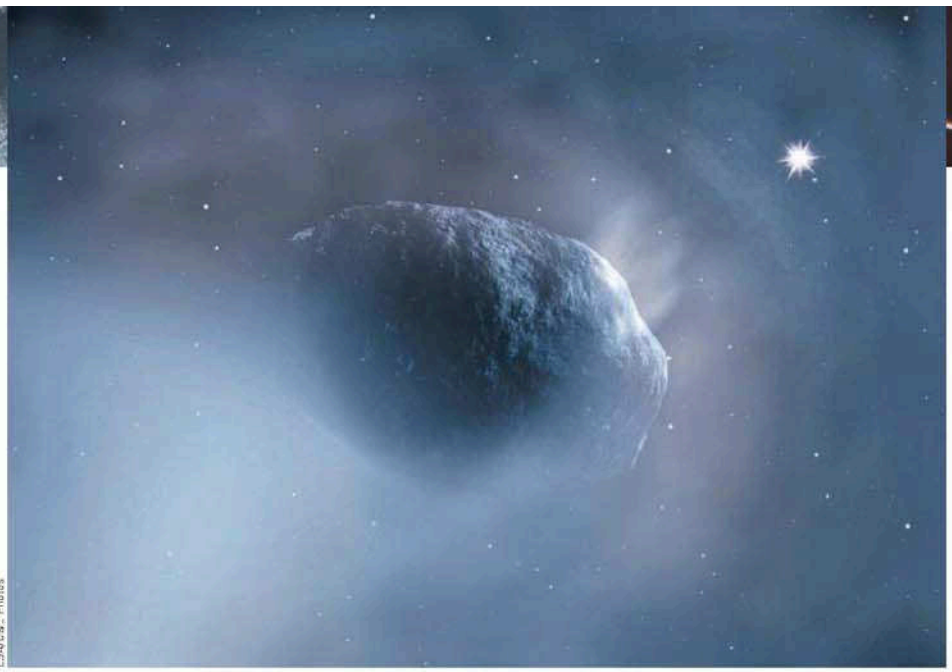
A. B. : Ce n'étaient pas à proprement parler des "organismes", mais plutôt des groupes de molécules organiques qui se sont assemblées par le jeu du hasard. Elles-mêmes provenaient de molécules carbonées gazeuses plus simples, comme le dioxyde de carbone, le monoxyde de carbone ou le méthane.

C&E : L'histoire aurait donc commencé dans l'atmosphère ?

A. B. : C'est une première hypothèse. Il y a cinquante ans, Stanley Miller a réalisé une expérience historique. En déclenchant des arcs électriques dans un gaz riche en méthane pour simuler la foudre dans l'atmosphère primordiale, il a recueilli 17 acides aminés, qui entrent dans la composition des protéines. Ils sont donc considérés comme les premières briques de la vie terrestre.

C&E : Nous serions donc tous issus d'un coup de foudre ?

A. B. : Eh non, pas sûr ! Si les éclairs étaient effectivement nombreux à cette époque, on sait aujourd'hui que le méthane n'était pas le composant majoritaire. Or s'il n'est pas en majorité dans le gaz en laboratoire, il ne se produit pas grand-chose.



ESA/C&E Photos

Grâce à l'énergie du rayonnement solaire, les premières briques de la vie ont pu se former au sein des astéroïdes, avant qu'ils ne s'abattent en masse sur la Terre. La vie serait alors d'origine céleste !

C&E : Alors de quoi s'agirait-il ?
A. B. : Les premières briques de vie pourraient être apparues sous l'eau, tout au fond de l'océan qui recouvrait intégralement la planète. Par endroits, de l'eau infiltrée dans le manteau ressort à 220 °C. Une température suffisante pour synthétiser des acides aminés.

C&E : La chaleur n'est-elle pas censée détruire les molécules ?
A. B. : La chaleur est dans un premier temps nécessaire pour synthétiser des molécules complexes. Mais aussitôt il faut les refroidir pour ne pas les détruire, effectivement. Justement, ces fameux "fumeurs noirs" sont localisés à des profondeurs abyssales. À quelques mètres à peine de l'endroit où l'eau brûlante jaillit, il fait déjà −4 °C !

C&E : Y a-t-il encore une autre hypothèse ?
A. B. : Oui : les ingrédients de la vie primitive seraient d'origine extraterrestre. On a en effet retrouvé des acides aminés dans des météorites. Ils auraient été synthétisés dans l'espace sur des astéroïdes et des comètes, puis seraient tombés sur la surface de notre globe, principalement sous forme de poussières.

C&E : Lequel de ces trois scénarios vous semble le plus probable ?
A. B. : Le dernier ! Les micrométéorites pénètrent l'atmosphère actuelle au rythme de 20 000 tonnes par an. Si on extrapole ce résultat à la Terre primordiale, on obtient un flux de 1 000 fois à 10 000 fois plus important ! Au total, la quantité de carbone importée depuis l'espace à cette époque est supérieure à celle qui compose toute la biomasse actuelle ! Cependant, il n'y pas de raison *a priori* pour que les deux autres mécanismes ne soient pas également intervenus. La vie tire certainement son origine dans une combinaison des trois scénarios.

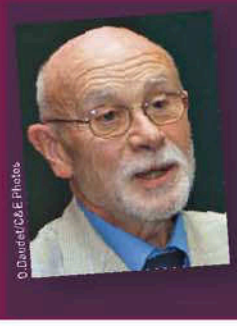
C&E : Quand sera-t-on définitivement fixé ?
A. B. : Probablement jamais. Même si les travaux actuels aboutissent, si on parvient à créer de la vie en laboratoire à partir des molécules contenues dans les micrométéorites, dans les conditions qui simulent celles de la Terre primordiale, on ne pourra jamais vraiment confirmer que c'est vraiment ce qui s'est passé sur Terre… car notre bonne vieille planète a effacé toutes les preuves entre-temps. Les fossiles ont été détruits à cause de la tectonique des plaques, de l'érosion des océans, ou à cause des rayons ultraviolets du Soleil, ou même à cause de la vie elle-même, qui s'est mise à produire de l'oxygène corrosif il y a 2 milliards d'années. Toutefois, il est possible que l'on trouve un jour des vestiges de vie sur Mars : les conditions de départ y ont été exactement les mêmes que sur Terre, mais la planète rouge n'a pas eu le même destin. La tectonique n'a pas été généralisée, les océans se sont vite retirés, il se pourrait donc que des fossiles du balbutiement de la vie y aient été épargnés.

C&E : L'eau liquide est omniprésente dès qu'on parle de la vie. Toutefois, peut-on imaginer une vie sans eau, et pourquoi pas même sans carbone ?
A. B. : À l'évidence, il faut un liquide ; dans un solide, les atomes ne peuvent pratiquement pas bouger et, dans un gaz, les molécules sont bien trop dispersées. À la place de l'eau, l'ammoniaque pourrait convenir aussi à la rigueur, mais il est bien moins abondant dans l'Univers que celle-ci !
Quant à l'atome de carbone, il peut former quatre liaisons avec d'autres atomes. C'est idéal pour former des molécules complexes. Le silicium pourrait également convenir, mais sa forme oxydée SiO_2 est nettement moins pratique que le CO_2 : elle est solide. On ne peut rien exclure. Peut-être existe-t-il quelque part dans la Galaxie un monde où les organismes sont composés à 90 % d'ammoniaque et expirent du sable…

Propos recueillis par Benoît Rey

+ À écouter sur www.cieletespaceradio.fr/jui.752
Chimie du vivant : son origine est dans l'espace
avec Louis D'Hendecourt

La vie a pu naître aussi au fond des océans, là où les "fumeurs noirs" crachent de l'eau du manteau terrestre à plus de 200 °C.

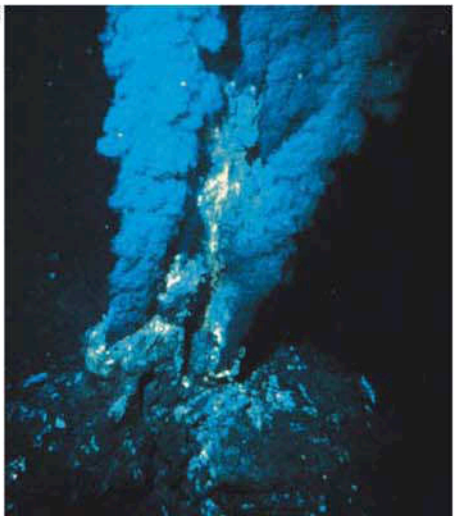


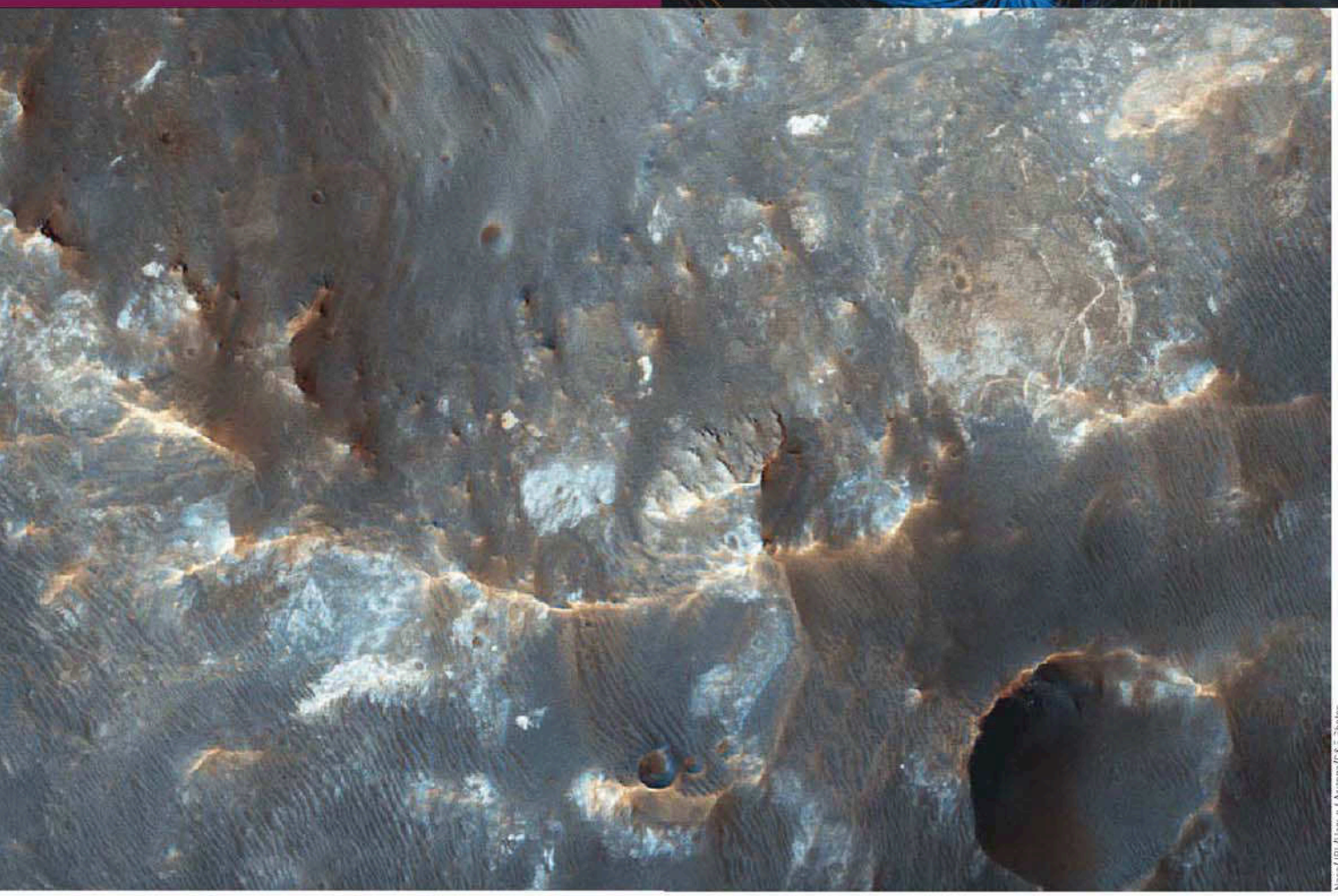
O.Dupont/C&E Photos

« La vie commence quand des systèmes chimiques sont capables de s'autoreproduire et d'évoluer »

André Brack, exobiologiste

DR





Nasa/JPL/University of Arizona/C&E - Photos

Le fond du cratère Holden, sur la planète Mars, est vu ici en haute résolution par la sonde Mars Reconnaissance Orbiter. Des argiles y ont été détectées. C'est désormais la piste la plus sérieuse pour chercher les vestiges d'une antique vie martienne.

Où faut-il chercher la vie sur Mars ?

L'ÉNIGME : Y a-t-il eu une vie sur Mars, où l'on voit les indices d'un passé plus clément qu'aujourd'hui ?

LES PISTES : Des terrains riches en argiles, qui se forment avec de l'eau.

L'ENJEU : Découvrir une vie martienne, même ancienne, indiquerait que la vie apparaît dès que certaines conditions sont réunies.

+ À écouter sur www.cieletespaceradio.fr/jui.752

Mars Science Laboratory (Curiosity), la Rolls de l'astromobile martien avec Sylvestre Maurice

Mars, où faut-il se poser ? avec François Forget

"*À moins de trouver un jour un fossile de homard dans les sables de Mars, nous devrons nous contenter encore longtemps d'indices et de débats.*" Par cette boutade, François Forget, spécialiste de la planète rouge à l'université Pierre et Marie Curie (Paris), l'affirme : l'énigme d'une vie martienne est toujours d'actualité. Les planétologues ont acquis une certitude : de l'eau a coulé en abondance sur cette planète, même si aujourd'hui elle ne possède plus qu'une atmosphère si ténue qu'elle ne permet pas l'existence de l'eau liquide. La vie a-t-elle pu y éclore et subsister jusqu'à aujourd'hui ?

"*Si on veut chercher de la vie actuelle sur Mars, on doit trouver de l'eau liquide en profondeur,* explique François Forget. *De telles nappes d'eau pourraient être liées à une activité géothermique. Mais les radars des sondes Mars Express et Mars Reconnaissance Orbiter n'ont donné aucun indice de leur existence.*" Autre méthode : déceler l'influence d'une forme de vie sur l'environnement martien. Notamment parce que la vie, même bactérienne, produit du méthane. Or, des chercheurs ont clamé avoir détecté du méthane dans l'atmosphère de Mars en 2003, par des observations au télescope. "*Cette détection a déclenché une polé-*

J.-L. Dauvergne/C&E Photos

A. Poitier/C&E Photos

« Nous devons trouver un endroit qui a été propice à la vie et où ces indices ont été conservés »

François Forget, planétologue

Curiosity (ci-dessus en maquette à l'échelle 1) est un véritable laboratoire ambulant, d'une autonomie minimale de 100 km. Dès 2012, il cherchera des indices de vie à la surface de la planète rouge.

mique, toujours actuelle, note François Forget. *Parce qu'elle n'est pas certaine. Si elle est avérée, elle montre une variation de la quantité de méthane au fil des ans. Ce qui signifierait qu'il y a une source abondante et régulière de ce gaz. Mais on n'a plus vu de méthane depuis 2005..."*

Le robot Curiosity, qui doit être lancé cet automne, disposera d'une diode capable de déceler de très infimes proportions de méthane et pourrait trancher. Les chercheurs prennent l'affaire suffisamment au sérieux pour avoir programmé en 2016 un satellite, Trace Gas Orbiter, spécialement dédié à cette recherche ! *"Mettre en évidence une vraie source de méthane serait extraordinaire*, dit François Forget. *Il resterait toutefois à trancher s'il s'agit du résultat d'une activité biologique ou si ce méthane provient d'une activité géothermique."*

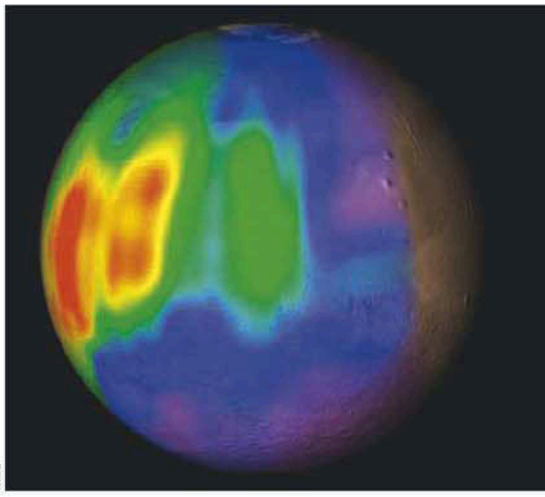
Les spécialistes espèrent davantage exhumer des traces d'une vie ancienne. Les mesures effectuées par les sondes révèlent en certains lieux la présence d'argiles, qui sont des minéraux altérés par de l'eau. Or, à la même époque (il y a 4 milliards d'années), on pense que la vie était déjà apparue sur la Terre. *"Ce qui s'est passé alors sur Mars reste en débat*, prévient François Forget. *L'eau a-t-elle subsisté en continu sur de longues périodes, ou n'est-elle apparue qu'à l'occasion d'événements épisodiques ?"* Si on fait l'hypothèse d'un environnement clément, on s'attend à trouver une vie bactérienne simple. Pas davantage. Les traces en seraient des fossiles de bactéries, des matrices géologiques d'organismes vivants (des structures sédimentaires issues d'organismes vivants) ou des molécules organiques très particulières (certains acides aminés).

Dans tous les cas, il va falloir examiner cela de près, voire creuser assez profond. *"Nous devons trouver un endroit qui a été propice à l'apparition de la vie et où ces indices ont été conservés"*, précise François Forget. Les fossiles sont sans doute les traces les moins fragiles. Même si les bactéries n'ont pas résisté à l'épreuve du temps, par minéralisation, leurs empreintes ont pu rester gravées dans les roches argileuses et dans les sulfates. Les matrices géologiques peuvent aussi être préservées dans les argiles.

Enfin, les molécules organiques, infimes vestiges d'organismes vivants, sont beaucoup plus fragiles. En surface, soumises aux rayonnements énergétiques venus de l'espace et aux agents oxydants, elles n'ont eu aucune chance de subsister. De plus, la radioactivité naturelle (lire p. 60) ou le contact avec d'autres molécules les détruisent inexorablement. Pour espérer en trouver, il faudra donc aller en profondeur. C'est l'ambition de la mission Exomars C, prévue pour 2018. Le robot mobile européen doit être doté d'une foreuse capable de creuser à plusieurs mètres sous la surface. Ses échantillons seront placés dans des containers en attendant qu'un autre vaisseau automatique vienne les chercher pour les apporter sur Terre. Là, ils seront analysés très précisément afin de révéler ce qu'ils cachent...

Le cap est donc mis non pas sur les lieux d'écoulements des anciennes rivières martiennes, mais sur les terrains où de l'argile a été découverte. C'est là que Curiosity posera vraisemblablement ses roues en 2012. Avec, toujours, le fol espoir de trouver un homard fossilisé...

Philippe Henarejos



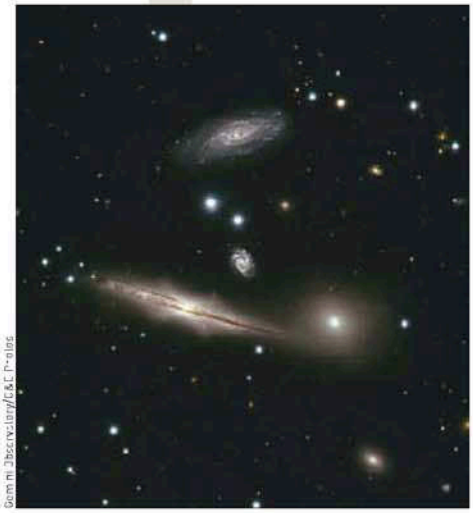
Nasa

Cette carte montre la répartition du méthane détecté dans l'atmosphère martienne en 2005. Des mesures contestées depuis. Curiosity nous en dira plus...

Sur ce cliché à grand champ d'une sonde Viking, on voit des traces d'écoulements d'eau importants. Premier indice qu'une vie ait pu apparaître, ces terrains sont aujourd'hui considérés comme de fausses pistes.

Nasa/JPL/USGS/C&E Photos

4 Y a-t-il eu quelque chose avant le big bang ?



Gemini Observatory/C&E Photos

Les étoiles, le gaz interstellaire, les galaxies, et finalement tout ce qui existe est issu d'une phase antérieure très chaude et très dense. Mais cette phase, qu'est-ce qui l'a créée ? Qu'y avait-il avant ? Aujourd'hui, la question n'est plus taboue.

L'ÉNIGME : Des avancées en physique théorique laissent penser qu'il aurait existé une phase antérieure à l'expansion de l'Univers.

LES PISTES : Cette phase pourrait être décrite par des théories encore en élaboration, comme la théorie des cordes.

L'ENJEU : Comprendre d'où, ou de quoi, est issu l'Univers tel que nous le connaissons.

+ C À écouter sur www.cieletespaceradio.fr/jui.752

Ombres et lumières sur l'origine de l'Univers
avec Étienne Klein

PEUT-on remonter à une époque antérieure au big bang ? Alain Riazuelo, cosmologiste à l'Institut d'astrophysique de Paris, répond.

Ciel & Espace : Cela a-t-il un sens de parler d'un avant-big bang ?

Alain Riazuelo : Oui, dès lors que l'on a en tête que ce n'est pas l'instant de la naissance de l'Univers. C'est juste une certaine époque de son évolution, où il était beaucoup plus dense et plus chaud — sans que cela préjuge d'un instant initial de son histoire.

Nous avons plusieurs preuves du big bang. On mesure par exemple que l'abondance de l'hélium dans l'Univers est six fois plus importante que celle que l'on peut attribuer à sa fabrication dans les étoiles. C'est donc qu'il a été synthétisé par l'Univers lui-même très tôt dans son histoire. Mais pour cela, il faut qu'il ait été suffisamment chaud, porté à plusieurs milliards de degrés. La formation des baryons, c'est-à-dire la matière qui nous compose, nécessite une température bien plus importante encore.

C&E : Dans ce modèle, plus on remonte le temps, plus la température du cosmos augmente. Mais jusqu'où ?

A. R. : À partir d'un certain niveau de température et de densité, nous ne savons plus comment se comporte la matière. Au-delà, nous ne savons même plus quelles sont les lois physiques qui régissent l'Univers. Et on ne peut espérer reproduire expérimentalement ces époques ! Grâce au LHC, le grand accélérateur de particules du Cern, on est sur le point de pouvoir reproduire ce qu'il se passe à des énergies de l'ordre de quelques téraélectronvolts, soit entre 10 et 100 millions de milliards de degrés. C'est un record, mais c'est bien en deçà des énergies mises en jeu dans l'Univers primordial, plusieurs milliards de fois plus élevées.

Pour remonter aussi tôt dans l'histoire de l'Univers, il faut l'observer tel qu'il est aujourd'hui, et y détecter les traces que le big bang a laissées. Il faut aussi développer une théorie qui tienne compte des effets quantiques. Le modèle du big bang repose essentiellement sur la théorie de la relativité générale. Or on sait, depuis Lemaître lui-même, que c'est un cadre trop limité pour décrire l'évolution de l'Univers.

C&E : La théorie des cordes est favorite pour unifier la relativité générale à la mécanique quantique. Elle pourrait expliquer ce qu'il y a eu avant le big bang ?

A. R. : Oui, si elle est exacte et que les calculs ne sont pas inextricables. Lorsqu'on l'applique à la cosmologie, de façon encore un peu naïve, elle donne en tout cas des pistes intéressantes. Par exemple, l'idée que notre Univers existe parmi beaucoup d'autres, ou qu'il est né d'un autre, ou que son évolution est cyclique. Mais ce n'est pas la seule théorie sur le marché. Il y a depuis longtemps un

D. Fossé/C&E Photos

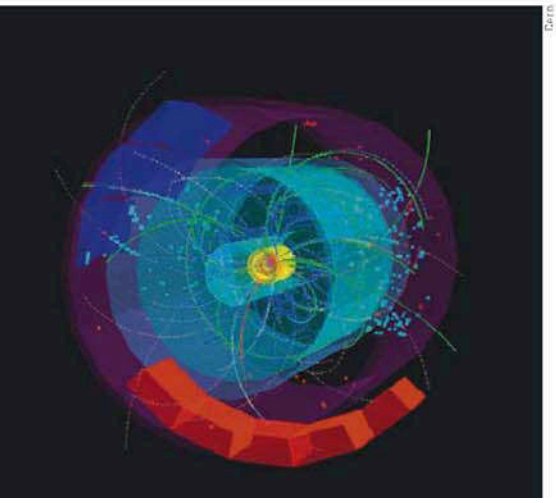
« La relativité générale est un cadre trop limité pour décrire l'évolution de l'Univers »

Alain Riazuelo, cosmologiste

P.Carril/C&E Photos

foisonnement d'idées en physique théorique, dont certaines tendent à nous éloigner d'une cosmologie de création. Évidemment, toutes ces idées sont fausses… sauf une !

Les astrophysiciens attendent beaucoup du grand accélérateur du Cern, le LHC. Sa puissance reste toutefois insuffisante pour accéder à l'avant-big bang.



Cern

C&E : Effacement du temps, univers multiples, univers à rebond… Tout ceci paraît très spéculatif. Certains pensent que ces idées ne seront jamais testables. Ne craignez-vous pas qu'elles sortent du champ de la science ?

A. R. : Il ne faut pas préjuger de ce que l'on pourra tester ou pas dans l'avenir. Aujourd'hui par exemple, grâce au satellite Planck, nous sommes sur le point de faire le tri entre certaines variétés du modèle de l'inflation — selon lequel, dans une phase très ancienne, lorsque la température de l'Univers avoisinait les 10^{29} degrés, le volume de l'Univers a été démesurément démultiplié en une fraction de seconde. Il n'est pas sûr que beaucoup de gens auraient cru cela possible voici à peine 30 ans. Mais il est vrai qu'il n'est pas certain que l'on puisse remonter beaucoup plus tôt dans l'histoire de l'Univers.

Et si notre Univers était né d'un autre univers ? Vieille comme le monde, cette idée est entrée dans le champ scientifique avec la théorie de l'inflation, dans les années 1980. L'une de ses variantes, l'inflation éternelle, le permet en théorie.

C&E : Cette recherche d'un avant-big bang serait donc vaine ?

A. R. : L'inflation a la fâcheuse tendance d'effacer les traces de l'état de l'Univers aux époques antérieures. C'est un résultat inattendu et frustrant du modèle, mais cela reste un progrès de l'avoir découvert. Cela dit, il n'est pas du tout exclu que d'infimes traces antérieures à l'inflation existent et soient découvertes par Planck ou par son successeur. Encore une fois, il est toujours hasardeux de spéculer sur la façon dont la connaissance scientifique évolue, et c'est encore plus vrai en cosmologie.

Propos recueillis par David Fossé

Certains sacralisent les étoiles ?

Nous les expliquons

Parce que tout le monde doit avoir accès à l'information, à la culture, aux sciences, nous multiplions les actions de sensibilisation à l'astronomie

E. Perrin

Reconnue d'utilité publique

Association française d'astronomie

Je souhaite devenir membre de l'Association française d'astronomie ou renouveler mon adhésion.

○ Je joins un chèque de : _____ €
au titre de :

○ membre individuel : 15 €

○ membre associé : 23 €
(associations, clubs, @teliers ciel et espace)

○ membre bienfaiteur : _____ €
(à partir de 60 €)

N° ADHÉRENT(E) (si vous renouvelez votre adhésion).....

NOM : .....

PRÉNOM : .....

ADRESSE : .....

À retourner accompagné de votre règlement à l'ordre de l'AFA :
17, rue Émile-Deutsch-de-la-Meurthe / 75014 Paris

Tél. : 01 45 89 81 44 - email : afa@cieletespace.fr

Pour connaître nos actions ou adhérer en ligne : www.afanet.fr

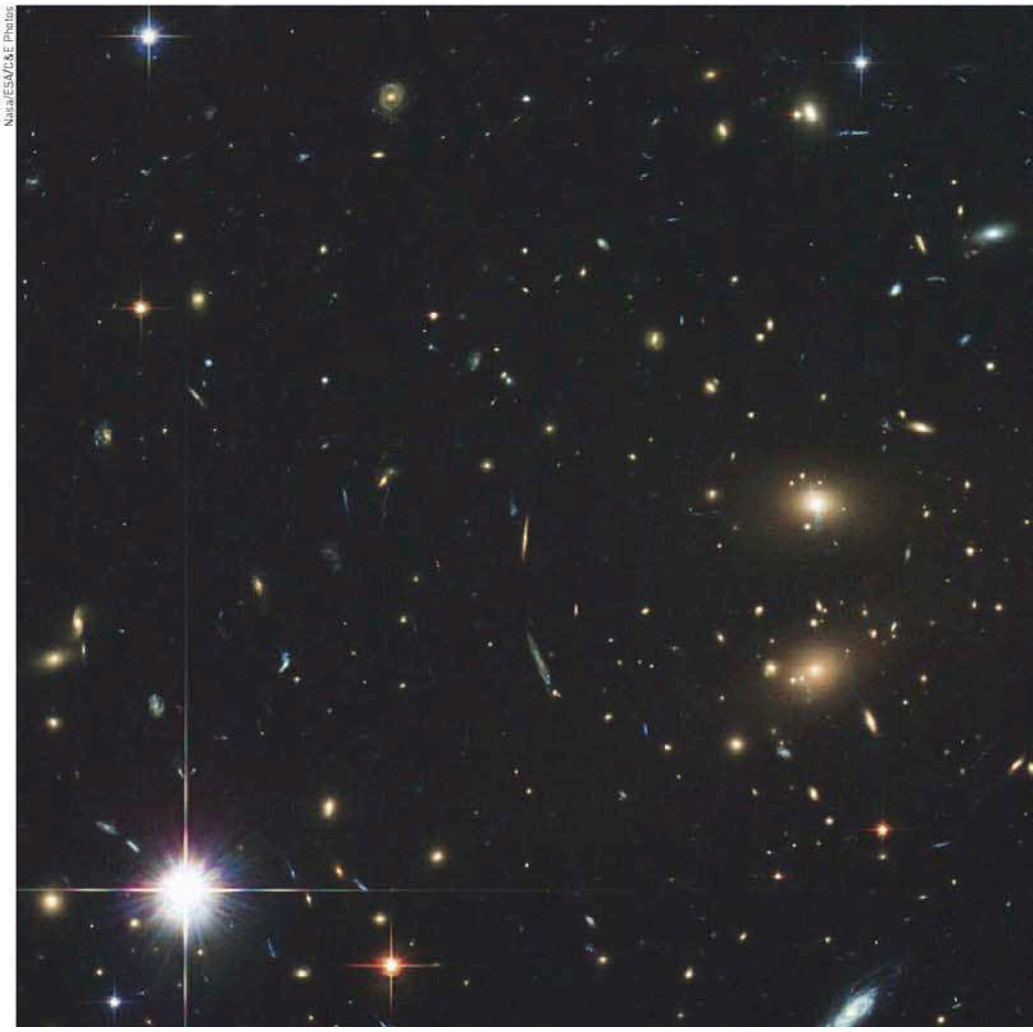
Comment sont nées les premières galaxies ?

L'ÉNIGME : Comment se sont assemblées les toutes premières galaxies de l'Univers, qui seraient apparues 200 millions d'années après le big bang ?

LES PISTES : Les simulations numériques, confrontées aux images de plus en plus fines des télescopes spatiaux.

L'ENJEU : Tester le modèle hiérarchique selon lequel les galaxies auraient grossi en absorbant les plus petites de leurs semblables.

AUJOURD'HUI encore, la naissance des toutes premières galaxies reste nimbée de mystère. *"Nous ne savons pas grand-chose de ces objets, même si nous pensons qu'ils se sont formés vers 200 millions d'années après le big bang"*, reconnaît Françoise Combes, de l'observatoire de Paris-Meudon. *"Nous sommes extrêmement limités car nos observations de telles galaxies ne permettent pas de les caractériser dans leur forme et leur mouvement*, souligne son collègue François



Nasa/ESA/C&E Photos

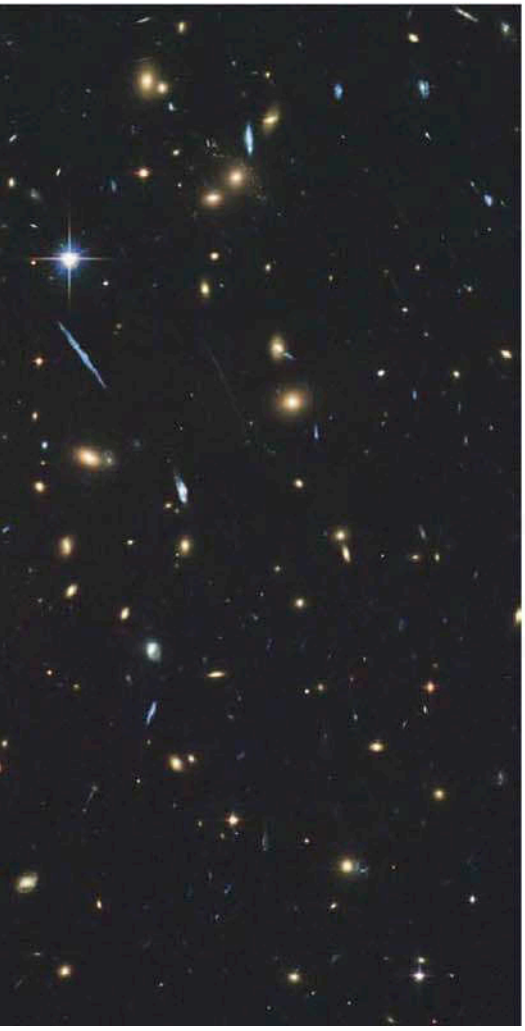
Hammer. *Nous n'en voyons que des points peu lumineux.*" Car non seulement les premières galaxies sont très lointaines, mais leur rayonnement optique est bien plus faible que celui de galaxies plus récentes, puisqu'elles ne sont composées pour leur masse que de 10 à 20 % d'étoiles. Le reste, c'est du gaz !
Heureusement pour les astronomes, une technique permet d'accroître la précision de leurs observations : l'effet de lentille gravitationnelle qui amplifie les rayons lumineux d'une galaxie lointaine lorsqu'un amas de galaxies se trouve entre elle et nous.
Quant à la masse d'une galaxie primordiale, certaines simulations montrent qu'elle équivaudrait au millième de celle d'une galaxie moderne (de l'ordre de 1 000 milliards de masses solaires, en moyenne). Elle serait également beaucoup plus compacte, avec une taille apparente de 3 à 6 millions d'années-lumière, soit le dixième de celle de notre Voie lactée. Enfin, elle ne posséderait ni bras spiraux ni barre centrale, qui sont l'apanage des structures évoluées.

D. Daudet/C&E Photos

« La forme et le mouvement de ces galaxies très lointaines sont difficiles à connaître »

François Hammer, de l'observatoire Paris-Meudon

Non seulement très lointaines, les premières galaxies sont peu lumineuses, car pauvres en étoiles. L'amplification de leur lumière par une masse à l'avant-plan nous offre cependant un moyen de les étudier. Leur image apparaît alors déformée, sous l'aspect d'arcs, comme sur cette photo de Hubble.



En revanche, les étoiles des premières galaxies étaient probablement beaucoup plus massives que celles que nous connaissons aujourd'hui. Car, pour se transformer en étoile, une boule de gaz a besoin d'atteindre une masse critique qui la fait s'effondrer sur elle-même. Or, dans l'Univers primordial, les atomes lourds comme le carbone ou l'oxygène n'ont pas encore été créés, ce qui suppose une formation à partir de nuages d'hydrogène beaucoup plus massifs que de nos jours. Une fois la réaction thermonucléaire enclenchée, les étoiles se forment lentement, en consommant moins de gaz que dans les cocons stellaires actuels. Ainsi, si l'on considère que la Voie lactée a consommé la moitié de son hydrogène en l'espace de 2 milliards d'années, une galaxie primordiale, dans le même temps, n'en aura absorbé que 10 %.
S'il reste encore de nombreux points à éclaircir, les astronomes tiennent à souligner néanmoins que, depuis plus de vingt ans, *"le domaine a connu une vraie révolution grâce aux télescopes spatiaux comme Hubble."* Les nouveaux instruments ont ainsi permis de nuancer la théorie du modèle hiérarchique, selon laquelle les premières galaxies les plus importantes s'étaient formées par assimilation progressive de leurs semblables plus petites. Il semble désormais que de grosses galaxies soient apparues dès les premières centaines de millions d'années, en se formant dans des zones plus denses de l'Univers.
Pour en savoir davantage, *"nous pourrions nous focaliser sur les objets les plus lumineux du ciel, comme les sursauts gamma"*, explique François Hammer. Ces flashes très énergétiques, que le spectrographe X-Shooter du VLT (Chili) suit depuis 2009, se produisent lorsqu'une très grosse étoile s'effondre. *"Ils correspondent à des étoiles similaires à celles apparues dans le tout jeune Univers, car on les trouve dans les régions les plus pauvres en atomes lourds."*

Nasa/C&E Photos

Le télescope spatial James Webb doit prendre la relève de Hubble dès 2014. Son miroir de 6,5 m de diamètre nous donnera accès au jeune Univers, alors qu'il avait moins de 1 milliard d'années.

Mais les astronomes attendent surtout le télescope James Webb de la Nasa, qui doit prendre la relève de Hubble vers 2014. Placé au point de Lagrange L2, à 1,5 million de kilomètres de la Terre, il sondera le cosmos lointain dans l'infrarouge et dans le visible grâce à son miroir de 6,5 m de diamètre. Objectif : capter l'image de l'Univers alors qu'il était âgé de moins de 1 milliard d'années. Et plus particulièrement la formation des premières étoiles, les trous noirs primordiaux et l'assemblage des galaxies. En attendant, le radiotélescope géant Alma (Atacama Large Millimeter Array, au Chili) devrait permettre de cartographier les nuages de gaz des premières galaxies. Ses observations commenceront au second semestre 2011.

Simon Castéran

+ L'actualité à lire sur www.cieletespace.fr

La découverte de la plus lointaine galaxie : www.cieletespace.fr/node/6199

+ À écouter sur www.cieletespaceradio.fr/jui.752

La vie mouvementée des galaxies avec P.-Alain Duc

6 Le Soleil peut-il s'emballer ?

L'ÉNIGME : Les sautes d'humeur de notre étoile sont potentiellement dangereuses pour la vie sur Terre. À quoi sont-elles dues ?

LES PISTES : L'étude de la dynamique profonde du Soleil, notamment grâce à l'héliosismologie.

L'ENJEU : Découvrir les signes avant-coureurs des colères solaires.

FAUT-IL se méfier du Soleil qui somnole ? La question peut paraître surprenante à l'heure où notre étoile semble particulièrement calme. Toutefois, *"le Soleil n'a rien d'une horloge suisse"*, prévient Allan Sacha Brun, du service d'astrophysique du CEA à Saclay. *"Le cycle d'activité actuel pourrait ainsi être plus violent que ce que l'on attend et le Soleil s'emballer alors que l'on imagine qu'il restera calme."* Les conséquences d'un réveil brutal du Soleil pourraient alors être catastrophiques pour la Terre. Notre planète pourrait ainsi se retrouver irradiée par deux fois plus d'ultraviolets, perturbant gravement la chimie de l'ozone dans l'atmosphère terrestre, et jusqu'à 100 fois plus de rayons X !

De plus, un fort surcroît d'activité du Soleil signifierait davantage d'éruptions solaires. Expulsées à grande vitesse, des particules hautement énergétiques atteindraient en quelques instants la Terre, déclenchant des orages magnétiques, mortels pour les astronautes de la station spatiale internationale comme pour les systèmes électroniques des satellites et des avions volant à haute altitude. À quoi il faudrait ajouter des pannes du réseau de distribution électrique à cause de tensions induites par des changements dans le champ magnétique terrestre. Le 13 mars 1989, un orage géomagnétique a ainsi plongé le Québec dans un *black-out* de 9 heures… En seulement 90 secondes.

Un tel scénario catastrophe risque-t-il de se reproduire bientôt ? Les chercheurs ne le pensent pas, même si le Soleil reste imprévisible. Notre étoile recèle en effet des phénomènes aussi difficiles à observer qu'à reproduire en laboratoire. Seule certitude : la dynamique du champ magnétique, qui naît dans les couches profondes du Soleil, conditionne les éruptions solaires. Autour du noyau, une épaisse couche de plasma de protons et d'électrons, la zone radiative, recouvre 70 % du diamètre solaire : la chaleur issue du cœur y circule sous forme de photons, qui entrent en collision pendant près d'un million d'années avec les particules de matière avant d'émerger dans la zone convective. C'est une deuxième couche de plasma, moins dense et moins chaude, dont les mouvements créent des courants électriques, qui engendrent à leur tour des champs magnétiques.

Mais alors que la zone radiative tourne sur elle-même d'un seul bloc en 28 jours, la zone convective qui l'entoure se déplace avec une

Nasa/SDO/AIA/Ucsc - Photos

En mars 2011, le satellite SDO surprenait une violente éruption à la surface du Soleil, pourtant considéré en période de calme actuellement. La matière éjectée matérialise des lignes de champ magnétique.

A. Paulin/CEA Photos

« Notre étoile n'a rien d'une horloge suisse. Il est complexe de prédire l'activité solaire »

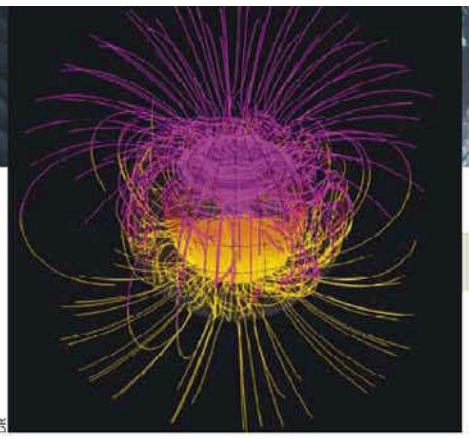
Allan Sacha Brun, du Laboratoire de dynamique stellaire (CEA)

+ C À écouter sur www.cieletespaceradio.fr/jui.752

Les derniers secrets de notre étoile avec J.-P. Zahn

+ W Pour en savoir plus, sur Internet

Un dossier de vulgarisation très complet sur le Soleil, sur le site de l'observatoire de Paris : www.lesia.obspm.fr/solaire/sciences



DR

La dynamique du champ magnétique conditionne l'apparition des éruptions solaires. Ce champ magnétique trouve son origine dans les mouvements de plasma à l'intérieur de l'étoile.

vitesse qui varie selon les latitudes : 25 jours à l'équateur, contre 33 jours aux pôles. Cette différence dans la vitesse de rotation crée une zone de cisaillement (la tachocline), qui oriente le champ magnétique de la zone convective en une structure horizontale, qui suit les parallèles. Encore méconnu, un autre phénomène de circulation de plasma de l'équateur vers les pôles, la circulation méridienne, serait également impliqué.

Pour en savoir plus, les chercheurs se penchent sur les ondes acoustiques émises par le Soleil : c'est l'héliosismologie. Celle-ci révèle les profils de pression, de densité et de température des couches de l'étoile, ainsi que sa dynamique interne. *"Or, lors du précédent cycle solaire, certains astrophysiciens ont découvert grâce à ces ondes que l'activité du Soleil était repartie, ce qui ne fut avéré qu'à partir de la fin 2009 !"* explique Allan Sacha Brun. Ce qui signifie qu'*"il pourrait y avoir une déconnexion entre le magnétisme interne révélé par ces ondes et sa manifestation en taches solaires, et donc qu'il n'y aurait pas forcément de lien entre ces dernières et le cycle de 11 ans. Le maximum d'activité pourrait donc être atteint en 2012, alors qu'il n'est attendu que pour 2014 !"*, conclut le chercheur, qui souligne toutefois qu'il ne s'agit pas là de l'hypothèse principale.

En effet, tout indique que le cycle 24, qui a débuté fin 2009, sera plutôt sage (lire notre dossier du *C&E* n° 493, juin 2011). Le précédent, déjà, s'était étiré sur 13 ans, au lieu de 11 en moyenne. À l'époque, les taches solaires, qui révèlent le dynamisme du Soleil, avaient disparu pendant plus de 200 jours en 2008 et 2009. Et malgré un sursaut d'activité en février et mars dernier, *"le champ magnétique reste faible, donc le vent solaire d'ions et électrons hautement chargés l'est tout autant"*, explique Allan Sacha Brun. Et c'est là que point un autre danger *"car, s'il était trop faible, il laisserait passer plus de rayons cosmiques sur la Terre"*, lesquels sont tout aussi mortels pour nous.

Simon Castéran

Où est passé l'Univers ?

L'ÉNIGME : Les observations suggèrent l'existence dans l'Univers d'une matière invisible, "noire", et d'une forme d'énergie nouvelle, "sombre". Mais leur nature reste mystérieuse...

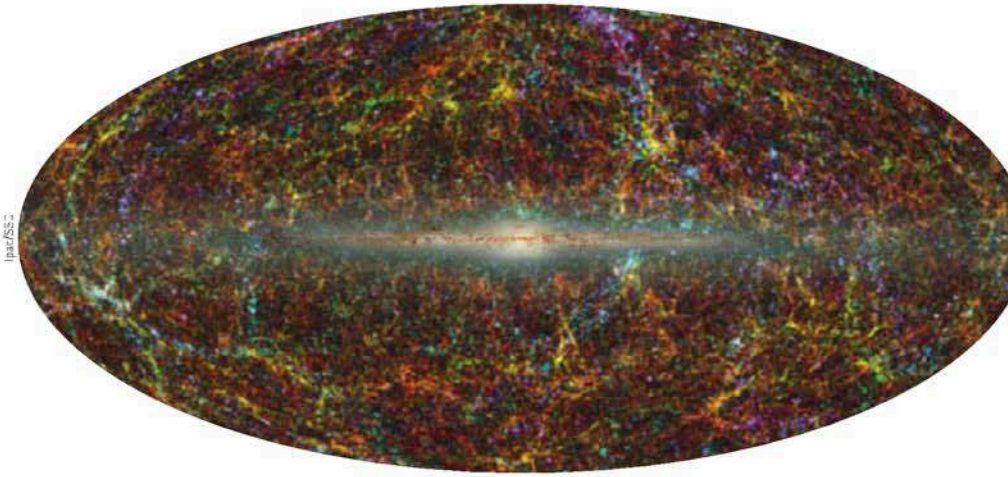
LES PISTES : La recherche de particules nouvelles, prédite par la physique des particules, bat son plein. L'essence de l'énergie noire, en revanche, reste énigmatique.

L'ENJEU : Découvrir la nature de 95 % du contenu de l'Univers, qui pour le moment nous échappent.

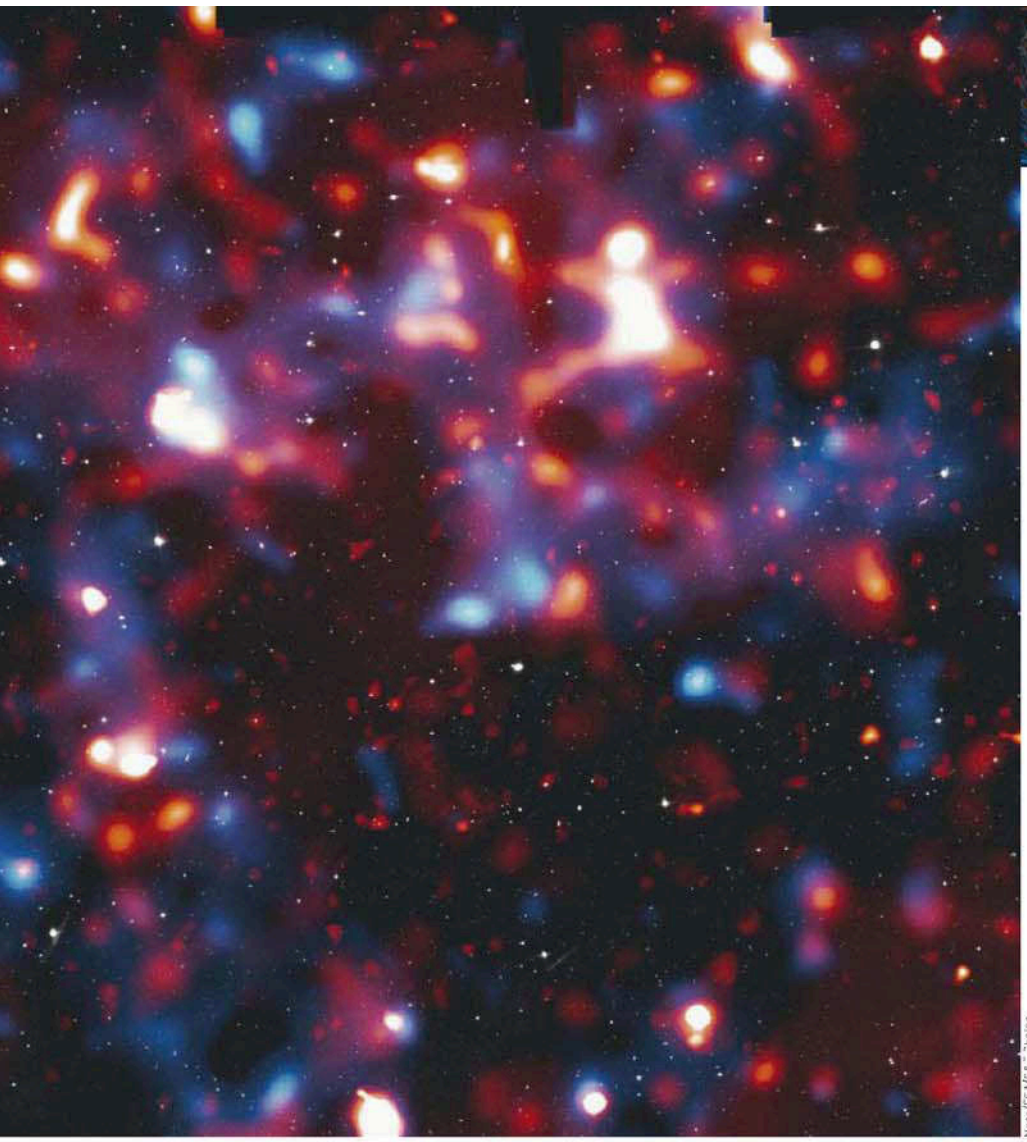
MÊME si la question sonne comme une boutade, c'est l'une des plus pesantes énigmes de l'astrophysique contemporaine. Où est passé l'Univers ? Après avoir rêvé de l'embrasser dans sa totalité grâce à des télescopes toujours plus puissants, les astrophysiciens ont réalisé qu'ils ne comprenaient seulement que 5 % du cosmos. Si étoiles, galaxies, gaz interstellaires, planètes, etc. comptent finalement pour si peu, de quoi sont composés les 95 % manquants ? Une question au cœur de la recherche sur la matière noire et l'énergie sombre. Ces deux composantes pèseraient la première pour 24 % de l'énergie totale de l'Univers et la seconde pour 71 %. Du moins si elles existent ! Car les chercheurs ont beau en être convaincus (sans elles, l'évolution de l'Univers n'est plus explicable), il reste à les identifier.

Pour la matière noire, après huit décennies d'errance, les astrophysiciens touchent peut-être au but. En 1933, Fritz Zwicky réalise que la matière qu'il voit dans l'amas de Coma ne suffit pas à expliquer les mouvements des galaxies de cet amas. Comme s'il y avait là une masse cachée. Vera Rubin, en 1975, confirme l'hypothèse grâce à ses observations des étoiles de la galaxie d'Andromède. Dans les deux cas, sans l'attraction gravitationnelle d'une invisible matière noire, amas et galaxies devraient se disloquer sous l'effet de la vitesse de leurs composants. Mais quelle est la nature de cette énigmatique matière ? Après avoir éliminé plusieurs candidats, on pense aujourd'hui qu'il s'agit de particules, baptisées wimps, dont on

Avec ses galaxies distribuées en filaments, notre Univers atteste de l'existence de la matière noire, qui concentre les masses, et de l'énergie sombre, qui tend à les diluer. Mais ni l'une ni l'autre n'ont encore été identifiées.



Ipac/SSC



Nasa/CSA/E.K. Jullo

Cette image composite du relevé Cosmos montre la répartition de la matière ordinaire (en rouge) et de la matière noire (en bleu). La distribution des étoiles et des galaxies — toujours de la matière ordinaire — apparaît en gris.

cherche activement à confirmer l'existence. Sur Terre, les détecteurs de matière noire sont généralement isolés comme au laboratoire Gran Sasso (Italie), situé sous 1400 m de roche. Cette protection laisse passer la matière noire qui interagit peu avec la matière ordinaire, mais arrête l'immense majorité des autres particules susceptibles de gêner les expériences. *"Elles consistent à repérer les interactions entre la matière noire et les atomes des détecteurs qu'elle traverse"*, raconte Piergiorgio Picozza, de l'Institut de physique nucléaire et subnucléaire de Rome. Ces interactions doivent se traduire par une émission de chaleur ou un flash lumineux. Dans l'espace en revanche, *"la recherche de la matière noire est indirecte. Elle vise à détecter des paires de particules ordinaires émises lorsque deux particules de matière noire se rencontrent et s'annihilent"*. C'est le but d'expériences spatiales comme Pamela ou AMS 2.

Jusqu'à présent, toutes ces tentatives de détection ont fait chou blanc, mais quelques annonces récentes laissent espérer un dénouement prochain : si la matière noire existe, les détecteurs sont désormais suffisamment sensibles pour la détecter ! Ils pourraient aussi se faire coiffer sur le poteau par le LHC, l'accélérateur de particules du Cern. Il fonctionne désormais à des énergies telles qu'il est susceptible de fabriquer des particules de matière noire.

L'énergie sombre, elle, risque d'être plus difficile à cerner. Il faut dire que sa découverte est plus récente. À la fin des années 1990, Adam Riess et Saul Perlmutter observent indépendamment des explosions d'étoiles appelées supernovae. Surprise : elles semblent plus éloignées de nous que si elles étaient entraînées au loin par une expansion décélérée de l'Univers. L'expansion cosmique doit donc être accélérée par quelque chose, une mystérieuse énergie, une énergie "sombre".

Mais de quoi s'agit-il au juste ? Si la matière noire, elle, se conçoit bien comme une particule, quel est ce "truc" qui agit sur tout l'Univers en accélérant son expansion ? Les cosmologistes penchent aujourd'hui pour l'énergie du vide. En effet, en physique, le vide parfait n'existe pas. Constamment, des paires de particules et d'antiparticules surgissent du néant avant de disparaître, donnant lieu à une énergie du vide. Ce n'est pas qu'une théorie puisque des expériences existent pour la mesurer. Malheureusement, l'infime quantité d'énergie sombre nécessaire à l'accélération de l'expansion (10^{-29} g/cm^3) semble irréconciliable avec la gigantesque quantité d'énergie du vide que l'on suppose avoir existé au début de l'Univers (10^{91} g/cm^3). Aussi, d'autres candidats, plus exotiques, sont envisagés. Parmi eux, des particules prédites par la théorie des cordes. Cette dernière conçoit les particules comme des objets à une dimension, des sortes de cordes vibrantes. Certaines d'entre elles n'auraient pas encore été observées et pourraient être l'énergie sombre tant recherchée. Une fois encore, le LHC pourrait apporter des indices en faveur de cette hypothèse. Mais pour l'instant, ils se font attendre. Il reste toujours à comprendre où est passé l'Univers.

Stéphane Fay

+ À écouter sur www.cieletespaceradio.fr/jui.752

La matière noire avec Jean-Marc Bonnet-Bidaud

Courtesy P. Picozza

« Nous tentons de repérer les interactions entre la matière noire et les atomes des détecteurs »

Piergiorgio Picozza, chercheur en physique nucléaire