

## Le plus gros des cerveaux terrestres

**L**a complexité sociale d'une espèce est corrélée à ses capacités cognitives et à la taille du cerveau – même si des exceptions existent.

Cette taille est élevée chez les éléphants, qui ont le cerveau le plus massif de tous les animaux terrestres : celui de l'éléphant d'Afrique atteint 6,5 kilogrammes (contre 1,5 kilogramme chez

l'homme). Même rapporté à la taille du corps, le cerveau des éléphants reste gros. Leur quotient d'encéphalisation (qui caractérise le poids du cerveau comparativement à ce qu'on attendrait pour un animal de

cette taille, la valeur 1 signifiant que le cerveau de l'animal a le poids attendu) varie entre 1,3 et 2,3, valeurs comparables à celles des grands singes. En revanche, il n'atteint pas les valeurs extrêmes (autour de 6) mesurées chez les humains et les dauphins.

Le quotient d'encéphalisation

n'indique pas directement le degré d'intelligence, mais il renseigne sur la quantité d'énergie dévolue aux processus cognitifs chez une espèce donnée – l'activité cérébrale étant coûteuse du point de vue métabolique. Ces processus consomment donc une part notable des ressources énergétiques des éléphants.

membres de leur groupe familial, qui comprend jusqu'à 17 femelles adultes et leur progéniture (un maximum d'une trentaine de membres au total), uniquement à partir de leur urine.

Pour créer et maintenir des liens sociaux au sein de leurs vastes réseaux, les éléphants communiquent par des signaux visuels, chimiques et auditifs. Peu d'études se sont penchées sur les signaux visuels, sans doute parce qu'ils sont moins importants que les autres. Cependant, nous avons montré en 2013 que les éléphants en captivité comprennent spontanément le geste d'un humain qui pointe un objet du doigt, un des signaux les plus élémentaires que nous utilisons pour rediriger l'attention des autres : quand l'animal est confronté à deux réseaux et que l'expérimentateur pointe l'un d'eux, il se dirige plus souvent vers ce dernier pour y chercher de la nourriture. On ignore si les éléphants pointent des objets de la trompe entre eux, mais le fait qu'ils comprennent qu'un geste humain est un signal visant à communiquer suggère que dans la nature, ils peuvent aussi interpréter de la sorte les mouvements des autres.

D'autres signaux visuels sont d'ailleurs connus. Ainsi, les éléphants secouent la tête pour exprimer l'irritation ou l'impatience, voire pour effrayer un prédateur, un adversaire ou un voisin inopportun, tel qu'une voiture roulant trop près d'eux. Autre exemple : un éléphant qui veut donner

le signal du départ se place au bord du groupe, face à la direction dans laquelle il souhaite aller, et attend là en grondant.

La plupart des recherches sur la communication des éléphants portent sur les signaux vocaux, qui comprennent une large gamme de sons : grondements doux, cris, hurlements assourdissants. Les grondements semblent transmettre de nombreuses informations sociales. Ils expriment par exemple l'état émotionnel et l'identité de leur émetteur, comme l'ont montré en 2005

**Des éléphants auraient mémorisé les cris de contact d'une centaine de femelles, appartenant à 14 familles.**

Joseph Soltis, du programme de recherche sur les animaux chez Disney, et ses collègues. Dans la nature, les éléphants peuvent également identifier leurs connaissances *via* leurs vocalisations.

En 2000, K. McComb et ses collègues ont publié une étude sur les cris dits de contact – qui servent à maintenir le contact avec des compagnons hors de vue – des éléphants d'Afrique. Ces cris sont émis dans le domaine des infrasons, c'est-à-dire que leur fréquence est inférieure à 20 hertz et inaudible pour l'homme. Les chercheurs ont diffusé des enregistrements de cris de contact émis tantôt par des éléphants quelconques, tantôt par les femelles de la famille proche et du groupe de liaison.

Dans ce dernier cas, les animaux se sont approchés du haut-parleur et ont lancé leurs propres cris de contact. Les éléphants auraient ainsi mémorisé les cris de contact d'une centaine de femelles, appartenant à 14 familles.

Comme dans la reconnaissance des prédateurs, l'expérience compte : les groupes familiaux dont la matriarche est âgée distinguent mieux, sur la base de leurs cris de contact, les individus qu'ils rencontrent régulièrement de ceux qu'ils n'ont jamais croisés. La survie de l'ensemble du groupe dépend des connaissances sociales de sa matriarche. Ainsi, des rapports de dominance existent entre les groupes et quand des éléphants s'abreuvent à un point d'eau ou se reposent à l'ombre, il est plus prudent pour eux de libérer la place à l'arrivée d'un groupe dominant.

En 2013, Graeme Shannon, de l'Université du Sussex, au Royaume-Uni, et ses collègues ont montré que les éléphants peinent à s'orienter dans leur complexe organisation sociale quand ils ont été déplacés ou séparés de membres de leur famille suite à des opérations d'abattage, même quand celles-ci ont été réalisées des décennies auparavant. De telles opérations, qui constituent une méthode controversée de gestion des populations d'éléphants, ont été menées à grande échelle en Afrique australe, dans les années 1980 et 1990. La mort d'un éléphant peut ainsi influencer sur la survie de tout le groupe, en particulier s'il est âgé et doté d'importantes connaissances sociales.

Les recherches récentes renvoient donc l'image de géants sensibles, très sociaux, chez qui la coopération, la communication et l'entraide sont fondamentales. Sans nier les problèmes complexes posés par le partage du territoire avec les éléphants, nous devons prendre des engagements forts pour la préservation de cette espèce : interdiction du commerce de l'ivoire, campagnes de lutte contre le braconnage, études sur la prévention des conflits entre les hommes et les animaux... Cette conservation est particulièrement difficile, notamment en raison des effets à long terme des campagnes d'abattage sur les membres survivants des familles ou des clans. On doit donc garder à l'esprit que l'unité familiale des éléphants est centrale et que la survie du groupe tout entier dépend de son intégrité. ■



CHAQUE MOIS



CHAQUE TRIMESTRE



**+** **L'APPLICATION**  
pour smartphone  
et tablette, téléchargeable  
sur Appstore et Google Play

**+** **LES VERSIONS**  
**NUMÉRIQUES**  
téléchargeables en PDF  
ou à lire en ligne sur le site

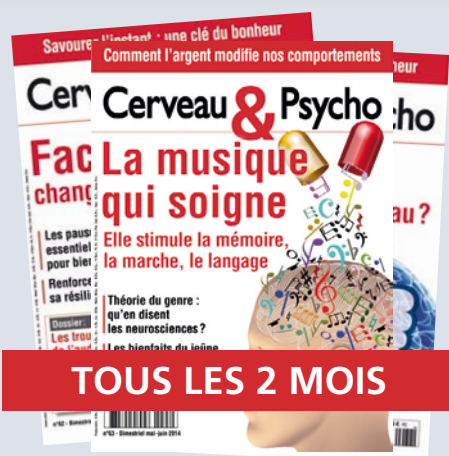
**+** **18 ANS D'ARCHIVES**  
**ET DES CONTENUS**  
**INÉDITS** sur le site

# POUR LA SCIENCE

**LA PRESSE SCIENTIFIQUE DE RÉFÉRENCE**

WWW.POURLASCIENCE.FR • WWW.CERVEAUETPSYCHO.FR

## Cerveau & Psycho



TOUS LES 2 MOIS



CHAQUE TRIMESTRE



**+** **L'APPLICATION**  
pour smartphone  
et tablette, téléchargeable  
sur Appstore et Google Play

**+** **LES VERSIONS**  
**NUMÉRIQUES**  
téléchargeables en PDF  
ou à lire en ligne sur le site

**+** **10 ANS D'ARCHIVES**  
**ET DES CONTENUS**  
**INÉDITS** sur le site

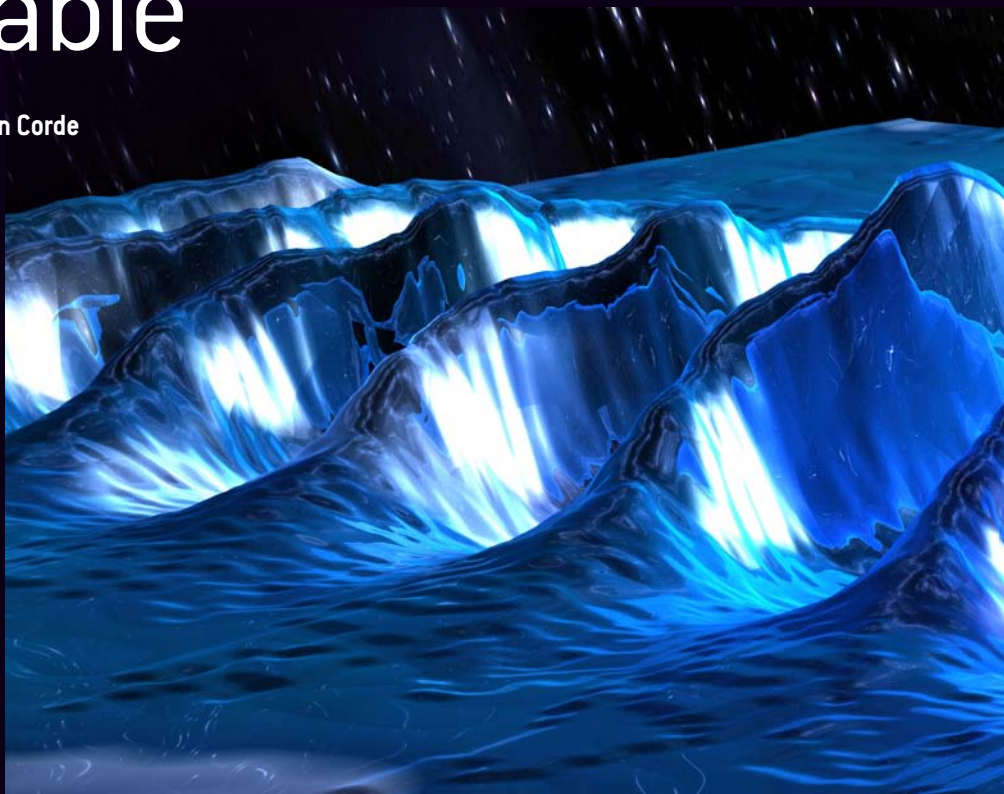
Retrouvez Pour la Science et  
Cerveau & Psycho également sur :



# Produire des rayons X et $\gamma$ sur une table

Kim Ta Phuoc, Cédric Thaury et Sébastien Corde

**Grâce aux ondes de sillage créées par des impulsions laser ultrabrèves qui traversent un gaz, les chercheurs mettent au point des sources compactes et puissantes de rayons X ou gamma.**



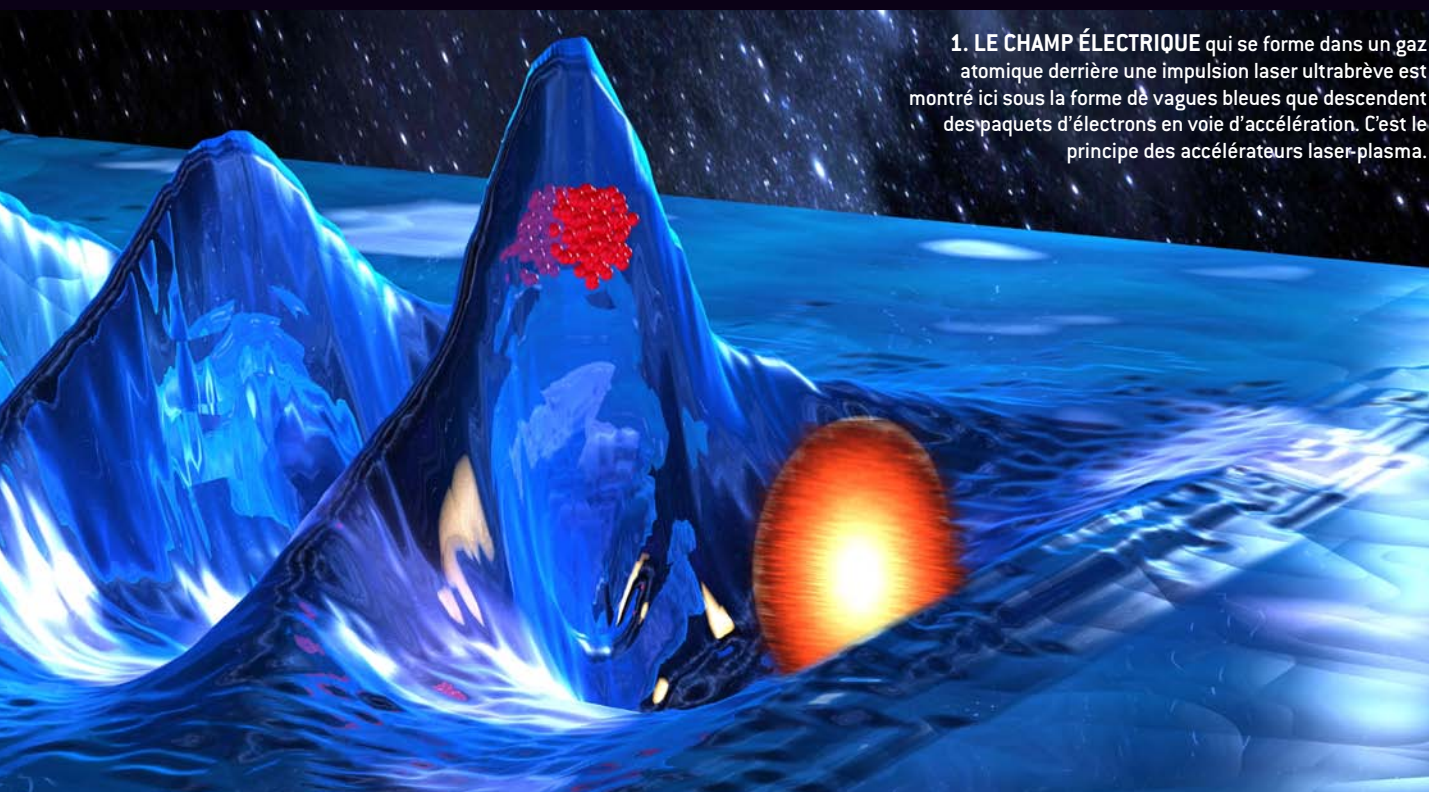
Imaginez un faisceau laser plus puissant que 100 000 réacteurs nucléaires. Seulement, pour le construire, nul besoin de bâtir des champs de centrales, car sa puissance n'est liée qu'à la brièveté de son impulsion ! En effet, une puissance est une énergie dépensée pendant un temps ; à énergie dépensée constante, si la durée du processus diminue, la puissance augmente. C'est ainsi qu'en tirant dans un gaz une impulsion laser ultrabrève d'une puissance instantanée de plusieurs dizaines de milliers de milliards de watts, les physiciens sont parvenus récemment à produire des faisceaux de rayons X et gamma ( $\gamma$ ) ultrabrillants. Nommé accélérateur laser-plasma, ce nouveau type de source de rayonnement est encore en cours de développement,

mais il atteint ou dépasse déjà les performances des faisceaux produits au sein de ces accélérateurs circulaires de plusieurs centaines de mètres de circonférence que sont les synchrotrons. Il s'agit en fait d'un véritable synchrotron miniature de seulement quelques millimètres de long. Nous allons voir comment on obtient ces nouvelles sources compactes, intenses et d'un coût raisonnable, et à quoi leurs flashes de rayons X de seulement quelques milliardièmes de milliardième de seconde pourraient servir.

Pour explorer l'intimité de la matière et y agir, on utilise souvent des instruments de lumière. Le rayonnement X en fait partie. Ses longueurs d'onde sont de l'ordre de l'angström ( $10^{-10}$  mètre, ou 0,1 nanomètre), soit la distance intra-atomique caractéris-

tique. Des rayonnements électromagnétiques de ces longueurs d'onde peuvent révéler les structures atomiques et moléculaires. On peut par exemple déterminer l'arrangement des atomes dans la matière par diffraction de rayons X. Dans cette technique, un rayonnement X arrivant sur un échantillon est renvoyé dans diverses directions qui dépendent de l'arrangement des atomes dans la matière : on dit qu'il est diffracté. La figure de diffraction permet de déduire la position des atomes. On utilise très souvent la diffraction X pour étudier des matériaux ordonnés tels que les cristaux, mais cette technique fonctionne aussi pour étudier des liquides ou des milieux désordonnés.

Le rayonnement X a aussi un grand pouvoir de pénétration de la matière, mais



**1. LE CHAMP ÉLECTRIQUE** qui se forme dans un gaz atomique derrière une impulsion laser ultrabrève est montré ici sous la forme de vagues bleues que descendent des paquets d'électrons en voie d'accélération. C'est le principe des accélérateurs laser-plasma.

Agustin Lischitz, LOA

dépendant du matériau traversé. Il est faiblement absorbé par les matériaux peu denses et l'est fortement par les matériaux denses. Un rayonnement X de longueur d'onde égale à 0,4 angström traverse par exemple trois millimètres d'aluminium ou 40 centimètres de plastique. Cet effet permet d'obtenir des images dont le contraste dépend de l'absorption. C'est la radiographie classique, utilisée par exemple en médecine diagnostique, mais aussi dans l'industrie pour réaliser des contrôles non destructifs de pièces mécaniques.

Plusieurs types de sources de rayons X existent. Les plus communes, celles que l'on trouve dans les hôpitaux, sont des tubes à rayons X. Dans ces sources, le rayonnement X est obtenu

en bombardant des cibles métalliques avec des électrons accélérés, dont les collisions avec la matière produisent le rayonnement. Ce type de source a l'avantage d'être très compact et bon marché, mais le rayonnement produit n'est pas de bonne qualité. Émis dans toutes les directions, il doit être concentré ; il comporte toute une gamme de longueurs d'onde (il est donc peu cohérent) et la dimension importante de la zone d'émission limite la résolution des images radiographiques.

Quand les images doivent être plus précises, on préfère employer le rayonnement X produit par les synchrotrons. Développés dans les années 1940, ces instruments sont très utilisés par les chercheurs. Ils comprennent un

## L'ESSENTIEL

- Dans un gaz atomique, une impulsion lumineuse ultrabrève et puissante crée un sillage de plasma.
- La séparation spontanée des charges électriques y accélère des électrons, qui émettent alors des rayons X ou  $\gamma$ .
- Comparables aux synchrotrons, ces nouvelles sources X et  $\gamma$  sont bon marché et devraient avoir la même utilité en recherche fondamentale.

Agustin Lischitz, LOA

dispositif capable de produire et d'accélérer des électrons jusqu'à des vitesses proches de la vitesse de la lumière et une structure périodique d'aimants – un « onduleur » – qui fait osciller ces électrons perpendiculairement à leur direction de propagation (voir la figure 2). Les accélérations subies par les électrons à chaque courbure de leur trajectoire ont pour effet de convertir une partie de l'énergie cinétique en rayonnement X. Le faisceau produit a des propriétés simples et intéressantes : il est émis vers l'avant sous la forme d'un cône peu divergent ; son énergie peut être contrôlée directement, en faisant varier soit l'énergie des électrons, soit la période de leurs oscillations. Ainsi, plus les électrons sont énergétiques, plus ils oscillent rapidement et plus le rayonnement émis sera énergétique, donc de courte longueur d'onde.

Pour atteindre la gamme des rayons X dans un synchrotron, on utilise généralement des électrons oscillant avec des périodes spatiales de quelques centimètres et progressant à des vitesses égales à quelque 0,9999999 fois celle de la lumière...

L'énergie d'électrons accélérés jusqu'à de telles vitesses atteint plusieurs gigaélectronvolts, c'est-à-dire un milliard d'électronvolts. Rappelons que l'électronvolt est l'énergie acquise par un électron accé-

## VERS LES SYNCHROTRONS DE TABLE

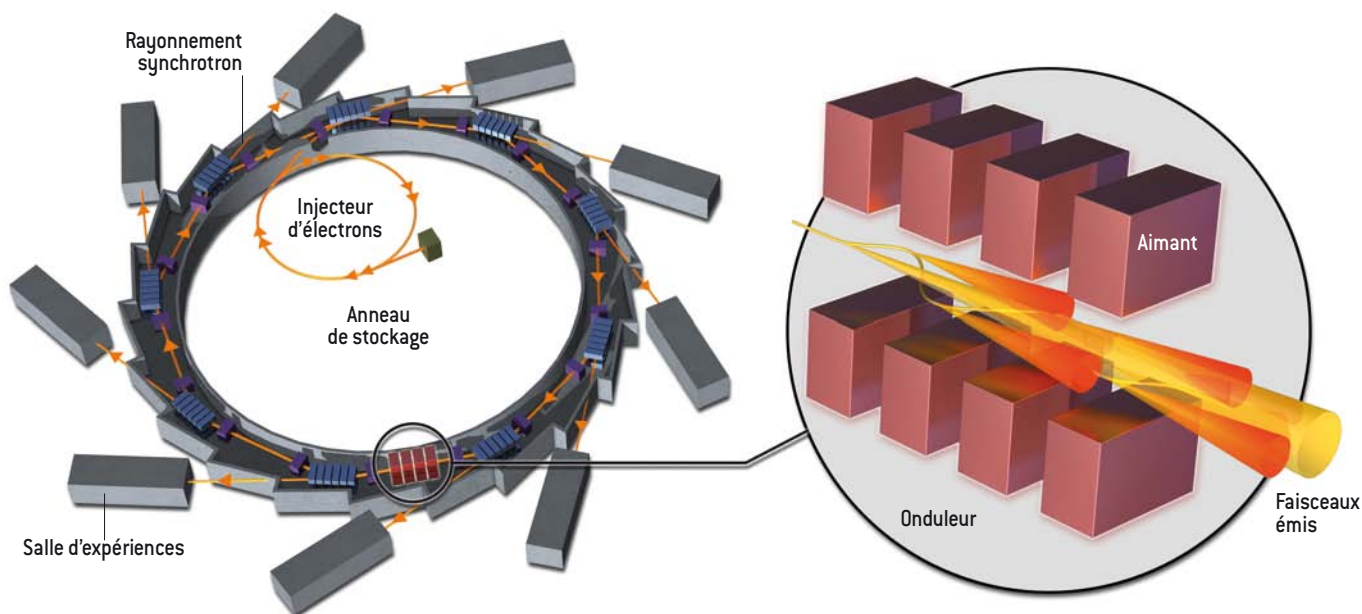
- **1960** Le premier faisceau laser est obtenu d'un laser à rubis.
- **1979** L'accélération dans les plasmas est étudiée théoriquement.
- **1985** Débuts des lasers femtosecondes de puissance.
- **1995** Première démonstration d'un accélérateur laser-plasma.
- **2004** Premier faisceau de rayons X issu d'un accélérateur laser-plasma.
- **2012** Premier faisceau de rayons gamma issu d'un accélérateur laser-plasma.

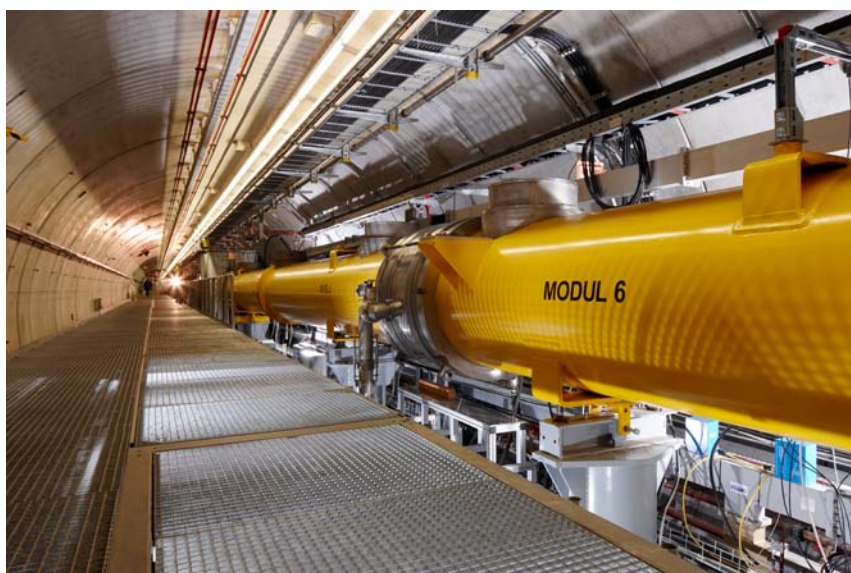
léré à l'aide d'une tension électrique de un volt. En unités d'énergie, la masse de l'électron vaut 0,511 mégaélectronvolt (million d'électronvolts). Ainsi, lorsque l'énergie cinétique d'un électron atteint deux gigaélectronvolts, elle représente quelque 4000 fois l'énergie équivalente à sa masse... À titre de comparaison, à la température ambiante, l'énergie cinétique d'une molécule atmosphérique avoisine 0,04 électronvolt.

## Filmer des atomes en mouvement

En France, il existe deux synchrotrons : SOLEIL sur le plateau de Saclay et l'ESRF à Grenoble. Ces grandes installations produisent du rayonnement allant de l'infrarouge (longueur d'onde micrométrique) aux rayons X (longueurs d'onde de l'ordre de l'angström). Ces machines sont très fiables et utilisées quotidiennement par de nombreux scientifiques de disciplines diverses. Elles ont donné lieu à de grandes avancées scientifiques et techniques portant sur la structure de la matière et du vivant. En 2009, le prix Nobel de chimie a par exemple récompensé des travaux où le rayonnement synchrotron avait été utilisé pour étudier la structure et la fonction des ribosomes, ces machines intracellulaires de synthèse des protéines mesurant environ 20 nanomètres et pouvant contenir jusqu'à 300 000 atomes... Pareilles avancées sont particulièrement utiles pour comprendre la façon dont sont faits et fonctionnent les êtres vivants.

**2. DANS LES SYNCHROTRONS**, des électrons sont injectés dans un anneau après avoir été amenés pratiquement à la vitesse de la lumière. À chaque virage dans un électro-aimant (*en bleu*), les paquets d'électrons émettent un rayonnement synchrotron, ensuite exploité dans les salles d'expériences. En amont de certaines salles sont disposées des alternances d'aimants – les onduleurs – où les électrons zigzaguent en émettant du rayonnement synchrotron. Ce dispositif augmente l'intensité du faisceau (*à droite*).





guez d'onde du rayonnement visible sont environ 1 000 fois supérieures aux déplacements atomiques, de l'ordre du nanomètre. Pour filmer le mouvement des atomes, il faut d'une part des flashes dont la durée se mesure en femtosecondes, et d'autre part un rayonnement dont les longueurs d'onde sont de l'ordre de la taille atomique, donc des rayons X.

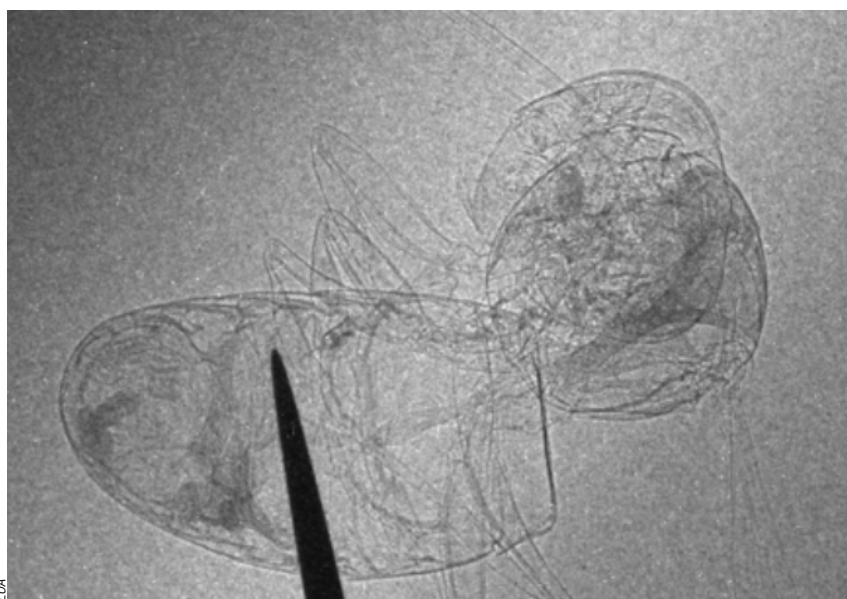
## Au-delà des synchrotrons

Les synchrotrons classiques ne permettent guère de produire des flashes de rayons X assez brefs. Certes, il existe bien quelques méthodes pour produire des impulsions brèves à partir du rayonnement synchrotron, mais en raison de la longueur des paquets d'électrons, il est difficile d'obtenir des flashes assez brefs pour saisir des réactions ultrarapides. Il a donc fallu développer de nouvelles machines : les lasers à électrons libres (voir la figure 3 et l'article *Le plus puissant faisceau de rayons X*, page 54). Ces installations, dont la première est entrée en fonctionnement en 2005, sont le fruit de dizaines d'années de développement. Extrêmement performantes, elles livrent des impulsions de rayons X des millions de fois plus brillantes que celles de toute source existante. Les lasers à électrons libres sont fondés sur un principe très proche de

Aujourd'hui, des applications de ces nouveaux faisceaux intenses de rayons X commencent à émerger. Les chercheurs ne se contentent plus d'images statiques des structures atomiques. Ils veulent désormais filmer les atomes en mouvement et comprendre la dynamique des réactions élémentaires de la matière. Pour cela, il faut être capable d'en capturer l'image pendant un temps très bref, assez bref pour que les atomes n'aient pas le temps de bouger sensiblement. Comme avec un stroboscope (un dispositif émettant une série de flashes lumineux), on peut ensuite employer ces images pour reconstruire un mouvement et sa dynamique. La brièveté nécessaire se déduit de la vitesse des mécanismes que l'on veut observer. Or un mouvement atomique élémentaire ne dure que quelques milliardièmes de milliardième de seconde, soit quelques femtosecondes (une femtoseconde =  $10^{-15}$  seconde). Pour voir des mouvements aussi rapides, il faut donc des flashes de lumière d'une durée comparable.

Les lasers émettant des faisceaux lumineux visibles – c'est-à-dire de longueurs d'onde comprises entre 0,4 et 0,8 micromètre – ou proches du domaine visible permettent d'obtenir les flashes ultrabrefs nécessaires. On les utilise pour étudier des réactions chimiques selon la méthode dite « pompe-sonde » : un premier flash ultrabref excite la réaction, puis un second analyse le résultat de l'excitation. Ces travaux ont entraîné des avancées majeures en chimie, en biologie et en pharmacologie. Toutefois, de tels flashes ne permettent pas de suivre les mouvements atomiques, car les lon-

**3. LE TUNNEL D'ACCÉLÉRATION DE FLASH**, la machine (située à Hambourg) où a été démontré le principe des lasers à électrons libres en 2001. Mis à la disposition des chercheurs depuis 2005, FLASH produit des rayons X de longueur d'onde égale à quatre nanomètres. Le laser XFEL actuellement en construction près de Hambourg atteindra pour sa part des longueurs d'onde de 0,1 nanomètre, suffisamment petites pour explorer les structures intra-atomiques.



**4. DES RADIOGRAPHIES DE GRANDE PRÉCISION** peuvent être réalisées à l'aide des rayons X produits par les accélérateurs laser-plasma. Ci-dessus, les délicates structures d'une guêpe ont ainsi été radiographiées pour démontrer cette possibilité. Outre la tête et le corps, on reconnaît les ailes et les pattes de l'insecte ainsi que plusieurs structures internes, qu'il devient ainsi possible d'étudier sans avoir à effectuer une difficile dissection.

**C**omment une impulsion lumineuse dans un gaz d'atomes peut-elle accélérer des électrons ? Une impulsion lumineuse présente un champ magnétique et un champ électrique qui oscillent dans des directions perpendiculaires à la direction de propagation. Ce n'est pas ce champ électrique qui accélère les électrons, mais un champ secondaire qu'il contribue à créer.

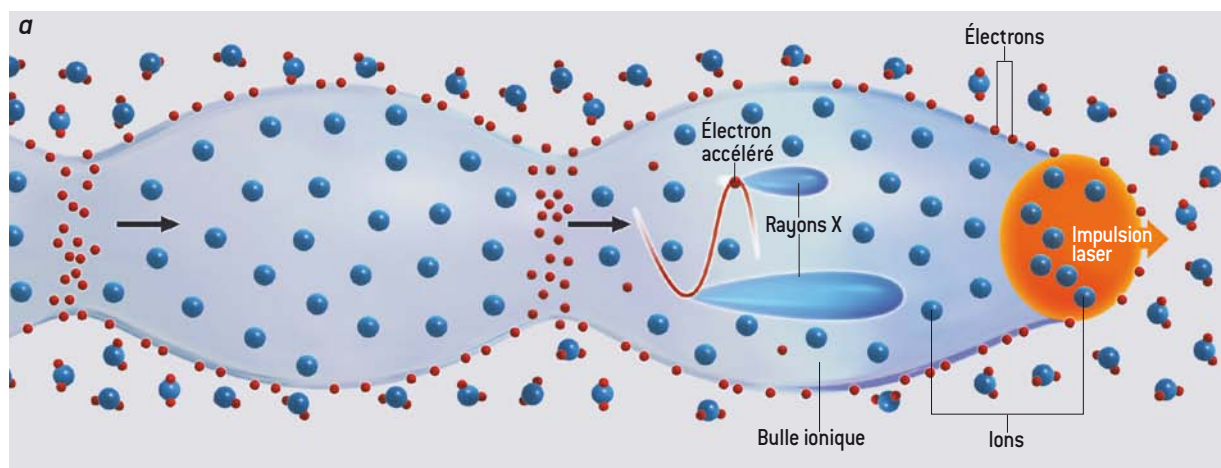
En effet, même s'il est bref, le champ électrique de l'impulsion laser est capable de transmettre tant d'énergie en si peu de temps aux électrons qu'il déshabille instantanément les atomes en leur arrachant leurs nuages électroniques.

Un plasma est créé, c'est-à-dire un mélange d'électrons et d'ions positifs (voir la figure a). Toutefois, les variations violentes du champ électrique de l'impulsion laser dans l'espace exercent sur les charges électriques ce que l'on nomme une pression de radiation perpendiculaire à l'axe. Trop lourds, les ions n'y sont pas sensibles et, restant

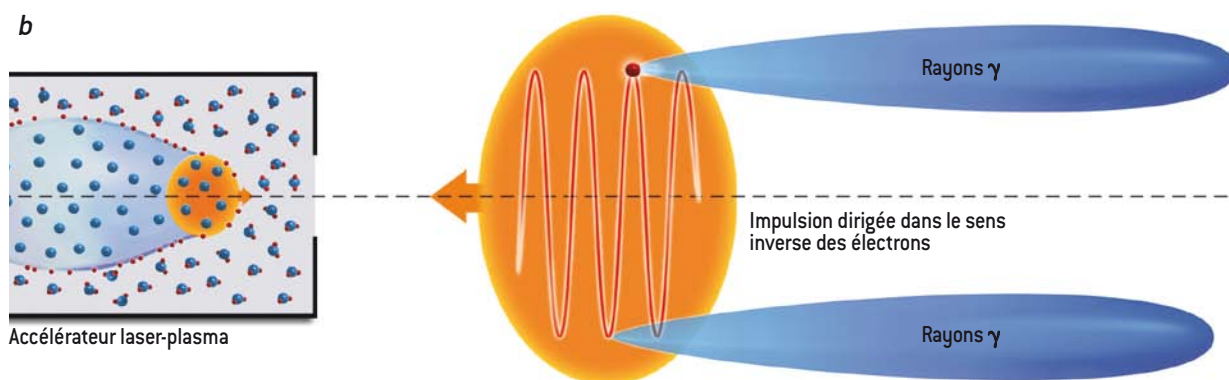
sur place, constituent une bulle ionique dans le sillage de l'impulsion. Très légers en revanche, les électrons libres sont projetés sur les parois de la bulle, puis vers l'arrière où ils finissent par se rejoindre pour fermer la bulle. La présence de tant de charges négatives en arrière de la bulle ionique chargée positivement induit un champ électrique parallèle à l'axe si intense qu'il accélère vers l'avant certains électrons arrachés aux parois de la bulle et leur confère des vitesses très proches de celle de la lumière. Durant toute l'accélération, ces électrons restent dans la bulle. En son sein,

la répartition à symétrie axiale des ions chargés positivement les fait osciller. En effet, chaque fois que ces électrons se trouvent au-dessus de l'axe, la majorité des ions se trouvant sous eux tend à les rappeler vers l'axe, phénomène qui s'inverse dès qu'ils ont franchi ce dernier. Les électrons accélérés zigzaguent fortement autour de l'axe, exactement comme dans un onduleur de synchrotron. C'est à chacun de leurs virages serrés que sont émis des trains de rayons X (voir la figure a).

L'énergie de cette émission lumineuse peut être augmentée encore en envoyant une impulsion lumineuse se propageant dans l'autre sens à la rencontre des électrons accélérés. Quand cette impulsion en croise un, son champ électrique oscillant le fait zigzaguer d'une manière encore plus violente, de sorte que des rayons gamma sont produits (voir la figure b).



**LE SILLAGE DE PLASMA** qui suit l'impulsion lumineuse ultrabrève sert d'accélérateur grâce aux champs électriques qui s'y établissent. Dû à la séparation électrons-ions, le premier est parallèle à l'axe de propagation et accélère les électrons vers l'avant. Le second, dû à la symétrie axiale de la répartition des ions, est perpendiculaire à la propagation et rappelle les électrons vers l'axe.



**UNE IMPULSION LUMINEUSE ULTRABRÈVE** envoyée vers les électrons qui sortent de l'accélérateur laser-plasma les fait osciller dans le champ électrique de l'onde électromagnétique associée. Ils émettent alors à chaque virage des rayons gamma.

celui des synchrotrons, c'est-à-dire qu'ils combinent un accélérateur d'électrons avec un onduleur. Mais dans un laser à électrons libres, tout est gigantesque, raison pour laquelle il n'existe actuellement que trois grandes machines de ce type dans le monde, où la sélection des expériences est encore plus draconienne que dans un synchrotron tel que SOLEIL.

## Les accélérateurs laser-plasma

C'est dans ce contexte que des sources de rayons X produits avec des lasers ont été développées : les accélérateurs laser-plasma. L'objectif était de produire des impulsions intenses avec des installations de petite taille et bien moins chères. Il n'était pas question de rivaliser avec les lasers à électrons libres, mais d'obtenir une source d'impulsions X suffisamment intenses et brèves pour un grand nombre d'applications. Un autre objectif était de produire du rayonnement dans une gamme d'énergies que les synchrotrons et les lasers à électrons libres ne peuvent pas atteindre : les rayons  $\gamma$ , ou

### ■ LES AUTEURS

Kim TA PHUOC est physicien au Laboratoire d'optique appliquée (LOA) de l'ENSTA (École nationale supérieure de techniques avancées), de l'École polytechnique et du CNRS, à Palaiseau.

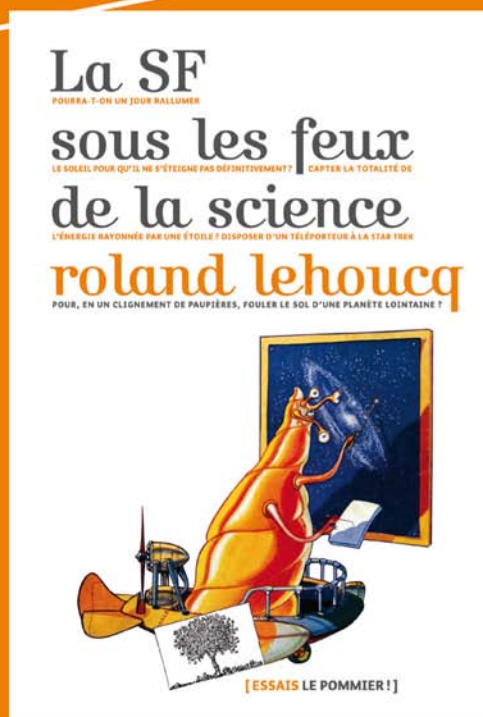
Cédric THAURY est physicien au Laboratoire d'optique appliquée.

Sébastien CORDE est postdoctorant au Laboratoire américain de l'accélérateur linéaire (SLAC), à l'Université Stanford aux États-Unis.

gamma. Souvent émis par les noyaux atomiques radioactifs, ces rayonnements électromagnétiques ont des longueurs d'onde à la mesure des phénomènes nucléaires, donc inférieures au diamètre d'un atome. Très énergétique, le rayonnement gamma traverse plusieurs millimètres d'acier, ce qui en fait une forme de radioactivité particulièrement dangereuse ; pour autant, il est aussi le rayonnement approprié pour explorer les structures intra-atomiques.

Or les physiciens ont réussi à créer des sources tenant sur une table, en exploitant les lasers femtosecondes et une compréhension améliorée des interactions laser-matière. Elles permettent de reproduire le principe d'un synchrotron sur une longueur de seulement quelques millimètres, et ainsi d'obtenir d'intenses flashes de rayons X et gamma à l'échelle de la femtoseconde.

Pour produire ces sources, on utilise des lasers femtosecondes dans l'infrarouge. Comme nous l'expliquions au début de cet article, leur puissance de crête – c'est-à-dire la puissance au pic de l'impulsion lumineuse – est de plusieurs dizaines de milliers de gigawatts. Elle n'existe que brièvement,



Roland Lehoucq - 216 pages - 135 x 200 mm - 20 €

## Un autre regard sur la science-fiction

Comme dans son précédent opus, Roland Lehoucq continue à analyser les grands thèmes de la science-fiction grâce aux outils de la science. Il tente ainsi de répondre à toutes les questions que posent ces explorations extraordinaires : le téléporteur de *Star Trek* est-il pour bientôt ? Peut-on, pourra-t-on rallumer le Soleil pour qu'il ne s'éteigne pas définitivement ? Disposer du blaster de *Star Wars* ? Capturer la totalité de l'énergie rayonnée par une étoile ?

Du même auteur :

256 p.  
110 x 180 mm,  
8,50 €



au cours d'impulsions de quelques femto-secondes. La focalisation de ces impulsions ultrabrèves sur des taches de quelques centièmes de millimètre concentre l'énergie dans l'espace et le temps, ce qui produit des champs électromagnétiques extrêmement intenses, capables d'arracher instantanément les électrons des atomes et de transformer ainsi en plasma un gaz ou un solide.

C'est dans ce plasma que sont produits les synchrotrons lasers. Leur principe physique est similaire à celui d'un synchrotron : il faut accélérer des électrons et les faire osciller pour qu'ils émettent du rayonnement. Toutefois, ici, tout se passe à une échelle beaucoup plus petite, car pour accélérer les électrons, on emploie l'onde plasma créée dans le sillage du faisceau laser. Dans ce sillage, le champ électrique de l'impulsion laser sépare les électrons des ions positifs. Cet écartement crée un champ électrique accélérateur pour les électrons qui lui sont extérieurs (*voir l'encadré page 50*). Tout se passe comme si un surfeur (un électron libre) descendait la vague de sillage d'un puissant navire (l'impulsion lumineuse), dont la pente jouerait le rôle du champ électrique (*voir ci-contre*). Ce surfeur pourrait ainsi suivre le navire à sa vitesse ; c'est ce que font les électrons accélérés puisqu'ils suivent l'impulsion à peu près à sa vitesse, celle de la lumière...

## Des flashes X ultrabrefs...

Les électrons ainsi accélérés parviennent à des énergies dépassant le gigaélectronvolt en quelques millimètres seulement, alors qu'il faut des centaines de mètres pour obtenir la même énergie dans un accélérateur classique. La recherche expérimentale sur les accélérateurs laser-plasma a progressé très vite : alors que les faisceaux d'électrons étaient peu reproductibles et d'énergies modestes il y a quelques années encore, on parvient aujourd'hui à produire des faisceaux ayant des caractéristiques bien contrôlées et des énergies atteignant plusieurs gigaélectronvolts. Le développement technique souhaitable dans les prochaines années consistera à rendre ce type d'accélérateur aussi stable qu'un accélérateur classique, tout en visant des énergies plus importantes.

À partir de tels accélérateurs laser-plasma, on utilise aujourd'hui deux méthodes pour produire des faisceaux de rayons X,

## Dans le sillage du laser

**Le surf sur le sillage d'un bateau est une métaphore naturelle de l'accélération laser-plasma. L'impulsion lumineuse joue le rôle du bateau, la bulle ionique qui suit le flash est l'analogue de la vague de sillage, et le champ électrique accélérateur créé par les ions et les électrons est analogue à la pente de cette vague. Ainsi, tel un surfeur qui descend la vague de sillage à la vitesse du bateau, un électron est propulsé par le champ électrique quasiment à la vitesse de la lumière.**



© Fredrik von Enckendorp/Corbis

toutes deux démontrées au Laboratoire d'optique appliquée (LOA, une unité mixte du CNRS, de l'ENSTA et de l'École polytechnique). La première est inhérente à l'accélérateur laser-plasma lui-même. Les électrons piégés et accélérés dans l'onde de sillage subissent également un champ électrique à symétrie axiale perpendiculaire au champ accélérateur. Ce champ fait osciller les électrons de part et d'autre de l'axe de propagation avec une période de l'ordre de la centaine de micromètres, ce qui conduit, exactement comme dans un synchrotron, à l'émission d'un flash de rayonnement X, que l'on appelle le rayonnement bêta-tron.

## ...et des flashes gamma

La longueur d'onde de ce rayonnement est de l'ordre de l'angström, soit la longueur d'onde intéressante pour de nombreuses applications. Il est émis dans un cône dont l'angle d'ouverture est de l'ordre du degré, et il ne dure que quelques femtosecondes. Cette courte durée est liée à la brièveté des paquets d'électrons accélérés dans le sillage. Le rayonnement bêta-tron a aussi la caractéristique très intéressante d'être émis depuis une toute petite surface, dont la taille est de l'ordre du micromètre. Cela rend possible la radiographie à très haute résolution ou encore la radiographie à contraste de phase, une méthode permettant de voir des détails invisibles en radiographie classique.

La seconde méthode permet de produire du rayonnement aux propriétés similaires au rayonnement bêta-tron, mais de longueurs d'onde bien plus courtes. Très récemment démontrée, elle nécessite une seconde impulsion laser intense issue du même système laser et se propageant dans le sens inverse des électrons. Quand elle rencontre les électrons, cette impulsion les fait osciller avec une période extrêmement courte. Des rayons gamma sont ainsi produits sous la forme de flashes des milliers de fois plus brillants que ceux de toute source existante dans cette gamme d'énergie (*voir l'encadré page 50*).

Cette nouvelle source de flashes gamma ultrabrefs ouvre des perspectives formidables de développement, car elle permet de produire avec un même instrument des faisceaux dans une large gamme spectrale, allant des rayons X aux rayons gamma. Il suffit pour cela d'ajuster l'énergie des électrons dans l'accélérateur laser-plasma,

## ■ BIBLIOGRAPHIE

V. Malka et al., **Accélérateurs à plasma laser : principes et applications**, *Reflète de la Physique* n° 33, mars 2013.

S. Corde et al., **Femtosecond X rays from laser-plasma accelerators**, *Reviews of Modern Physics*, vol. 85, p. 1, 2013.

C. Joshi, **Surfer sur des ondes de plasma**, *Pour la Science* n° 341, mars 2006.

par exemple en changeant la longueur du plasma. Plus les électrons seront énergétiques, plus le rayonnement sera de courte longueur d'onde.

Les synchrotrons lasers sont encore des instruments de recherche fondamentale, mais leur principe est démontré. Pour les rendre accessibles et fiables, il faut maintenant un effort d'ingénierie. Aujourd'hui, une telle source tient dans une pièce d'environ 50 mètres carrés et coûte quelques centaines de milliers d'euros, l'essentiel du coût provenant du système laser. À l'avenir, les lasers de puissance devraient devenir plus compacts, mais aussi moins chers, et les applications de ces nouvelles sources X pourraient se répandre dans les laboratoires.

Néanmoins, de premières applications ont déjà été réalisées. Dans la gamme des rayons X, le rayonnement bêta-tron a permis de mettre en évidence la fusion de semi-conducteurs, phénomène qui ne dure que quelques centaines de femtosecondes. Il a aussi servi à radiographier, avec un seul flash de rayonnement et une très haute

résolution, de petits spécimens d'intérêt biologique, permettant de voir instantanément des détails qui n'auraient pas pu être révélés par une radiographie classique (voir la figure 4). À plus haute énergie, le rayonnement produit par un synchrotron laser ouvre une gamme d'applications importantes en radiographie industrielle. Très énergétique, le rayonnement gamma permet par

**On peut pronostiquer que les travaux engagés aboutiront bientôt à une nouvelle génération de sources X.**

exemple d'inspecter l'intérieur des pièces métalliques ou d'épais objets pour y détecter d'éventuels défauts.

Des projets liés à la sécurité sont aussi en cours, notamment pour créer des sources servant à inspecter le contenu de camions. Des applications médicales sont aussi envisagées, en particulier une forme de radiographie à haute résolution qui permettrait

de mettre en évidence plus de détails qu'en radiographie classique.

Il faudra encore quelques années de développement avant que ces sources deviennent des instruments de travail accessibles. L'investissement en vaut la peine, car leur principe technique promet de les rendre bien plus compactes et moins onéreuses que les sources habituelles.

Déjà aussi brillants qu'un synchrotron dans le domaine des rayons X et des milliers de fois plus brillants que toute source existante dans le domaine gamma, les synchrotrons lasers devraient se révéler extrêmement utiles à l'avenir.

Aujourd'hui, de nombreux laboratoires se sont équipés de systèmes laser commerciaux et se sont lancés dans cette direction de recherche prometteuse. On peut pronostiquer que les travaux engagés aboutiront bientôt à une nouvelle génération de sources X et gamma compactes, qui trouveront de multiples usages, que ce soit en physique, en chimie, en médecine ou dans l'industrie. ■

## Épatez vos amis avec 50 expériences scientifiques incroyables !



Jack Guichard et Guy Simonin - Relié sous spirale, 168 pages, 170 x 210 mm, 18,90 €

Retournez votre verre de vin sans en perdre une goutte, transformez l'eau en vin, créez un nuage dans une bouteille, mettez une olive en lévitation ! Des expériences très faciles à réaliser et enrichies d'une explication simple et compréhensible des phénomènes scientifiques en jeu.



# Le plus puissant faisceau de rayons X

Nora Berrah et Philip Bucksbaum

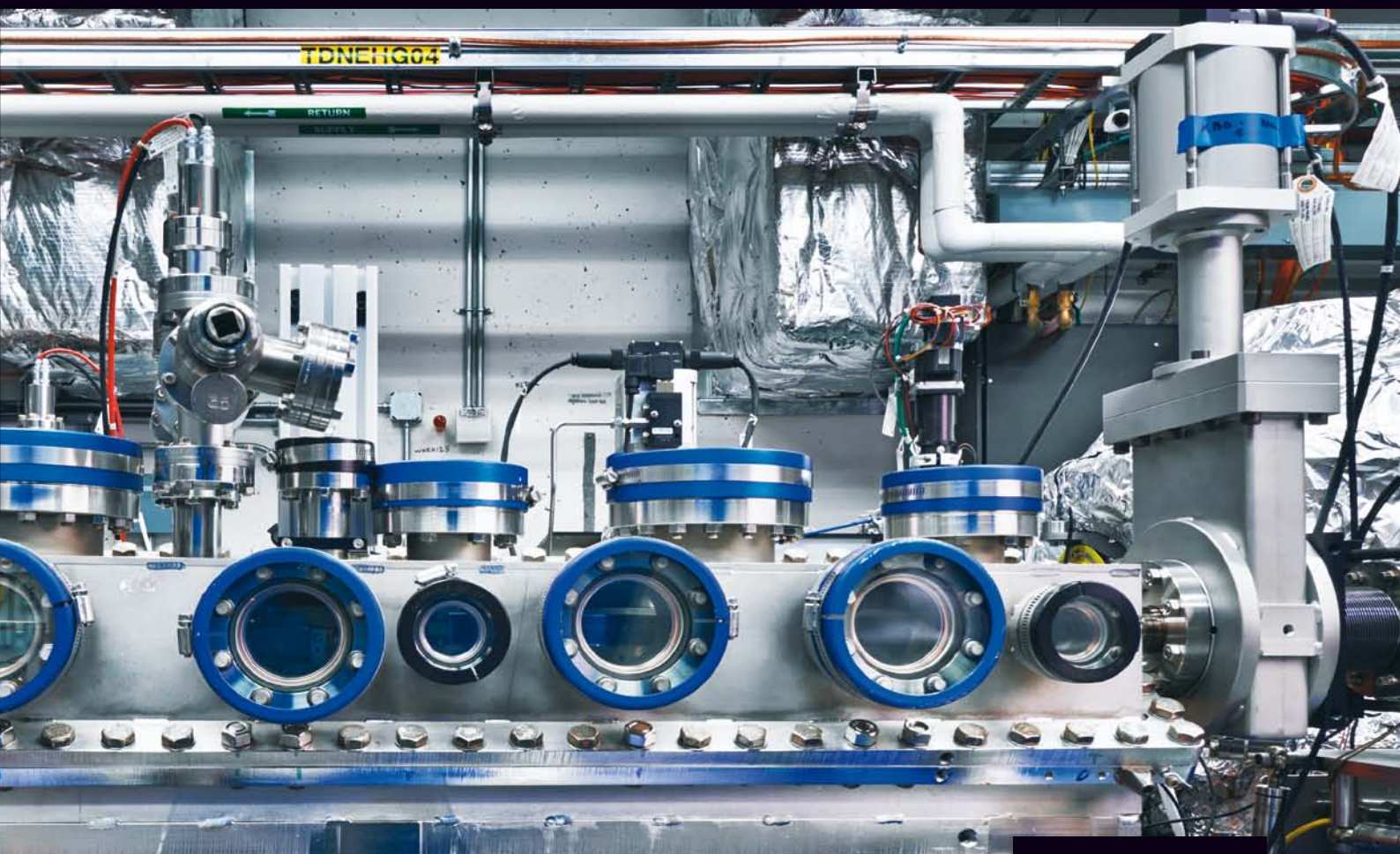
**Le grand accélérateur linéaire de l'Université Stanford a été converti en laser à électrons libres. Il a ainsi donné naissance à la plus intense source de rayons X du monde.**

**P**orter en moins d'un milliardième de seconde un groupe d'atomes ou une poussière à un million de degrés. Voilà ce que peut faire de façon routinière le plus puissant des lasers dits à électrons libres : le LCLS, un laser à rayons X installé dans le tunnel de l'accélérateur linéaire de Stanford (le SLAC, ou *Stanford Linear Accelerator Center*). Un atome de néon soumis au rayonnement du LCLS perd par exemple quasi instantanément ses dix électrons. Privé de son nuage électronique protecteur, il est projeté de façon quasi explosive loin des atomes voisins, et laisse derrière lui un sillage de destructions, qui intéresse beaucoup les physiciens.

Depuis son entrée en fonction en 2009, le LCLS joue en physique atomique et des plasmas, en chimie, en physique de la matière condensée et en biologie le rôle pionnier que joue en physique des particules élémentaires le LHC, le grand collisionneur du Cern. Exploitant les chocs violents qu'il administre, les physiciens préparent la matière dans des états extrêmes, tel celui de cet atome de néon quasi instantanément vidé de ses électrons. Ils se servent aussi du LCLS comme d'une sorte de caméra ultrarapide pour suivre l'évolution de systèmes quantiques, par exemple une molécule en train de réagir avec une autre. Le LCLS sert aussi à révéler la structure de protéines et de molécules biologiques, quand les autres sources de rayons X en sont incapables.



**1. CETTE CHAMBRE À VIDE**  
(la structure aux hublots bleus) contient des miroirs conçus pour concentrer en un point de la taille d'une poussière le plus puissant des faisceaux X existants.



## L'ESSENTIEL

- LCLS, le laser à électrons libres de l'Université Stanford, est alimenté par le SLAC, un grand accélérateur linéaire.
- Les impulsions X ultra-intenses de ce laser créent de nouveaux états de la matière.
- Sorte de caméra ultrarapide pour le monde microscopique, le LCLS peut aussi enregistrer des transformations chimiques qui durent moins d'un millième de milliardième de seconde.
- Il permet aussi d'enregistrer des instantanés de protéines ou de virus.

Toutes les photographies sont de Spencer Lowell

## ■ LES AUTEURS



Norah BERRAH dirige le département de physique de l'Université du Connecticut, aux Etats-Unis, où elle travaille notamment à la construction d'instruments de mesure pour le LCLS.

Philip BUCKSBAUM est professeur de physique à l'Université Stanford et au SLAC, où il dirige l'Institut PULSE consacré aux recherches utilisant les lasers ultrabrefs et le LCLS.

## L'invention du laser à électrons libres

L'invention du principe du laser à électrons libres est généralement attribuée à John Madey, aujourd'hui professeur de physique à l'Université d'Hawaï. Étudiant dans les années 1960 au Caltech, il eut une discussion avec des camarades sur les moyens de renforcer le rayonnement de freinage d'une particule chargée (nommé Bremsstrahlung). De cette question naquit toute une carrière vouée au développement technique du laser à électrons libres et qui s'est déroulée à l'Université Stanford, puis à l'Université Duke.

LCLS est le sigle de *Linac Coherent Light Source*, soit « source cohérente de lumière de l'accélérateur linéaire ». L'essentiel de son principe découle des techniques employées dans tous les grands accélérateurs de particules. De fait, le LCLS est un détournement du SLAC, c'est-à-dire du grand accélérateur linéaire exploité depuis 1962 par l'Université Stanford. Avant de devenir le LCLS, le SLAC était bien connu : c'est à cet accélérateur que les États-Unis doivent les grandes découvertes et les nombreux prix Nobel qui les ont maintenus à la pointe de la physique des particules élémentaires pendant des décennies.

## Suivre le mouvement des atomes ?

Le laser à rayons X qu'est le LCLS combine les deux principaux outils utilisés par les physiciens expérimentateurs d'aujourd'hui : les sources de rayonnement synchrotron et les lasers ultrabrefs. Les synchrotrons, rappelons-le, sont de grands instruments construits à l'aide d'électroaimants et de cavités à champs électriques afin d'accélérer sur une trajectoire circulaire des particules chargées. En raison de l'accélération centripète (due à la courbure) qu'elles subissent, ces particules émettent un rayonnement dirigé essentiellement selon la tangente à la trajectoire : c'est le rayonnement synchrotron. Lorsque l'accélération est forte, ce rayonnement est composé surtout de rayons X, qui font le bonheur des physiciens dans toutes sortes d'explorations de la matière (voir l'article *Produire des rayons X et  $\gamma$  sur une table*, page 46).

L'une d'entre nous (N. Berrah) consacre sa carrière à l'étude de l'intérieur des atomes, des molécules et de tous les systèmes de taille nanométrique à l'aide du rayonnement synchrotron. Les rayons X sont en effet l'outil idéal de ce type de recherche, car leurs longueurs d'onde – de 0,01 à 10 nanomètres – couvrent les tailles atomiques (vers 0,1 nanomètre) et moléculaires (vers 1 nanomètre). Pour cette raison, les rayons X que diffracte une structure de taille nanométrique emportent sur cette dernière des informations. Les rayons X ont aussi l'intérêt de pouvoir être réglés de façon à correspondre à des atomes particuliers, tels ceux de fer, ce qui permet par exemple de les situer au sein d'une grande molécule, telle l'hémoglobine.

Toutefois, il y a une chose que le rayonnement synchrotron ne fait pas : suivre les mouvements de la matière les plus intimes, ceux qui se produisent au sein d'une molécule ou de la matière solide. Le problème est que les rayons X produits à l'aide d'un synchrotron ne sont ni assez brefs ni assez intenses.

Le rayonnement synchrotron ne suffit pas non plus à lire la structure d'une molécule isolée. Actuellement, pour déterminer la structure d'une molécule à l'aide du rayonnement synchrotron, il faut en aligner des exemplaires par millions, pour leur faire former un cristal, lequel n'est pas toujours facile à obtenir.

D'où l'idée de recourir à des lasers à rayons X, beaucoup plus intenses, puisque leur rayonnement est composé d'une seule grande onde électromagnétique, plutôt que d'ondes se propageant indépendamment. Nommée cohérence, cette caractéristique permet de concentrer le faisceau et son énorme énergie en un point minuscule. Les faisceaux laser ont aussi l'avantage de pouvoir s'allumer et s'éteindre en une femtoseconde ( $10^{-15}$  seconde). L'un d'entre nous (P. Bucksbaum) emploie des impulsions laser ultrabrefs pour éclairer en saccade le mouvement des atomes ou une réaction chimique, exactement comme on éclaire au stroboscope le mouvement d'une roue.

Les lasers les plus courants fonctionnent dans le visible ou tout près. Les longueurs d'onde correspondantes (0,4 à 0,8 micromètre) sont quelque mille fois supérieures à celles requises pour distinguer des atomes individuels. De la même manière qu'un radar météorologique montre une tempête mais pas ses gouttes de pluie, les faisceaux laser émettant dans le domaine visible détectent les ensembles d'atomes mais pas les atomes eux-mêmes. Pour qu'un objet atomique diffracte un rayonnement cohérent de façon mesurable, il faut que la longueur d'onde de ce dernier soit au moins aussi petite que lui, donc dans la gamme des rayons X. Bref, pour éclairer le monde atomique et moléculaire, il faut disposer d'un laser à rayons X !

Il fut un temps où l'idée même de construire un laser émettant des rayons aussi énergétiques que des rayons X paraissait absurde. Les lasers courants exploitent la capacité des atomes à absorber et à restituer des photons. Le plus souvent, après



**2. LE FAISCEAU X**  
parcourt un tube reliant  
les deux salles d'expé-  
riences du laser à  
électrons libres du Centre  
de l'accélérateur linéaire  
de Stanford, le SLAC.

avoir absorbé l'énergie d'une telle particule de lumière, un atome finit par la libérer spontanément. Mais quand ? Au début du XX<sup>e</sup> siècle, Albert Einstein a découvert un moyen de déclencher cette émission : c'est ce que l'on nomme l'émission stimulée. Cet effet est exploité pour obtenir des lasers. Pour cela, il faut exciter en permanence toute une population d'atomes, c'est-à-dire leur faire absorber des photons d'énergie choisie. Un atome se désexcite en émettant un photon, lequel déclenchera l'émission, par un autre atome excité, d'un photon identique au premier et en phase ; le phénomène se poursuit ensuite et s'amplifie. C'est cette réaction en chaîne qui produit une émission laser cohérente et conséquente.

En réalité, la probabilité qu'un atome excité qui reçoit un photon incident émette un photon est assez faible. Dans la plupart des cas, l'atome libère spontanément l'énergie absorbée avant qu'une interaction avec un photon incident n'ait pu avoir lieu. Dans les lasers habituels, on surmonte cette limite en multipliant les occasions d'interaction. Pour cela, on place le milieu émetteur entre deux miroirs afin de multiplier les parcours des photons. Dans les lasers à hélium-néon des scanners de supermarché par exemple, un flot continu d'électrons entre en collision avec les atomes d'un gaz, et la lumière produite est renvoyée 200 fois par les miroirs afin de constituer un faisceau suffisant.

## Abattre en vol des satellites et des missiles balistiques

Dans le cas d'un laser X, chaque étape de ce processus se complique. Un photon X contient facilement 1 000 fois plus d'énergie qu'un photon de lumière visible. Un atome recevant une telle particule de lumière doit donc absorber 1 000 fois plus d'énergie, qu'il ne pourra retenir bien longtemps. Un autre point est que des miroirs pour rayons X sont très difficiles à fabriquer. Bien que ces difficultés ne soient pas indépassables, elles signifient en pratique que, pour créer les conditions d'une émission laser X, une énorme quantité d'énergie est nécessaire.

Le premier laser X ayant jamais existé tirait son énergie d'un essai nucléaire souterrain. Il fut construit dans le cadre du projet secret *Excalibur* mis en œuvre par le Laboratoire américain Lawrence

Livermore, situé à l'Est de San Francisco. Ce projet constituait l'un des pans de l'Initiative de défense stratégique (dite « Guerre des étoiles »), lancée par le président Ronald Reagan dans les années 1980, dans le but d'abattre en vol des satellites et des missiles balistiques.

Durant ces années, le Laboratoire Lawrence Livermore a élaboré une première version de laser X non nucléaire en utilisant l'énergie fournie par les puissants lasers optiques construits pour tester les propriétés des armes nucléaires. Toutefois, il ne s'agissait pas encore d'instruments utilisables au quotidien dans la pratique de la recherche, possibilité qui semblait alors encore fort lointaine. On doit à l'Université Stanford la percée qui a permis de développer des lasers X civils. Depuis les années 1960, cette institution exploitait l'accélérateur linéaire d'électrons le plus

long du monde : le SLAC. Long de trois kilomètres, cet appareil servait alors à accélérer de denses paquets d'électrons jusqu'à des vitesses extrêmement proches de celle de la lumière.

## Un onduleur géant

Il y a une dizaine d'années, l'agence de tutelle du SLAC a décidé de le convertir en ce que l'on nomme un laser à électrons libres. Le dispositif utilisé dans les synchrotrons modernes pour produire des faisceaux X intenses – un onduleur – a donc été ajouté au SLAC. Les onduleurs sont constitués d'une série d'aimants disposés de façon à créer un champ magnétique alternant. Les électrons qui les parcourent zigzaguent en émettant du rayonnement synchrotron à chaque virage. Dans les synchrotrons, les électrons circulent dans un anneau

où sont insérés des onduleurs. À chaque passage des électrons dans l'onduleur, le rayonnement X émis est dirigé vers une salle d'expériences.

L'accélérateur du SLAC a été doté d'un onduleur de pas moins de 130 mètres de long. Les électrons y circulent sur la même trajectoire rectiligne que les photons et presque à la même vitesse. Pour cette raison, de nombreux électrons se trouvent sur le chemin de photons X émis par ceux qui les précèdent de peu. Or le champ magnétique oscillant associé à ces photons contribue aussi à faire osciller les électrons. L'émission de rayonnement synchrotron s'amplifie ainsi, jusqu'à atteindre une valeur de saturation. Cette forme d'émission autostimulée produit un faisceau cohérent et d'une très grande luminosité, sans qu'aucun miroir à rayons X n'ait été nécessaire.

### COMMENT LE LASER À ÉLECTRONS LIBRES LCLS FONCTIONNE

Alimenté par un accélérateur linéaire, le LCLS constitue une sorte de version gigantesque des canons à électrons des anciens téléviseurs, sauf qu'il accélère les électrons

jusqu'à des vitesses très proches de celles de la lumière. L'élément essentiel de la machine est constitué par un onduleur, c'est-à-dire une alternance de gros aimants

#### LASER PILOTE

Il envoie des impulsions de lumière ultraviolette pour extraire d'une cathode des bouffées d'électrons.

#### ACCÉLÉRATEUR

Des champs électriques accélèrent ces paquets d'électrons jusqu'à une énergie de 12 giga-électronvolts. Pour cela, le LCLS utilise un tiers de la longueur totale de l'accélérateur du SLAC.

#### COMPRESSEUR DE PAQUETS 1

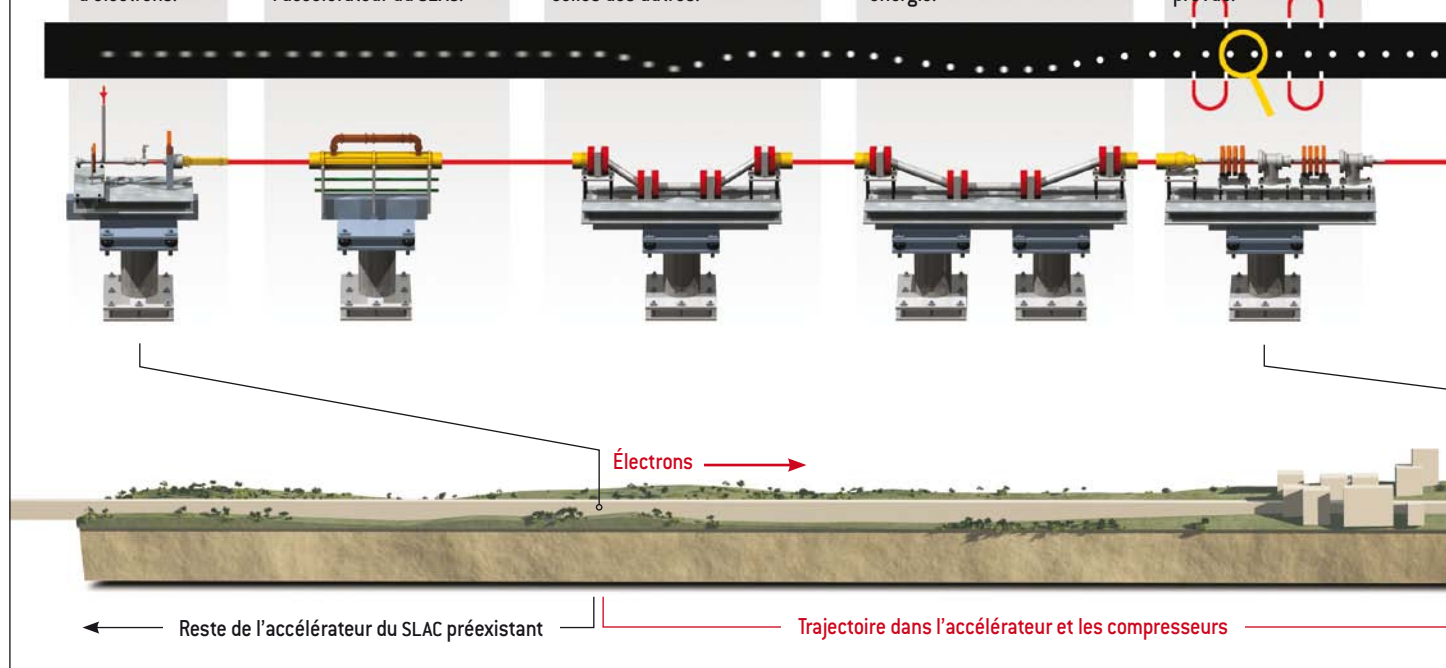
Les paquets d'électrons passent par une courbe en S. Son rôle est de constituer des paquets d'électrons volant ensemble, en éliminant les électrons dont les vitesses ne sont pas assez proches de celles des autres.

#### COMPRESSEUR DE PAQUETS 2

Après une nouvelle accélération, les paquets d'électrons entrent dans un second compresseur, qui doit être plus long que le premier puisque les électrons ont maintenant une plus grande énergie.

#### PRÉPARATEUR

Des aimants concentrent les impulsions, et l'on vérifie à l'aide de capteurs que les électrons sont bien sur la trajectoire prévue.



Tout ce qu'il faut pour obtenir une telle émission laser est un espace assez grand pour loger un très long onduleur et un faisceau d'électrons libres – des conditions que réunissait le SLAC, étant donné son tunnel de trois kilomètres. Au bout de la ligne, les électrons sont déviés avant que les photons ne pénètrent dans les chambres expérimentales. Si tout est parfaitement aligné, le tour est joué, et l'on obtient un faisceau ultra-intense.

## Gigantesque intensité

L'intensité du LCLS est gigantesque : elle atteint  $10^{18}$  watts par centimètre carré au pic de l'impulsion, soit des milliards de fois plus que ce que produisent les synchrotrons. Son champ électromagnétique étant 1 000 fois plus élevé que les champs qui lient les atomes les uns aux autres au

sein de la matière ou des molécules, un tel laser découpe facilement l'acier.

Le LCLS a un tel succès que ses gestionnaires ne peuvent répondre favorablement qu'à une demande d'utilisation sur quatre. Les scientifiques du site travaillent avec de grosses équipes de visiteurs (étudiants, postdoctorants et chercheurs confirmés) et tous sont engagés dans de véritables marathons de 12 heures par jour pendant cinq jours. Chaque microseconde compte.

Les lasers à rayons X servent dans toute une variété de recherches qu'il serait trop long de détailler ici. Pour en donner une idée, nous nous restreindrons ici à deux thèmes : le comportement de la matière dans des conditions extrêmes et l'imagerie ultrarapide de molécules. Ces thèmes sont tous deux intimement liés aux processus fondamentaux étudiés en physique atomique, moléculaire et optique.

Un atome visé par le faisceau du LCLS est l'un des exemples les plus simples de matière poussée dans un état extrême. C'est ce que l'on nomme un atome creux, car le faisceau ne lui fait pas perdre ses électrons d'un seul coup, mais l'évide par le fond. Les couches électroniques externes sont en effet quasi transparentes aux rayons X ; c'est la couche la plus interne qui absorbe ce rayonnement. Les deux électrons de cette couche sont éjectés, laissant un espace vide à la base du nuage électronique de l'atome. En quelques femtosecondes, deux électrons des couches supérieures viennent occuper les deux places vacantes, puis absorbent le rayonnement, de sorte que le processus d'évidement par l'intérieur de l'atome « creux » continue jusqu'à ce qu'il ne reste plus aucun électron. Ce processus est nommé relaxation Auger. Il se produit

imprimant aux électrons un mouvement en zigzags. Chaque fois qu'ils doivent changer de direction, les électrons émettent des rayons X, qui contribuent à les faire zigzaguer

davantage, de sorte que l'émission X produite s'autoamplifie. Cela produit *in fine* un faisceau exceptionnellement pur et intense.

### ONDULEUR

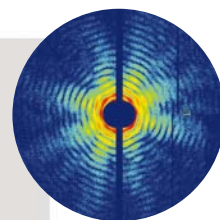
Une série d'aimants de polarités alternées impriment des zigzags aux électrons. À chaque virage brusque, ces derniers émettent un rayonnement synchrotron, ici un faisceau de rayons X.

### TRIEUR DE FAISCEAUX

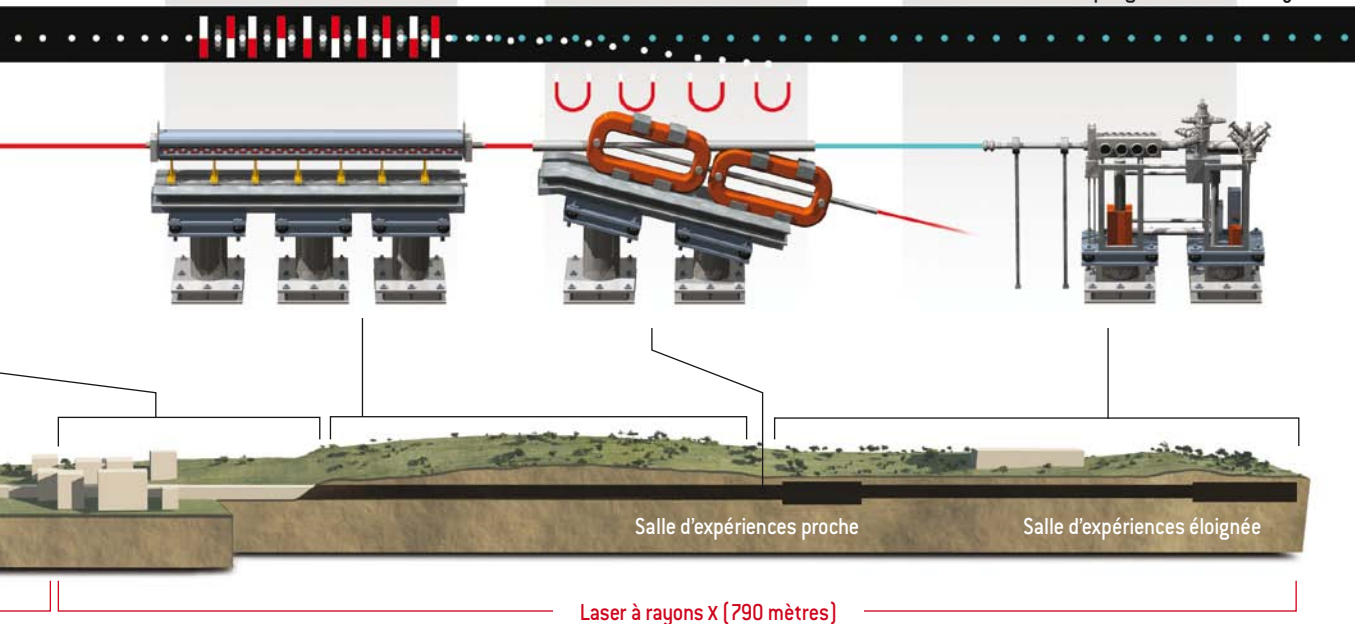
Un puissant aimant dévie le faisceau d'électrons et laisse le faisceau de rayons X poursuivre son chemin.

### SALLE D'EXPÉRIENCES

Les rayons X pénètrent la matière et y accomplissent leur tâche. Par exemple, ils livrent une image détaillée de la structure interne d'un virus (*ci-contre*).



Bactériophage visualisé aux rayons X





**3. LES DÉTECTEURS PLACÉS DANS CETTE CHAMBRE À VIDE** fournissent des images d'ultra haute résolution de protéines et de cellules au moment où une impulsion X les éclaire.

avec des molécules, comme avec des atomes pris dans la matière solide.

L'état exotique de la matière qui en résulte n'existe que quelques femtosecondes. Dans les solides, il évolue en matière dense et chaude, une sorte de plasma que l'on ne rencontre habituellement que dans les conditions extrêmes du cœur d'une planète géante où en cas de fusion nucléaire. Il n'a en tout cas aucun équivalent sur Terre.

Or le LCLS peut servir de caméra rapide afin de saisir la façon dont se créent les atomes creux. Comme les relaxations Auger durent quelques femtosecondes, il est possible avec le LCLS de diriger une impulsion X d'une femtoseconde sur un système atomique en voie d'évidement avant qu'un électron externe ait le temps de rejoindre les places vacantes de la couche interne. C'est ce que nous avons fait non seulement pour des atomes, mais également pour des molécules et des échantillons de matière.

## Simuler l'intérieur des planètes gazeuses

Une autre application du LCLS est la simulation des conditions extrêmes régnant au sein des géantes gazeuses. Selon les théories existantes, les températures à l'intérieur de Jupiter, Saturne, Uranus ou encore Neptune atteignent 20 000 degrés, soit environ quatre fois la température de surface du Soleil. Les principaux constituants de la planète que sont l'hydrogène et l'hélium doivent se trouver sous la forme

de phases solides exotiques, de densités extrêmes. Toutefois, nous en savons peu, car la résistance d'une telle matière et la façon dont elle se comprime ne sont ni faciles à mesurer, ni bien comprises en théorie. Pour le moment, la recherche sur de tels états de la matière n'a pu qu'être théorique, et les expériences de validation des modèles ont été rares.

Certaines des premières expériences conduites au LCLS ont été menées pour recréer ces conditions internes aux planètes gazeuses. L'intensité colossale du laser chauffe la matière très rapidement, produisant des effets extraordinaires. Nous avons par exemple observé pour la première fois une absorption multiphotonique X, c'est-à-dire comment plusieurs photons X peuvent être absorbés par des molécules constituées de nombreux atomes, ce qui libère des électrons fortement liés.

Un groupe assez dense de tels photons peut aussi arracher de multiples électrons à un atome, à une molécule ou à un élément de matière, et les vider de l'intérieur comme décrit plus haut. Les rayons X de forte intensité peuvent en outre casser quasi instantanément toutes les liaisons au sein de molécules supposées se trouver à l'intérieur des planètes géantes, dont l'eau, le méthane et l'ammoniac. Les mesures de la matière dans des conditions extrêmes ont permis de déterminer l'équation d'état de la matière (relation entre température, pression et densité) au cœur des géantes gazeuses ou durant les impacts météoritiques.

Quant à l'exploitation du laser comme caméra X ultrarapide, elle pourrait combler de sérieuses lacunes dans nos connaissances en réalisant des instantanés de molécules en train de réagir ou encore de processus physiques, chimiques et biologiques rapides.

On connaît peu en effet la structure de nombreuses molécules biologiques, en particulier des protéines membranaires et des gros complexes protéiques. La technique standard, la cristallographie, suppose de former ces molécules en une structure cristalline assez importante et régulière pour diffracter le rayonnement synchrotron. Les motifs résultants révèlent la structure de la molécule. La faiblesse de cette méthode tient au fait que les rayons X endommagent facilement les molécules. Pour compenser, les chercheurs doivent préparer de gros cristaux, mais de nombreuses molécules intéressantes (dont les protéines membra-

## BIBLIOGRAPHIE

L. Redecke *et al.*, *Natively inhibited Trypanosoma brucei cathepsin B structure determined by using an X-ray laser*, *Science*, vol. 339, pp. 227-230, 2013.

S. M. Vinko *et al.*, *Creation and diagnosis of a solid-density plasma with an X-ray free electron laser*, *Nature*, vol. 482, pp. 59-63, 2012.

H. N. Chapman *et al.*, *Femtosecond X-ray protein nanocrystallography*, *Nature*, vol. 470, pp. 73-77, 2011.

M. M. Seibert *et al.*, *Single Mimivirus particles intercepted and imaged with an X-ray laser*, *Nature*, vol. 470, pp. 78-81, 2011.

N. Berrah *et al.*, *Double core-hole spectroscopy for chemical analysis with an intense X-ray femtosecond laser*, *PNAS*, vol. 108(41), pp. 16912-16915, 2011.

L. Young *et al.*, *Femtosecond electronic response of atoms to ultra-Intense X-rays*, *Nature*, vol. 466, pp. 56-61, 2010.

naïres) sont très difficiles à faire cristalliser. L'exploitation du rayonnement synchrotron pour analyser des molécules biologiques est de surcroît lente, donc inutile pour observer les phénomènes chimiques transitoires qui se produisent à l'échelle de la femtoseconde.

Au premier abord, le LCLS semble être un outil totalement inadapté pour analyser de fragiles macromolécules organiques. Une seule impulsion de ses rayons X suffit en effet à détruire les matériaux organiques ou toute matière non cristalline. Toutefois, la brièveté de l'impulsion X et son intensité permettent de capturer une image en moins de temps que la molécule n'en met à exploser. Certes, le laser détruit l'échantillon, mais il en prend néanmoins une image claire avant sa disparition.

Cette méthode dite de la « diffraction avant destruction » commence déjà à produire des fruits. Les chercheurs ont utilisé la cristallographie femtoseconde pour enregistrer des motifs de diffraction de nanocristaux, de protéines et de virus

(voir l'encadré pages 58 et 59). Au cours de travaux récents, des chercheurs ont ainsi cartographié la structure de protéines impliquées dans la maladie du sommeil.

Outre le LCLS, des laboratoires européens et asiatiques préparent ou construisent de nouveaux gros lasers à électrons libres. En Europe, le centre allemand de recherche

*Amplifying Spontaneous Emission*, émission spontanée auto-amplificatrice). Après avoir longtemps servi de machine pilote, FLASH est à la disposition des chercheurs depuis 2005. L'expérience accumulée avec FLASH est actuellement réinvestie par le centre DESY dans la construction du laser XFEL (*European X-ray Free-Electron Laser*), qui doit entrer en fonctionnement en 2016 à Hambourg.

Cette nouvelle génération de machines sera plus stable et dotée de faisceaux plus faciles à contrôler, et aux impulsions plus brèves encore. Avec des impulsions de seulement 0,1 femtoseconde, nous pourrions en effet commencer à observer non seulement le mouvement des atomes, mais aussi celui des électrons atomiques ou moléculaires. De nouveaux dispositifs pourraient même nous permettre de contrôler ce mouvement. Le rêve de réaliser des films montrant comment les liaisons chimiques se cassent, puis comment de nouvelles liaisons se forment à leur place, est maintenant à notre portée. ■

## LE RÊVE DE FILMER

**comment les liaisons chimiques se cassent et comment de nouvelles se forment est maintenant à notre portée.**

fondamentale DESY (*Deutsches Elektronen Synchrotron*) a innové très tôt en construisant dès les années 1990 une machine pour tester le principe des lasers à électrons libres : le laser TESLA rebaptisé depuis *Free Electron Laser Hamburg* ou FLASH. C'est là que fut démontrée en 2001 la possibilité même de produire un rayonnement laser à partir d'un faisceau d'électrons en exploitant l'émission auto-amplifiée décrite plus haut. Cet effet est nommé l'effet SASE (*Self*

france culture

C'EST POUR VOUS

# LA MARCHÉ DES SCIENCES

AVENTURES SAVANTES AU FIL DE L'HISTOIRE  
AURÉLIE LUNEAU / JEUDI 14H - 15H

EN PARTENARIAT AVEC POUR LA SCIENCE

écoutez, réécoutez et podcastez l'émission sur  
franceculture.fr

QR code and social media icons (Facebook, Twitter)