

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

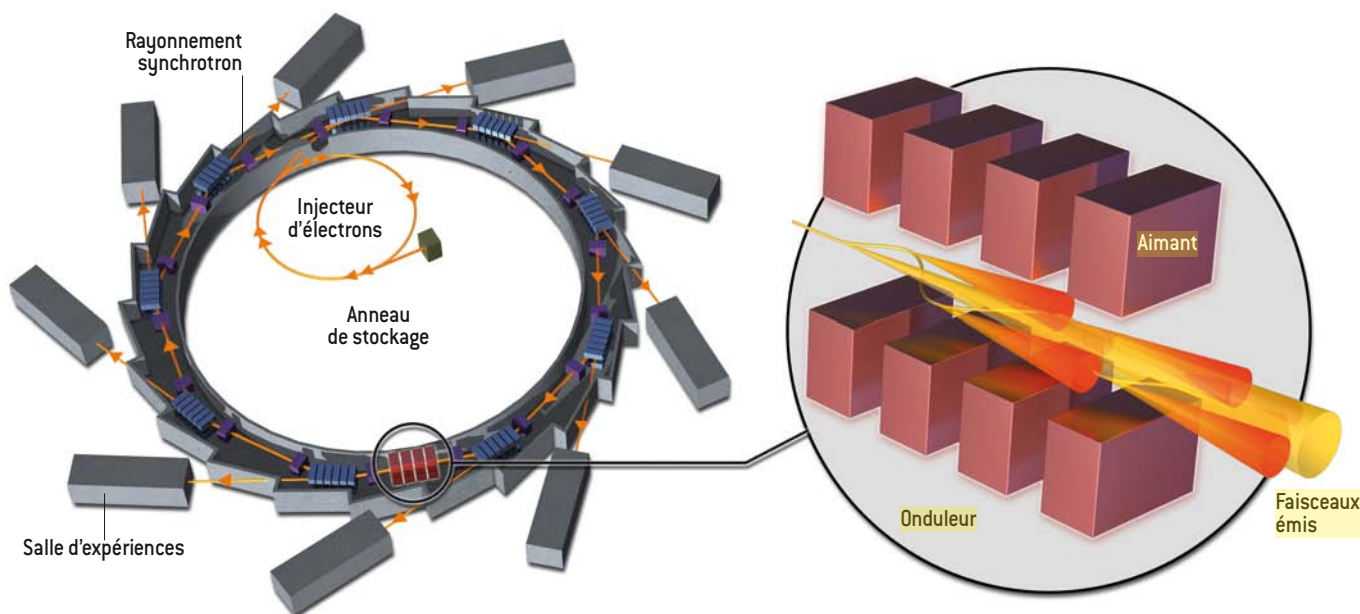
- **1960** Le premier faisceau laser est obtenu d'un laser à rubis.
- **1979** L'accélération dans les plasmas est étudiée théoriquement.
- **1985** Débuts des lasers femtosecondes de puissance.
- **1995** Première démonstration d'un accélérateur laser-plasma.
- **2004** Premier faisceau de rayons X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

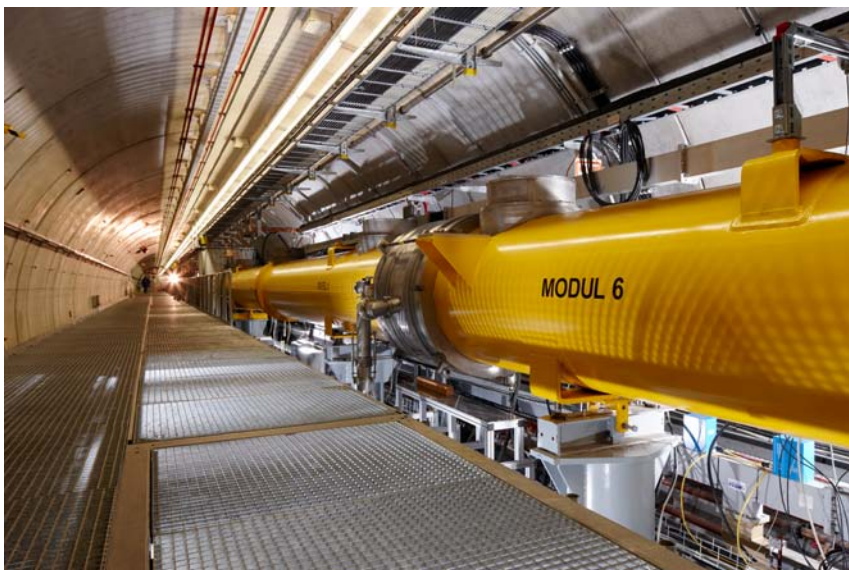
léré à l'aide d'une tension électrique de un volt. En unités d'énergie, la masse de l'électron vaut 0,511 mégaélectronvolt (million d'électronvolts). Ainsi, lorsque l'énergie cinétique d'un électron atteint deux gigaélectronvolts, elle représente quelque 4000 fois l'énergie équivalente à sa masse...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

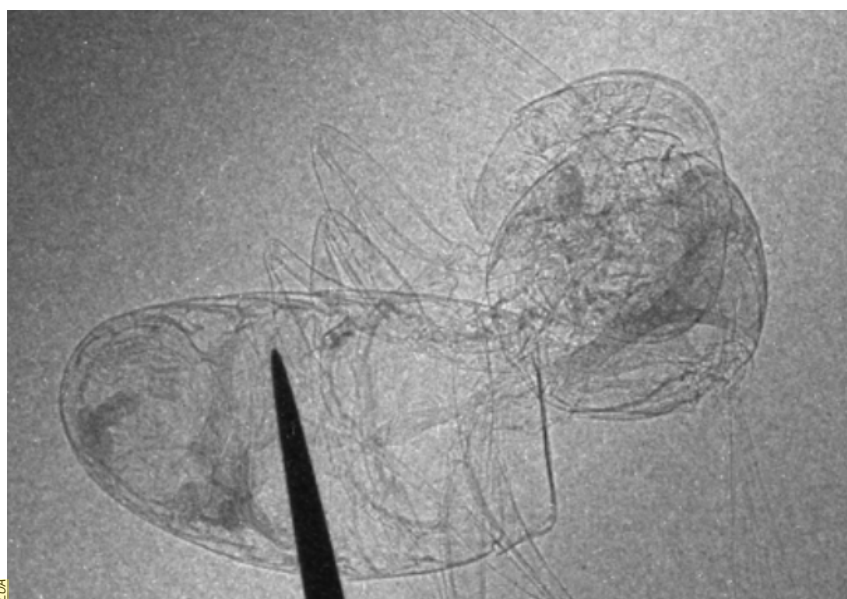
Au-delà des synchrotrons

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.

Comment 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.

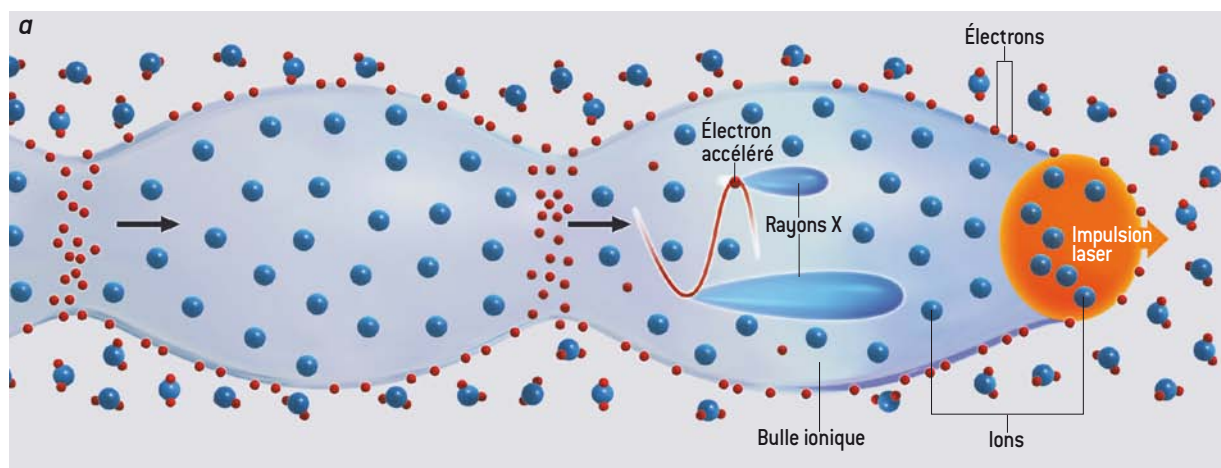
En effet, même s'il est bref, le champ électrique de l'impulsion laser est capable de transmettre tant d'énergie en si peu de temps aux électrons qu'il déshabille instantanément les atomes en leur arrachant leurs nuages électroniques.

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

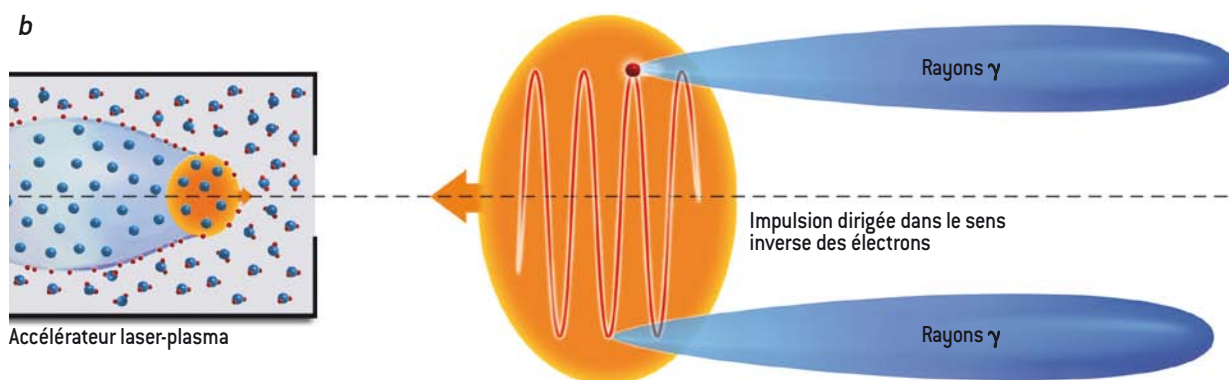
sur place, constituent une bulle ionique dans le sillage de l'impulsion. Très légers en revanche, les électrons libres sont projetés sur les parois de la bulle, puis vers l'arrière où ils finissent par se rejoindre pour fermer la bulle. La présence de tant de charges négatives en arrière de la bulle 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.