

RDT info



Commission européenne

Magazine de la recherche européenne

Numéro spécial EIROforum – Février 2007

ISSN 1023-9006

Entre quarks et hypernovæ

L'aventure de la matière et du vivant

CERN

• EFDA

• ILL

• ESRF

• EMBL

• ESA

• ESO

Editorial

Terres de l'inconnaisance

En présentant quelques-unes des recherches de pointe menées actuellement par les sept grandes organisations européennes regroupées dans l'EIROforum, ce numéro témoigne de la vivacité et de l'excellence de la science dont notre Vieux Continent ne cesse de repousser les frontières.

En même temps, les articles composent, à défaut d'une photographie de l'Univers, un faisceau

d'éclairages convergents sur la matière, la vie et l'évolution.

Mais ce *patchwork* ainsi constitué révèle aussi l'étendue des *vides* de la connaissance actuelle. Réalise-t-on, par exemple, que l'essentiel de la masse de l'Univers nous est toujours inconnu? Qu'une énergie noire semble baigner notre espace-temps et nous irradier de ses effets indirects?

Telle un *trou noir*, la science englobe nos connaissances et, par contraste, met en *lumière*,

si l'on ose écrire, l'ampleur de nos *méconnaissances*. Une «évidence» qu'il est bon de rappeler, à l'heure où nombreux sont ceux qui dénoncent l'inculture scientifique du public. Les savants sont fondamentalement des ignorants! Une vérité certes déjà coulée dans la sagesse populaire: plus on sait, rappelle le dicton, «plus on sait qu'on ne sait pas». Mais notre société aurait sans doute à gagner à cultiver davantage l'ignorance et à respecter *urbi et orbi* les terres de l'inconnaisance.

RDT info – Spécial EIROforum

4 «EIROforum est devenu un acteur-clé de la science européenne»

Entretien avec Bill Stirling, directeur général de l'ESRF et président d'EIROforum.

5 Sortir la science des laboratoires

Gros plan sur deux initiatives d'EIROforum centrées sur les enseignants: le magazine *Science in School* et le festival *Science en Scène*.

CERN

6 La matière, dans ses derniers retranchements

Plus de 6 500 scientifiques de tous les continents, prix Nobel ou jeunes chercheurs, se côtoient, à Genève, dans le plus grand centre de physique des particules du monde.

7 Et les particules furent

Les particules élémentaires remontent à une époque où l'Univers était encore plus petit qu'une tête d'épingle... Eclairage de Rolf Landua.

8 Le secours des cordes

A côté du modèle «standard» de la physique des particules, la science s'interroge sur la vision nouvelle apportée par la théorie mathématique des cordes.

10 Les promesses du grand collisionneur

Le plus puissant accélérateur de particules, le LHC, sera inauguré au CERN, en 2007. Il doit permettre de sonder les secrets de la matière, dès ses origines.

EFDA

12 Les yeux tournés vers ITER

L'humanité pourra-t-elle compter sur une nouvelle source d'énergie, illimitée, propre, contrôlable? La réponse pourrait venir du réacteur ITER, opérationnel en 2016.

13 Un pari réfléchi

Rencontre avec David Ward, spécialiste de la physique des plasmas, impliqué dans la préparation d'ITER.

14 L'ambitieuse aventure de la fusion

Le défi de la fusion? Reproduire le Soleil sur Terre – un processus qui exige des températures avoisinant les 150 millions de degrés...

16 JET, le banc d'essai pionnier d'ITER

Sans le JET, ITER n'aurait jamais vu le jour. Et c'est au JET que sont évaluées la validité et la faisabilité de nombreuses options scientifiques et technologiques pressenties pour le réacteur de Cadarache.

ILL

17 Les neutrons au service de la science

L'Institut Laue-Langevin de Grenoble (FR) représente l'une des plus importantes sources mondiales de neutrons, permettant aux scientifiques de pénétrer dans la structure de la matière.

18 L'énergie vraiment égale à «mc²»?

Le spectromètre à rayons Gamma GAMS 4 de l'ILL a permis de vérifier l'équation fondatrice d'Einstein, et cela avec une marge d'erreurs de 0,00004%...

20 Le mystère du magnétisme martien

Des chercheurs ont pu montrer que les anomalies magnétiques révélées par la sonde *Mars Global Surveyor* s'expliquaient par la présence de pyrrhotite.

21 Du côté des neurones

Les biologistes recourent de plus en plus aux faisceaux de neutrons pour décrypter la matière vivante. Exemple: les molécules d'adhésion des cellules neuronales (NCAM).

ESRF

22 L'ère des nouvelles lumières

Autour du synchrotron de l'ESRF, une quarantaine de «lignes de lumière» permettent l'observation d'échantillons microscopiques indispensables à des chercheurs de multiples disciplines.

Avertissement

Ni la Commission européenne ni aucune personne agissant au nom de la Commission ne sont responsables de l'usage qui pourrait être fait des informations contenues dans cette publication ou des erreurs éventuelles qui, malgré le soin apporté à la préparation des textes, pourraient y subsister. © Communautés européennes, 2007
Reproduction autorisée, moyennant mention de la source

Magazine d'information sur la recherche européenne, RDT info est publié – en anglais, français, allemand et espagnol – par l'Unité Information et Communication de la DG Recherche de la Commission européenne.
Editeur responsable: Michel Claessens
Tél.: +32 2 295 9971
Fax: +32 2 295 8220
E-mail: rtd-info@ec.europa.eu

Ce numéro a été tiré à 102 000 exemplaires
Toutes les éditions de RDT info sont consultables en ligne sur le site Web de la DG Recherche:
http://ec.europa.eu/research/rtdinfo/index_fr.html

23 Voir l'invisible

Les techniques utilisées sur les lignes de lumières offrent la possibilité de suivre des réactions chimiques ou biologiques sur des temps extrêmement courts.

24 Le vivant sous l'œil du synchrotron

Les biologistes utilisent de plus en plus le synchrotron pour comprendre le vivant. Les sept lignes de lumières de l'ESRF dédiées à la cristallographie des protéines représentent environ un quart de son activité scientifique.

26 Décoder les origines

De nombreux chercheurs, de disciplines diverses, utilisent les rayons X «durs». Exemple: la paléontologie.

EMBL**27 A la pointe des sciences du vivant**

Indépendance, interdisciplinarité, accueil de jeunes chercheurs, formation de doctorants et relations «science-société» sont au programme des cinq laboratoires de l'EMBL.

28 L'arbre de la vie à l'heure génomique

Six chercheurs, emmenés par Peer Bork, viennent de publier dans Science un nouvel «arbre de la vie» se basant sur les connaissances du génome. Un éclairage nouveau sur nos origines.

30 Qui était *Urbilateria*?

Un petit ver marin, *Platynereis*, est bien plus proche d'*Homo sapiens* que des insectes... Si on le sait, c'est grâce à l'étude d'*Urbilateria* (600 millions d'années).

32 Au commencement était la forme

Entretien avec Eric Karsenti, directeur de l'unité «biologie cellulaire et biophysique».

ESA**33 L'espace européen sans frontières**

L'Agence spatiale européenne (ESA) est un remarquable exemple de coopération internationale rassemblant différents Etats membres de l'Union, la Suisse et le Canada.

34 Les révolutions de la science offshore

Entretien avec David Southwood, directeur scientifique de l'ESA.

36 Les sentinelles du «Système Terre»

Depuis 2004, le programme *Planète vivante* de l'ESA a pour objectif de développer la capacité globale à comprendre le fonctionnement de la Terre, prédire ses changements, limiter les atteintes qu'elle subit.

38 Mars et Vénus, nos voisines

Si la question de l'eau fascine sur Mars, Vénus interpelle par les conditions «infernales» régnant à sa surface.

ESO**39 La fascination du cosmos**

L'ESO est la plus importante organisation intergouvernementale dans le domaine de l'astronomie et de l'astrophysique européennes. Ses télescopes sont situés au Chili.

40 La saga des trous noirs

Les énigmatiques trous noirs révèlent de plus en plus de secrets sur la nature et l'évolution des galaxies.

42 Le message des sursauts gamma

De nombreux sursauts gamma proviennent de distances supérieures à 12,5 milliards d'années-lumière. Il s'agit là des traces de libérations d'énergie parmi les plus violentes de l'Univers après le Big Bang.

44 La chasse aux exoplanètes

Un nouveau champ de recherche s'ouvre aux astronomes: les exoplanètes, dont plus de 200 ont été recensées en quelques années.

Demande d'abonnement gratuit à RDT info

Vous pouvez vous abonner gratuitement au magazine via le site web http://ec.europa.eu/research/mail-forms/rtd-adr_fr.cfm

Vous pouvez aussi remplir le présent coupon en caractères d'imprimerie à renvoyer à l'adresse suivante:

RDT info
ML DG1201
Boîte postale 2201
L-1022 Luxembourg

Nom:

Organisation:

Version(s) linguistique(s) que vous souhaitez recevoir (*):

Versions française anglaise allemande espagnole

Adresse:

Code postal: **Ville:**

Pays:

(*) Si vous souhaitez recevoir plusieurs exemplaires d'une version linguistique donnée, veuillez adresser votre demande, avec votre adresse complète et une courte justification:
- par internet
http://ec.europa.eu/research/mail-forms/rtd-adr_fr.cfm
- par fax (+32-2-295 82 20).

Si vous désirez obtenir un ou des exemplaires de numéros antérieurs de *RDT info*, veuillez envoyer un message soit par e-mail soit par fax.



«EIROforum est devenu un acteur-clé de la science européenne»

Directeur général de l'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) depuis 2001, Bill Stirling a vécu la période pendant laquelle la collaboration d'EIROforum a atteint sa maturité. Aujourd'hui président du groupe, il nous parle de son expérience, du passé de l'organisation et de ses orientations futures.

Quelle est actuellement la «valeur» d'EIROforum?

EIROforum concrétise une collaboration très positive entre sept organisations qui partagent leur expérience scientifique au plus haut niveau. Un de nos objectifs consiste à développer les capacités scientifiques de l'Europe dans un environnement complexe. Cet environnement regroupe une science nationale, une science financée par l'Union, une science intergouvernementale telle que la nôtre, et une science mondiale. Nous cherchons à mettre en place des stratégies à suffisamment long terme afin d'être en mesure de répondre aux questions scientifiques majeures de l'avenir, de motiver notre personnel, de trouver les fonds nécessaires et d'établir un équilibre entre les programmes internationaux de nos institutions et les besoins nationaux de nos Etats membres. Sur plusieurs de ces points, notre relation avec la Commission européenne revêt une importance de plus en plus grande.

Personnellement, je suis toujours étonné de voir que les questions que je considère importantes quant à l'utilisation du rayonnement synchrotron à travers l'Europe comportent, à bien des égards, de nombreuses similitudes, avec les problèmes auxquels sont confrontés d'autres organisations de l'EIROforum, par exemple en matière de développement de la physique des particules ou de la science spatiale.

Les grandes infrastructures européennes ont été développées au-delà de l'Union et de sa politique de recherche. Cependant, la collaboration avec la Commission se renforce au fil des ans. Cette tendance va-t-elle se poursuivre et s'amplifier?

Pour l'instant, des organisations telles que l'ESRF sont mises en place pour satisfaire en priorité (mais pas seulement) les besoins scientifiques de leurs Etats membres. Toutefois, je constate l'engagement de plus en plus fort de la Commission européenne à travers les différents thèmes du septième programme-cadre, les bourses Marie Curie, etc. Il est clair que certains de nos domaines scientifiques, telle la physique des particules, ne peuvent opérer qu'au niveau supranational – ce qui n'est pas le cas pour la science développée au sein de toutes les organisations de recherche européennes intergouvernementales (EIRO).

Certes, nous tirerons parti de certains programmes. La feuille de route du Forum stratégique européen sur les infrastructures de recherche (ESFRI) constitue un moyen très direct pour l'Europe d'influer sur l'avenir des membres d'EIROforum, puisque certains sont impliqués dans cette feuille de route. Et la création du Conseil européen de la Recherche (CER) ⁽¹⁾ revêt une importance cruciale pour l'avenir d'une science de l'excellence en Europe, y compris pour la science développée par les partenaires d'EIROforum.



Bill Stirling (à gauche) avec le Commissaire européen à la science et à la recherche, Janez Potočnik

Quel sera l'impact du CER sur les institutions EIRO?

Le Conseil européen de la Recherche, s'il dispose du soutien approprié, représentera un tournant fondamental pour le financement de la science en Europe. Initialement, l'impact sur les membres de l'EIRO sera indirect. Nous disposons d'infrastructures de recherche qui offrent des services scientifiques à des chercheurs européens dans une vaste gamme de domaines. Le CER octroiera des fonds aux meilleurs chercheurs afin qu'ils mènent à bien leur projet. Par conséquent, des installations telles que celles d'EIROforum seront utiles, car ces chercheurs pourront les utiliser. Ceci donnera sans aucun doute une «impulsion» à la science européenne, bien qu'il y ait toujours un risque que le juste retour au niveau national n'affaiblisse les effets positifs du CER. J'espère que celui-ci sera suffisamment fort pour résister à cette tendance.

Vous êtes à la tête d'EIROforum depuis six mois. Dans quelle mesure ce mandat change-t-il votre approche de l'organisation?

Je suis fasciné par l'étendue des activités dans lesquelles l'EIROforum est impliqué. Presque pas un jour ne passe sans qu'un courriel ne sollicite la participation d'EIROforum à une exposition ou une conférence scientifiques, un concours de recrutement... Et la liste est longue. EIROforum a atteint une maturité telle qu'il est aujourd'hui perçu comme un acteur clé de la science européenne. Il est considéré comme un partenaire essentiel à tous les grands événements scientifiques en Europe et, de plus en plus, au niveau mondial. Ceci n'est pas vraiment étonnant puisque, après tout, chaque organisation d'EIROforum est leader dans son propre domaine scientifique.

(1) Dans le 7^{ème} programme-cadre, le CER a le statut d'une nouvelle agence de financement grâce à laquelle la communauté scientifique européenne choisit de soutenir des recherches dans des domaines fondamentaux émergents.

Sortir la science des laboratoires

La science évolue plus rapidement que jamais. Une découverte importante entraîne la suivante. Alors que les enseignants peinent à se tenir au courant des dernières recherches, beaucoup d'élèves estiment les cours de science «ennuyeux». Au printemps 2006, EIROforum a répondu à ces contradictions en lançant *Science in School*, le premier journal international et multidisciplinaire pour un enseignement innovant de la science.



«La science devient de plus en plus internationale et interdisciplinaire», estime Eleanor Hayes, éditrice de ce trimestriel, basé à l'EMBL. «Les systèmes d'éducation sont nationaux, mais les enfants du monde entier ont des curiosités semblables. L'événement le plus excitant du jour peut apparaître dans n'importe quel domaine. Les élèves peuvent tout à coup avoir envie de discuter d'une découverte sur Mars, d'une innovation médicale ou d'une catastrophe naturelle.» C'est dans cet esprit que *Science in School* approche l'enseignement de la science, non seulement à travers l'Europe, mais également à travers ses différents domaines. Populaire auprès des professeurs de science, des chercheurs et de ceux qui sont impliqués dans l'éducation scientifique, *Science in School* parle des dernières découvertes, propose du matériel pédagogique, donne la parole à des enseignants et des scientifiques, passe en revue les ressources disponibles, etc. Les sujets traités dans les trois premiers numéros portaient notamment sur la chimie du chocolat, les séquelles génétiques de Tchernobyl, la contribution musulmane à la science occidentale, la manière de construire une hélice d'ADN au moyen de bouteilles vides ou encore une analyse sur ce que les teenagers pensent réellement de la science.

«Les scientifiques européens, notamment ceux qui travaillent dans les laboratoires de l'EIROforum, font continuellement de nouvelles découvertes qu'ils voudraient expliquer aux plus jeunes, mais il n'existait aucun canal pour les y aider», souligne Bill Stirling, directeur général de l'ESRF. Promouvoir la communication entre les scientifiques et les écoles est un objectif-clé du journal. Estimant que les vrais experts sont ceux qui sont à l'ouvrage, *Science in School* fait le lien entre deux principaux groupes d'auteurs: les scientifiques qui mènent des recherches et les enseignants qui utilisent des matériaux. Des professeurs expérimentés relisent les articles et proposent des façons d'utiliser ces textes dans les classes.

Cette approche fonctionne: les lecteurs de plus d'une trentaine de pays européens ont répondu avec un tel enthousiasme qu'EIROforum tire actuellement *Science in School* à 30 000 exemplaires (contre 20 000 au départ). L'édition, en langue anglaise, est envoyée gratuitement aux professeurs de science à travers l'Europe.

Même si la version anglaise a du succès, les cours ne se donnent pas moins dans la langue du pays. L'équipe de *Science in School* travaille donc avec des chercheurs et des enseignants européens pour proposer des traductions de ces textes sur son site web. «La demande la plus fréquente de nos lecteurs est d'étendre la publication dans le plus grand nombre possible de langues», poursuit Eleanor Hayes. «Grâce à de nombreux bénévoles, nous mettons déjà des articles disponibles en ligne dans seize langues européennes. Mais c'est une tâche qui se poursuit. Aussi, ceux qui souhaiteraient nous aider sont les bienvenus...»

Science en Scène

Comment transmettre aux jeunes l'émerveillement de la recherche et de la découverte? Comment assurer pour l'avenir la relève des scientifiques et des ingénieurs dont la société a de plus en plus besoin? Quels moyens l'Europe peut-elle apporter pour renforcer l'enseignement scientifique dans les écoles primaires et secondaires?

Ces grandes questions seront débattues pendant le festival européen *Science on Stage (Science en Scène)*, qui se déroulera à Grenoble du 2 au 6 avril 2007. Cet événement, organisé par EIROforum et soutenu par la Commission européenne, est une occasion unique pour 500 professeurs de science d'une trentaine de pays européens de se retrouver et d'échanger leurs idées sur les meilleures pratiques d'enseignement.

En mêlant les approches ludiques et conviviales avec la réflexion de fond, *Science en Scène* peut être vu comme une sorte de laboratoire où les idées les plus originales cohabitent avec les expériences pédagogiques les plus exigeantes. Entre la «foire», où chacun peut exposer son projet devant ses collègues d'autres pays, et les ateliers de formation, où les professeurs retrouvent les bancs de l'école pour expérimenter de nouvelles pratiques, tous les chemins de traverse sont possibles, et l'interdisciplinarité est reine. Les enseignants ont aussi l'occasion de rencontrer des scientifiques en poste dans les instituts européens d'EIROforum.

Ce programme a pris de la graine depuis le premier *Physics on Stage* organisé au CERN en 2000. Des comités nationaux se sont mis en place dans 29 pays. Ils forment la structure de base du programme *Science en Scène*, avec pour objectif de rendre l'enseignement des sciences plus attractif, de capitaliser sur la curiosité naturelle des enfants et des adolescents, de montrer que la recherche est une activité passionnante en perpétuelle évolution. Ils ont aussi pour mission de poser sur la place publique les grandes questions sur le futur de l'éducation en Europe.

Le 5 avril 2007, à Grenoble, les professeurs de science pourront débattre directement avec les décideurs, à l'occasion d'une table ronde sur le thème *Challenges to Europe: European science education in the future*, présidée par le commissaire européen chargé de la science et de la recherche, Janez Potočnik.

En savoir plus

www.scienceinschool.org

Contact

editor@scienceinschool.org

En savoir plus

www.scienceonstage.net

Contacts

Iris Mazuré

iris.mazure@esrf.fr

Contact média – Montserrat Capellas
press@esrf.fr



La matière, dans ses derniers retranchements

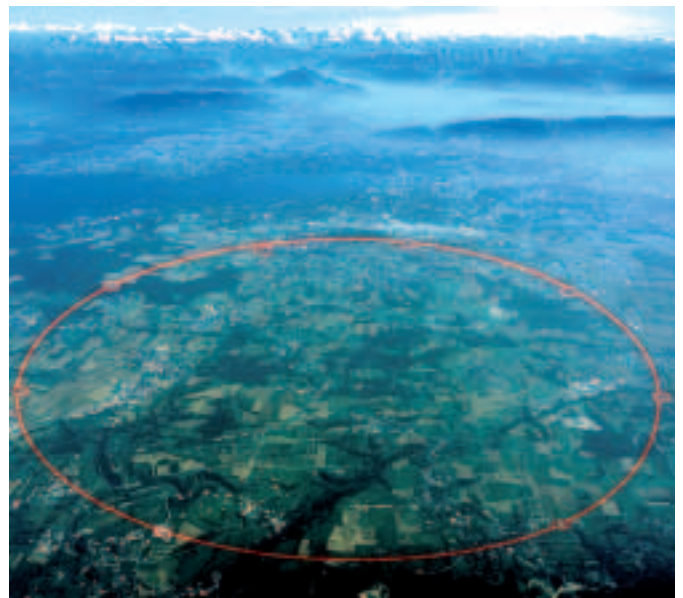
Le plus grand centre de physique des particules du monde est européen et situé à cheval sur la frontière franco-suisse, près de Genève. Le CERN – Organisation européenne pour la recherche nucléaire, une appellation qui désigne non pas l'exploitation de l'énergie atomique mais bien la science des «noyaux de la matière» – rassemble plus de 6 500 scientifiques. En majorité physiciens, ceux-ci viennent des quatre coins de la planète. Savants les plus réputés et jeunes chercheurs se côtoient dans ce grand laboratoire polyglotte. Le CERN met à leur disposition de puissants accélérateurs de particules pour explorer les constituants ultimes de la matière et les forces qui assurent leur cohésion.

Fondée en 1954, prémisse d'un espace européen de la recherche, cette entreprise ambitieuse compte 20 Etats membres. Elle a pleinement rempli son objectif initial : créer sur le Vieux continent une organisation de rang mondial pour la recherche en physique fondamentale.

Les succès du CERN peuvent se mesurer à l'aune des «machines» de plus en plus performantes construites en un demi-siècle. Du premier *Synchro-Cyclotron* (SC) à protons de 600 MeV (1957) au *Grand collisionneur de hadrons* (LHC) – cet accélérateur de particules qui sondera la matière plus profondément que jamais à partir de la fin 2007 –, ce laboratoire paneuropéen s'est équipé d'outils qui ont permis d'élargir ses champs de recherche et de réaliser des découvertes fondamentales en physique.

C'est au CERN qu'ont travaillé de nombreux Prix Nobel, tels Carlo Rubbia et Simon Van der Meer, Georges Charpak, Sam Ting et Burt Richter, Jack Steinberger.

C'est ici que les «chambres proportionnelles multifils» de Charpak ont révolutionné le domaine de la détection électronique des particules. On y a découvert que les neutrinos pouvaient interagir avec une autre particule tout en restant des neutrinos. Le premier collisionneur proton-antiproton y a été mis en service. La découverte historique des bosons W et Z a confirmé la théorie électrofaible qui unifie la force faible et la force électromagnétique. Et, dans un tout autre domaine, c'est encore au CERN que Tim Berners-Lee a proposé un système d'information distribué, basé sur l'hypertexte, que chacun connaît désormais sous le nom de *World-Wide Web*.



Vue aérienne du CERN avec le tracé du tunnel LEP et du futur LHC. © CERN

Sensibiliser jeunes et curieux

Le CERN est un laboratoire ouvert sur le monde et ouvert au monde. Ici, la recherche est transparente et ceux qui la pratiquent souhaitent communiquer leur passion. L'éducation du «grand public» aux avancées de la physique contemporaine est une constante permanente développée par l'institution. Des *visites guidées*, en plusieurs langues, sont organisées tout au long de l'année (visits.service@cern.ch). Les *Lundis de la découverte* présentent en nocturne, une fois par mois, un aspect des recherches menées dans les laboratoires. Le *site Web* (www.cern.ch) s'adresse à tout citoyen curieux de physique et/ou désireux de connaître ce grand centre européen de recherche. Un lien (Ask.Expert.Service@cern.ch) permet à chacun de poser ses questions.

Le CERN attache une importance prioritaire à la sensibilisation des «générations montantes» – terreau des scientifiques de demain – et des professeurs qui les éduquent. Une véritable *stratégie enseignants* (séminaires, informations en ligne, visites scolaires, matériel didactique virtuel, en particulier multimédia, etc.) est développée pour promouvoir des approches pédagogiques innovantes. De façon à montrer que la science est une aventure passionnante et que la physique peut être apprise «en s'amusant».

> www.cern.ch

Et les particules furent

L'apparition des particules remonte à une époque bien embarrassante pour les physiciens, celle où les énergies à l'œuvre dans l'Univers sont si grandes qu'ils ne savent pas comment les décrire. Pourtant, il est possible de concevoir la naissance des briques élémentaires constituant la matière et l'énergie. Comment? Eclairage en compagnie de Rolf Landua, physicien au CERN.

Dans quel cadre les particules élémentaires ont-elles vu le jour? L'affaire remonte à une époque où l'Univers est encore plus petit qu'une tête d'épingle. Puisque les particules ne sont pas encore là, il est donc vide. Vide? Mais alors comment peut-il se passer quelque chose dans un espace vide? Tout simplement parce que le vide des physiciens n'est pas l'absence de tout, tel que défini habituellement.

«Le vide est la structure la plus compliquée de la physique», explique Rolf Landua, physicien au CERN. En effet, dans la Nature, le vide parfait n'existe pas. De même qu'une droite n'est jamais parfaitement droite (ce n'est qu'une définition mathématique sans réalité physique), l'énergie n'est jamais totalement égale à zéro en chaque point de l'espace. Tout comme une surface couverte de blé se définit comme un champ de blé, on parle alors de champ d'énergie. «Le vide est rempli de toutes sortes de champs, comme par exemple des champs électromagnétiques. Leur énergie n'est jamais exactement zéro mais fluctue sans cesse dans le temps. C'est un peu comme un syndrome d'hyperactivité.»⁽¹⁾

De l'énergie à la masse

Comment obtient-on des particules à partir de ces champs? «La relativité restreinte nous enseigne que l'énergie, c'est aussi de la masse. C'est la signification de la célèbre formule d'Einstein $E=mc^2$. L'énergie peut donc être convertie en particules et les particules en énergie.» Or les physiciens pensent que, durant les premiers instants de l'Univers, le vide était rempli d'énergies de nature inconnue. C'est ainsi que, spontanément, des paires de particules et d'antiparticules furent alors créées grâce aux fluctuations de l'énergie du vide. Cette dualité est indispensable car une antiparticule a une charge électrique opposée à celle de sa particule. La somme des charges électriques des particules émergeant du vide reste ainsi toujours égale à zéro, respectant la conservation des charges électriques observée dans la Nature. Puis, très vite, ce processus initial cesse, pour des raisons que les physiciens ne comprennent pas très bien. Les couples de particules ainsi créés pendant le bref moment des fluctuations de l'énergie du vide sont, eux-mêmes, très énergétiques. Par de multiples processus, ils vont donner naissance aux générations suivantes de particules.

Les particules vont notamment s'annihiler avec leurs antiparticules, produisant des gerbes d'énergie qui, à leur tour, se transforment en d'autres particules. Dans cette singulière partie de billard de matière et d'antimatière, les particules les plus lourdes se désintègrent pour donner naissance à des consœurs plus légères et plus stables. Tout ce petit monde se collisionne joyeusement à d'énormes vitesses pour fabriquer ... d'autres particules, à leur tour lourdes ou légères.

Aussitôt après le Big Bang, à une échelle de temps hors norme par rapport à notre perception – un laps de 10^{35} seconde vient de s'écouler –, l'Univers a alors initié son expansion. A cause de l'expansion de l'Univers, de même que l'on peut diluer du sirop dans de l'eau, l'énergie et la matière de l'Univers se diluent dans un espace toujours plus grand. Les particules ont alors de moins en moins de chance de rentrer en collision. Lorsque cela se produit néanmoins, leurs énergies sont de plus en plus faibles et des particules toujours plus légères sont créées.

La physique archéologique

Après un millionième de seconde, la matière qui remplit l'Univers est celle que nous observons aujourd'hui. Les particules les plus lourdes se sont désintégrées. Ce qui s'est produit avant ne peut être étudié que dans des accélérateurs collisionnant des particules à très hautes énergies. «Les physiciens des particules sont un peu comme des archéologues. Ils tentent de reproduire les niveaux d'énergie qui ont régné juste après le Big Bang afin de recréer les particules massives aujourd'hui disparues, de même que d'autres spécialistes tentent de retrouver des dinosaures.» Parmi celles-ci, de mystérieuses particules supersymétriques dont les représentants les plus légers pourraient constituer la matière noire de l'Univers (voir article suivant).

Ainsi seraient apparues les particules dans l'Univers, surgies du néant, telles des fantômes... «Cette explication donne l'impression que les physiciens ont troqué un problème contre un autre: pour expliquer l'origine des particules, ils invoquent l'énergie du vide. Mais alors d'où vient cette énergie? C'est un autre grand mystère de la physique moderne...»

Rolf Landua lors d'une vidéoconférence sur la fusion, organisée par l'EIROforum et l'EFDA. Cet événement, rassemblant des étudiants, se déroulait au Deutsches Museum de Munich, en 2006.
© Hermann Heyer

(1) Toutes les citations des articles concernant le CERN sont de Rolf Landua.

Le secours des cordes

Au-delà des mécanismes présidant à la naissance des particules élémentaires, comment décrire la nature de ces dernières? A côté du modèle dit «standard» de la physique des particules – qui résulte des postulats de la mécanique quantique –, la science contemporaine place ses espoirs dans la vision totalement nouvelle et unificatrice offerte par la théorie très mathématique des cordes. Celle-ci ouvre de nouvelles perspectives d'expérimentation inédites programmées par le CERN.

Le modèle standard – clé de voûte de la physique moderne patiemment mise en place au cours du XX^{ème} siècle – considère les particules élémentaires comme des points régis par trois des interactions fondamentales reconnues entre les particules: l'électromagnétisme et les forces forte et faible. Cela permet de proposer une description qui «colle» très bien avec ce qui se passe dans le monde de l'infiniment petit. Ce modèle ne prend cependant pas en compte la quatrième interaction, celle de la gravitation. Or, dans la conception quantique, de même que la lumière se propage à l'aide d'une particule appelée photon, l'interaction gravitationnelle doit se transmettre à l'aide d'une autre particule dénommée graviton.

A la recherche d'une unification

Il y a donc un obstacle à la description d'une telle particule par le modèle standard (voir encadré). De plus, à ses débuts, l'Univers est à la fois extrêmement petit mais également extrêmement massif (toute l'énergie et la matière sont concentrées dans un minuscule volume). Par conséquent, là encore, une théorie qui a vocation à décrire les particules régnant à cette époque ne peut pas faire abstraction de la gravité. Comment donc intégrer dans cet ensemble la théorie de la relativité générale, due à Einstein au début du siècle dernier, dont l'axe conducteur repose sur la gravitation? «L'unification de la mécanique quantique et de la théorie de la relativité générale est devenue le véritable Saint Graal des physiciens. Des armées de scientifiques y travaillent. La piste la plus prometteuse semble la théorie des cordes.»

Des points aux cordes

Que nous enseigne cette théorie sur notre monde? Tout d'abord, elle conçoit les particules non pas comme des points mais comme des «éléments» assimilables à des cordes extrêmement petites, de l'ordre de 10^{-35} mètres de longueur (un 1 précédé de 35 zéros!). Ces cordes

La «biodiversité» des particules élémentaires

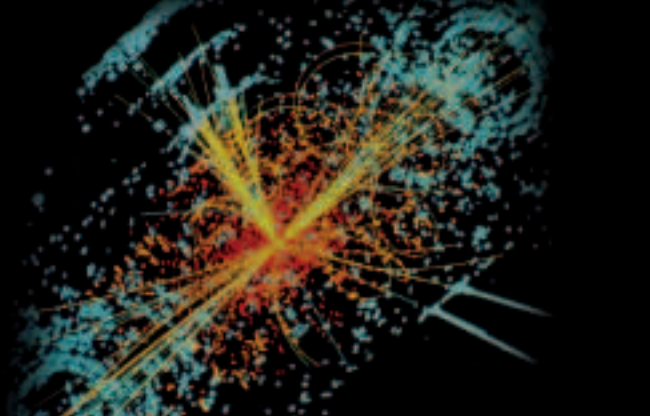
Les particules élémentaires sont, par définition, insécables. Il en existe deux types, les bosons et les fermions.

Dans le cadre du modèle dit «standard», la **famille des bosons** se compose de quatre particules qui véhiculent les quatre interactions de la nature. Ainsi le photon est responsable de la propagation de l'interaction électromagnétique dont la lumière ou l'électricité sont l'une des conséquences. Le *gluon* est le boson responsable de la propagation de l'interaction forte qui assure la cohésion du noyau des atomes. Les bosons W^+ , Z^0 et W^- sont responsables de la propagation de l'interaction faible qui explique par exemple la radioactivité. Tous ces bosons ont été observés par les physiciens des particules, contrairement au *graviton*, responsable de la propagation de l'interaction gravitationnelle et dont un «éventuel» boson de Higgs serait responsable de la masse des particules.

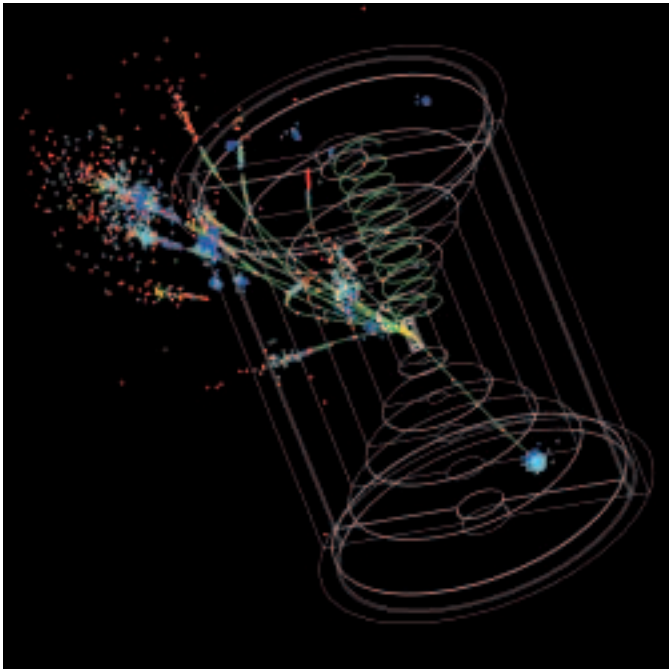
La **famille des fermions** se scinde en trois sous-familles. La première constitue la matière ordinaire et est composée de l'électron, du *neutrino électronique* et des *quarks* «bas» et «haut». Ces quarks sont les particules élémentaires constituant les *protons* et les *neutrons* qui, eux-mêmes, constituent les noyaux des atomes. Les deux autres familles fermioniques de particules élémentaires contiennent chacune, elles aussi, quatre particules n'ayant existé qu'au moment du Big Bang. Leur existence ne peut être attestée aujourd'hui que dans des rayonnements très énergétiques.

Le modèle standard contient ainsi dix-sept particules élémentaires. Ce nombre est doublé en théorie des cordes puisque la supersymétrie associe à chaque boson un fermion et vice-versa. Pour nommer les partenaires supersymétriques des bosons, les

physiciens rajoutent généralement le suffixe «ino» au nom des bosons du modèle standard. On trouve ainsi le *photino* ou le *gravitino*, tandis que les superpartenaires des bosons W^+ et W^- sont nommés les charginos, car ... ils portent une charge. Pour les superpartenaires des fermions, un préfixe «s» est généralement utilisé. Cela donne des *squarks*, les *sélectrons* et les *sneutrinos*. La langue des physiciens doit innover en même temps que la science...



Simulation de la désintégration d'un boson de Higgs à deux jets (centre) et deux électrons (en bas à gauche) dans le détecteur CMS du LHC au CERN. Les traces dénotent les particules qui ont été produites par la collision d'une paire de protons d'ultra-haute énergie. Les énergies déposées par les particules dans le détecteur sont montrées en bleu pâle.



Simulation de la signature d'un neutralino dans un détecteur de particules. Les différentes courbes montrent les traces des particules qui accompagneront l'émission du neutralino. Cette particule supersymétrique pourrait constituer la matière noire tant recherchée par les astronomes.

© Norman Graff.

sont en état de vibration et les manières dont elles vibrent correspondent aux différents types de particules. Plus une corde vibre, plus la particule correspondante est énergétique.

L'une des propriétés de la théorie des cordes (mais pas seulement de celle-ci), nécessaire à sa cohérence mathématique, se nomme la supersymétrie. Pour mieux comprendre de quoi il s'agit, une courte explication sur la «zoologie» des particules élémentaires s'impose. On peut scinder l'univers corpusculaire quantique en deux familles: d'une part celle dite des fermions, particules élémentaires de la matière à laquelle appartiennent entre autres les électrons et les quarks; de l'autre la famille dite des bosons à laquelle appartiennent les particules médiatrices des interactions fondamentales telles le photon, qui véhicule la force électromagnétique, ou le graviton, mentionné ci-avant, pour la gravitation.

L'enjeu supersymétrique

La supersymétrie consiste à supposer qu'à chaque particule de la famille des fermions devrait correspondre une particule appartenant à la famille des bosons, et vice-versa, d'où l'idée de symétrie. Aucune particule supersymétrique n'a pour l'heure été découverte mais les physiciens des particules espèrent les observer dans les collisions à hautes énergies qu'ils provoqueront bientôt grâce au LHC, le nouvel accélérateur de particules du CERN (voir page 10).

A moins que les astronomes n'aient, entre-temps, observé indirectement les effets de ces mystérieuses particules... Car la masse totale des galaxies et des amas de galaxies semble bien plus grande que la masse lumineuse (étoiles, gaz, etc.) perçue par les télescopes des astronomes.

Ils supposent ainsi l'existence d'une invisible matière noire n'interagissant avec le reste de la matière que par sa gravitation et constituée de particules très stables, et donc très légères. Autant de caractéristiques partagées avec les plus légères des particules supersymétriques. Celles-ci pourraient ainsi être les énigmatiques constituants de la matière noire, dont les effets ont été observés pour la première fois par l'astronome suisse Fritz Zwicky en 1933.

Quatre interactions, fille d'une interaction unique

Une autre question taraudant les scientifiques concerne les quatre fameuses interactions fondamentales de la Nature⁽¹⁾. Pourquoi leurs amplitudes sont-elles si différentes les unes des autres? L'amplitude de l'interaction gravitationnelle est, par exemple, beaucoup plus faible que celle de l'interaction électromagnétique. Pour preuve, le magnétisme d'un simple aimant suffit pour attirer une masse relativement importante de métal alors qu'une planète entière est nécessaire pour attirer la même masse à l'aide de la gravité.

«Une réponse à cette question est que toutes les interactions fondamentales n'auraient fait qu'une aux très hautes énergies qui régnaient au début de l'Univers. Un peu comme l'eau se transforme en glace en dessous d'une température nulle, ce n'est que lorsque l'énergie de l'Univers aurait été suffisamment basse que cette unique interaction se serait scindée en quatre interactions différentes telles que nous les concevons aujourd'hui.» Cette unification des interactions fondamentales à haute énergie est aussi décrite par la théorie des cordes (mais elle n'est pas la seule à réaliser cet exploit).

Dimensions sept

L'une des avancées théoriques les plus spectaculaires des cordes est sans nul doute l'existence de dimensions autres que nos trois dimensions d'espace (hauteur, largeur, longueur) et de temps. En effet, afin d'assurer sa cohérence mathématique, la théorie des cordes nécessite l'existence de sept dimensions supplémentaires d'espace (un peu comme la notion de surface ne peut être mathématiquement cohérente qu'avec deux dimensions d'espace). La matière et les interactions électromagnétiques, forte et faible, seraient confinées dans les trois dimensions d'espace habituelles. Ces interactions étant principalement celles nous permettant d'appréhender le monde (par exemple l'interaction électromagnétique avec la lumière), elles ne nous permettraient cependant pas de percevoir les sept autres dimensions spatiales qui resteraient «invisibles».

Ainsi va la vie des particules, émergées du vide quantique lors des phases les plus énergétiques de l'Univers. Les physiciens d'aujourd'hui les décrivent comme de minuscules cordes vibrantes ouvrant la voie vers l'unification de la relativité générale et de la mécanique quantique. Certains des ingrédients de cette théorie, comme l'existence de particules supersymétriques, pourraient être vérifiés par le LHC dans les années à venir, donnant plus de crédibilité à la théorie des cordes, sans toutefois la valider.

(1) L'interaction électromagnétique, l'interaction gravitationnelle, les interactions forte et faible.

En savoir plus

<http://superstringtheory.com/>
http://en.wikipedia.org/wiki/Virtual_particle
http://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum_energy

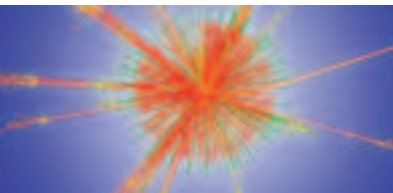
En 2007, le plus puissant accélérateur de particules jamais construit, le nouveau Large Hadron Collider du CERN, sondera les secrets de la matière dans des états d'énergie ayant régné dans les instants qui ont succédé au Big Bang. En faisant se percuter frontalement des particules à des vitesses proches de celle de la lumière, les physiciens espèrent sonder la matière dans ses recoins les plus ultimes, grâce à l'énergie dégagée par les collisions.

Les promesses du grand collisionneur



Antimatière. Supersymétrie. Boson de Higgs. Plasma quark-gluon.

Autant de mystères prenant leurs sources dans les phases les plus énergétiques de l'Univers, au sein de la fournaise du Big Bang. Des mystères que les chercheurs espèrent bien percer grâce à l'incroyable machine à remonter le temps que sera le LHC. Les premiers aimants de l'accélérateur LHC sont installés, mais non connectés, dans le tunnel de 27 km de circonférence. © CERN



Simulation de la collision de deux protons dans le détecteur ATLAS. © CERN



Le détecteur CMS juste avant sa fermeture. Les cinq roues du tonneau et les six disques des bouchons ont été glissés les uns contre les autres pour procéder aux tests de l'aimant et aux essais du détecteur avec des rayons cosmiques. © CERN



Installation des cristaux de l'un des modules du spectromètre à photons d'ALICE. © CERN



Assemblage des tuiles scintillantes dans le calorimètre Hadron du détecteur LHCb. © CERN

Qu'attend-on de l'énorme investissement consenti par l'Europe pour la réalisation du LHC? Ce dernier va faire tourner, en sens opposés, dans un anneau souterrain de vingt-sept kilomètres de circonférence à cheval sur la frontière franco-suisse, deux faisceaux de protons, particules constituantes du noyau des atomes appartenant à la famille des hadrons. Pour accélérer ces protons et les maintenir confinés en d'étroits faisceaux, des champs magnétiques extrêmement intenses sont requis. Ces champs seront produits par des supraconducteurs, à savoir des matériaux capables de conduire l'électricité sans résistance ni perte d'énergie et fonctionnant à très basse température, élaborés en collaboration avec l'industrie européenne. Les collisions entre protons se produisent au rythme de huit cent millions de fois par seconde à une énergie colossale de 14 TeV. Pour se rendre compte de l'amplitude de ce nombre, un TeV est à peu près l'énergie du mouvement... d'un moustique en vol. Sauf que, dans le LHC, cette énergie sera concentrée dans un espace mille milliards de fois plus petit qu'à l'échelle d'un insecte! L'énergie pouvant se matérialiser en particule selon le principe d'équivalence masse/énergie de la relativité restreinte – le fameux $E=mc^2$ –, les physiciens espèrent ainsi créer des particules jamais encore observées dans des accélérateurs. La densité et l'intensité des collisions sont importantes, car elles multiplient les chances de les voir apparaître. Deux faisceaux de noyaux de plomb seront également produits, atteignant une énergie de 1 150 TeV, avec cependant moins de collisions par seconde.

De la quête de la supersymétrie...

Certains détecteurs seront capables d'analyser ces collisions. Deux d'entre eux portent les noms de *CMS* (*Compact Muon Solenoid*) et *Atlas* (*A Toroidal LHC Apparatus*). Ils se concentreront sur la détection de particules dites supersymétriques et également celle du boson de Higgs.

Qu'en est-il de la supersymétrie? La physique des particules comporte de nombreuses symétries – comme, par exemple, la matière et l'antimatière. La supersymétrie consiste à associer à chaque boson (véhiculant la transmission des interactions comme le photon) un fermion (particules constitutives de la matière tels les électrons et les quarks), et vice-versa. Le défi repose sur le fait que ces contreparties qualifiées de supersymétriques (ou désignées aussi sous le vocable de *sparticules*) n'ont encore jamais été observées.

Comment les détecter? Paradoxalement, par leur absence! «C'est un peu comme dans une salle de cinéma. Vous comptez le nombre et la qualité de personnes qui rentrent puis qui sortent de la salle. S'il en manque une à la sortie du film, parce que vous savez qui est entré, vous êtes capable de deviner qui n'est pas sorti.» De même, les expérimentateurs du LHC savent que certaines collisions de particules sont censées produire ces *sparticules* qu'aucun détecteur n'est capable de voir. Connaissant les énergies des particules avant leurs collisions, ils vont les comparer aux énergies des particules produites après la collision.

S'il y a différentiel énergétique, c'est qu'une particule leur aura échappé. En calculant l'énergie manquante, ils sauront s'il s'agit ou non de la composante supersymétrique ou *sparticule* qu'ils attendent.

... à celle du boson de Higgs

L'autre défi des détecteurs CMS et LHC sera de détecter le boson de Higgs. Objet central de la théorie du modèle standard, ce dernier est censé interagir avec les particules et leur donner une masse. Comment? Imaginons une pièce remplie d'étudiants en physique. Tout à coup Albert Einstein entre dans la pièce et les étudiants le cernent de toute part, le pressant de questions. Albert, lorsqu'il tente de se déplacer, ressent alors une certaine inertie de mouvement due aux étudiants qui s'accrochent à lui. Il est un peu comme ces particules qui acquièrent une masse lorsque les bosons de Higgs tentent d'interagir avec elles. Là encore la détection tant espérée de ces fameux bosons ne peut être qu'indirecte: ce seront les particules issues de leur désintégration qui seront détectées.

La soupe quarks-gluons

Un troisième détecteur équipant le LHC se nomme Alice (*A Large Ion Collider Experiment*). Son but est d'explorer les territoires inconnus de la physique nucléaire, en particulier d'étudier un état de la matière ayant subsisté très peu de temps après le Big Bang et connu sous le nom de plasma de quarks-gluons.

Quelle est cette nouvelle étrangeté? C'est dans les années '60 que les scientifiques ont réalisé que les protons et les neutrons, constituant le noyau des atomes, étaient eux-mêmes des assemblages de particules plus élémentaires, les *quarks*. Ceux-ci sont liés entre eux par l'interaction forte véhiculée, pour sa part, par des particules appelées *gluons*. L'une de leurs caractéristiques est qu'ils sont grégaires: ils ne peuvent exister seuls mais vont toujours par paires ou triplets. Plus vous essayez d'éloigner un quark d'un autre quark, plus la force qui les lie augmente, de sorte qu'ils sont en définitive *inséparables*. On dit que les quarks sont *confinés*. Pourtant, si vous projetez des protons les uns contre les autres à de très hautes énergies, vous allez obtenir une soupe de quarks et de gluons dans laquelle les quarks seront libres de se déplacer. On parle alors de *déconfinement* des quarks dans le plasma quarks/gluons.

Pourquoi ce déconfinement? «C'est un peu comme sur un domaine de ski. Lorsqu'il n'y a pas beaucoup de neige, les pistes peuvent être séparées par des zones herbeuses et les skieurs sont confinés sur leur piste. Par contre, s'il y a beaucoup de neige, ils peuvent aller de l'une à l'autre. Ils sont déconfinés.» Les physiciens n'ajouteront pas de la neige mais de l'énergie: plus on augmente l'énergie des quarks, plus la force qui les lie s'affaiblit, de telle sorte qu'à partir d'un certain seuil d'énergie, on peut les séparer.

Cet état de plasma quarks-gluons était probablement celui de la matière quelques microsecondes après le Big Bang. C'est pourquoi les physiciens souhaitent l'étudier grâce aux faisceaux d'ions de plomb produits par le LHC. Ceux-ci sont, en effet, très riches en protons et neutrons. Ils peuvent atteindre une énergie de 1 150 TeV nécessaire pour produire et examiner, avec plus de précision que dans les expériences précédentes, le plasma quarks/gluons régnant au début de l'Univers.

Le mystère de l'antimatière

Enfin, un dernier détecteur porte le nom de *LHCb*, acronyme de *Large Hadron Collider beauty*. Son objectif est de mieux apprécier les subtiles différences entre matière et antimatière afin de mieux comprendre ce qui est arrivé à l'*antimatière* de l'Univers.

En effet, à chaque particule correspond une antiparticule qui a, entre autres, la même masse mais une charge électrique opposée. Ainsi, à l'électron de charge négative correspond l'antiélectron (ou positon) de même masse, mais de charge positive. Lorsqu'un électron et un antiélectron se rencontrent, ils s'annihilent en produisant une gerbe d'énergie.

D'après le modèle standard de la physique des particules, autant de matière que d'antimatière ont dû être créées au début de l'Univers. Par conséquent, toutes les particules auraient dû s'annihiler entre elles et l'Univers devrait être vide. Pourtant, comme chacun peut le constater, la matière y abonde!

D'où la question que tentera de clarifier le LHCb: où donc est passée l'antimatière? Une réponse possible repose sur la faculté de certaines particules de se transformer en leur antiparticule et vice-versa. Dans ce cas, l'existence de la matière repose sur l'hypothèse – qui reste à prouver – que la transformation des antiparticules en particules est favorisée par rapport à la transformation inverse en ce début de l'Univers. *In fine*, le processus d'annihilation entre matière et antimatière aurait engendré un Univers où la matière l'a emporté sur son opposé.

Un tel déséquilibre est-il démontrable? En réalité, il a déjà été observé expérimentalement avec des particules de type quarks, appelées *kaons*. Les antikaons se transforment spontanément en kaons, mais l'inverse se produit moins souvent. Le LHCb étudiera un autre candidat, le *mésone B* contenant, entre autres, une particule (ou son antiparticule) élémentaire dénommée *quark b*, ou encore *beauty* (d'où le charmant petit nom du LHCb).

En savoir plus

ATLAS: <http://atlas.ch/>

CMS: <http://cms.cern.ch/>

ALICE: <http://aliceinfo.cern.ch/Public/index.html>

La traque des particules

Si les particules ne peuvent être vues, il est en revanche possible de les détecter. Pour ce faire, le LHC est équipé de dispositifs constitués de plusieurs couches concentriques de détecteurs qui, à la manière d'un oignon, entourent le faisceau de particules où se produisent les collisions. Chaque couche est dédiée à un type de détection particulier.

- Au centre du détecteur, on trouve une chambre à trace. L'intérieur de celle-ci contient des millions de semi-conducteurs qui, lorsqu'ils sont touchés par une particule, produisent des impulsions électroniques enregistrées par des ordinateurs. Il est ainsi possible de reconstituer leurs trajectoires.
- Dans tout le détecteur règne également un champ magnétique. Ce dernier permet de repérer et d'étudier les trajectoires des particules chargées, telles les électrons ou les protons, et qui sont donc sensibles au champ.
- Un autre dispositif consiste en un détecteur de trace à calorimètre. Certains calorimètres stoppent les particules comme les photons ou les électrons, d'autres sont conçus pour arrêter les protons et les neutrons. Ils mesurent l'énergie perdue par les particules qui les pénètrent.

Les yeux tournés vers *ITER*



Le site de Cadarache, dans le sud de la France, avec simulation de l'implantation d'*ITER*. Le nouveau réacteur devrait être opérationnel en 2016.

© ITER

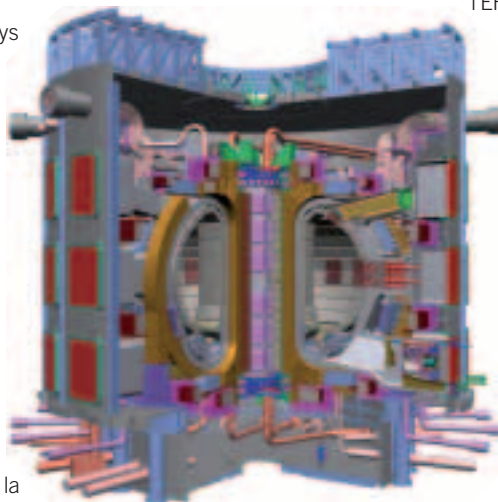
Forte de l'expertise unique qu'elle a acquise sur le JET – la machine expérimentale de fusion la plus avancée au monde –, l'Europe a réussi à rassembler un large consensus international autour de la réalisation d'ITER. Le lancement de ce nouveau réacteur mobilise une vaste coopération scientifique et technologique impliquant des savants et des ingénieurs du monde entier. Au niveau européen, cette collaboration est solidement structurée et placée sous l'égide de l'EFDA (European Fusion Development Agreement).

La construction d'*ITER* – qui représente un investissement de 4,5 milliards € – doit commencer en 2007 sur le site de Cadarache, dans le sud de la France. Ce nouveau réacteur de fusion, opérationnel en 2016, devra prouver si, oui ou non, l'humanité peut compter sur cette extraordinaire ressource d'énergie qui cumule la promesse d'être illimitée, sûre, totalement contrôlable, propre (sans déchets) et sans aucune influence sur le climat.

Dès les années cinquante, plusieurs pays européens ont commencé à s'intéresser aux perspectives énergétiques de la fusion nucléaire et ont financé des recherches dans divers laboratoires nationaux de physique fondamentale. Par ailleurs, au niveau communautaire, le Traité Euratom de 1957 instituant une politique commune dans le secteur nucléaire y intégra la volonté d'instaurer une étroite coopération scientifique pour le développement des connaissances et des technologies dans ce domaine futuriste.

Placé sous l'égide de l'Union, ce climat de collaboration active établi entre les savants et les ingénieurs à travers toute l'Europe conduisit à l'émergence et à la réalisation du réacteur de fusion nommé *JET*

(*Joint European Torus*) sur le site d'Abingdon, près d'Oxford (UK). Les progrès réalisés durant deux décennies grâce à cette machine d'avant-garde, la plus importante de ce type au monde, ont contribué à une expertise scientifique et technologique de premier plan sur les possibilités de mettre en œuvre les conditions physiques extrêmement complexes de la fusion. Celles-ci sont marquées par la contrainte énorme des niveaux vertigineux de températures – atteignant plus de 100 millions de degrés! – qui sont requis au sein du plasma de fusion confiné.



L'ombrelle européenne de la fusion

Si la réalisation du *JET* – et les connaissances uniques sur la fusion qu'elle a permises – a été l'un des moteurs essentiels dans le lancement du nouveau réacteur *ITER*, elle a été aussi le creuset d'une coopération scientifique désormais unifiée et solidement structurée à l'échelle européenne. Celle-ci est placée sous le sigle de l'EFDA (*European Fusion Development Agreement*).

Cette entité regroupe et coordonne l'ensemble des moyens de recherche dédiés à la fusion dans 22 pays membres, ainsi que les programmes mis en œuvre par la Commission européenne dans ce domaine. L'EFDA est, en particulier, maître d'œuvre de l'exploitation du *JET*, dont les installations doivent offrir un banc d'essai particulièrement adapté pour l'évaluation et la validation des technologies complexes nécessitées par le développement d'*ITER*.

La direction et le management de l'EFDA sont assurés par des équipes de soutien (*Close Support Units*), installées à Garching, près de Munich (DE) et au *JET*.

À Garching, sont coordonnées toutes les activités de recherche réparties dans les quelque 29 organismes et institutions de physique fondamentale travaillant sur le développement de la fusion en Europe. La priorité numéro un est évidemment la contribution scientifique et technologique que l'Union et chacun des membres de l'organisation se sont engagés à apporter au projet *ITER*.

En savoir plus

www.efda.org
www.jet.efda.org
www.iter.org

Un pari réfléchi

Spécialiste de la physique des plasmas, David Ward est membre de l'UK Atomic Energy Authority impliqué dans la préparation d'ITER au centre d'Abingdon (UK). Il est persuadé que la fusion peut et doit devenir une source majeure d'énergie pour répondre aux besoins et aux contraintes climatiques du XXI^{ème} siècle.

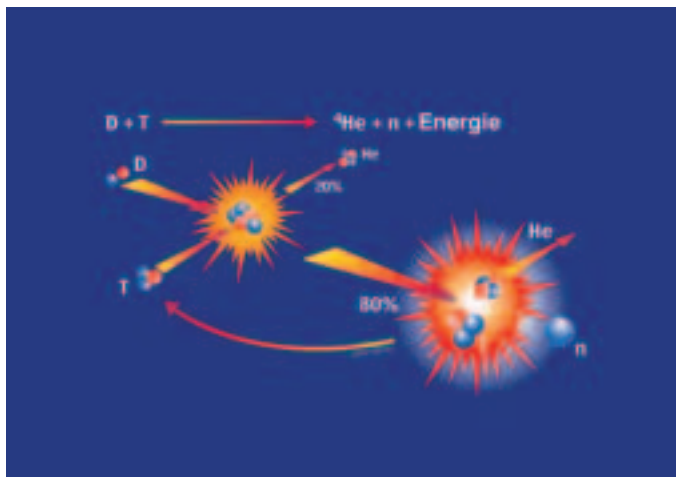


David Ward – «Je ne présenterais en aucun cas la fusion nucléaire comme une formule «magique» capable de résoudre, à elle seule, les questions énergétiques de l'avenir. Toutes les sources renouvelables – et elle en est une – doivent être mobilisées.»

Tout étudié, discuté et négocié qu'il ait été pendant près de vingt ans, ITER est un formidable pari sur un succès scientifique et technologique dont le bien-fondé ne sera pas validé avant au moins une décennie. Le jeu en vaut-il vraiment la chandelle?

On peut encore considérer que c'est une forme de pari, mais rarement un pari n'aura été pris sur la base de données aussi sérieusement réfléchies, calculées et évaluées. Des centaines – sinon des milliers – de scientifiques de par le monde ont disséqué les chances de ce projet et sont arrivés à convaincre sept grandes puissances, comptant parmi les plus importantes de la planète, de fonder un partenariat commun pour le réaliser.

Et s'il reste un risque – sûrement pas d'échec, mais peut-être de résultats insuffisants par rapport aux objectifs –, ne mérite-t-il pas néanmoins d'être pris, dès lors que l'on évalue les défis énergétiques qui sont devant nous? A partir des années 2020, la planète sera habitée par près de huit milliards d'êtres humains contre six aujourd'hui. Dès maintenant, sous la poussée de la croissance économique galopante de pays comme la Chine, l'Inde ou la république de Corée – dont les deux premiers sont partenaires dans ITER –, et sans oublier les besoins énormes du reste du monde en développement, la consommation mondiale d'énergie a entamé son ascension inéluctable vers un doublement dans les deux prochaines décennies. Cette tendance incontournable se greffe sur la certitude, désormais acquise, que le règne triomphant des combustibles fossiles n'est plus soutenable. Ceci à la fois pour des raisons climatiques et parce que, à l'horizon des générations futures, les ressources finiront par se tarir.



Réaction de la fusion.

© EFDA

ITER n'en représente pas moins, avec la Station spatiale internationale, l'un des investissements scientifiques les plus coûteux jamais entrepris. L'Europe en a-t-elle les moyens?

Le coût de construction et de fonctionnement d'ITER – 12 milliards d'euros – est, tout d'abord, partagé entre sept partenaires. La contribution de l'Europe, qui accueille le réacteur sur son sol et sera, grâce à son expérience, l'un des acteurs clés de cette coopération scientifique internationale, s'élève à 40%, soit environ 5 milliards. Pour donner des comparaisons, les investissements prévus dans la fusion – qui s'étalent sur 12 ans – représentent 1 milliard d'euros par an. Parallèlement, les dépenses dans les énergies renouvelables s'élèvent à 40 milliards d'euros. Le marché mondial de l'énergie est évalué à 4 000 milliards d'euros par an.

La fusion n'est donc qu'une des solutions énergétiques de demain. Quels sont ses atouts spécifiques?

Je ne présenterais, en effet, en aucun cas, la fusion nucléaire comme une formule «magique» capable de résoudre, à elle seule, les questions énergétiques de l'avenir. Toutes les sources renouvelables – et elle en est une – doivent être mobilisées. La fusion est, à mes yeux, l'une des rares options d'avenir susceptibles de répondre aux besoins d'énergie à grande échelle des innombrables métropoles urbaines qui ne cessent de croître sur tous les continents.

La fusion est encore aujourd'hui un processus scientifique et technologique qu'il faut absolument apprendre à maîtriser. Tous les progrès des connaissances acquises durant des décennies montrent qu'il vaut la peine de poursuivre dans cette voie. Ce n'est évidemment pas pour le plaisir de réaliser une prouesse. Le JET a été construit dans les années '70 en raison de l'avertissement grave que représentaient les premiers chocs pétroliers. Et puis la tension pétrolière s'est relâchée durant plus de vingt ans, de sorte que, tout en étant cependant conceptuellement étudié, le projet ITER a traîné en longueur.

Aujourd'hui, nous subissons non seulement un nouveau choc pétrolier, mais nous nous inquiétons de l'après pétrole et du réchauffement climatique. Tel est le véritable enjeu d'ITER. Pour reprendre votre expression, je ne doute pas que «le jeu n'en vaille la chandelle».

Contact

David Ward

david.ward@ukaea.org.uk

L'ambitieuse aventure de la fusion

Il y a un demi-siècle, les physiciens ont commencé à imaginer que le modèle de la nucléosynthèse stellaire pourrait être reproduit sur Terre et fournir une inépuisable source d'énergie. Panorama de cette longue quête scientifique où l'Europe a joué et joue aujourd'hui un rôle de premier plan, avec la nouvelle étape cruciale de la construction d'ITER.

Quand l'univers n'existait que depuis quelques minutes, le seul élément de matière qui le constituait était l'hydrogène. Il faudra ensuite attendre environ un milliard d'années après le Big Bang pour que naissent les étoiles. Leur formation s'est déclenchée lorsque de grands nuages d'hydrogène en dérive commencèrent à se contracter sous l'effet de la gravité. Cette contraction s'est accompagnée d'un extraordinaire échauffement cumulé des températures, dans lequel l'hydrogène passe à l'état de plasma: l'élévation de température sépare les électrons des noyaux auxquels ils sont liés et cet état de plasma se caractérise par un amas gazeux d'ions d'hydrogène, c'est-à-dire de noyaux chargés positivement.

Cette cohabitation de charges de même signe se traduit, de prime abord, par des forces électrostatiques de répulsion, les maintenant à distance l'une de l'autre. Mais si les températures continuent à s'élever au sein du plasma, la répulsion électrostatique est supplantée par l'entrée en action de l'interaction nucléaire forte. Sa portée est très courte, mais elle est extrêmement puissante. Brusquement, et irrésistiblement, deux noyaux s'attirent mutuellement sous l'effet de cette force, qui les conduit à fusionner. Cette fusion nucléaire de noyaux d'hydrogène (masse atomique égale à un) produit de l'hélium (masse atomique égale à deux), le second élément apparu dans l'Univers. En même temps, la perte de masse résultant de ce processus se transforme en une énorme libération d'énergie. Celle-ci contribue à perpétuer le phénomène fusionnel⁽¹⁾.

Le rêve des savants

Ainsi sont nées et vivent les myriades d'étoiles de l'Univers, qui sont les creusets d'une formidable concentration de production par fusion de matière et d'énergie. A commencer, bien sûr par la nôtre, le Soleil, pourvoyeur primordial des énergies disponibles sur Terre.

Mais dès lors que la science eut établi les fondements de la nucléosynthèse stellaire – vers le milieu du siècle dernier –, un rêve ambitieux commença à hanter l'esprit des physiciens: si l'on arrivait, sur Terre, à reproduire et à maîtriser technologiquement le processus de la fusion nucléaire, l'humanité disposerait alors d'une source inouïe et quasiment inépuisable d'énergie.

Cette abondance potentielle s'appuie sur un double constat. Provoquer une réaction de fusion avec une production instantanée d'énergie comparable à celle d'une grosse centrale électrique pourrait se réaliser à partir d'un plasma ne contenant que quelques grammes d'ions



Lorsque l'hydrogène passe à l'état de plasma, celui-ci se caractérise par un amas gazeux d'ions d'hydrogène, c'est-à-dire de noyaux chargés positivement. Des recherches sur des configurations plus sphériques du plasma de fusion sont menées par le programme britannique sur la fusion *Mast experiments*, successeur du programme *Start*.

© EFDA

lourds d'hydrogène⁽²⁾. Ensuite l'hydrogène est l'élément de matière le plus élémentaire et le plus abondant, pas seulement dans l'Univers, mais aussi sur notre planète, à commencer dans la composition de l'eau. L'intérêt de la fusion nucléaire tient aussi au fait qu'elle élimine les risques liés jusqu'ici à l'exploitation civile de l'énergie atomique. Contrairement au processus de la fission des atomes lourds de l'uranium, sur lequel s'est développée la filière nucléaire largement répandue dans le monde à l'heure présente, la fusion ne peut être le siège d'aucune «réaction en chaîne», telle qu'elle s'est produite à Tchernobyl. Elle ne nécessite ni l'évacuation ni le retraitement d'aucun déchet radioactif: la seule radioactivité produite, d'une durée de vie limitée à quelques décennies, est contenue dans les parois internes du réacteur. Enfin, cette énergie est proposée comme une alternative importante à l'utilisation des combustibles fossiles – ce qui, par les temps de changement climatique à l'ordre du jour, est un avantage inestimable.

Une longue marche d'un siècle

Mais si l'équation même de la fusion de deux atomes s'écrit avec la formule déconcertante de simplicité d'une simple addition entre un très petit nombre de noyaux d'hydrogène, la longue marche des recherches sur la fusion menées depuis cinquante ans n'a pas encore atteint son terme. Selon les estimations raisonnables que l'on peut faire à présent que la décision de construire *ITER* est prise, son aboutissement – qui ne sera acquis qu'avec le début d'une exploitation énergétique industrielle de la fusion – demandera encore autant de temps. Car le vrai challenge reste de «reproduire le Soleil sur Terre», à savoir provoquer un processus qui ne peut se produire qu'à des températures défiant l'imagination, c'est-à-dire avoisinant les 150 millions de degrés.

Le choix des atomes «fusionables» se posa d'abord aux chercheurs. Parmi toutes les réactions possibles, c'est la fusion du deutérium et du tritium, deux isotopes lourds de l'hydrogène faciles à obtenir, qui a été retenue. Le principal réservoir naturel de deutérium est constitué par les océans, desquels on peut extraire en moyenne 35 g de deutérium par m³ d'eau. Le tritium, un élément à l'état radioactif dont la durée

de demi-vie est d'environ 12 ans, est par contre extrêmement rare dans la nature, mais il est aisé de le produire artificiellement et au sein même d'un réacteur de fusion à partir de lithium – un métal léger abondant dans l'écorce terrestre.

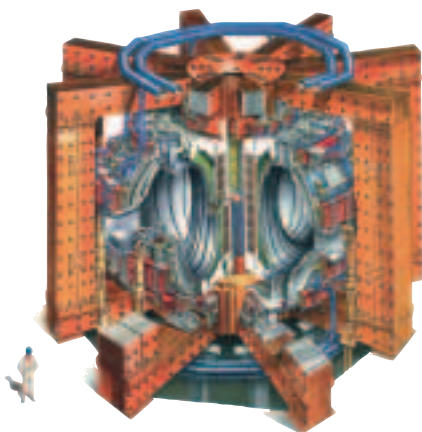
Pour faire fonctionner un réacteur de fusion, les quantités nécessaires de ces deux combustibles de base sont extrêmement faibles. A titre d'exemple, un réacteur de fusion industriel d'une capacité d'un gigawatt pendant un an ne demanderait qu'une consommation de 100 kg de deutérium (extraits de 2 800 tonnes d'eau de mer) et de 150 kg de tritium (productibles à partir de 10 tonnes de minerai de lithium).

La question fondamentale – celle à laquelle devra répondre *ITER* – reste cependant le déclenchement effectif d'une réaction de fusion durable au sein de cet amas gazeux singulier, quasi-immatériel et particulièrement délicat à maintenir dans un état stable, que constitue un plasma porté à des températures extrêmes. La condition *sine qua non* est que, dans l'enceinte du réacteur, le plasma soit un milieu complètement fermé et «flottant» – c'est-à-dire n'ayant à aucun moment le moindre contact avec une quelconque partie de l'enceinte interne du réacteur – dans lequel les ions d'hydrogène effectuent une circulation de plus en plus rapide et agitée, jusqu'à pouvoir se rencontrer et fusionner. La réalisation de cette condition s'appelle le confinement du plasma.

JET, la machine de tête

Ici aussi, des choix ont été progressivement établis. Celui qui s'est imposé comme le plus efficace est le réacteur de type *Tokamak*, proposé dès les années '50 par les scientifiques russes Igor Taman et Andrei Sakharov. Cette appellation est l'acronyme russe désignant un conteneur en forme de tore, dans lequel le plasma est confiné, par rapport aux parois, par des champs magnétiques puissants.

Plusieurs tokamaks existent dans le monde mais le plus grand et le plus performant jamais construit est le *Joint European Torus* ou *JET*. Ce réacteur expérimental, conçu durant les années '70 et opérationnel depuis 1983, est la machine sur laquelle ont pu être étudiées et mises au point les techniques les plus avancées de chauffage, de confinement et de contrôle de stabilité du plasma. C'est au cœur du *JET* qu'a pu être déclenchée – c'était en 1991 – la première réaction de fusion contrôlée réalisée sur Terre. La libération d'énergie n'était guère spectaculaire – d'une puissance inférieure à 2 mégawatts –, mais un pas substantiel était franchi. Les patients essais répétés des chercheurs permirent d'atteindre, en 1997, un record inégalé de puissance d'énergie de fusion atteignant 16 mégawatts.



Confinement du plasma. Celui-ci est assuré par le champ produit par un système complexe de bobines électromagnétiques.

© EFDA



Plate-forme de test d'opération du «divertor» de ITER. Le fonctionnement de cette partie essentielle du réacteur, qui permet la charge des combustibles et l'évacuation des «déchets» de fusion (sous forme d'hélium non radioactif), doit être entièrement commandé à distance.

© ITER

Cette réussite ne fut, certes, qu'une «étincelle» de quelques secondes, n'atteignant qu'un facteur de 0,64 par rapport au seuil sacro-saint du *break even*, à savoir le point crucial où l'énergie de fusion dépassera celle qui a été nécessaire pour chauffer et confiner le plasma. C'est ce dépassement que le futur tokamak *ITER* doit accomplir de manière convaincante.

La voie ITER

Haut de 24 m et large de 30, *ITER* est conçu pour atteindre de 500 MW à 700 MW de puissance thermique, au sein d'un plasma de fusion toroïdal d'un volume de 800 m³ confiné par de puissants champs magnétiques. Il devra engendrer entre cinq et dix fois plus de chaleur qu'il n'est nécessaire pour maintenir le plasma à la température de fusion. Il montrera ainsi qu'une production soutenue et fiable d'énergie est possible, en vue de parvenir à l'exploitation d'une centrale en régime constant.

La voie sera alors ouverte pour permettre aux physiciens et aux ingénieurs de développer et d'optimiser les technologies, les composants et les stratégies de contrôle qui serviront dans une future centrale électrique à fusion de démonstration, qui est l'ultime étape de cette longue marche d'un siècle. Elle a déjà un nom, on la baptise *DEMO*.

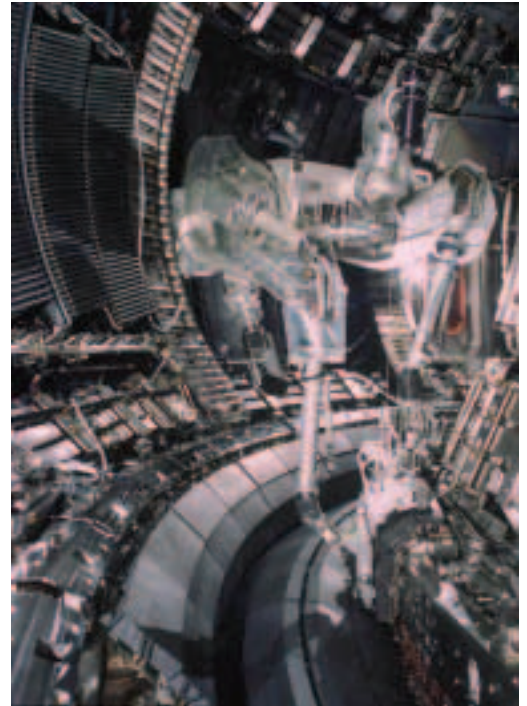
(1) Tous les éléments existant dans l'Univers, des plus légers (tels le carbone et l'oxygène) aux plus lourds (l'or, le plomb ou l'uranium), se sont ainsi constitués par une démultiplication des phénomènes de fusion nucléaire d'atomes légers, au cœur puis dans les couches externes des étoiles.

(2) On peut considérer, par exemple, qu'un kilogramme de «combustible de fusion» permet de générer autant d'énergie que 10 000 tonnes de charbon dans une centrale classique.

JET, le banc d'essai pionnier d'ITER

Le réacteur Joint European Torus (JET) peut être considéré comme la machine pionnière sans laquelle le projet ITER n'aurait jamais vu le jour. Ce centre d'avant-garde est l'un des bancs-tests sur lesquels sont évaluées la validité et la faisabilité de nombreuses options scientifiques et technologiques prévues pour le futur réacteur international de Cadarache.

L'un des départements de recherche d'Abingdon travaille sur le développement de la robotique de maintenance qui sera nécessaire pour pénétrer dans l'enceinte radioactive du tokamak ITER et y opérer des vérifications et interventions. Ainsi, le robot en service sur la machine JET a acquis la flexibilité d'un serpent qui se déploie dans l'enceinte toroïdale jusqu'à en faire le tour. Le pilotage se contrôle à distance, depuis une petite salle remplie d'écrans où l'opérateur manipule délicatement deux poignées. Le système de guidage permet de sentir la résistance de la plus petite vis.



Établies dans le Culham Science Centre d'Abingdon, dans la banlieue verte d'Oxford (UK), les installations du JET constituent le fleuron du programme européen sur la fusion. «Les autres laboratoires de recherche basés sur le continent possèdent leurs propres capacités d'expérimentation, explique Chris Carpenter, attaché de l'UK Atomic Energy Authority au sein de l'EFDA. Mais le JET constitue la plaque d'essai la plus polyvalente et la mieux équipée pour tester et valider un grand nombre des travaux.»

Quand le réacteur s'allume

Le Culham Science Centre abrite des centaines de chercheurs et ingénieurs, résidents ou visiteurs, venus d'Europe ou d'autres continents. Lorsque le réacteur est mis en activité pour mener diverses expériences, le pilotage du JET pourrait ressembler à la salle de contrôle du lancement d'une fusée spatiale. Une cinquantaine d'experts surveillent sur leurs écrans les milliers de variables qui touchent au fonctionnement de la machine, au comportement du plasma, au contrôle des températures, au confinement magnétique...

Sur un plateau central, trois personnes, représentant les responsables de l'expérimentation en cours, les physiciens permanents du JET et les ingénieurs chargés du fonctionnement des équipements technologiques arbitrent les opérations. «Le plasma deutérium-tritium confiné dans le tokamak est plus léger que l'air. Il se compose d'un million de fois moins de particules que l'atmosphère mais il est un million de fois plus chaud», explique Christopher Warrick, physicien et porte-parole du JET. «Nous avons mis des années pour apprendre à gérer les situations incroyablement extrêmes et instables qui apparaissent dans un tel milieu physique.»

Les équipes se succèdent de sept heures du matin à vingt-deux heures. Les propositions d'expériences sont défendues par chacune des sept *tasks forces* du JET devant un comité scientifique européen. Elles sont passées au peigne fin en fonction, notamment, de la pertinence des expériences pour la mise en place d'ITER.

Une nouvelle enceinte

«Par sa taille et sa configuration, le JET est le plus grand 'modèle réduit' sur lequel peuvent être testés et validés de nombreux développements demandés par la construction du réacteur de Cadarache, explique Shakeib Arshad, attaché à la *Close Support Unit* en charge de la stratégie scientifique du réacteur. Grâce à des méthodes de diagnostic sans cesse améliorées, nous pouvons travailler sur des plasmas deutérium-tritium de formes et de températures différentes, en cherchant à optimiser le rendement énergétique de chacun de ces modes. D'autres points forts du JET concernent la maîtrise du flux des particules rapides alpha, qui transmettent leur énergie cinétique aux autres particules du plasma.»

En 2007 ou 2008, les expériences s'interrompront durant plusieurs mois afin de permettre un *upgrade* de la machine. «Souvent, après une série d'expériences, nous modifions l'infrastructure de façon à permettre de nouvelles configurations d'essai. Mais il s'agit cette fois de très grands travaux qui vont nous permettre de mettre à l'épreuve une nouvelle enceinte interne. Celle-ci sera constituée – en lieu et place des composites carbonés utilisés jusqu'ici dans le tokamak –, des revêtements au béryllium, choisis pour tapisser les parois du futur réacteur ITER. Cette nouvelle configuration sera une première mondiale. La compatibilité entre le plasma et cette enceinte constitue évidemment un enjeu fondamental pour le projet. De nouveaux défis nous attendent.»

En savoir plus

www.jet.efda.org



Les neutrons au service de la science

Institut Laue-Langevin. Le nom donné à l'ILL par ses fondateurs est un hommage à deux physiciens pionniers du siècle dernier⁽¹⁾. Ce centre d'excellence européen est aujourd'hui l'une des plus importantes sources mondiales de neutrons, grâce auxquels des chercheurs de toutes disciplines peuvent pénétrer dans la structure de la matière, inerte ou vivante.

Cette importante installation scientifique est née, à Grenoble, dans les années '60, de l'inspiration conjointe du physicien allemand Heinz Maier-Leibnitz et de son collègue français Louis Néel (prix Nobel 1970 pour ses travaux sur le magnétisme). Ceux-ci voulaient mettre à la disposition de la recherche fondamentale civile le formidable outil d'investigation des atomes ou des molécules offert par les faisceaux neutroniques. Ce jumelage bilatéral France-Allemagne a été renforcé par une participation équivalente du Royaume-Uni dès les années '70⁽²⁾. D'autres partenariats avec différents pays européens sont venus, depuis lors, apporter leur appui à l'Institut.

Un leader mondial

Leader mondial en sciences et techniques neutroniques, l'ILL est un institut de service offrant aux chercheurs du monde entier la possibilité de mener des travaux dans une gamme étendue de domaines – de la physique de la matière condensée à la science des matériaux, en passant par la chimie, la biologie et la physique nucléaire. Chaque année, près de 2 000 chercheurs, sélectionnés par un comité scientifique, y séjournent pour réaliser leur propre projet et quelque 800 expériences sont menées. En parallèle, la vie scientifique propre à l'Institut et le support aux utilisateurs mobilisent en permanence plus de 300 chercheurs, ingénieurs et techniciens.

L'excellence de pointe de l'ILL est due à la qualité de sa source de neutrons, mais également à la grande quantité de lignes de faisceau sur lesquelles ceux-ci sont répartis. Ainsi, une même source de neutrons peut être exploitée par diverses expériences nécessitant des faisceaux très différents, tant en intensité qu'en énergie. Outre les détecteurs et instruments divers, des équipements sophistiqués – conçus et développés par les scientifiques « maison » et souvent sans équivalent au monde – s'offrent également aux chercheurs: composants optiques ultra perfectionnés dits monochromateurs, supermiroirs qui réfléchissent, concentrent et guident les neutrons, cryo-aimants permettant d'étudier les échantillons à l'état magnétique souhaité, etc.



Effet Cerenkov visible dans la piscine du réacteur de l'ILL. La lumière bleue résulte d'un phénomène de polarisation de l'eau quand elle est traversée par des électrons de haute énergie. Ces électrons sont créés par des rayonnements gamma émis par le processus de fission dans le cœur du réacteur.

© ILL/Jean-Luc Baudet

Pistes pédagogiques

L'ILL s'adresse au grand public à travers une série de brochures thématiques (en anglais) sur les applications des techniques du neutron dans différents domaines (la matière, la vie, les nouveaux matériaux, l'Univers, etc.). Très bien illustrées, ces brochures téléchargeables offrent des pistes pédagogiques intéressantes pour les enseignants.

(1) L'Allemand Max von Laue (prix Nobel 1914) est l'inventeur de la mesure par diffraction des longueurs d'onde des rayons X à travers un cristal et le Français Paul Langevin fut un chercheur important dans l'équipe des pionniers de l'atome proches de Pierre et Marie Curie. Tous deux peuvent être considérés comme les « pères spirituels » de la recherche neutronique.

(2) Au-delà des trois pays associés, des partenariats scientifiques se nouent continuellement depuis une vingtaine d'années: l'Espagne (1987), la Suisse (1988), l'Autriche (1990), la Russie (1996), l'Italie (1997), la République tchèque (1999), la Suède et la Hongrie (2005), la Belgique et la Pologne (2006).

En savoir plus

www.ill.fr

www.ill.fr/pages/science/AtILL/brochures.html

L'énergie, vraiment égale à « mc^2 »?

Signée par Albert Einstein en 1905, l'équation de la relativité restreinte $E=mc^2$ – la formule la plus célèbre de la physique moderne – a jeté les bases de l'équivalence entre l'énergie et la masse dans la topologie de l'espace-temps. Même si aucune nouvelle théorie ou observation n'est venue invalider cette équation fondatrice, les physiciens n'ont cessé de la mettre à l'épreuve de l'expérimentation. D'une précision jamais égalée, la dernière en date s'est déroulée à l'Institut Laue-Langevin de Grenoble, haut lieu européen et mondial de la neutronique – cette branche très spéciale de la physique nucléaire qui utilise des faisceaux de neutrons pour explorer la matière dans ses constituants les plus intimes.

Vérifier l'équation d'Einstein avec une précision suffisamment significative n'est pas chose aisée. En 1932, une équipe britannique avait, la première, entrepris le test en bombardant de protons une cible en lithium qui se désintégra en libérant des noyaux d'hélium à grande vitesse. En mesurant l'énergie de ces noyaux et en la comparant à la différence de masse entre les noyaux de départ (lithium) et ceux d'arrivée (hélium), les chercheurs étaient arrivés à estimer que l'équation «marchait», mais l'estimation restait entachée d'une marge d'imprécision de plusieurs pourcents.

Par la suite, d'autres expériences ont été menées en faisant rentrer en collision un électron et un positron (un couple d'antiparticules). Lors du choc, ils s'annihilent, et c'est en comparant l'énergie ainsi dégagée et la masse originale des particules que la tentative de vérification est établie. Les physiciens admettent néanmoins que cette modalité de mesures reste insatisfaisante. Ce n'est qu'en 2005 que les flux de neutrons de l'ILL vont mettre au point une vérification qui se situe dans des normes de précision 55 fois plus grandes que les expériences antérieures.

Rayon gamma et mesure de masse

Pour entreprendre cette démonstration, attentivement suivie dans le monde de la physique, les chercheurs vont mesurer séparément les deux volets de l'équation, la masse d'un côté et l'énergie de l'autre. Comment? Lorsqu'un noyau capture un neutron, il émet une infime quantité d'énergie sous forme d'un rayon gamma. Cette énergie, qualifiée d'énergie de liaison, correspond donc à une perte de masse proportionnelle. L'expérience consiste donc à mesurer cette masse disparue et à la comparer avec l'énergie du rayon émis. C'est d'abord au *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) que se sont déroulées les mesures de masse grâce à un appareillage appelé *piège de Penning*. Les «pesées» concernaient la différence de masse entre un noyau de silicium 28 et un autre auquel on a fait capturer un neutron (soit un silicium 29). Cette différence est obtenue en comparant la fréquence de rotation des deux atomes que l'on fait tourner dans un champ magnétique de 8 teslas.



Le spectre à rayons Gamma GAMS 4 utilisé par l'ILL dans la vérification de l'équation d'Einstein. © ILL/Artechnique



Michael Jentschel: «Notre expérience revient à couper depuis Paris une tranche de 2 mm dans une pomme située à Moscou.»

© ILL/Serge Claisse

Ce résultat est alors soustrait à la masse d'un neutron, ce qui donne la petite différence de masse correspondant à l'énergie émise par le rayon gamma. Pour Simon Rainville, professeur au MIT chargé de l'expérience, «il s'agit là de la mesure de masse la plus précise au monde – une partie pour 100 milliards.» Le membre droit de l'équation (mc^2) est ainsi évalué en multipliant cette valeur par le carré de la vitesse de la lumière.

Mesurer l'énergie

De l'autre côté de l'Atlantique, un groupe de chercheurs du NIST et de l'ILL se sont attelés, pour leur part, à calculer la partie gauche de l'équation (l'énergie, E) en mesurant l'énergie du rayon gamma avec un spectromètre. Dans ce cas, l'atome de silicium 28 est bombardé de neutrons. Lorsqu'il en capture un, le rayon gamma émis est diffracté par deux cristaux de silicium ultra purs qui le dévient suivant un angle proportionnel à sa longueur d'onde, donc à son énergie. L'angle est mesuré avec une précision de l'ordre de cinq dix millièmes ($5 \cdot 10^{-7}$) à l'aide d'un interféromètre angulaire spécialement construit pour l'expérience. Pour Michael Jentschel, physicien de l'ILL impliqué dans cette recherche de pointe, la précision de cette mesure «revient à couper depuis Paris une tranche de deux millimètres dans une pomme située à Moscou». L'énergie du rayon gamma ainsi déterminée fournit la valeur pour le premier membre de l'équation.

Et, vérification réussie, E est bien égale à mc^2 , avec une précision de 0,00004%. «Le contraire aurait tout simplement mis sens dessus dessous tout le monde de la physique et de la cosmologie, explique Michael Jentschel. Et la première réaction aurait été de mettre en doute la validité de nos travaux...» Ainsi va la science, qui bien souvent consiste à mesurer des valeurs qui ne peuvent être autres que celles attendues. «Notre expérience n'a donc pas fait la une des médias. Pourtant, on sait que la mesure officielle et universelle de la notion de masse n'est toujours étalonnée que par un cylindre de platine irisé précieusement conservé au Bureau international des poids et mesures à Paris. L'intérêt de nos travaux réside dans le fait qu'ils ont expérimentalement innové en reliant la masse à une autre grandeur physique, l'énergie.»

Le neutron, sherpa du monde subatomique

Une masse de $1,68 \times 10^{-24}$ gramme, une «taille» de 10^{-15} mètre (1 fermi), une charge électrique nulle, un spin magnétique de 0,5. Le neutron est l'un des constituants, avec les protons chargés positivement, de la structure du noyau des atomes. Lors des réactions de fission nucléaire contrôlée, la radioactivité libère ces particules subatomiques globalement «neutres», à savoir non seulement électriquement neutres mais aussi dénuées de pouvoir ionisant.

Les scientifiques ont compris très tôt l'extraordinaire outil que fournissait la neutralité de ces particules essentielles de l'univers atomique. Lorsque des neutrons sont dirigés en faisceau sur une «cible» de matière, ils peuvent pénétrer de façon non destructive les atomes de cette dernière pour en observer l'intimité. Leur masse les fait «rebondir» sur les noyaux des atomes, et ces chocs se traduisent par des émissions d'ondes et des échanges d'énergie.



Le diffractomètre à neutrons thermiques D19 permet d'analyser la matière étudiée. Cet appareil recueille les caractéristiques des ondes atomiques émises lorsque la matière est traversée par le faisceau de neutrons et permet ainsi de reconstruire la structure et la position des atomes de l'échantillon analysé. © ILL/Artechnique

Deux grands types d'appareillage de détection permettent d'analyser et de tirer des informations extrêmement fines sur la matière étudiée.

Le *diffractomètre* neutronique recueille les caractéristiques (direction de propagation, longueur d'onde et amplitude) des ondes «de choc» atomique émises lorsque la matière est traversée par le faisceau de neutrons. Cette connaissance permet de reconstruire la structure et la position des atomes de l'échantillon.

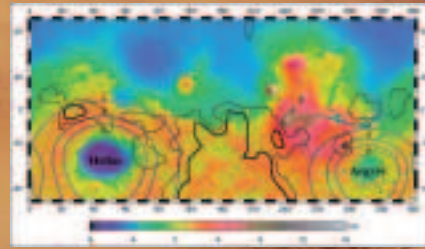
En second lieu, des détecteurs de *spectrométrie neutronique* permettent de mesurer les échanges d'énergie provoqués en donnant une information sur la distribution de l'énergie et donc sur les mouvements au sein des atomes observés.

En outre, le spin propre au neutron le rend sensible aux propriétés magnétiques des atomes qu'il traverse. Il constitue, en réalité, la seule sonde capable de voir à la fois les noyaux des atomes et les mécanismes magnétiques de leurs électrons.

Complémentaires d'autres sources de rayonnement, les neutrons excellent dans des domaines d'expertise qui leur confèrent une place unique au cœur des enjeux scientifiques et technologiques de demain. Ils couvrent des champs d'investigation particulièrement variés et étendus, en physique des particules, physique nucléaire, chimie, biosciences ou encore sciences des matériaux.

Le mystère du magnétisme martien

Mars. Cratère Galle, à l'est du bassin de l'Argyre. © ESA



Carte topographique de Mars. En gris: les courbes de niveaux de pression, établies par calcul, telles qu'elles se sont réparties autour des immenses cratères Hellas et Argyre suite aux impacts. En traits noirs: le contour des champs magnétiques mesurés par la sonde *Mars Global Surveyor*. © Projection Mercator. Courtesy of MOLA science team.

Sur Mars, c'est un tout autre problème, reliant matière et énergie, qui a été éclairé grâce aux neutrons de l'ILL. Dès 1997, lorsque la sonde américaine Mars Global Surveyor a survolé pour la première fois sa surface à 400 km d'altitude, les scientifiques ont été intrigués par les importantes anomalies magnétiques révélées sur la planète rouge. C'est à Grenoble que des chercheurs ont réussi à montrer que les traces fossiles du magnétisme martien s'expliquent par la présence d'un minéral de sulfure de fer, la pyrrhotite.

Il y a 4 milliards d'années, Mars disposait d'un champ magnétique probablement similaire à celui de la Terre. Le refroidissement de la planète rouge a entraîné l'arrêt du mouvement du magma. Or c'est ce mouvement de matière en fusion riche en fer qui, comme une dynamo, engendre le champ magnétique au cœur des planètes. Une plongée dans le passé explique pourquoi l'hémisphère nord de

La fin d'une illusion...

Le magnétisme des météorites d'origine martienne tombées sur terre a maintes fois été étudié en tant que terrain de recherche sur le magnétisme martien de la planète rouge. Les données nouvelles introduites par les travaux sur le seuil de transition magnétique de la pyrrhotite rendent ces études antérieures caduques. En effet, lors de leur éjection, toutes les météorites martiennes ont subi une pression largement supérieure à 3 gigapascals. L'absence de forte rémanence dans ces roches met en évidence le manque de champ magnétique au moment de l'impact – et non pas au moment de la cristallisation des roches.

attribuée à l'augmentation de pression, au cœur des roches responsables du magnétisme fossile, au moment des impacts.

Mars apparaît dépourvu de champ magnétique: sa croûte ne se serait solidifiée qu'après l'arrêt de l'activité magnétique de son noyau. En revanche, il est apparu que la croûte de l'hémisphère sud, plus ancienne, garde, elle, une trace fossile de cette activité.

Cette cartographie magnétique globale était néanmoins contredite par deux anomalies révélées par *Mars Global Surveyor*: une absence totale de magnétisme autour des immenses bassins de l'Argyre et du Hellas, deux anciens cratères de plus de 200 km de diamètre creusés par des météorites géantes. Comme l'augmentation de température suite à l'impact de ces météorites ne pouvait de toute évidence pas justifier la largeur de la zone démagnétisée, les géophysiciens ont alors cherché si la cause pouvait être

La preuve par la pyrrhotite

Pour étayer une telle supposition, il fallait d'abord émettre une hypothèse sur la nature même de ces roches responsables du magnétisme et mesurer leur seuil de transition de phase, c'est-à-dire la pression à laquelle la roche se démagnétise. Dans l'éventail des possibilités, les soupçons se sont portés sur les propriétés magnétiques d'un sulfure de fer connu sous le nom de *pyrrhotite*.

C'est à l'ILL que les recherches sur le seuil de transition magnétique de la pyrrhotite ont été menées à l'aide de diffractomètres à neutrons. «Envoyés sur un échantillon du minéral, les neutrons diffractés sont collectés par un détecteur qui fait apparaître des pics de diffraction caractéristiques non seulement de la structure atomique mais aussi des arrangements des moments magnétiques des atomes», explique Bachir Ouladdiaf, spécialiste du magnétisme à l'ILL. Après avoir fait monter la pression dans une fourchette comprise entre 2,6 et 3,1 gigapascals⁽¹⁾, les chercheurs ont ainsi pu constater la disparition des pics liés au magnétisme.

Restait ensuite à revenir sur la planète Mars où, grâce aux données recueillies par les sondes et à des simulations, les géophysiciens ont délimité autour des impacts les zones ayant été soumises à des pressions dépassant ces seuils. Elles se superposent parfaitement à celles démagnétisées relevées par la sonde *Mars Global Surveyor*.

«La mesure de la transition de phase de la pyrrhotite a permis d'expliquer non seulement les anomalies de la rémanence magnétique de la croûte martienne – ce qui était le point de départ de la recherche – mais nous sommes donc aussi à même de désigner la pyrrhotite comme le principal minéral présent responsable de cette rémanence. Parfois, l'infiniment petit, le neutron, permet de clarifier l'histoire magnétique d'une planète en perçant l'intimité physique d'un minéral.»

(1) Le gigapascal équivaut à 10 000 fois la pression atmosphérique à la surface de la Terre.

En savoir plus

P. Rochette, G. Fillion and R. Ballou, F. Brunet, B. Ouladdiaf, L. Hood, *Geophysical Research Letters*, vol. 30, n°13, 1683 (2003).

Si, à l'instar du rayonnement X synchrotron, les faisceaux de neutrons révèlent la structure de la matière inerte, les biologistes recourent également de plus en plus à ces deux instruments européens de Grenoble pour étudier les molécules complexes qui construisent le vivant. Des travaux très pointus menés en partenariat à l'ILL et l'ESRF s'intéressent en particulier aux molécules d'adhésion des cellules neuronales (connues sous l'acronyme anglais NCAM), qui sont responsables de la répulsion ou de l'adhésion entre cellules nerveuses au niveau des synapses.

Du côté des neurones

Ces recherches sous-tendent des enjeux de taille sur le plan médical. Si les mécanismes d'adhésion de ces longues molécules fixées à la membrane cellulaire ont pour mission d'assurer la stabilité et l'intégrité des connexions entre neurones, les mécanismes de répulsion, en revanche, président à la migration des jeunes cellules et permettent ainsi le développement du système nerveux central.

Cette plasticité, indispensable pour sa construction, se révèle aussi cruciale pour sa reconstruction, dans une éventuelle perspective thérapeutique. A l'inverse, le phénomène migratoire des cellules neuronales est également un facteur aggravant des cancers cérébraux.

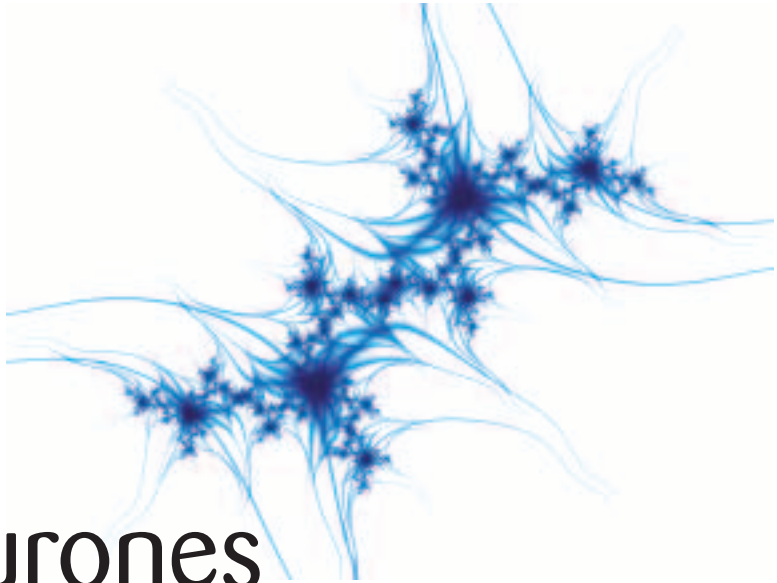
De l'adhésion à la répulsion

Pour comprendre comment se produisent adhésion et répulsion, les scientifiques ont tout d'abord mesuré l'épaisseur des molécules d'adhésion. Une monocouche de molécules d'adhésion NCAM (*Neural Cell Adhesion Molecule*) a été déposée sur un film reproduisant une membrane cellulaire. A l'aide des spectromètres à neutrons et rayonnement de synchrotron de l'ILL et de l'ESRF, les chercheurs ont confirmé un résultat déjà pressenti: la couche est beaucoup plus fine qu'elle devrait l'être si les sept segments de la molécule étaient alignés perpendiculairement à la membrane. En réalité, la protéine est pliée au niveau de son deuxième segment, réduisant ainsi la distance d'adhésion entre deux cellules. Les neutrons diffractés par les protéines ont ainsi permis d'en mesurer l'épaisseur, la rugosité et de connaître la composition de la couche d'adhésion.

Ces informations établies, les chercheurs ont pu mettre en évidence, dans le mécanisme d'adhésion, le double rôle d'un polymère d'acide polysialique (PSA) et de la présence de sodium dans le milieu cellulaire. «Deux types de NCAM sont présentes sur les membranes des neurones, explique Oleg Konovalov, responsable de recherche à l'ESRF. Celles associées aux jeunes cellules possèdent une chaîne de PSA, alors que les autres en sont dépourvues. La chaîne de PSA inhibe l'adhésion en entourant et en masquant les domaines de la molécule impliqués. Nous voulions comprendre ce processus dit de répulsion, qui est indispensable pour que les cellules nouvellement formées puissent migrer et trouver leur place dans le système nerveux.»

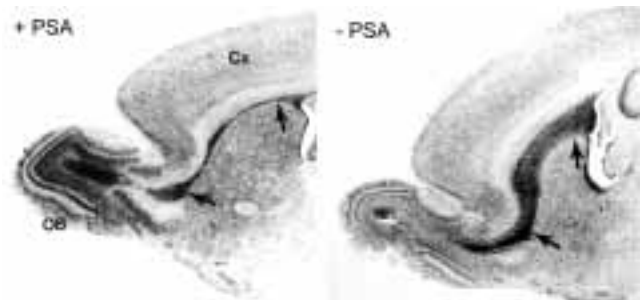
Une question de salinité

Comment ces cellules se fixent-elles lorsqu'elles ont atteint leur destination? C'est en connaissant la distance à laquelle les NCAM s'étendent à la surface de la membrane cellulaire et en mesurant l'espace occupé par le polymère que les chercheurs ont pu répondre à cette question. «Normalement, le PSA empêche l'adhésion. Mais, en augmentant la salinité, le polymère se rétracte et laisse ressortir les domaines de la



molécule assurant le mécanisme d'adhésion. La protéine redevient alors adhésive. C'est en agissant sur la salinité du milieu que se contrôle l'adhésion cellulaire», commente Giovanna Fragneto, spécialiste des membranes cellulaires à l'ILL.

Cette recherche récente sur les NCAM ne permet pas encore d'applications directes. Ces connaissances des mécanismes d'adhésion cellulaires et des protéines impliquées semblent néanmoins pouvoir offrir, à terme, d'intéressantes perspectives. Des traitements contre les maladies neuro-dégénératives, comme la maladie d'Alzheimer, pourraient en découler. Un autre exemple pourrait être de contrôler la croissance de cellules de l'hippocampe sur des structures artificielles pour soigner des lésions de la moelle épinière. Certains bio-ingénieurs espèrent y trouver des pistes pour raccorder matériel biologique et prothèses artificielles. D'autres rêvent à l'inverse, d'intégrer des tissus neuraux dans des équipements électroniques pour construire des ordinateurs «biologiques».



Dans l'image de gauche, l'acide polysialique (PSA) joue un rôle essentiel dans la migration des cellules souches au cours du développement du cerveau. A droite, sans ce médiateur PSA, on assiste à un phénomène de friction entre cellules qui entrave la migration. © U. Rutishauser

A travers l'observation de la matière et de la vie, les travaux menés à l'ILL et à l'ESRF sur le site du Polygone scientifique de Grenoble rappellent d'abord que le fondement de toute recherche scientifique consiste à observer la nature. Ce n'est qu'à partir de ces constatations que s'échauffent et se valident lois et théories. Neutrons, rayons X ou microscopie électronique, les techniques d'investigation modernes donnent aux scientifiques des moyens d'observation inégalés dans l'histoire. En même temps, si les connaissances augmentent de plus en plus vite grâce à ces outils, les découvertes qu'ils permettent renvoient à autant de questions que de réponses....



C'est en 1975 qu'a germé l'idée d'installer en Europe un premier synchrotron, dit de troisième génération, ayant la capacité de produire de la lumière X mille milliards de fois plus intense que celle utilisée traditionnellement en médecine ou en cristallographie.

L'ère des nouvelles lumières

Grenoble, ville de science et de haute technologie, a été choisie, en 1988, pour l'installation de l'ESRF (*European Synchrotron Radiation Facility*). La présence depuis les années '70 de l'Institut Laue-Langevin, une réusite internationale dans la recherche avec les neutrons, a favorisé cette décision. Les techniques neutroniques et le rayonnement synchrotron sont, en effet, à la fois proches et complémentaires. Dix-huit pays sont parties prenantes dans cette collaboration européenne. Parmi la cinquantaine de synchrotrons que l'on dénombre dans le monde, seuls deux autres, l'un aux Etats-Unis et l'autre au Japon, peuvent rivaliser avec celui de Grenoble.

5 500 chercheurs par an

Autour du grand anneau synchrotron de l'ESRF sont aujourd'hui en service une quarantaine de «lignes de lumière» extrêmement performantes et en constante amélioration. Chaque ligne de lumière est spécialisée dans une technique ou un domaine de recherche. Les synchrotrons sont, en effet, des «machines à tout faire», permettant d'étudier la matière sous toutes ses formes, solide, liquide, ou gazeuse. Les faisceaux de rayons X très brillants fournis par l'anneau de l'ESRF rendent possibles l'observation d'échantillons microscopiques – voire nanoscopiques –, la détection de polluants ultra dilués et cependant nocifs pour la santé, ou encore le suivi de réactions chimiques comme dans un film, à l'échelle de la nanoseconde.

Le synchrotron européen, qui fonctionne 24 heures sur 24, accueille chaque année 5 500 chercheurs de tous horizons géographiques et scientifiques. Deux fois par an, les projets provenant d'environ 600 universités et centres de recherches sont sélectionnés par des comités d'experts extérieurs, sur le critère de l'excellence. Les équipes scientifiques restent en moyenne trois jours sur la ligne de lumière qui leur est attribuée. Les travaux réalisés à l'ESRF se concrétisent par plus de 1300 publications chaque année.



Anneau synchrotron de l'ESRF de Grenoble. © ESRF

Les industriels ont, eux aussi, depuis longtemps compris l'intérêt de la lumière synchrotron et ils confient régulièrement des recherches à l'ESRF dans des domaines tels que la pharmacie, la pétrochimie, la microélectronique ou les cosmétiques.

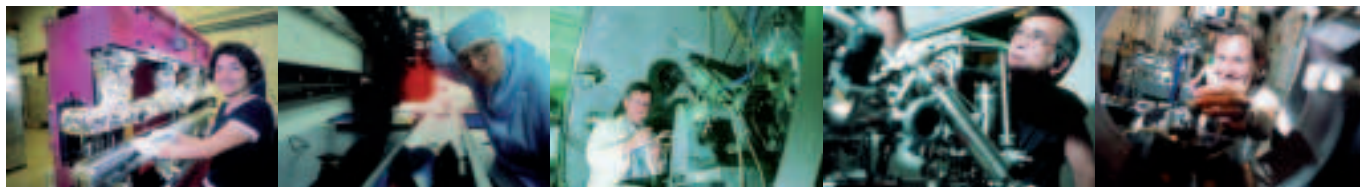
«Le développement des activités du synchrotron européen répondra de plus en plus aux impératifs d'exploration des nanosciences», souligne Bill Stirling, directeur de l'ESRF. «L'objectif est de fournir bientôt des faisceaux à l'échelle du nanomètre. Nous allons reconverter environ un tiers des lignes pour nous préparer à ce que sera la science des prochaines décennies, tout en sauvegardant et en améliorant l'outil des scientifiques d'aujourd'hui.»

Vivier multiculturel

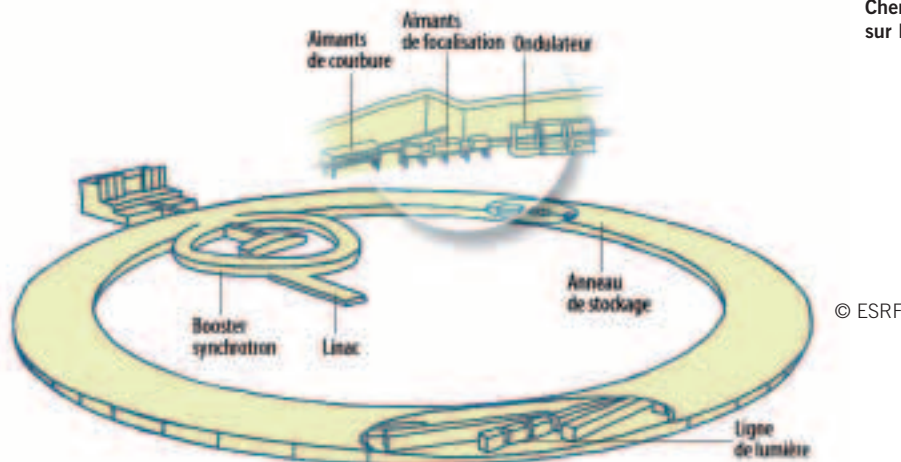
Parce qu'il s'applique aux domaines les plus divers, le synchrotron de Grenoble voit se côtoyer physiciens, chimistes, biologistes, médecins ou archéologues à l'origine d'expériences inédites, fondamentales ou appliquées, propres à repousser les limites de la connaissance. Ce milieu multiculturel favorise une ouverture d'esprit renforcée par la présence de nombreux stagiaires, étudiants en cours de thèse et post-doctorants. A chaque automne, une journée est consacrée aux jeunes chercheurs qui présentent leurs travaux. De nombreux séminaires et conférences se déroulent également tout au long d'année. Le site web de l'ESRF est, en outre, particulièrement bien conçu pour accueillir les publics intéressés par la science.

En savoir plus

www.esrf.fr



Chercheurs de différentes disciplines travaillant sur les lignes de lumière de l'anneau de l'ESRF. © ESRF



Voir l'invisible

Le rayonnement X, forme de lumière invisible, est peu absorbé par la matière qu'il illumine. Il a la propriété d'y pénétrer profondément pour en dévoiler une vision intérieure.

L'homme, pour voir et comprendre le monde qui l'entoure, a besoin de lumière. Depuis les torches de l'époque préhistorique jusqu'au laser moderne, il a inventé toute une gamme de sources lumineuses, supplantant ainsi aux seules possibilités de la lumière naturelle.

Pour mieux voir de loin et de près, et donc élargir son champ de vision, l'homme ingénieux a su fabriquer des instruments optiques, des télescopes et des microscopes. Mais, même avec ces aides très performantes, nous percevons seulement un fragment de la réalité. Beaucoup reste caché à notre regard si nous utilisons uniquement la lumière dite visible – c'est-à-dire cette partie du rayonnement électromagnétique à laquelle l'œil humain est sensible.

L'héritage Röntgen

À la fin du XIX^{ème} siècle, le scientifique allemand Wilhelm Conrad Röntgen, premier prix Nobel de physique de l'histoire, découvrit un nouveau moyen extraordinaire de vision: les rayons X. Le rayonnement X, forme de lumière invisible, est peu absorbé par la matière qu'il illumine. Il a la propriété d'y pénétrer profondément pour en dévoiler une vision intérieure. Outre les applications médicales en tous genres, il permet, par exemple, de vérifier le contenu d'objets tels qu'une valise ou un container sans avoir à les ouvrir, et, pour les scientifiques, de plonger au cœur de la matière de façon «non-destructive». Dans une radio, les rayons X révèlent des matériaux de densités variées, par exemple un plombage dans une dent, par simple contraste d'absorption (le plomb absorbe beaucoup plus les rayons X que le tissu dentaire).

Le pouvoir de pénétration des rayons X s'accompagne d'une autre propriété, moins connue du grand public: leur longueur d'onde est dix mille fois plus petite que celle de la lumière visible, c'est-à-dire de l'ordre du

dixième de nanomètre. Cette spécificité de la *lumière X* est capitale. Cet ordre de grandeur correspond, en effet, à la taille des atomes et des molécules. Lorsque ces atomes et molécules sont arrangés de manière régulière et périodique dans l'espace, c'est-à-dire que la matière est sous forme cristalline, les rayons X sont «diffractés». C'est cette technique de diffraction, également appelée cristallographie, qui permet de «visualiser» les atomes à l'intérieur de la matière. La cristallographie X est ainsi devenue, depuis le début du vingtième siècle, une discipline incontournable de la science moderne.

De nouveaux défis

En 1947, des physiciens travaillant sur un nouveau type d'accélérateur de particules – le synchrotron – ont observé une lumière sortant de l'anneau où circulaient des électrons. Cette lumière, appelée rayonnement synchrotron, n'a pas tout de suite été appréciée à sa juste valeur. Il a fallu attendre les années '70 pour que les scientifiques reconnaissent ses propriétés extraordinaires et décident alors de fabriquer des machines dédiées à l'émission de lumière synchrotron pour l'étude de la matière à l'échelle atomique.

Le synchrotron de Grenoble, équipé d'ondulateurs qui font zigzaguer le faisceau d'électrons, peut produire des rayons X «durs» particulièrement intenses, cohérents et stables. La brillance obtenue – mille milliards de fois celle d'un appareil de radiologie médicale classique – permet de réaliser des expériences qu'on ne pouvait même pas imaginer il y a une quinzaine d'années.

Les techniques utilisées sur les lignes de lumières se sont progressivement diversifiées et sont devenues de plus en plus sophistiquées. En effet, les rayons X interagissent avec la matière de multiples façons, et la brillance du rayonnement synchrotron a permis d'ouvrir des champs complètement inexplorés. L'un des progrès les plus spectaculaires est la possibilité de suivre des réactions chimiques ou biologiques sur des temps extrêmement courts. On peut, par exemple, observer la transformation des gaz d'échappement après la combustion lorsqu'ils passent à l'intérieur d'un pot catalytique. Il est également possible de reproduire, dans une cellule spéciale, les conditions que subissent les matériaux au centre de la Terre (très hautes pressions et très hautes températures à la fois), et obtenir des informations essentielles sur les matériaux soumis à ces conditions extrêmes.

Le vivant sous l'œil du synchrotron

C'est à une véritable révolution que l'on assiste depuis quelques années en biologie moléculaire et structurale, et ceci grâce au rayonnement synchrotron. Actuellement, les sept lignes de lumières de l'ESRF dédiées à la cristallographie des protéines représentent environ un quart de son activité scientifique. Les biologistes utilisent de plus en plus cet outil pour mieux voir, comprendre et maîtriser le vivant.



Illustration de la structure tridimensionnelle de la protéine RecO – une protéine participant à la réparation de l'ADN génomique suite aux dommages causés par l'irradiation.

© Joanna Timmins

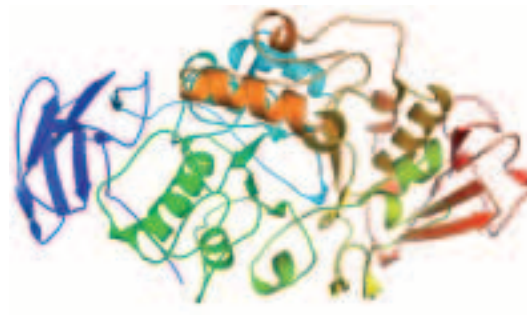


Illustration de la structure tridimensionnelle de la protéine MTHase – une enzyme participant à la synthèse d'un disaccharide (trehalose).

© Joanna Timmins

Depuis la découverte de la structure en double hélice de l'ADN grâce aux rayons X il y a un demi-siècle, que de chemin parcouru... Aujourd'hui, les structures de milliers de protéines ont été résolues et, dans certains cas, la cristallographie des protéines est devenue une simple routine. Mais les scientifiques se lancent dans des études de plus en plus difficiles, telles que les protéines membranaires ou les complexes macromoléculaires. Heureusement, la lumière synchrotron, avec sa remarquable brillance, permet d'aller toujours plus loin. Parmi les défis liés à la santé publique, la lutte contre les virus et les bactéries exige d'obtenir des informations structurales absolument cruciales pour produire les médicaments, vaccins et antibiotiques du futur.

Alzheimer, paludisme, grippe aviaire...

Pour acquérir une vision atomique de la structure d'une protéine avec les rayons X, il faut dans un premier temps fabriquer un cristal de protéine. En effet, ce n'est que sous cette forme cristallisée que les protéines révéleront leur structure atomique sous l'éclairage des rayons X. Grâce au rayonnement synchrotron, à des détecteurs extrêmement puissants et à une informatique de très haut niveau, des architectures protéiques très complexes peuvent être visualisées et élucidées. La cristallographie synchrotron est souvent déterminante pour le résultat de projets de recherche très divers. A cause de la focalisation extrême de certains faisceaux, on a, par exemple, réussi à identifier la structure de base de l'axe des *fibrilles amyloïdes*, présentes notamment dans la maladie d'Alzheimer, dont l'arrangement atomique est difficilement accessible.

La structure de l'antigène *AMA1* du plasmodium vecteur du paludisme, aujourd'hui testé comme candidat-vaccin, a aussi été élucidée par cristallographie à l'ESRF. Tout comme celle de l'*hémagglutinine*, responsable de la virulence du virus de la grippe «espagnole» de 1918 (dont l'intérêt a été réactivé par les nouvelles menaces d'épidémie mondiale de grippe aviaire), ou encore celle de *recBCD*, un complexe protéique assurant la réparation de l'ADN bactérien.

Radiorésistance et réparation de l'ADN

Membre du groupe de cristallographie macromoléculaire, Joanna Timmins s'intéresse à la bactérie *Deinococcus radiodurans* qui a la propriété fascinante de résister à de très fortes irradiations. Son génome est séquencé et certaines de ses protéines cristallisées. Cette bactérie ne présente pas de caractères exceptionnels, mais elle répare très bien les cassures des doubles brins de l'ADN, généralement fatales aux cellules.

«Puisque cette bactérie résiste à des taux de radiation qui n'existent pas sur Terre, ce n'est pas un caractère acquis. Cette radiorésistance n'est peut-être qu'une conséquence indirecte de son efficacité exceptionnelle pour tout un ensemble de fonctions cellulaires classiques – qui expliquerait aussi, par exemple, son extrême endurance à la sécheresse», commente Joanna Timmins. Mieux connaître les mécanismes fondamentaux de réparation des cassures de l'ADN chez *D. radiodurans* pourrait ainsi aider à comprendre en quoi ils sont perturbés dans des cancers radio-induits, comme ceux de la peau.

Dans le même groupe, Laurent Terradot travaille en collaboration avec l'Institut Pasteur sur *Helicobacter pylori*, la bactérie responsable de l'ulcère de l'estomac. L'étude des interactions des protéines impliquées dans la détoxification de l'acidité – un processus indispensable à la survie de la bactérie dans l'estomac – a permis de découvrir un mécanisme unique. «*Helicobacter pylori* accumule le nickel puis le relâche quand l'acidité augmente. Le nickel libéré permet à une autre protéine de la bactérie de déclencher la détoxination. L'an dernier, la même équipe a publié la structure des 12 protéines qui constituent la machinerie par laquelle la bactérie injecte ses toxines dans les cellules humaines. Ce sont autant de cibles thérapeutiques potentielles.»

Guérir le gliome?

En radiothérapie, des méthodes développées par des équipes de l'hôpital universitaire de Grenoble, en collaboration avec l'ESRF, donnent des résultats très prometteurs. Elles se basent sur une synergie entre l'irradiation



Représentation schématique de la protéine NikR de *Helicobacter pylori* sous sa forme tétramérique (deux chaînes de deux couleurs).

- La première image présente la structure obtenue sans nickel.
- La deuxième la montre après incorporation du nickel (représenté par des boules jaunes). Les atomes de nickel viennent se loger à l'interface des deux dimères et permettent, d'une part, d'assembler la protéine sous forme compacte et, d'autre part, de susciter le mouvement des domaines de liaisons à l'ADN. Il s'agit là d'une phase intermédiaire.
- La troisième illustration fait apparaître, en phase finale, l'incorporation du nickel vu dans les cristaux de NikR.

Les trois structures ont ainsi permis d'obtenir des images successives de l'incorporation du nickel et de voir comment son entrée engendre des changements structuraux qui se répercutent vers les domaines extérieurs de liaison à l'ADN.

© Journal of molecular biology

Mary-Rose, Stardust, arsenic et iode



Analyse de la dégradation de l'épave du *Mary-Rose*, vaisseau d'Henri VIII d'Angleterre. Courtesy of the Mary Rose Trust

Dans l'imagerie synchrotron X, le faisceau peut illuminer tout l'échantillon ou le balayer point par point avec une résolution comprise entre 100 μm et 100 nm (0,1 μm). Cela permet de détecter, en quantités infimes, la présence et l'état d'éléments-traces comme les métaux. Ce type de détection est utilisé dans les investigations les plus diverses: archéologie, recherche spatiale, études environnementales, nouvelles thérapies. Des équipes de scientifiques viennent, par exemple, à l'ESRF pour comprendre et prévenir la formation des composés sulfurés à l'origine de la dégradation des bois du célèbre vestige naval *Mary-Rose*, vaisseau d'Henri VIII d'Angleterre. Ou pour l'analyse chimique et structurale de poussières d'étoiles ramenées par la mission récente *Stardust* de la NASA. Ou encore pour l'étude des interactions entre l'os et une prothèse de titane, ou le suivi de la métabolisation de l'arsenic dans un cheveu.

des cellules tumorales et une chimiothérapie à base de cisplatine, un anticancéreux de premier plan utilisé pour tenter de traiter les gliomes, ces tumeurs cérébrales aujourd'hui incurables. «En sélectionnant un seuil d'énergie spécifique du platine pour la radiothérapie, l'absorption du cisplatine est multipliée. Chez le rat, la survie est de quelques semaines avec la radiothérapie ou la chimiothérapie seules, mais un peu plus en combinant les deux. Avec le rayonnement monochromatique du synchrotron à la bonne énergie, c'est une véritable rémission qui est, pour la première fois, obtenue», précise Alberto Bravin.

La soie, source de bio-inspiration

Etudier le vivant, certes. Mais le copier? Pas si simple. «La nature est source d'inspiration inépuisable,» rappelle Christian Riekkel, qui dirige à l'ESRF le groupe *Matière condensée molle*. «Ce sont la résistance, l'élasticité, la biocompatibilité du fil de soie qui ont inspiré l'idée de l'utiliser comme substitut des tendons humains.» Ces propriétés suggèrent bien d'autres applications... à condition de pouvoir fabriquer ces fibres industriellement.

Le groupe développe des techniques d'imagerie et d'études structurales pour mieux comprendre comment ce polymère d'une protéine toute simple forme un filament en solution aqueuse, exploite parfaitement banal pour l'araignée. «La microfluidique, qui utilise des puces contenant des micro-canaux, ou d'autres techniques comparables, permet de visualiser à chaque instant, sous le faisceau X, comment une protéine en solution change de conformation quand on ajoute un produit agrégeant.»

D'autres chercheurs tentent de fabriquer des muscles artificiels avec un copolymère formé d'un polymère dur et d'un polymère mou. «Ce copolymère absorbe l'eau quand l'acidité du milieu change, se gonfle et fournit un effet mécanique. Cela fonctionne à l'échelle de la fibrille unitaire, microscopique, mais demande un temps infini à celle du muscle.»

Soie, tendon ou muscle, les interactions des fibres protéiques rigides avec la matrice molle qui les englobe jouent un rôle majeur dans leurs propriétés mécaniques. Ces fibres sont noyées dans une matrice à laquelle elles sont ancrées par des liaisons qui se rompent en présence d'eau. L'ensemble, jusque là homogène, se fragmente alors. «Comment ces ruptures au niveau moléculaire sont-elles intégrées et se transmettent-elles à l'ensemble du muscle ou du tendon pour changer son état? Comment ces différentes échelles d'organisation travaillent-elles ensemble? Pour le comprendre, il faut pouvoir observer le même phénomène à ces différents niveaux d'organisation. Grâce à la précision nanométrique offerte par les lignes de lumière de l'ESRF, nous pouvons maintenant mettre au point des techniques qui permettent mieux d'étudier ce passage du microscopique au macroscopique, ce qui était impossible il y a encore dix ans.»

Décoder les origines

Formidable outil d'exploration biologique, le synchrotron est aussi un instrument privilégié pour la compréhension des formes de vie venues du passé.

Paléontologue et primatologue, Paul Tafforeau a utilisé, pour la première fois en 2001, les rayons X de l'ESRF pour l'analyse de la structure tridimensionnelle des dents de primates. L'épaisseur et la distribution de l'émail constituent, en effet, des caractères importants dans l'étude de l'évolution des hominidés, mais leur caractérisation nécessite des méthodes de mesures rigoureuses et objectives.

«L'émail est relativement fin chez les grands singes africains actuels, et relativement épais chez les orangs-outangs. Il semble montrer un épaississement au cours de l'évolution des hominidés, même si les données sont encore mal quantifiées chez nos deux plus lointains ancêtres, Toumaï et *Orrorin tugenensis*.»

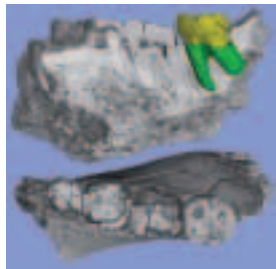
Jusqu'à très récemment, la seule façon d'étudier l'émail consistait à couper les dents. Cet aspect destructif n'est pas envisageable sur des échantillons très rares, voire uniques. Depuis quelques années, les microtomographes de laboratoire (rayons X) permettent de réaliser ces coupes virtuellement, sans détruire les dents. Mais ils restent assez lents, parfois peu précis, et manquent souvent de contraste. A l'ESRF, on peut obtenir des images de bien meilleure qualité, rapidement, ce qui accroît considérablement les possibilités d'investigations sur des fossiles anciens fortement reminéralisés.



Crâne de Toumaï

© Mission Paléanthropologique Franco-Tchadienne

Mandibule inférieure droite attribuée à *Sahelanthropus tchadensis*. Une polémique a touché la troisième molaire, certains ayant prétendu qu'il s'agissait d'une molaire gauche recollée sur une mandibule droite. En plus de caractères anatomiques évidents indiquant qu'il s'agit bien d'une dent droite, l'extraction 3D de



la couronne et de la racine a permis de montrer que le contact est quasiment parfait et que cette dent est bien à sa place. © Tafforeau, Brunet

Comparaisons entre les mâchoires de *Khoratpithecus chianguanensis* (12 millions d'années) et *Khoratpithecus piriyai* (7 millions d'années) provenant toutes deux de Thaïlande. Le spécimen de gauche est un composite 3D réalisé à partir de dents isolées de mâle et de femelle scannées sur ID19.

© Tafforeau, Jaeger, Chaimanee



Coupe virtuelle à travers un petit embryon de Chine âgé de 580 millions d'années. Les différentes couleurs correspondent à chacune des trois cellules embryonnaires (blastomères). Le calcul du volume de chacune de ces cellules montre que la bleue est



deux fois plus volumineuse. Cette observation renforce l'interprétation d'un développement embryonnaire à formation de lobes polaires. © Li, Tafforeau, Chen

Synchrotron et contraste de phase

Certains fossiles sont tellement modifiés par la diagenèse qu'ils ne présentent plus aucun contraste en imagerie classique d'absorption. Dans ce cas, il est possible d'utiliser une autre technique basée sur les propriétés de cohérence partielle du faisceau produit par certains synchrotrons: le contraste de phase de propagation. «Le contraste de phase permet de révéler de nombreuses structures sur les fossiles, totalement invisibles en imagerie classique. Les résultats sont impressionnants sur les fossiles comme les insectes dans l'ambre et les dents. On peut obtenir des reconstructions 3D montrant avec une grande précision la jonction émail-dentine, même si la dent ne présente plus aucun contraste d'absorption du fait de la diagenèse. Ces analyses de la distribution de l'émail apportent de nouveaux caractères pour étudier les relations phylogéniques des primates fossiles et actuels. L'épaisseur de l'émail informe également sur l'alimentation des spécimens étudiés. Dans certains cas, l'émail fin s'use rapidement en formant des crêtes acérées, plus adaptées à un régime végétal, alors que l'émail épais peut parfois indiquer une alimentation plus dure, incluant par exemple des noix ou des graines.»

Des embryons de 580 millions d'années

La paléontologie est en plein essor à l'ESRF. En 2003, une étude internationale sur les charophytes (des algues vieilles de 420 millions d'années) a permis de voir en détail leurs fructifications et de préciser leur position phylogénique. Des embryons marins de quatre cellules datant du Précambrien (580 millions d'années avant notre ère), trouvés dans les phosphates du site de Doushantuo, en Chine, font l'objet d'une intense recherche internationale. Réalisés à l'ESRF lors d'une étude franco-chinoise, des scans 3D révèlent le détail des membranes cellulaires des embryons, montrant clairement qu'ils se divisent de façon asymétrique pour donner des cellules de tailles différentes. «On ignore tout de leur identité et de la forme des organismes adultes. Mais on sait que de telles divisions, qui existent toujours chez certains bivalves marins actuels, créent un plan primitif de symétrie bilatérale. Or, l'immense majorité des espèces vivantes actuelles sont des *bilateria*. Notre étude, dont le résultat a été publié récemment dans *Science*, suggère donc que cette caractéristique est apparue très tôt au cours de l'évolution.»



A la pointe des sciences européennes du vivant

Créé en 1974, soutenu aujourd'hui par 19 Etats partenaires, l'EMBL (The European Molecular Biology Laboratory) est un centre multipolaire européen de recherche, de formation et d'enseignement. Il se fonde sur une coopération intense entre les scientifiques de toutes nationalités engagés dans le champ de la biologie moléculaire.

Quelque 80 groupes de chercheurs se répartissent dans les cinq laboratoires de l'EMBL. Le quartier général d'Heidelberg (DE) couvre tout le spectre des recherches en biologie moléculaire, de l'étude des molécules au développement embryonnaire des organismes, en passant par l'émergence des composants cellulaires.

Centre d'excellence en biologie moléculaire accueillant les meilleurs chercheurs, l'EMBL accorde également une grande importance à la formation des doctorants et étudiants.

© M.Schupp/EMBL



Cinq laboratoires en symbiose

Les deux antennes de Hambourg (DE) et Grenoble (FR) se trouvent sur des sites possédant des synchrotrons et collaborent à la mise en place d'un *Partenariat pour la biologie structurale*. Ce PBS est principalement implanté à Grenoble, avec la participation de l'ILL, l'ESRF, l'IBS (*Institut de Biologie Structurale*), l'IVMS (*Institut de Virologie Moléculaire et Structurale*), ainsi que celle du DESY (*Deutsches Elektronen-Synchrotron*). Les chercheurs de Monterotondo, près de Rome (EMBL *Mouse Biology Unit*), travaillent sur la fonction des gènes. Ils apportent leur expertise de très haut niveau dans la mise au point de lignées-modèles de souris pour l'étude des maladies humaines et collaborent étroitement avec les groupes de recherche nationale italiens (CNR) et l'*European Mouse Mutant Archive* (EMMA). Le Centre de bio-informatique de l'EMBL (*European Bioinformatics Institute*), installé sur le campus du Sanger Institute à Hinxton, près de Cambridge (UK), gère une des banques d'informations biologiques les plus importantes au monde.

Tous ces sites fonctionnent en étroite collaboration, avec une souplesse propre à l'ensemble de l'institution. Les travaux sont menés par des groupes de chercheurs indépendants, selon des programmes thématiques. Les structures favorisent l'interdisciplinarité et les interactions entre équipes.

L'EMBL offre, en outre, un éventail élargi de services aux scientifiques européens. Les plus largement utilisés sont la base de données gratuite de l'*European Bioinformatics Institute* (EBI) et l'accès au cyclotron de Hambourg et au synchrotron de Grenoble. Des transferts de technologies et des instrumentations développées par l'organisation sont également ouverts aux entreprises du secteur (*EMBL-Entreprise Management*).

Diffuser, former, débattre

La diffusion des connaissances et la formation des jeunes appelés à assurer la relève de la recherche sont deux volets essentiels des priorités de l'organisation. Environ 170 doctorants suivent notamment le fameux *EMBL's international PhD Programme*, mené en partenariat avec 24 universités de 17 pays. Les équipes scientifiques accueillent en permanence des chercheurs de toutes nationalités, à toutes les étapes de leur carrière. Les conférences internationales et les ateliers pratiques organisés chaque année par l'EMBL pour la communauté scientifique européenne sont toujours très attendus.

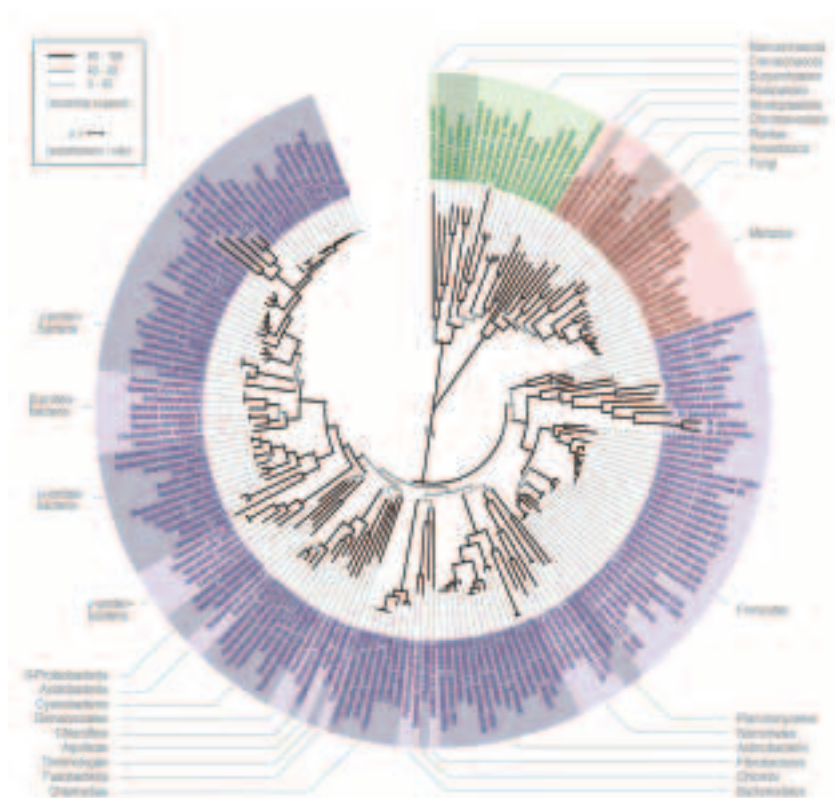
Concernée également par les implications «sociétales» de la formidable évolution des sciences du vivant, l'EMBL se donne pour mission d'approfondir les relations entre la science et la société et de communiquer la recherche «hors les murs». Le laboratoire européen propose un programme dynamique (*Science and Society*) visant à établir un dialogue entre les scientifiques et le public.

Dans un autre registre, les sessions de l'*European Learning Laboratory for the Life Sciences* (ELLS) permettent à des pédagogues motivés de se plonger au cœur des nouveaux domaines de pointe d'une discipline où la multiplication et la diversité des connaissances sont en perpétuelle progression.

L'EMBL accueille également le magazine *Science in School* de l'EIROforum, dont l'objectif est de donner de nouvelles pistes à l'enseignement de la science.

En savoir plus

www.embl.de



Selon le principe de l'ancêtre commun, la présence de 31 gènes – dont les chercheurs ont acquis la certitude qu'ils correspondent à une transmission phylogénétique au sein des génomes de 191 espèces étudiées – a permis à l'équipe EMBL dirigée par Peer Bork de dessiner un nouvel arbre de la vie, publié dans la revue © *Science Magazine*, 2006.

horizontaux. A l'issue de ce travail de bénédictin, ne restaient plus que 31 gènes dont les chercheurs avaient acquis la certitude qu'ils correspondaient à une transmission phylogénétique.

Ce n'est qu'une fois cette sélection préalable bouclée que de puissants programmes de bioinformatique ont été mis au point pour reconstituer, selon le principe de l'ancêtre commun, la présence de chacun de ces gènes au sein des génomes des 191 espèces étudiées, et en tirer ainsi un nouvel arbre de la vie.

Plus on est petit, plus on évolue vite...

«Cette étude, d'une ampleur sans commune mesure à ce jour, bouleverse un certain nombre d'idées reçues sur les filiations du vivant», souligne l'Irlandais Christopher Creevey, post-doctorant du groupe de Peer Bork. «Une première leçon fondamentale s'en dégage: plus les génomes sont petits, et plus ils évoluent vite.» En un sens, les bactéries sont donc bien plus évoluées que les mammifères...

Pour le reste, le nouvel arbre de la vie propose pas moins de quinze révisions de notre conception de la généalogie du vivant. Une des plus importantes consiste à placer les vertébrés et les insectes sur une même lignée – distincte de celle des nématodes – alors que l'on tendait à penser, depuis une dizaine d'années, que la lignée des vertébrés était véritablement une entité qu'il fallait séparer de celle des nématodes et des insectes.

«Dès la publication des résultats de nos travaux dans la revue *Science*, nous avons été assaillis de demandes de chercheurs souhaitant des précisions, comme des zooms, sur telle ou telle branche de notre phylogénèse dont ils étaient spécialistes», raconte Christopher Creevey. Cette synthèse était donc très attendue de la communauté scientifique, mais elle a eu un écho aussi dans le grand public. «Nous avons même reçu des demandes d'autorisation d'imprimer notre arbre de la vie sur des T-shirts!»

Un jour nouveau

La question si fascinante de l'origine se trouve ainsi éclairée d'un nouveau jour, puisque l'arbre de la vie suggère fortement que le tout premier être vivant apparu sur Terre se trouvait dans un milieu très chaud, vraisemblablement une de ces sources chaudes des fonds océaniques, causées par les remontées de magma du manteau terrestre.

L'arbre de la vie continuera à s'enrichir à mesure que les données du séquençage de nouveaux génomes seront ajoutées, de manière presque automatisée, et présentées sur le site dédié géré par l'EMBL. Cet afflux de nouvelles informations risque d'avoir des allures de déferlante: si 352 génomes étaient séquencés au moment de la publication dans *Science*, pas moins de 1 000 sont en cours d'achèvement.

(1) Soit 150 génomes de bactéries, 23 d'eucaryotes – dont celui d'*Homo sapiens* – et 18 génomes d'archaebactéries (bactéries très anciennes possédant un noyau).

En savoir plus

Site de l'arbre de vie à l'EMBL
www.bork.embl.de/tree-of-life

Contacts

Peer Bork
peer.bork@embl.de

Christopher Creevey
creevey@embl.de

Qui était *Urbilateria*?

Urbilateria... Ce nom ne vous dit rien? C'est l'appellation érudite donnée à l'ancêtre hypothétique commun de tous les animaux «symétriques bilatéraux» – par rapport à l'axe de leur corps –, des vers aux insectes et des poissons aux mammifères. Urbilateria vivait il y a plus de 600 millions d'années, mais on ne sait presque rien de cette créature, qui n'a laissé aucun fossile. Comme ces particules jamais observées – mais dont l'existence est prédite par la théorie – que les physiciens traquent pendant des années, Urbilateria passionne les spécialistes de l'évolution. Les travaux menés à l'EMBL ont permis d'importantes avancées dans notre connaissance de ce si lointain ancêtre.

Le fameux *Urbilateria* a, en effet, donné naissance à deux vastes groupes marqués du sceau de la symétrie corporelle. Les phylogénéticiens distinguent, d'un côté, les deutérostomes – ensemble réunissant notamment les poissons et les mammifères – et, de l'autre, les protostomes. Ceux-ci sont à leur tour divisés en deux grands sous-groupes: les ecdysozoaires (nématodes, insectes, araignées et crustacés) et les lophotrochozoaires, tels que les mollusques et les vers. Forte de cette classification, une équipe internationale menée par le groupe de Detlev Arendt à l'EMBL s'est lancée dans une vaste étude de comparaison des ADN des trois grandes lignées issues d'*Urbilateria*. Si les génomes entièrement séquencés d'insectes, de poissons ou de mammifères ne manquent pas, les chercheurs se trouvaient cependant confrontés à l'absence complète de séquences génétiques de représentants du groupe des lophotrochozoaires.



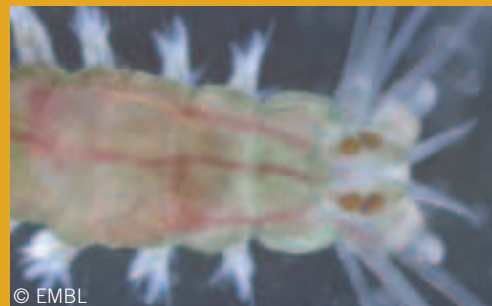
Les chercheurs Detlev Arendt, Peer Bork et Florian Raible revisitant la fable du «Lièvre, de la Tortue... et du Ver». Un clin d'œil pour comparer les lignées d'espèces selon qu'elles franchissent les étapes de l'évolution à grandes enjambées – ou très lentement, comme dans le cas de *Platynereis*. © M. Schupp/EMBL

Histoire de l'oeil

Les avancées permises par l'étude de Platynereis (photo) ne s'arrêtent pas là. Elles ont aussi permis d'élucider une énigme qui a, de longue date, donné bien du fil à retordre aux biologistes: celle de l'apparition de l'œil.

Darwin reconnaissait déjà qu'il était hautement improbable qu'une structure aussi complexe soit apparue d'un coup, par variation aléatoire suivie de sélection, comme le prévoit la théorie de l'évolution. A la fin des années 1980, les travaux de Walter Gehring, à Bâle, ont apporté de premiers éléments d'explication en montrant qu'un seul gène, contrôlant en cascade l'activation de 2 500 autres, suffisait pour déterminer la fabrication d'un œil et que ce gène était le même chez la souris, la drosophile et le calmar. Ces résultats suggéraient donc que les yeux des mammifères, des insectes ou des céphalopodes, pourtant si différents, dérivent sans doute tous du même œil rudimentaire, qu'un seul gène a pu suffire à réaliser.

La première apparition de cet œil primitif au cours de l'évolution doit donc être cherchée chez un ancêtre commun aux trois branches... donc chez le fameux *Urbilateria*. Reste cependant à décrire ce mystérieux proto-œil. Là encore, c'est de *Platynereis* que vient la réponse. «Chez ce lophotrochozoaire coexistent deux types de cellules photoréceptrices: l'une, dite rhabdomérique,



© EMBL

typique des invertébrés et l'autre, dite ciliée, caractéristique des vertébrés, raconte Detlev Arendt. Lorsque j'ai vu pour la première fois des clichés en microscopie électronique de ces cellules photoréceptrices ciliées de *Platynereis*, j'ai été frappé par leur ressemblance avec les cônes et aux bâtonnets, caractéristiques de notre rétine humaine.»

Un petit ver utile

Ils ont finalement choisi de prendre pour modèle d'étude un petit ver marin nommé *Platynereis dumerilii*. Ses avantages? Facile à élever en laboratoire, *Platynereis* a tout du fossile vivant. L'organisation de son corps, en segments répétitifs, semble avoir peu évolué depuis 600 millions d'années. Son identité phylogénétique implique que tout caractère complexe que l'on retrouve à la fois chez le lophotrochozoaire *Platynereis* et, par exemple, chez le deutérostome *Homo sapiens* devait être déjà présent chez *Urbilateria*.

Un séquençage partiel du génome de *Platynereis* a donc été mené pour combler cette lacune. Il a permis d'identifier 30 gènes existant aussi dans les deux autres grands groupes. L'analyse s'est ensuite attachée à étudier non pas les séquences codantes de ces gènes, mais bien les séquences non codantes qui les morcellent. Ces séquences dites intruses forment ce que l'on appelle les introns (par opposition aux séquences baptisées exons qui codent pour la séquence protéique).

Le rôle des introns est encore aujourd'hui très discuté. Les uns estiment qu'il s'agit de restes évolutifs, selon la théorie de «l'ADN poubelle», d'autres y voient une sorte d'astuce biomoléculaire permettant de produire plusieurs protéines à partir d'un seul gène (par aboutage d'exons différents). La comparaison phylogénétique des introns pourrait donc percer une part du mystère.

Platynereis et *Homo sapiens*

Cette étude, publiée, dans *Science* en novembre 2005, apporte un premier résultat, surprenant: *Platynereis* contient en moyenne 7,8 introns par gène, soit sensiblement autant que l'homme (8,4), mais beaucoup plus que les insectes et les nématodes qui en comptent entre 2,4 et 5,4.

Voilà qui indique, en vertu du principe de l'ancêtre commun, qu'*Urbilateria* devait lui aussi avoir un génome riche en introns.

Deuxième résultat, plus étonnant encore: plus de la moitié des introns humains sont conservés, parfois au nucléotide près, chez *Platynereis*, alors que cette proportion n'est en moyenne que d'un quart chez les insectes. En remontant la phylogénie, on en arrive à la conclusion que plus des deux tiers des introns humains devaient donc déjà être présents chez *Urbilateria*.

Or, ces séquences n'ont pu être inventées deux fois. Cette extraordinaire faculté de conservation suggère que les introns, loin d'être de «la poubelle de l'ADN», jouent un rôle fonctionnel très important, même si celui-ci reste débattu. Est-ce là une particularité propre aux introns? Nullement, comme le montre le troisième résultat présenté dans *Science*: l'analyse de la séquence de 442 protéines présentes dans les trois branches montre à nouveau que *Platynereis* est bien plus proche d'*Homo sapiens* que des insectes.

Ainsi, contrairement à l'intuition, notre espèce est génétiquement beaucoup plus semblable à *Platynereis*, cet humble ver marin, qu'à des organismes aussi sophistiqués que l'abeille. Detlev Arendt pousse même le raisonnement encore plus loin: «nos résultats peuvent s'interpréter en disant qu'*Homo sapiens* a préservé des traits ancestraux...». Paradoxe? Pas vraiment. Tout se passe comme si la branche des ecdysozoaires, à laquelle se rattachent les insectes, avait privilégié une forme d'évolution passant par la simplification des génomes et la diminution de leur nombre d'introns, tandis que les deux autres branches auraient conservé la fragmentation très importante qui était déjà celle d'*Urbilateria*. «Les ecdysozoaires ont donc évolué rapidement, poursuit Detlev Arendt. Ils se sont, en fait, davantage éloignés de l'ancêtre commun que ne le faisaient les lignées des lophotrochozoaires et des deutérostomes, qui ont connu un rythme d'évolution beaucoup plus conservateur.»

En savoir plus

www-db.embl.de/jss/EmblGroupsOrg/g_172.html

Contact

Detlev Arendt
arendt@embl.de

Restait à prouver cette intuition, ce qu'a permis la technique des empreintes moléculaires, fonctionnant au niveau de la cellule comme une véritable empreinte digitale. Les cellules photoréceptrices ciliées de *Platynereis*, transmises non seulement à ce ver mais aussi à toute la lignée des vertébrés, possèdent une signature commune. Conclusion logique: *Urbilateria* devait déjà posséder ce type cellulaire, même s'il ne permettait sans doute pas une véritable vision, mais plutôt une adaptation au photopériodisme, importante pour ajuster le cycle reproductif à l'alternance du jour et de la nuit.

Fort de ces découvertes, Arendt rêve aujourd'hui de reconstruire petit à petit le système nerveux d'*Urbilateria*. «Je suis fasciné de voir que l'on trouve exactement les mêmes hormones et neurotransmetteurs chez *Platynereis* et chez l'Homme, alors que certains sont absents chez les insectes, ce qui illustre là encore l'idée que cette branche a évolué beaucoup plus vite.» Grâce à cette méthode de l'empreinte moléculaire, qui permet de reconstituer la généalogie des types cellulaires de la même manière que l'on reconstitue des

arbres phylogénétiques, le chercheur échafaude déjà des modèles d'apparition du système nerveux.

«Imaginons une cellule photoréceptrice présente chez un ancêtre d'*Urbilateria*», lance-t-il, en esquissant un croquis, «et imaginons que la duplication d'un gène codant pour un photorécepteur permette de donner naissance à deux types de cellules, héritant chacune d'une version du gène: l'une spécialisée dans la réception de l'information lumineuse, et l'autre dans son traitement. Il est fréquent, lors du développement embryonnaire, que des cellules se déplacent. Supposons donc que l'une de nos deux cellules migre, tout en restant connectée à sa sœur par un prolongement de cytoplasme. Nous obtenons un véritable proto-système nerveux, avec le prolongement jouant le rôle de l'axone!»

Sous le crayon du chercheur, apparaît l'ébauche d'un réseau neuronal, tel qu'il put se mettre en place chez *Urbilateria*. Des générations de biologistes n'ont pu qu'imaginer cet ancêtre lointain. Grâce aux nouvelles techniques de biologie moléculaire, il prend progressivement figure sous nos yeux.



Au commencement était la forme

Eric Karsenti dirige l'unité «biologie cellulaire et biophysique» de l'EMBL. 150 ans après la publication par Darwin de L'origine des espèces, ce spécialiste du cytosquelette projette de s'embarquer, en 2009, sur un voilier refaisant le voyage du HMS Beagle qui avait permis au fondateur de la théorie de l'évolution de collecter nombre des observations étayant ses idées.



Représentation des brins microtubules du cytosquelette de la levure (en vert), associé aux mitochondries (en jaune) et au noyau cellulaire (en violet).
© EMBL

Quel rapport y a-t-il entre vos recherches à l'EMBL, qui portent sur des mécanismes physico-chimiques régissant le fonctionnement du squelette cellulaire, et votre intérêt pour les questions d'évolution?

Le problème qui m'a toujours fasciné est celui de la complexité et de la diversité des formes que peut prendre la vie. Comment une telle diversité est-elle possible et comment a-t-elle pu être générée au cours de l'évolution? C'est une interrogation fort ancienne, qui remonte à Aristote. Cette question, aujourd'hui négligée, était très présente au XIX^{ème} siècle et au début du XX^{ème}.

Ainsi, le fameux exemple des pinsons des Galapagos. Lors du voyage du HMS Beagle, Darwin décrit 13 espèces de pinsons vivant dans cet archipel du Pacifique, se distinguant les uns des autres par la forme du bec. C'est devenu un paradigme de ce que nous appelons la spéciation: comment la forme des becs de pinsons peut-elle varier au cours de l'évolution, et finalement assez rapidement?

La réponse peut être trouvée en descendant d'un degré sur l'échelle des niveaux d'organisation du vivant, c'est-à-dire en passant de l'organe à la cellule. Le cytosquelette est ce qui donne sa forme à la cellule. C'est donc pour comprendre la morphogénèse cellulaire que j'ai commencé à travailler – avec une équipe comprenant autant de biologistes que de physiciens – sur le cytosquelette et ses principaux constituants: l'actine, la tubuline, et les protéines qui leur sont associées.

Peut-on dater, dans l'évolution, l'apparition du cytosquelette?

Toutes les cellules eucaryotes (les cellules à noyau) en ont un. Chez les procaryotes (les cellules sans noyau, comme les bactéries), on ne trouve pas de structure équivalente, même si certaines protéines similaires y sont présentes. Il a donc dû y avoir un moment, au cours de l'évolution, où le matériel génétique est devenu si complexe que la distribution des chromosomes en deux lots identiques a nécessité l'apparition d'un mécanisme plus sophistiqué: le cytosquelette. En effet, chez tous les eucaryotes, les chromosomes sont distribués par un fuseau mitotique constitué de microtubules. Cela pose un problème fascinant, celui de la co-évolution possible, lors de l'émergence des eucaryotes, d'un grand nombre de gènes impliqués dans le contrôle de

la division et de la forme cellulaire. Malheureusement, c'est un sujet peu étudié et je regrette que l'on ne travaille pas davantage sur ces questions de biologie évolutive au niveau cellulaire. Il y aurait de passionnantes études à mener sur le cytosquelette des eucaryotes unicellulaires, chez le plancton en particulier, dont certains sont de véritables trésors fossiles vivants.

Existe-t-il des exemples où la mutation d'un gène codant pour une protéine du cytosquelette entraîne l'apparition d'une nouvelle forme?

Certainement. C'est, par exemple, le cas d'une mutation de la dynéine. Cette protéine du cytosquelette fonctionne comme un petit moteur qui se déplace le long des microtubules et qui cause rien moins que l'inversion de la position des organes: le cœur à droite, le foie à gauche, etc.

Attention, je ne prétends pas que toutes les nouvelles formes surgissent via des mutations de gènes du cytosquelette... Dans l'exemple des pinsons de Darwin, on sait à présent que c'est la variation du niveau d'expression d'un gène codant pour une hormone régulant la prolifération des cellules qui est impliquée dans la formation du bec.

Je pense, en revanche, que l'étude des principes physico-chimiques et dynamiques sous-tendant la morphogénèse cellulaire est indispensable pour comprendre comment l'évolution a pu conduire à la splendeur et à la diversité des formes de vie que nous avons la chance de contempler aujourd'hui...

En savoir plus

www-db.embl.de/jss/EmblGroupsOrg/g_40.html

Contact

Eric Karsenti
karsenti@embl.de



L'espace européen sans frontières

Figure de proue de la science et de la technologie, l'Agence spatiale européenne ⁽¹⁾ constituée, depuis 1973, le centre de conception et d'opération qui met en œuvre la présence de l'Europe dans l'espace. L'ESA s'appuie sur la volonté de coopération construite entre différents Etats membres de l'Union⁽²⁾, la Suisse et le Canada.

L'ESA balaye l'ensemble des activités de l'espace. Elle dirige la construction des fusées Ariane et leur lancement à partir de la base de Kourou en Guyane française, la conception et la mise au point de satellites et de leurs équipements, la préparation et la réalisation des vols habités. Parallèlement, elle développe et met en œuvre de vastes programmes scientifiques et projets internationaux – notamment pour la participation européenne à la Station spatiale internationale (ISS). Outil scientifique et technologique pour la mise en œuvre de la stratégie d'indépendance spatiale de l'Europe, l'ESA a développé une coopération étroite avec l'Union. Elle opère dans divers domaines: communications, navigation, surveillance de l'environnement, développement de technologies spatiales nouvelles – en particulier pour les grands projets *Galileo* et *GMES* (*Global Monitoring for Environment and Security services*).

Paris, Noordwijk, Darmstadt, Frascati, Kourou

Employant environ 1 900 personnes, l'ESA est un remarquable exemple de mise en œuvre opérationnelle d'une Europe sans frontières. Basé à Paris, son quartier général politique et exécutif fédère, en particulier, les coopérations étroites de l'Agence avec tous les centres spatiaux des partenaires nationaux et mondiaux, et gère l'ensemble des programmes scientifiques. L'ESTEC (*European Space Research and Technology Centre*) à Noordwijk (NL) représente le pôle de R&D où sont préparés et testés la plupart des engins et développements technologiques lancés dans l'espace. En Allemagne, l'ESOC (*European Space Operations Centre*) de Darmstadt est le centre de contrôle des satellites européens en orbite, tandis qu'à Cologne, l'EAC (*European Astronauts Centre*) prépare l'équipe permanente des astronautes européens à leurs missions. Enfin, l'ESRIN (*ESA Centre for Earth Observation*), situé à Frascati (IT), récolte, organise et distribue les données apportées par les satellites d'observations et représente le cœur de l'information de l'agence. Sans oublier le fonctionnement de base de lancement des fusées Ariane à Kourou, en Guyane.

Les nouvelles frontières de la culture

L'aventure spatiale joue aujourd'hui un rôle déterminant pour le devenir de l'humanité. Le grand public, en particulier les jeunes, se passionne pour ce sujet. Consciente de l'intérêt de ses ressources, l'ESA contribue à la diffusion de la culture et de l'éducation scientifiques. Son site web, très bien conçu, offre des informations claires, vivantes, bien documentées et agrémentées d'impressionnantes photos. Il contient notamment une page *ESA kids* (en plusieurs langues), véritable magazine junior où l'on s'instruit en s'amusant.

Parallèlement, l'ESA a lancé une Fondation éducative (*International Space Station Education Fund – ISSEF*) qui propose des outils pédagogiques conçus pour différents niveaux (de l'école primaire à l'université).

(1) Désignée généralement sous son acronyme anglais ESA, European Space Agency.

(2) Les 17 pays membres de l'Agence sont les suivants: l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, le Danemark, l'Espagne, la Finlande, la France, la Grèce, l'Irlande, l'Italie, le Luxembourg, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, le Royaume-Uni, la Suède et la Suisse. Le Canada prend part à certains projets grâce à un accord de coopération. La Hongrie, la République tchèque et la Roumanie ont le statut de *European Cooperating States*.

> www.esa.int
> www.esa.int/esaHS/education.html



David Southwood, directeur scientifique de l'ESA: «L'outil spatial est désormais utilisé en permanence pour comprendre le fonctionnement de l'écosystème global de la Terre – et des sous-systèmes qui le compose –, en révélant un certain nombre de phénomènes essentiels impossibles à appréhender autrement.» © ESA

Les révolutions de la science offshore

Pour David Southwood, directeur scientifique de l'ESA, il y a deux grandes sciences spatiales. L'une regarde vers l'extérieur, de notre système solaire jusqu'aux confins de l'Univers. L'autre est braquée sur la Terre. Toutes deux s'attachent à une triple question fondamentale de l'existence du vivant: pourquoi, comment et où? Entretien.

La science spatiale est un domaine de recherche dont les coûts paraissent vertigineux. L'Europe a-t-elle raison d'y consacrer autant de forces et de moyens?

Soyons réalistes. Ce n'est pas d'abord pour faire de la science que l'Europe est montée dans l'espace. La capacité de mettre des satellites en orbite est aujourd'hui un outil stratégique et économique essentiel, sur le plan des télécommunications, de la navigation, de la sécurité... C'est un souci premier d'indépendance. Il y a quelques siècles, une nation moderne se devait d'avoir une flotte et d'être capable d'envoyer des navires d'un continent à l'autre. De la même manière, nous devons pouvoir envoyer des engins spatiaux où nous voulons.

Mais, lorsque cette capacité est là, on peut également l'utiliser pour la science. S'en priver serait une aberration alors même que les progrès des connaissances fondamentales et appliquées accomplis grâce à l'espace sont déterminants dans un éventail énorme de domaines. Or l'Europe est un pôle essentiel de la recherche mondiale. Elle a un potentiel scientifique humain de haut niveau. Elle a un rôle à tenir et c'est aussi un domaine où il faut être capable d'aller «où on veut».

Quels sont les objectifs scientifiques de l'ESA?

Aller dans l'espace permet d'avoir deux regards scientifiques distincts. L'un, tourné vers l'extérieur, a pour objectif de comprendre l'Univers dans lequel nous existons et dont nous sommes issus. L'autre, orienté vers le bas, observe cet objet nommé Terre grâce auquel nous existons. A l'extérieur, le premier domaine d'intérêt est, bien sûr, l'exploration de notre banlieue proche, à savoir notre système solaire, qui est désormais de plus en plus «à portée d'engins». L'ESA «pilote» en ce moment un vaisseau *Express* autour de Vénus, un autre autour de Mars. L'expédition conjointe *Cassini-Huygens*, effectuée en 2004-2005, est une réussite: le vaisseau de la NASA est en orbite autour d'une lune de Saturne appelée Titan, sur laquelle s'est posée sans encombre la sonde européenne *Huygens*. Sans oublier les circonvolutions de *Smart 1*, le satellite qui, depuis 2004, examine de près le sol de notre Lune, notamment pour y déceler la présence antérieure de l'eau.

Parallèlement, l'Europe a apporté une importante contribution à la «chasse aux comètes», entamée il y a 20 ans avec la visite de la sonde *Giotto* à *Haley*, qui fut une grande première. La formation des comètes est antérieure à celle des planètes et elles pourraient être le matériau primordial à partir duquel les planètes sont nées. Bien sûr, ce matériau a été chauffé, a subi des collisions, des agrégations, et il faut comprendre ce qui s'est passé pour retrouver les «briques» originelles. Telle est la grande ambition portée aujourd'hui par la sonde *Rosetta*, lancée en 2004, destinée à se poser sur la comète *Churyumov-Gerasimenko* en 2014. *Rosetta* s'appelle ainsi en référence à la *Pierre de Rosette*, qui

permet à Champollion de décoder les hiéroglyphes égyptiens. Nous cherchons les codes de développement de la matière dans le système solaire – une matière dont est aussi sortie la vie.

Mais l'espace ne s'arrête pas au système solaire...

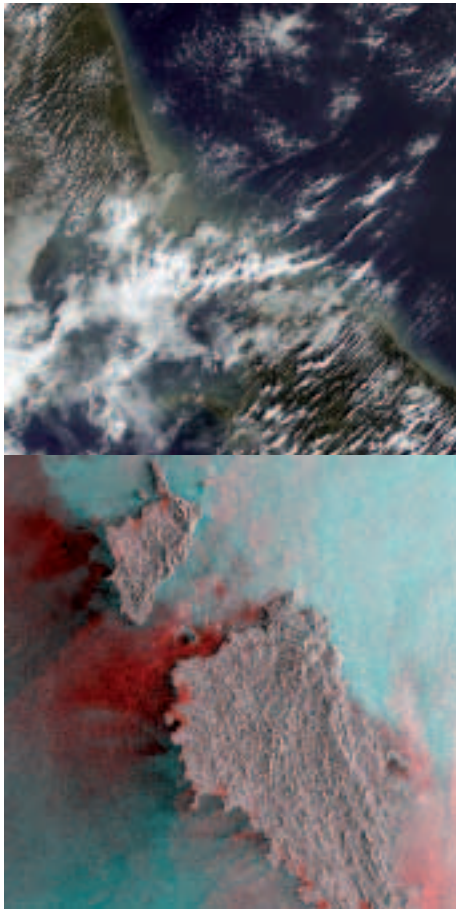
Loin s'en faut... Au-delà du système solaire, il y a le formidable champ d'observation offert à l'astronomie et à l'astrophysique par les télescopes et les détecteurs embarqués sur des satellites orbitaires. Ainsi, la réputation de la moisson d'images stellaires prises par «l'observatoire» *Hubble* n'est plus à faire. Mais d'autres instruments moins connus, tel *XMM-Newton*, un engin dédié à la détection des rayonnements X, récoltent des masses de données précieuses aux scientifiques.

L'ESA a plusieurs projets en chantier dans cette fascinante exploration de l'Univers. Dans deux ans, nous allons lancer – avec la même fusée – les deux engins *Planck* et *Herschell*. Le premier étudiera, dans les galaxies les plus lointaines, la formation de l'Univers et les premières leçons de sa structuration – autrement dit les temps les plus rapprochés du Big Bang. Le second analysera l'organisation de la matière en amas, la formation des galaxies, des étoiles et des planètes. *Herschell* sera un outil d'élucidation de la mystérieuse partie sombre de l'Univers, là où la gravité transforme la masse en chaleur dans l'effondrement de certaines étoiles sur elles-mêmes. Ensuite, ce sera le tour de la future mission *Gaia*, qui effectuera une véritable plongée au cœur de l'horlogerie cosmique de notre propre galaxie, de son milliard d'étoiles, de sa matière noire...

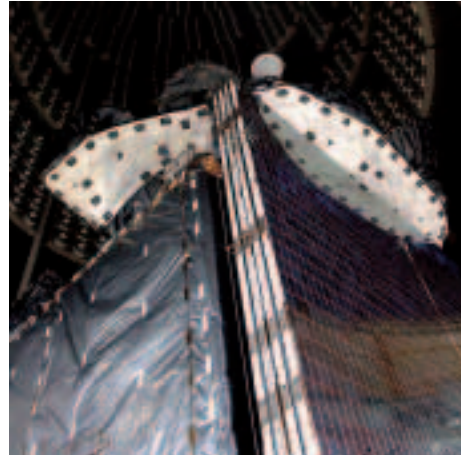
Tous ces projets ne vous conduisent-ils pas à négliger l'observation de la Terre?

Non, car le programme *Planète vivante*, regroupant l'ensemble des moyens d'observation de la Terre, représente environ la moitié de l'effort de recherche scientifique de l'ESA durant les prochaines années. L'outil spatial est désormais utilisé en permanence pour comprendre le fonctionnement de l'écosystème global de la Terre – et des sous-systèmes qui le compose –, en révélant un certain nombre de phénomènes essentiels impossibles à appréhender autrement. Depuis trois décennies, l'Europe a accumulé un savoir-faire et des connaissances irremplaçables à travers le déploiement toujours plus dense des satellites météo, les mises en orbite des engins ERS-1 et 2 (*European Remote Sensing*) et surtout avec *Envisat*, ce fleuron de l'observation de la Terre. Sur cette plate-forme satellitaire, pas moins de dix instruments scrutent, depuis 2002, les océans, les calottes glacières, les continents et l'atmosphère.

Planète vivante est la *roadmap* que s'est fixée l'ESA pour remplir sa mission dans le contexte désormais primordial du changement



La côte nord-est du Sri Lanka sous l'oeil d'Envisat lors du tsunami du 28 décembre 2004 (en haut) et les dégâts de cette catastrophe enregistrés par ERS-2. © ESA



Le satellite Spainsat placé au sommet du lanceur Ariane 5. © ESA/S.Corvaja

global et du réchauffement climatique. Une série de six satellites, les *Earth Explorers*, sont à l'étude ou déjà en chantier et seront mis en orbite d'ici à 2012. Chacun doit remplir un cahier des charges soigneusement adapté aux besoins des «docteurs» de la Terre, pour la connaissance des grands courants marins, de la salinité océanique, du cycle de l'eau, de la circulation dans l'atmosphère, de la fonte des glaces, etc. Tout ceci indépendamment de la poursuite du développement de satellites météo, ainsi que des engins qui feront partie du fameux système orbital GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*).

Lorsqu'on arrive sur le portail web de l'ESA, le premier onglet proposé est attirant pour le visiteur: il s'intitule Life in Space. N'est-ce pas cette question sous-jacente de la «vie ailleurs» qui motive l'irrésistible attraction de l'Homme pour l'espace?

Nous savons, en tout cas, que la «vie ici» existe... Lorsque nous observons la Terre à la distance d'un engin spatial, que faisons-nous sinon observer déjà «la vie dans l'espace»? Et il est grand temps de le faire car nous savons que le réchauffement climatique, le changement global, sont des processus qui interrogent la relation unissant la vie et la planète, et la responsabilité de l'Homme à l'égard de «sa» planète.

Cette relation gouverne aussi notre regard vers l'extérieur. La possibilité que notre Terre devienne inhabitable nous conduit à étudier comment l'énorme effet de serre empêche toute vie sur Vénus et si Mars, en dépit de son apparence inhospitalière, n'héberge pas des formes de vie primitives. Sur Titan, on trouve de l'hydrogène, du méthane, de l'azote, de l'eau... Or, si cette eau libérait son oxygène, tout pourrait être en place pour un scénario du vivant. De surcroît, s'ouvre à présent la possibilité d'étudier des planètes en dehors de notre système solaire, ce qui il y a seulement 20 ans était considéré comme de la science-fiction.

Ce que la science essaie de comprendre c'est comment tout ceci – l'Univers, la vie sur Terre, peut-être la vie ailleurs – est apparu. Si l'Univers devait renaître, il n'y a aucune certitude que des humains surgiraient à nouveau sur une planète pas plus importante qu'une autre, dans une galaxie elle-même environnée à perte de vue d'autres galaxies. La science a aussi une idée de la suite de l'histoire. Un jour, dans cinq milliards d'années, le Soleil sera devenu un géant rouge et aura avalé la Terre. Peut-être que notre planète est la seule zone de vie de l'univers particulier qui est le nôtre. Mais peut-être aussi que cet univers grouille littéralement de vie... Ceci a une signification morale. D'une certaine façon, si nous sommes uniques, cela fait de notre survie un enjeu particulier. Si par contre nous ne sommes qu'un cas parmi une foule d'autres, cela a moins d'importance. On pourra tranquillement, lorsque le moment sera venu, laisser la lumière s'éteindre...

En savoir plus

www.esa.int/esaSC/index.html

Contact

David Southwood
c/o dina.bauer@esa.int

Les sentinelles du «Système Terre»

Pour réagir par rapport à la très préoccupante évolution des conditions environnementales de la planète, la technologie spatiale a un rôle clé à jouer, qu'il s'agisse d'établir un diagnostic, d'élaborer le traitement, ou de veiller à ce que ce dernier soit convenablement administré...

«**A**vant de m'envoler, je savais scientifiquement combien notre planète est petite et vulnérable. Mais l'émotion qui m'a saisi lorsque je l'ai vue depuis l'espace, dans sa beauté et sa fragilité extrême en tant que berceau où est apparue la vie, j'ai compris que la tâche la plus urgente de l'humanité est de la chérir et de la préserver à tout prix pour les générations futures.» Ecrite il y a 30 ans, cette phrase de Sigmund Jähn, premier cosmonaute allemand, pourrait paraître emphatique si des dizaines d'astronautes de toutes nationalités n'avaient depuis tenu des propos comparables.

L'ère anthropocène

Faut-il chercher plus loin l'explication à la ferveur avec laquelle l'ESA, depuis des années, entend mettre des moyens satellitaires de plus en plus importants et sophistiqués au service d'une conception planétaire du développement durable? Le programme coordonné que l'Agence spatiale développe depuis 2004, *Planète vivante*, vise essentiellement à «jouer un rôle central dans le développement d'une capacité globale à comprendre la planète Terre, prédire ses changements, et limiter les effets négatifs du changement global sur sa population.»

Le changement global ne se résume pas au seul réchauffement climatique. Par delà l'atmosphère, les mutations que l'Homme a provoquées, en seulement 150 ans, sur l'ensemble de la planète, sont, en effet, d'une telle ampleur que le chimiste Paul Crutzen, prix Nobel, a forgé le néologisme *anthropocène* pour désigner l'époque actuelle. Ce terme souligne à quel point «l'âge de l'Homme» est à la source d'innombrables processus planétaires, depuis l'évolution des espèces jusqu'aux cycles du carbone, de l'azote ou de l'eau.

De plus – et c'est ce qui justifie la notion de Système Terre apparue à la fin du XX^{ème} siècle –, l'évolution de notre planète ne peut être comprise que si l'on couple les différents grands ensembles qui la constituent et interagissent constamment: la biosphère (l'ensemble des êtres vivants), la cryosphère (les zones englacées), les océans, les surfaces continentales, et bien entendu l'atmosphère. Pour comprendre la dynamique de ces différentes entités, et surtout la résultante de leurs interactions, la première étape consiste à connaître leurs comportements et leurs corrélations. La seconde est de pouvoir prévoir leur évolution conjointe grâce à des modélisations.

L'imagerie médicale de la planète...

Les satellites sont, de ce point de vue, de véritables observatoires de la Terre. Les illustrations en sont innombrables. Grâce à des altimètres spatiaux d'une précision remarquable, la hausse continue du niveau des mers sous l'effet du réchauffement climatique est à présent enregistrée indépendamment des mouvements tectoniques des continents, qui peuvent perturber les mesures classiques des marégraphes. Toute accélération de cette hausse serait a priori rapidement détectée. Un des pionniers de ces altimètres, Carl Wunsch, souligne que «ces appareils nous ont révélé que le système océanique change profondément chaque jour, ce qui a transformé notre regard. On avait tendance à le considérer comme un phénomène géophysique très lent et cela s'avère un système beaucoup plus complexe dont le fluide se déplace en permanence dans toutes les directions.»

Dans le même temps, l'évolution des glaces est soigneusement observée. Des images prises par les satellites ERS montrent, année après année, le processus de fonte de la calotte groenlandaise – et les chercheurs suivent de près ses corrélations avec le niveau des eaux. Autre exemple: des images d'Envisat acquises en août 2006 ont révélé l'apparition inattendue dans la banquise arctique permanente d'une faille colossale allant jusqu'au pôle Nord. «Un tel phénomène n'avait jamais été observé auparavant, commente Mark Drinkwater, de l'unité Océans/Glace de l'ESA. Cette fissure pourrait théoriquement permettre de faire naviguer un bateau du Spitzberg ou de la Sibérie jusqu'au pôle Nord.»



The Global Ozone Monitoring Experiment-2 (GOME-2), un des instruments de nouvelle génération doit apporter une contribution importante aux recherches sur l'atmosphère, en permettant notamment de rassembler des données sur les concentrations d'ozone. © ESA

Surveillance de l'impact humain

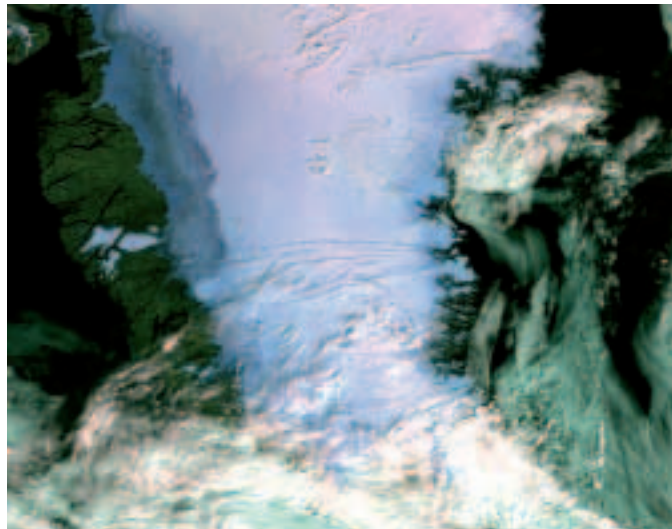
Par ailleurs, presque aucun impact des diverses activités humaines n'échappe à l'oeil perçant des satellites. Déforestation, urbanisation – notamment du littoral –, bouleversements du régime hydrographique par creusement de canaux, assèchement de zones humides, édification de barrages... Tout est méthodiquement enregistré par les inlassables survols de ces sentinelles de la Terre. Ainsi les incendies, qui se multiplient à l'échelon mondial sont désormais recensés dans *The World Fire Atlas*, où les données sont intégrées au fur et à mesure de leur acquisition. «Ce recueil sans cesse mis à jour est une ressource totalement

innovante pour les chercheurs, commente Matt Fitzpatrick, spécialiste d'écologie et de biologie évolutive. Il va permettre aux écologistes de réexaminer de vieilles questions irrésolues concernant la façon dont le milieu naturel se restructure après le passage du feu et d'en tirer des leçons pour sa restauration.» Beaucoup de nos émissions (méthane, oxydes d'azote) sont également visibles de l'espace, tout comme les effets de certaines catastrophes écologiques (telles les marées noires) et naturelles (après-tsunami, éruptions volcaniques, etc.).



Les images apportées par les satellites ont fait faire à la science du Système Terre des progrès comparables à ceux que l'ensemble des techniques d'imagerie – IRM, scanner, radiographie, échographie, etc. – ont permis à la médecine. Ici le Suriname et la Guyane française «vus d'en haut»

© ESA



Le Groenland capté par l'œil de Meris (Medium Resolution Imaging Spectrometer). La glace se distingue des nuages, au bas de l'image.

© ESA

Explorateurs de la Terre

D'ici 2012, le programme *Planète vivante* a déjà sélectionné six missions dites *Earth Explorers*. Alors qu'autrefois l'Agence privilégiait d'imposants vaisseaux portant de très nombreux instruments, la stratégie actuelle consiste à répondre aux questions les plus pressantes que se pose la communauté scientifique, à l'aide d'instruments plus petits et ciblés.

- *GOCE (Gravity Field and Steady State Ocean Circulation Explorer)* – Lancement en 2007. Axée sur le champ gravitationnel de notre planète, GOCE fournira des informations aussi bien sur la circulation océanique que sur la physique de l'intérieur de la Terre.
- *SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity)* – Lancement en 2007. Cartographiera l'humidité du sol et la salinité de l'océan. Améliorera notre compréhension du cycle de l'eau.
- *ADM-Aeolus (Atmospheric Dynamics Mission)* – Lancement en 2008. Mesurera les profils de vent de l'atmosphère.
- *CryoSat-2*. – Lancement en 2009 (en remplacement de *CryoSat-1*, perdu en 2005). Étudiera l'épaisseur des glaces marines et terrestres et leur variation.
- *Swarm* – Lancement en 2010. Il s'agit d'un groupe de trois satellites consacré à la dynamique du champ magnétique. Objectif: mieux comprendre l'intérieur du globe et le climat.
- *EarthCARE (Earth Clouds Aerosols and Radiation Explorer)* – Lancement en 2012. Étudiera le bilan radiatif de la Terre (projet nippo-européen).

D'autres projets sont à l'étude pour prendre la suite de ces missions.

Des modèles pour décoder

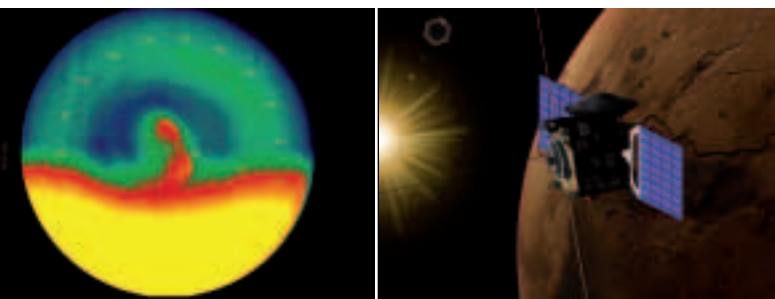
Etablir des constats ne constitue que la première étape de la compréhension intime des phénomènes. Pour décoder leurs ressorts et leurs liens réciproques, il faut recourir à des modèles, qui mettent aussi précisément que possible en équation les données et les savoirs disponibles. Constamment affinés, calibrés, et surtout testés à la lumière des données satellites «digérées» par des ordinateurs de plus en plus puissants, ces modèles constituent en quelque sorte une tentative de construction sans cesse renouvelée du Système Terre. A terme, même les réactions – ou la passivité – des communautés humaines face aux changements environnementaux (sécheresses, inondations, réchauffement ou refroidissement des saisons, hausse du niveau de la mer, etc.) pourront à leur tour être modélisées, car elles prendront de plus en plus d'importance dans le fonctionnement du système. Un défi qui n'est pas mince...

Si, comme il faut l'espérer, la communauté internationale prend enfin des mesures pour préserver le Système Terre de la déstabilisation qui le menace, de nouvelles missions devraient en découler pour l'ESA. Il sera alors indispensable de superviser le respect des indispensables accords internationaux. Qui sait, enfin, si le rôle clé de l'Agence n'est pas également d'alimenter l'humanité avec suffisamment d'images de sa planète – de sa beauté comme de ses blessures – pour que ses habitants finissent par comprendre, à l'instar des astronautes, qu'il s'agit de leur plus précieux bien commun.

L'Europe rend actuellement visite aux deux planètes du système solaire les plus proches de la nôtre. Des voisines dont la fréquentation pourrait ouvrir de nouvelles perspectives scientifiques sur la formation et la destinée des planètes, et de la vie ou la non-vie qui y règne.

On peut les observer quotidiennement à l'œil nu si le ciel est dégagé: Mars, reconnaissable à sa lumière rougeâtre, Vénus si brillante le soir ou le matin. Copernic, Kepler, Galilée et bien d'autres ont inspecté ces sœurs de la Terre. Mais ils en étaient bien loin. Aujourd'hui, deux satellites jumeaux européens, *Mars Express* et *Venus Express*, hérissés d'un extraordinaire attirail instrumental, orbitent désormais autour des deux planètes. Le premier a été lancé en 2003, le second en 2006. La moisson de données qu'ils accumulent est impressionnante.

Mars et Vénus, nos voisines



Le double vortex au pôle sud de Vénus.
© ESA

Mars Express amorçant son éclipse autour de Mars (vue d'artiste). © ESA

Réécrire l'histoire

Au cours de l'été 2006, *Mars Express* a, par exemple, observé pour la première fois des nuages qui évoluent dans l'atmosphère de la planète à une altitude sans précédent: entre 80 et 100 km! Dans ce milieu règne une température de -193°C. A ce niveau de froid, le dioxyde de carbone se condense, ce qui conduit les chercheurs à penser qu'il s'agit de nuages de gaz, probablement mélangé avec des particules de poussière.

Mais c'est surtout la question de l'eau qui fascine les spécialistes de Mars. Selon Gerhard Neukum, de l'Université Libre de Berlin, les données recueillies actuellement par la palette d'instruments qui ausculte la planète permettent à présent «d'en réécrire l'histoire.» Il s'avère finalement que si une période chaude et humide a eu lieu, elle n'a pas duré plus de quelques centaines de millions d'années, et a pris fin au plus tard il y a 4 milliards d'années. Reste qu'il y a encore énormément d'eau sous forme de glace sur Mars (détectée grâce à l'instrument radar *Marsis*), ainsi que des structures géologiques relativement récentes formées par l'érosion. Pour le chercheur allemand, les traces jeunes d'eau liquide sont cependant toujours liées au volcanisme, suggérant d'éphémères jaillissements d'eau, vite évaporés.

L'inférieure Vénus

Si Mars est une planète glacée à l'atmosphère raréfiée, Vénus fascine, à l'inverse, par les conditions infernales qui règnent à sa surface: une pression atmosphérique 90 fois supérieure à la nôtre, une température moyenne de 465°C, une atmosphère toxique presque exclusivement constituée de dioxyde de carbone, si épaisse que le Soleil est à jamais invisible depuis son sol pierreux et aride.

Le satellite de l'ESA a envoyé de splendides clichés du gigantesque double vortex atmosphérique découvert au-dessus du pôle sud, dont la dynamique tient pour l'instant en échec les astronomes (il a été le siège d'un énorme hurricane observé en novembre 2006). La stratification verticale de l'atmosphère a également révélé quelques surprises, dont d'étranges halos d'altitude, opaques jusqu'à 90 km, et moins denses jusqu'à 105 km. «Des phénomènes analogues se rencontrent parfois sur Terre, aux environs de 20 km d'altitude. Ils sont constitués de gouttelettes ténues d'acide sulfurique issues de l'activité volcanique», commente Jean-Louis Bertaux, du CNRS français, responsable de l'instrument *SpicaV-SOIR*. Les chercheurs se demandent donc si le volcanisme vénusien n'est pas à l'origine de ces étranges structures. Ces conditions sont d'autant plus impressionnantes qu'au début de leur histoire, Vénus et la Terre se ressemblaient probablement beaucoup (diamètre, masse, compositions chimiques comparables). Ces voyages vers des planètes finalement proches de la Terre, et pourtant aujourd'hui si différentes, illustrent l'émergence d'une nouvelle discipline: l'évolution planétaire.

En savoir plus

Venus Express

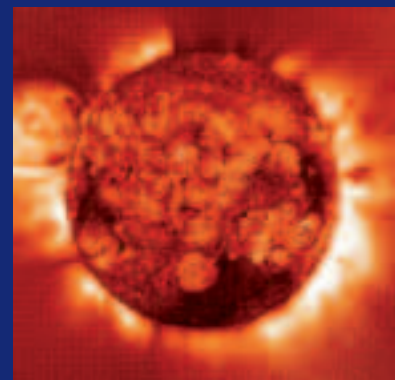
<http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=64>

Mars Express

http://www.esa.int/SPECIALS/Mars_Express/

L'étoile qui nous intéresse le plus...

Le corps spatial le plus étudié par l'ESA reste le Soleil, l'étoile sans laquelle le *Système Terre* ne serait pas ce qu'il est. Lancé en 1995 et toujours opérationnel, le satellite Soho – une coopération ESA/NASA – en a fourni les plus beaux clichés «rapprochés». Il a été suivi par le lancement de *Cluster* (quatre satellites en 2000) et de *Double Star* (deux engins équipés d'instruments européens mis en orbite en 2003 par des lanceurs chinois). Si elles sont d'abord scientifiques, les observations satellitaires du Soleil sont aussi dictées par des raisons plus prosaïques. Les activités «colériques» de notre étoile – vents solaires, éjections de masse coronariennes, etc. – peuvent infliger des dommages graves aux réseaux électriques et de télécommunications, ainsi qu'aux satellites. La prochaine grande mission solaire de l'ESA est prévue pour la prochaine décennie.



© ESA



La fascination du cosmos

Nébuleuse de la Tarentule, située dans le Grand Nuage de Magellan, prise par le VLT. © ESO

La plus importante organisation intergouvernementale ⁽¹⁾ dans le domaine de l'astronomie et l'astrophysique est européenne. Mais ses télescopes observent les astres depuis les montagnes du désert d'Atacama (Chili), région où l'absence d'humidité dans l'atmosphère permet une netteté de la vision du ciel reconnue comme la meilleure de la planète. Créée en 1962, l'ESO (Organisation Européenne pour la Recherche Astronomique dans l'Hémisphère Austral) a porté à bout de bras la construction, à près de 2 500 mètres d'altitude, des deux plates-formes astronomiques de La Silla (inaugurée en 1969) et de Paranal (opérationnelle depuis 1998).

Conçus et réalisés par l'Organisation, les équipements d'observation et de détection équipant ces deux sites sont uniques au monde. Le fleuron technologique le plus récent de l'ESO est constitué par les quatre éléments du très fameux VLT (*Very Large Telescope*), installés à Paranal. Grâce à un grand ensemble d'instruments, l'utilisation de procédés innovants comme l'optique adaptative et l'interférométrie optique, et un mode d'opération unique, le VLT permettent des performances d'observation inégalées.

Le centre de l'Organisation scientifique est basé à Garching, près de Munich (DE). Entre les deux continents, l'institution occupe 570 personnes. Plus de 1 700 demandes de temps d'observations, venues d'Europe et d'au-delà, aboutissent chaque année à l'ESO. En 2005, plus de 600 travaux de pointe, menés grâce aux observatoires chiliens, ont donné lieu à des publications scientifiques dans des journaux à comité de lecture.

Une science projetée dans l'avenir

L'astronomie et l'astrophysique sont des sciences qui se projettent en permanence dans l'avenir. Depuis 2003, le chantier du nouveau site chilien de Llano de Chajnantor, à 5 000 m d'altitude, prépare le plus

grand déploiement de télescopes jamais construit. Ce projet, dénommé *The Atacama Large Millimeter Array (ALMA)*, est le fruit d'une coopération entre les pays membres de l'ESO, les Etats-Unis et le Canada, le Japon et Taiwan, et le Chili.

Cette plate-forme sera équipée d'une vaste armada d'antennes-soucoupes mobiles de 12 m de diamètre qui «visionneront» le ciel dans des fréquences allant de 30 à 950 GHz. La capacité informatique qui centralisera les données sera dimensionnée pour traiter 16 000 milliards d'opérations par seconde ($1,6 \times 10^{16}$). ALMA permettra d'explorer la naissance et le déclin des astres et de leurs planètes, et d'étudier les galaxies les plus distantes.

Le projet suivant, l'*European Extremely Large Telescope (E-ELT)* – un télescope avec un diamètre de l'ordre de 30 à 60 m – suscite déjà, depuis quelques années, une intense activité de préparation au sein de l'ESO. Ce nouvel outil est attendu pour la prochaine décennie.

Intarissables images

Les activités menées à l'ESO sont une source intarissable d'images astronomiques passionnantes. Son site offre régulièrement des explications sur de nouvelles découvertes et d'étonnants «paysages7 de l'Univers.

L'astronomie porte en elle un immense pouvoir de fascination, digne de partage. Elle montre la matrice originelle dont sont issus «notre» système solaire, «notre» Terre et nos existences de Terriens. L'ESO se veut donc aussi très ouverte au public en proposant de nombreuses informations pour la presse, des journées portes ouvertes, des compétitions originales pour les jeunes du monde entier. Ses services éducatifs produisent en outre un excellent matériel pédagogique à l'intention des enseignants, auxquels des formations spécifiques sont offertes chaque année.

(1) Douze pays sont membres de l'ESO: la Belgique, le Danemark, la France, la Finlande, l'Allemagne, l'Italie, les Pays-Bas, le Portugal, la Suède, la Suisse, le Royaume-Uni et l'Espagne.

En savoir plus

www.eso.org

La saga des trous noirs

Vue aérienne du sommet de Paranal, découvrant les quatre éléments du VLT, le plus grand télescope du monde. Au premier plan le télescope Yepun, de gauche à droite Antu, Kueyen et Melipal. © ESO

Les trous noirs n'étaient, à l'origine, que des constructions mentales élaborées par les théoriciens de la physique. Aujourd'hui, on peut cependant les identifier et les observer astronomiquement. Ils offrent une mine de renseignements sur la nature et l'évolution des galaxies. Les plus récentes découvertes dans ce domaine sont l'un des grands succès de l'astronomie européenne.

L'aventure des trous noirs commence en 1963, avec la première identification des quasars, ces objets très lointains émettant une énergie phénoménale. Le plus brillant jamais recensé, 3C273, situé dans la constellation de la Vierge, est plusieurs milliards de fois plus brillant que le Soleil. Seuls les sursauts gamma les dépassent en énergie (voir p. 42).

Une attraction dévorante

Comment expliquer une émission énergétique d'une telle puissance? Les scientifiques ont émis l'hypothèse qu'un tel phénomène pouvait avoir un rapport avec les trous noirs, ces objets prévus par les théories cosmologiques dérivées de la physique moderne. On peut les décrire comme d'étranges «zones» de champs attractifs situés dans l'Univers, qui «aspirent» ou «capturent» les astres passant à leur portée. Ces objets sont si denses que même la lumière ne peut s'en échapper. On sait aujourd'hui que les trous noirs existent bel et bien et que l'énergie qu'ils émettent sporadiquement – correspondant au phénomène du quasar qui leur est associé – provient en réalité de la matière ou des astres qu'ils absorbent. Lorsque ces derniers tombent dans leur champ attractif, ils éliminent leur énergie gravitationnelle par échauffement et

rayonnent intensément, d'abord en ondes radio, puis en infrarouges, puis en lumières, en UV et en rayons X.

Le trou noir le plus fascinant pour les astronomes est situé au centre de notre propre galaxie, la Voie Lactée. On s'est, en effet, interrogé longtemps sur l'existence d'une énigmatique source de rayonnement radio, très puissante, baptisée *Sagittarius A* et considérée comme candidate au titre de «centre super massif de notre galaxie», sans certitude qu'il s'agissait d'un trou noir.

2,7 millions de Soleil...

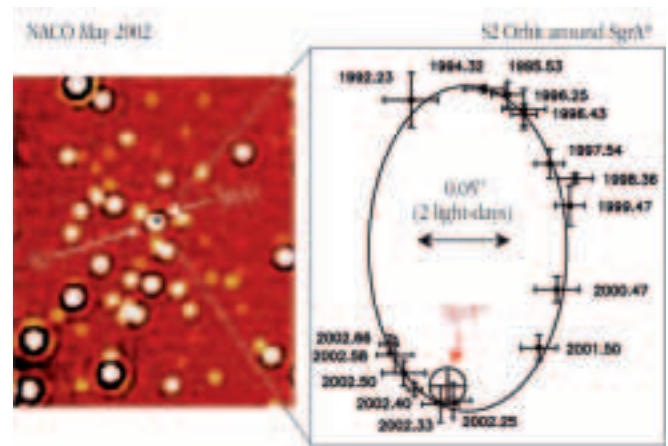
La confirmation précise, irréfutable et définitive a été apportée par une équipe internationale, aux commandes d'un des quatre télescopes du VLT (Very Large Telescope) de l'ESO au Chili, équipé de son optique adaptative (voir encadré). Après dix ans d'observations persévérantes (1992-2002), les chercheurs ont obtenu des images saisissantes de l'étoile S2. Cet astre, d'une masse équivalente à 15 fois notre Soleil, orbite autour du fameux *Sagittarius A* à la vitesse de 5 000 km/sec (soit 200 fois plus vite que la Terre autour du Soleil).

Comme l'explique Reinhard Genzel, directeur du *Max-Planck Institute for Extraterrestrial Physics (MPE)* de Garching (DE), membre actif de cette équipe, «la masse de l'étoile S2 et surtout sa trajectoire parfaitement elliptique, observée avec précision, impliquent que le centre attracteur situé à l'un des foyers de son orbite possède une masse énorme. Celle-ci représente 2,7 millions de masses solaires et occupe un tout petit volume de 10 minutes-lumière de diamètre – soit un peu moins que l'orbite de Vénus, qui est la deuxième planète la plus proche du Soleil.» Ces données n'étant compatibles qu'avec le profil d'un trou noir, la preuve a ainsi été faite que *Sagittarius A* est bien le trou noir central hypermassif de notre galaxie.

La preuve par la chute

D'autres découvertes récentes montrent que l'ère de l'observation directe de la physique des trous noirs a bien commencé. Le 8 mai 2003, un des astronomes de l'équipe de Reinhard Genzel, rivé à l'écran de contrôle de son télescope géant, a soudainement sursauté devant la présence incongrue d'une étoile. Sa seconde surprise fut de constater sa disparition au bout de quelques minutes. Cette équipe venait d'observer – et c'était une première – un flash très puissant, en infrarouge proche, à l'endroit exact où l'on situe le trou noir super massif présent au centre de notre galaxie.

Cette longueur d'onde de rayonnement correspondait bien à la signature d'une accretion de matière échauffée qui, durant sa « chute » dans le trou noir, se met à chauffer, et donc à rayonner dans l'infrarouge proche. C'est ainsi qu'après des années de recherches, cette trace tant désirée de l'absorption de matière par un trou noir se laissait découvrir. Nul n'avait été, jusque là, le témoin de ce dernier signal de la matière, happée par un trou noir, traversant le point de non retour vers un destin inconnu.



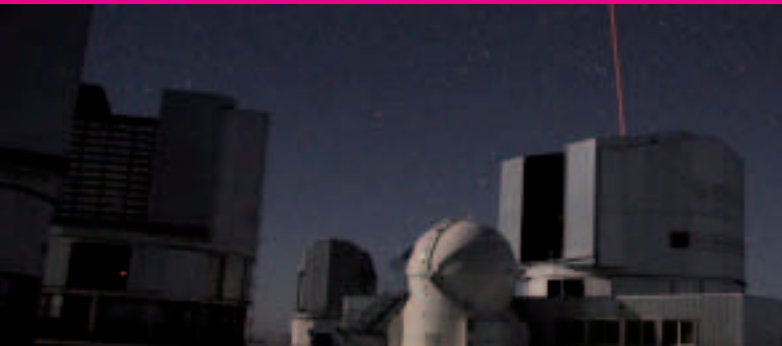
Le mouvement d'une étoile autour du trou noir super massif au centre de la voie lactée: à gauche, Sagittarius (SgrA*) et S2; à droite, schéma de l'orbite de S2 autour de SgrA*, observée entre 1992 et 2002. Une vidéo de Sagittarius A et S2 peut être téléchargée sur le site de l'ESO:

www.eso.org/outreach/press-rel/pr-2002/video/vid-02-02.mpg

© ESO

Subtilités de mise au point

Le télescope Yepun, l'un des quatre formant le VLT au Mont Paranal au Chili, est équipé de NaCo et de SINFONI, deux systèmes d'optique adaptative. Cette technologie consiste à compenser les défauts de l'image, dus aux perturbations de l'atmosphère, par une déformation du miroir produisant des



Le télescope Yepun du VLT et son faisceau laser créant une «étoile artificielle». © ESO

défauts exactement inverses, de telle sorte que la combinaison des deux effets les annule. Pour ce faire, on s'aide d'une étoile ponctuelle se trouvant dans le champ d'observation et servant de référence. Dès que le point-image de l'étoile de référence se déforme ou est flou, des servomécanismes ultrarapides (agissant 1000 fois par seconde sur un miroir déformable dans l'instrument) rétablissent sa «netteté», et donc celle de tout le champ d'observation.

Lorsque les observations ont lieu dans une partie du ciel où aucune étoile de référence n'est disponible, les astronomes se servent d'une étoile artificielle. Cette prouesse technique a été inaugurée en 2006. Un puissant faisceau laser (de longueur d'onde précise) excite les atomes de sodium présents en grande quantité dans une couche atmosphérique située vers 90 km d'altitude, suscitant une lumière brillante caractéristique.

Résultat le plus saisissant: cette émission varie très rapidement d'intensité, en quelques minutes seulement, prouvant ainsi que ces signaux infrarouges doivent provenir d'une minuscule région. Cette zone est située juste à la frontière du trou noir, au-delà de laquelle aucun rayonnement ne peut plus s'échapper. On décèle aussi, dans ce phénomène, une périodicité dans le rayonnement, due au mouvement en spirale de la matière orbitant autour du trou noir avant d'y disparaître. Celui-ci doit tourner rapidement. «C'est une découverte majeure, ajoute Reinhard Genzel, qui nous permet de confirmer les théories actuelles des trous noirs. Une telle possibilité était, récemment encore, inimaginable.»

Quand l'astronomie revisite la théorie

L'astronomie de ce XXIème siècle – au-delà des questions d'astrophysique comme l'inflation, la matière noire, l'énergie sombre, etc. –, intervient dans les grandes questions de la physique la plus théorique. On peut ainsi envisager de tester, par observation, la théorie de la gravitation quantique, l'évolution du cosmos, le Big Bang lui-même, ou encore la stabilité des constantes fondamentales au cours de l'histoire de l'Univers. En quinze ans, les progrès ont été stupéfiants. Une des prochaines étapes sera de comprendre quand et comment se sont formés ces trous noirs super massifs. Et pourquoi presque toutes les galaxies importantes semblent en contenir un.

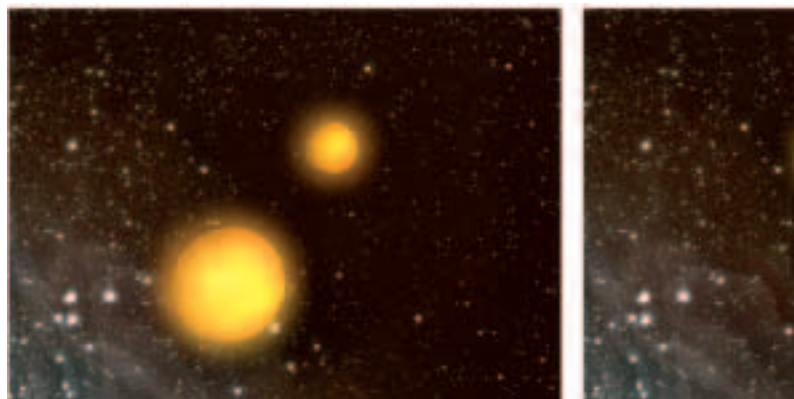
En savoir plus

www.eso.org

Contact

Reinhard Genzel
genzel@mpe.mpg.de

Le message des sursauts gamma



Tout a commencé pendant la guerre froide. Les satellites militaires américains avaient mis en place une armada de satellites sensibles aux rayons gamma dans le but de vérifier que les Soviétiques n'enfreignaient pas le moratoire concernant les essais nucléaires. Aucune explosion ne fut détectée dans l'atmosphère, mais l'on découvrit de mystérieux flashes, venant de l'espace. On comprit ensuite qu'il s'agissait là des traces brèves et aléatoires de libérations d'énergie parmi les plus violentes de l'Univers après le Big Bang.

Les sursauts gamma sont notamment émis lors de l'apparition fugitive des supra- et hypernovae, ces effondrements cataclysmiques d'étoiles massives donnant naissance à un trou noir. Les sentinelles de ces phénomènes fulgurants sont les satellites et, dès que l'alerte lui parvient au Chili, le VLT (Very Large Telescope) de l'ESO se pointe sur l'événement pour l'analyser et le décoder.

L'énergie libérée en quelques secondes lors de ces phénomènes extraordinaires dépasse largement celle du Soleil durant toute son existence de plus de 10 milliards d'années... Seul ce qui s'est passé lors du Big Bang les surpasse en énergie. Tous les sursauts gamma (les GRB, pour *Gamma Ray Bursts*) sont extragalactiques. Ils viennent de très loin – de distances dites «cosmologiques» –, sont distribués partout dans l'Univers, durent de quelques millisecondes à quinze minutes, et arrivent sans crier gare. Leur irruption inattendue explique la difficulté des scientifiques à les étudier et à comprendre leur signification astronomique. Parce qu'il faut être rapide.

La souplesse du VLT

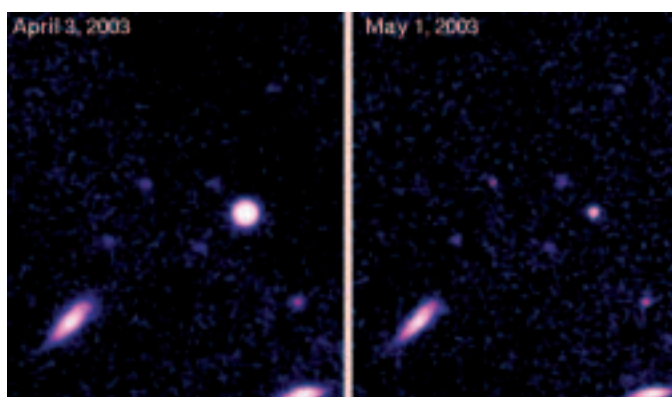
Un télescope géant, capable de les saisir, ne se manœuvre pas comme une paire de jumelles. C'est une des qualités du VLT que de pouvoir cibler son objectif en quelques minutes seulement, ouvrant ainsi la voie à des observations approfondies. Depuis 1997, avec l'aide précieuse des satellites capables de localiser les sources gamma, plusieurs dizaines de GRB ont été répertoriés. Et l'on en sait donc un peu plus sur l'origine des plus importants de ces mystérieux sursauts gamma.

C'est grâce au VLT qu'a pu être établi le lien de cause à effet entre ces flashes et l'apparition fluctuante des supernovae et hypernovae, ces «étoiles nouvelles» extraordinairement lumineuses, mais dont la brillance décline rapidement. L'appellation donnée à ces phénomènes, qui ont excité de longue date la curiosité des astronomes⁽¹⁾, est cependant paradoxalement trompeuse. Les observations menées au XX^e siècle – en particulier celle de la supernova relativement proche étudiée en 1987 dans le Grand Nuage de Magellan – ont établi qu'il s'agissait non pas de «naissances astrales», mais bien d'événements cataclysmiques produits par l'effondrement gravitationnel d'étoiles très massives sur leur propre cœur, qui signifient la mort de celles-ci.

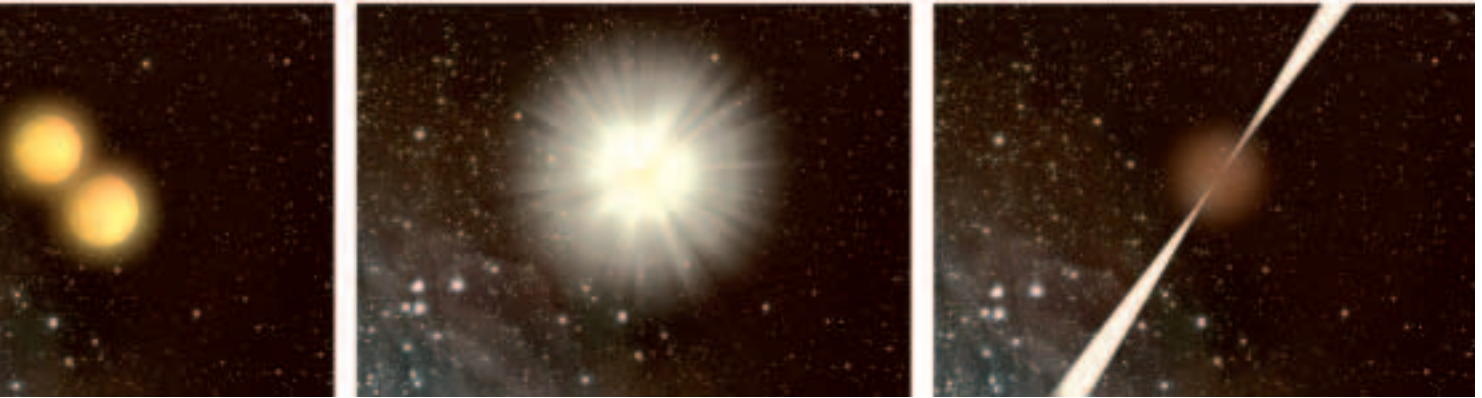
Un double phénomène

Le 29 mars 2003 fut un jour faste pour les astronomes. L'observation d'un sursaut gamma décelé à partir du satellite américain HETE-2 a été confirmée immédiatement par des observatoires au sol qui détectaient, dans la même direction, une nouvelle source de lumière visible. Dans les heures suivantes, le télescope Kueyen, du VLT, équipé du spectrographe UVES, obtenait le spectre de ce nouvel événement cosmique. D'après son décalage vers le rouge (*redshift*), on estimait sa distance – relativement proche – à 2 milliards 650 millions d'années-lumière.

En observant régulièrement dans le mois qui suivait les caractéristiques spectrales de cette nouvelle source lumineuse, les astronomes virent apparaître progressivement le spectre d'une hypernova. Ils découvrirent aussi que le signal lumineux décroissait lentement. Ce scénario était conforme à l'hypothèse d'un flash lumineux assimilable à une



Le déclin de l'hypernova - Deux images, en lumière visible, du sursaut gamma GRB 030329, observé le 3 avril 2003 (quatre jours après son apparition), et le 1er mai 2003. Elles montrent clairement la diminution de sa lumière résiduelle (*optical afterglow*), ce qui est compatible avec le comportement d'une hypernova. © ESO



Le scénario des étoiles à neutrons (vue d'artiste) - Les astronomes donnent une version très différente de celle des hypernovæ quand il s'agit d'expliquer l'origine des sursauts gamma de très courte durée. Le scénario est basé sur l'attraction réciproque de deux étoiles à neutrons orbitant l'une autour de l'autre, dans un mouvement de rapprochement progressif. Tout se termine par une explosion stellaire où deux jets de plasma sont émis. Si l'un des jets pointe vers la Terre, on observe un bref sursaut gamma. © ESO

hypernova résultant de l'explosion d'une très grosse étoile en fin de vie. A partir de ces spectres, les astrophysiciens ont pu évaluer le moment où ce cataclysme devait s'être produit – moment qui s'avéra coïncider dans le temps avec l'apparition du sursaut gamma. Il s'agissait donc bien là de la confirmation décisive que les deux événements sont liés. Ils n'en forment en réalité qu'un seul, observé d'abord en rayons gamma et ensuite en lumière visible.

Le «collapsar model»

«GRB et hypernovæ sont donc deux facettes du même objet/événement astronomique», souligne Bruno Leibundgut, chercheur à l'ESO. La théorie qui a la faveur des astrophysiciens pour expliquer les sursauts gamma 'longs' – il en existe aussi de très courts, de l'ordre de la seconde, encore différemment interprétés – est le *collapsar model*.

Ce modèle implique une étoile de plus de 25 masses solaires qui a transformé tout son hydrogène en hélium et a expulsé ses couches les

plus externes (de la classe Wolf-Rayet dans le jargon astronomique), et qui arrive dans un stade où l'énergie radiative épuisée n'équilibre plus la pression gravitationnelle. Son cœur commence soudain à s'effondrer sur lui-même en formant un trou noir, expulsant en même temps un jet de plasma projeté à une vitesse énorme. Ce jet traverse la matière des couches extérieures de l'étoile, qui sont «explosées» dans l'espace par les vents stellaires composés de nickel-56 radioactif nouvellement formé. «La violente lumière, constitutive du concept d'hypernova, n'est donc «seulement» qu'un phénomène de surface, que l'on pourrait comparer aux derniers feux d'une étoile mourante, poursuit Bruno Leibundgut. Et c'est au cœur de ce processus menant à la formation du trou noir, dans l'émission du jet de plasma, que le flash gamma est émis.»

(1) On en trouve dans des documents astronomiques au XI^{ème} siècle, tant en Chine qu'en Occident. Tycho Brahé et Johannes Kepler eurent respectivement la chance d'observer, à leur époque, les deux supernovæ dans les constellations de Cassiopée (1572) et Ophiuchus (1604).

Les premiers pas de l'Univers

Nombre de sursauts gamma proviennent de distances supérieures à 12,5 milliards d'années-lumière, dans les galaxies les plus lointaines qui se sont formées quand l'Univers était très jeune. Comme ils sont associés aux hypernovæ, la mort cataclysmique d'étoiles très massives, alors que l'Univers était encore «à ses débuts», interpelle les astronomes et leur ouvre une nouvelle approche pour mieux comprendre sa nature et son évolution.

La luminosité intrinsèque «standard» de certaines hypernovæ offre, en particulier, un nouveau moyen de calibrer les grandes distances dans l'Univers, et donc la densité d'énergie de ses composants. Celles-ci interviennent ainsi dans les grandes questions actuelles de l'astrophysique, telles la matière noire (dont l'existence est nécessaire pour comprendre les mouvements des galaxies, non explicables si l'on s'en tient au seul bilan de la matière «visible»), ou encore l'énergie sombre, une forme inconnue d'énergie sensée expliquer l'accélération de l'expansion de l'Univers.

En savoir plus

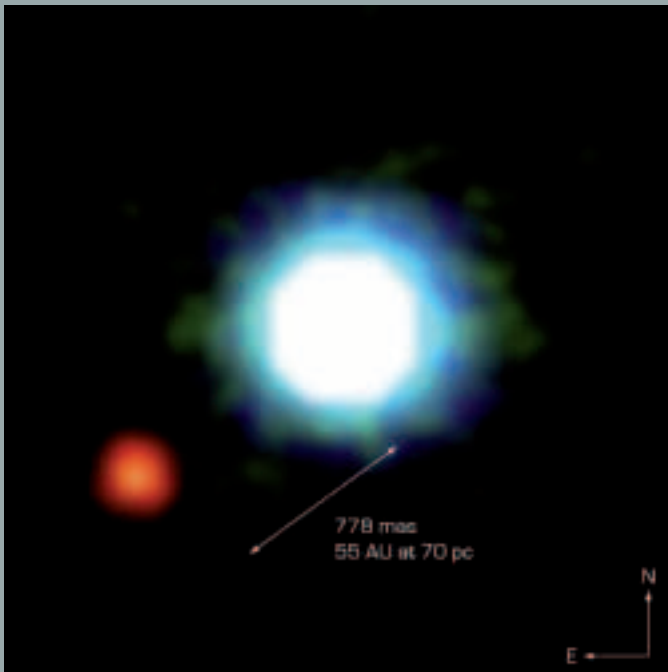
<http://www.eso.org/outreach/press-rel/pr-2005/pr-26-05-p2.html>
http://fr.wikipedia.org/wiki/Sursaut_gamma
http://132.166.172.2/fr/magazine/dossier_sursauts_gamma/index.htm

Contact

Bruno Leibundgut
 bleibund@eso.org

La chasse aux exoplanètes

En 1995, Michel Mayor et Didier Queloz, de l'Observatoire de Genève, annoncèrent la preuve de l'existence d'un objet de masse planétaire (0,5 fois Jupiter) en orbite autour de l'étoile de type solaire 51 Pegasi. Cette découverte a lancé la «traque» aux exoplanètes, ces objets non stellaires en orbite autour d'un autre Soleil que le nôtre, dont plus de 200 sont aujourd'hui identifiés.



Avril 2005. La première exoplanète (en bas à gauche) photographiée directement, grâce à l'un des VLT de l'ESO. Elle orbite autour de la naine brune 2M1207b (au centre), à une distance double de celle de Neptune au Soleil. Image possible parce que cette naine brune n'est que 100 fois plus lumineuse que la planète (alors que pour le Soleil et la Terre, ce rapport est de un milliard). © ESO

S'appuyant sur un an d'observations à l'Observatoire de Haute Provence, Michel Mayor et Didier Queloz ont établi clairement que la vitesse de l'étoile 51 Pegasi subissait des fluctuations périodiques, attribuables à la présence d'une grosse planète en orbite. La méthode inaugurée par ces chercheurs était de mesurer la vitesse radiale, c'est-à-dire l'observation de la perturbation du déplacement de l'étoile – tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre – induite par la planète et proportionnelle à la masse de celle-ci. La variation oscillante de vitesse de l'astre affecte la lumière qui nous en parvient et les longueurs d'onde de ses raies spectrales se déplacent, par effet Doppler, tantôt vers le bleu, tantôt vers le rouge.

Harps, spectromètre hypersensible

Ce mode de détection suppose des spectromètres hypersensibles. L'ESO a ainsi mis au point le Harps (*High accuracy radial velocity planet searcher*), le spectromètre «chasseur de planètes» le plus performant du monde, qui équipe l'un des télescopes de l'Observatoire de La Silla (Chili). Sa sensibilité extraordinaire lui permet de détecter une variation de vitesse de l'étoile de 1 mètre par seconde. Sur le spectre qu'examine l'astronome, le glissement physique dans l'échelle des raies est de l'ordre d'une fraction de micron.

Plusieurs découvertes permises par Harps ont récemment mis le monde astronomique en émoi. Il s'agit, par exemple, d'un petit «système solaire» de trois planètes orbitant autour de HD69830, une étoile distante de 40 années-lumière dans la constellation de la Poupe. De ces trois nouvelles trouvailles, deux seraient rocheuses, dotées de masses proches de celles de Neptune (17 fois celle de la Terre), donc bien plus faibles que Jupiter (qui «pèse» 318 fois la Terre). A ce jour, ce trio compose le système lointain le plus ressemblant à notre système solaire.

L'énigme de la naissance planétaire

Plus de 200 «objets planétaires identifiés» ont été découverts au cours des onze dernières années. Leur présence est répartie de façon homogène dans toutes les directions du ciel – le système solaire n'est donc pas une exception dans l'Univers. Les plus nombreuses sont les planètes de type jupitérien, très massives, chaudes et gazeuses, et orbitant près de leur astre. Il est vrai que les principaux outils disponibles actuellement favorisent leur détection (la perturbation de l'étoile étant plus importante et la fréquence rapide de révolutions plus observable). Les techniques ne cessant de s'affiner, l'identification de planètes de taille plus modeste est néanmoins appelée à s'accroître.

D'autre part, comme l'explique Gero Rupprecht, membre de l'équipe travaillant sur Harps, «la question des origines des systèmes planétaires est posée par les données recueillies sur les exoplanètes de type Jupiter. Se forment-elles au voisinage de leur étoile? Ou bien ailleurs, et ont-elles migré vers leur étoile? C'est la dynamique même de formation des systèmes planétaires que les astronomes et astrophysiciens essayent de comprendre.»

Ce nouveau champ de recherches attend beaucoup du futur E-ELT, prévu dans une dizaine d'années. Ce télescope géant sera équipé d'une surface collectrice d'un diamètre de l'ordre de 30 à 60 m. Il pourra mesurer les variations de la vitesse des étoiles avec une précision incroyable, de quelques centimètres par seconde, poussant ainsi la précision à ses limites. Au-delà, on se trouve dans le «bruit» de fond généré par toute étoile, dont le mouvement est aussi influencé par sa propre activité.

En savoir plus

<http://www.eso.org/outreach/press-rel/pr-2006/pr-19-06-add.html>
http://www.eso.org/gen-fac/pubs/esaesowg/espwg_report.pdf

Encyclopédie des planètes extrasolaires
<http://exoplanet.eu/>

Contact

Gero Rupprecht
grupprec@eso.org