

Les systèmes nucléaires du futur

Christophe Béhar

L'industrie nucléaire présente des atouts forts au regard de la demande croissante en énergie et de la nécessaire limitation du réchauffement climatique. Les maintenir sur le long terme passe par la mise au point de systèmes innovants, dits « de quatrième génération », auxquels le CEA consacre de grands efforts.

Certains chiffres parlent d'eux-mêmes : en 2030, la consommation énergétique mondiale devrait augmenter de 50 % par rapport à celle de 2005, sous l'effet conjugué de l'augmentation de la population et de la croissance des pays émergents ; les pays non membres de l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques) devraient totaliser plus de 80 % de cette hausse.

En regard de cette demande, on trouve de nombreuses contraintes, parmi lesquelles la lutte contre le réchauffement climatique, la raréfaction des ressources énergétiques, la sûreté d'approvisionnement, la maîtrise des coûts de l'énergie et la préservation de la balance commerciale.

Quant à la contrainte climatique, le cinquième rapport du Giec, rendu public l'année dernière, est sans appel : d'une part, le réchauffement du climat est sans équivoque et sans précédent (les trois dernières décennies ont été les plus chaudes depuis au moins 1 400 ans) et, d'autre part, l'influence des activités humaines est clairement établie. Limiter la hausse des températures à 2°C représente donc un objectif majeur (qui sera au cœur de la 21^e conférence internationale Climat, aussi nommée Cop21 ou Paris 2015 et organisée en France à la fin de l'année). Cela implique de diminuer le recours aux énergies fossiles et d'augmenter la part d'électricité dans le mix énergétique.

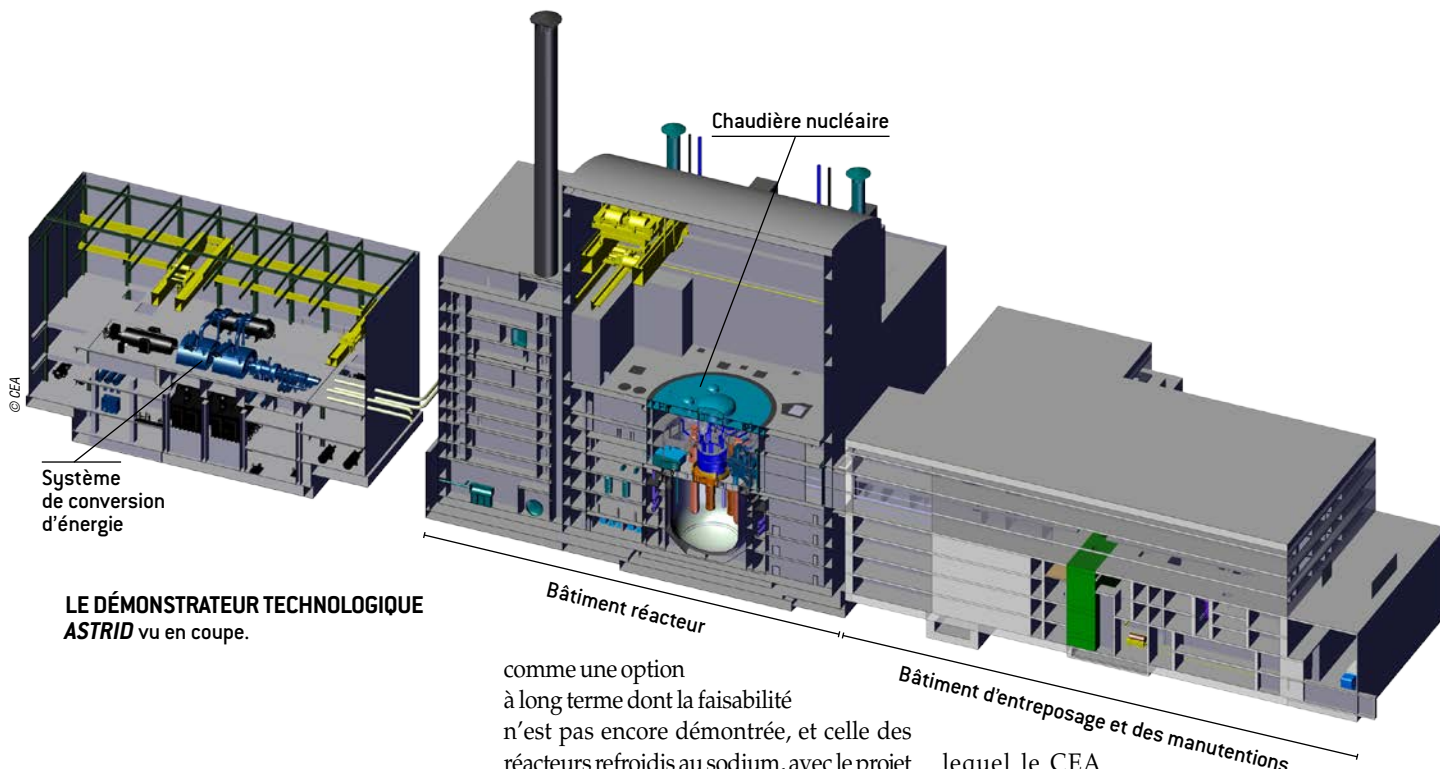
Christophe BÉHAR est Directeur
de l'énergie nucléaire au CEA

Dans ce contexte, l'énergie nucléaire a un rôle incontournable à jouer en synergie avec les énergies renouvelables puisqu'elles constituent les seuls modes de production d'électricité qui émettent très peu de gaz à effet de serre. Dans le projet de loi française sur la transition énergétique et la croissance verte, elles interviennent en complémentarité : de grandes unités fonctionnant en base pour l'énergie nucléaire ; de petites unités décentralisées et intermittentes pour les énergies renouvelables.

La quatrième génération de réacteurs

Si l'industrie nucléaire dispose d'atouts qui lui permettent de s'imposer comme l'une des solutions prometteuses pour l'avenir, au sein d'un mix énergétique décarboné, elle est aussi confrontée à des enjeux en termes de compétitivité, de disponibilité, de sûreté, de lutte contre la prolifération, de raréfaction de la ressource et de gestion des déchets. Autant de défis qui imposent de poursuivre sur la voie de l'innovation technologique qui a toujours été un moteur du développement de cette industrie. Aujourd'hui, cette innovation passe par le développement de systèmes nucléaires du futur, dits aussi de quatrième génération.

L'évaluation la plus récente et la plus aboutie des technologies capables de répondre aux objectifs définis pour ces



**LE DÉMONSTRATEUR TECHNOLOGIQUE
ASTRID** vu en coupe.

comme une option à long terme dont la faisabilité n'est pas encore démontrée, et celle des réacteurs refroidis au sodium, avec le projet de démonstrateur technologique *Astrid* (*Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration*), dont le CEA est maître d'ouvrage pour les études.

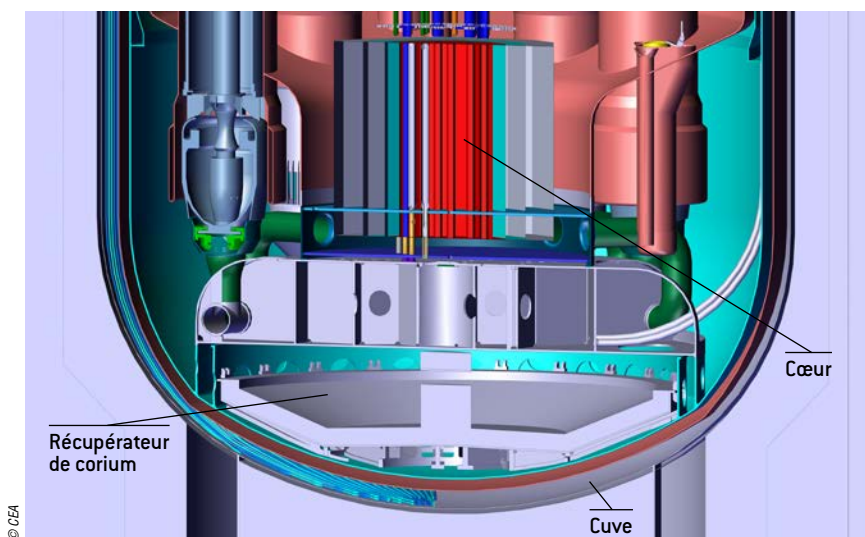
« En France, les études sont pilotées par le CEA autour du projet Astrid. »

Le concept de RNR refroidi au gaz représente une option à long terme, car les verrous technologiques à lever sont importants (à titre d'exemple, il nécessite le développement de matériaux résistants à de très hautes températures et de systèmes d'évacuation de la puissance résiduelle). Son développement s'appuie sur un projet de réacteur expérimental de petite taille, nommé *Allegro*, dont la conception est portée par un consortium européen constitué de quatre instituts de recherche-développement (VUJE Slovaquie, UJV République tchèque, MTA-EK Hongrie, NCBJ Pologne), pour

lequel le CEA intervient en soutien. Le premier prototype, non électrogène dans un premier temps, sera nécessairement de très faible puissance, et ne saurait fonctionner avant 2030.

Le concept de RNR refroidi au sodium est la filière de référence pour les RNR de quatrième génération, avec une dimension internationale potentielle et une maturité qui pourrait être atteinte pour la seconde moitié de ce siècle en France, et probablement plus tôt dans d'autres pays. En France, les études sont pilotées par le CEA, autour du projet *Astrid*, qui bénéficiera de l'expérience des RNR ayant déjà fonctionné dans le monde, mais qui sera en rupture technologique complète avec eux.

Le choix du sodium comme fluide caloporteur découle d'une analyse multicritère. Outre le fait qu'il ne ralentit pas les neutrons – condition essentielle pour les RNR –, le sodium liquide est doté de bonnes propriétés thermiques (conductivité, évacuation de la chaleur) et d'une faible viscosité, ce qui en fait un excellent caloporteur. Il est faiblement activé par les neutrons, ce qui évite de produire de grandes quantités de déchets radioactifs. Il est peu corrosif, ce qui le rend compatible avec les aciers. En outre, il offre d'excellentes garanties en termes de sûreté ; sa faible inertie thermique confère ainsi aux RNR-Na un excellent comportement en cas de perte de source froide externe (atmosphère, eau). Ses principaux inconvénients résident en son opacité (qui complique certaines opérations d'inspection ou de maintenance) et en sa forte réactivité chimique avec l'eau



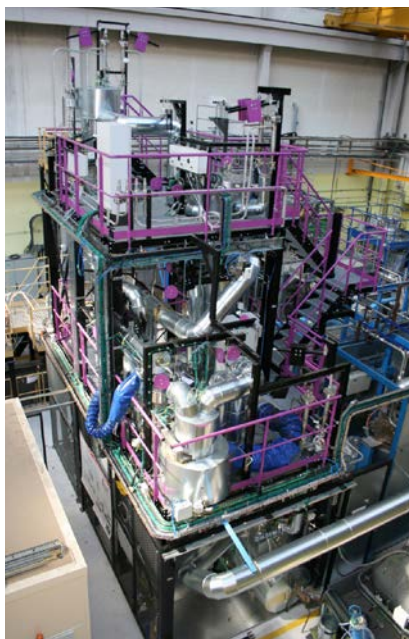
LE RÉACTEUR D'ASTRID, avec son récupérateur de corium.

et l'oxygène de l'air. Ils sont suffisamment bien connus pour permettre de développer des parades efficaces ; ainsi, l'utilisation du sodium ne constitue pas un frein à l'atteinte des objectifs de la quatrième génération. Autre avantage, les RNR-Na ont fait l'objet de nombreux projets dans le monde qui ont permis d'accumuler plus de 400 années-réacteur d'exploitation, dont 100 en exploitation industrielle. Ils constituent, par ailleurs, la voie aujourd'hui retenue en référence par l'ensemble des pays qui se sont engagés dans le développement de RNR de cette nouvelle génération.

Des options innovantes

Le déploiement industriel de RNR-Na de quatrième génération nécessite la qualification préalable, à une échelle représentative, des diverses avancées technologiques appelées par les objectifs de performance assignés à la quatrième génération de réacteurs nucléaires. C'est dans ce contexte que le démonstrateur technologique *Astrid* a été proposé par le CEA et ses partenaires. Sa puissance (1500 mégawatts thermiques, soit environ 600 mégawatts électriques) a été définie pour concilier une flexibilité d'utilisation suffisante et la nécessaire représentativité au regard des principaux aspects industriels.

La phase de R&D qui se poursuit permet des choix d'options particulièrement avancés, notamment en matière de sûreté et d'exploitabilité. Parmi les avancées décisives réalisées par le CEA et ses partenaires figurent les éléments suivants : un cœur innovant, naturellement résistant aux situations accidentelles, qui confère au réacteur un comportement naturel favorable en cas de perte de refroidissement et qui constitue une avancée essentielle, unique au monde, dans le domaine de la sûreté ; un système de conversion d'énergie qui n'utilise pas d'eau, mais un gaz, supprimant ainsi toute possibilité d'interaction de l'eau et du sodium ; un récupérateur de cœur fondu (le corium) intégré à la cuve du réacteur ; des dispositions d'inertage (l'utilisation d'un gaz inerte comme l'azote pour supprimer les risques de réaction du sodium avec l'air) et de détection précoce de fuites qui éliminent les risques de feu de sodium ; des moyens multiples et redondants d'évacuation de la puissance résiduelle, le réacteur pouvant en outre utiliser l'atmosphère comme moyen de



MOYENS D'ÉTUDES et de développement du système de conversion d'énergie d'*Astrid*, qui utilise un échangeur de chaleur sodium-gaz.

MOYENS D'ESSAIS de systèmes de détection de fuite sur les tuyauteries du circuit de sodium secondaire d'*Astrid*.



refroidissement, même en cas de perte des alimentations électriques et de la source froide. De plus, la conception de ce système prend en compte les besoins d'inspection en service pendant toute la durée de vie du réacteur. *Astrid* intègre également des dispositions qui permettent de réduire la durée des arrêts pour le rechargement du combustible et d'augmenter le taux de combustion ainsi que la durée de cycles.

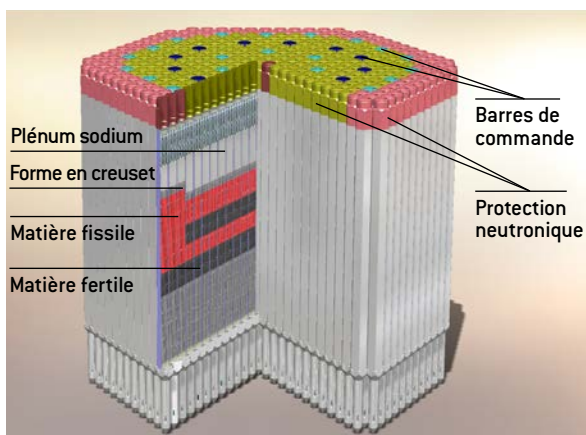
Des collaborations nombreuses

Pour la mise en œuvre du projet *Astrid*, le CEA est entouré d'industriels partenaires qui participent aux études au travers d'accords de collaboration prévoyant une contribution sur leurs fonds propres. Ce projet implique d'ores et déjà 600 personnes, dont près de la moitié sont le personnel de ces partenaires. Tandis que la maîtrise d'ouvrage et le pilotage du projet sont assurés par le CEA, de nombreux industriels, français mais aussi étrangers, y participent : Areva intervient dans le domaine de la chaudière (c'est-à-dire du cœur jusqu'au générateur de vapeur), du contrôle commande et des auxiliaires nucléaires ; EDF est impliqué dans la R&D et l'assistance à la maîtrise d'ouvrage ; Alstom intervient dans le domaine du système de conversion d'énergie ; Bouygues le fait sur le génie civil et la ventilation ; Comex Nucléaire se consacre principalement sur la problématique de l'inspection en service ; Jacobs France travaille sur les moyens communs et les infrastructures ; Toshiba collabore sur

Le cœur innovant du réacteur Astrid

Breveté en 2010, le cœur « à faible vidange » (CFV) est l'un des principaux éléments qui différencient la conception d'Astrid de celle des RNR précédents. L'enjeu, pour les équipes du CEA et de ses partenaires, était de développer un cœur dont la réactivité diminue en cas de fuite de sodium, jusqu'à l'arrêt des réactions nucléaires.

Le sodium ralentit un peu, réfléchit ou capture les neutrons. Par conséquent, sa disparition ou sa dilatation locale dans le cœur entraîne une variation de la réactivité, qui résulte de deux effets antagonistes : un effet positif, dû au fait que les neutrons sont moins ralentis et moins capturés, et un effet négatif, lié à l'augmentation des fuites de neutrons hors du cœur. Le taux de fuite de neutrons diminuant avec l'augmentation de la taille du cœur, l'effet d'une vidange du sodium sur la réactivité est largement positif pour les grands cœurs de forte puissance de conception traditionnelle, ce qui constitue une problématique de sûreté délicate à gérer pour les RNR-Na. Pour obtenir un effet négatif – voire faible – sur la réactivité,



LE CŒUR D'ASTRID
à faible effet de réactivité en cas de vidange du sodium [vue en coupe].

non fissile placée à environ mi-hauteur du cœur ; le concept de cœur « en creuset », dans lequel la différence de hauteur des zones fissiles interne et externe

le CEA a développé avec ses partenaires un cœur dont le principe est d'amplifier la composante de fuite, grâce à la combinaison de plusieurs dispositions géométriques : la réduction de la proportion volumique du sodium dans le cœur, obtenue en diminuant le diamètre du fil espaceur situé entre les aiguilles de combustible ; le concept de plénum sodium, qui se matérialise sous la forme d'une cavité remplie de sodium et placée au-dessus du faisceau d'aiguilles, à l'intérieur des assemblages combustibles (ce plénum, en situation vidangée, favorise la fuite des neutrons hors du cœur), et celui d'un cœur à géométrie hétérogène, avec une plaque

augmente l'effet de fuite des neutrons du plénum et contrebalance ainsi l'apport de réactivité en cas de vidange.

Les développements réalisés se sont appuyés sur les résultats d'études expérimentales et de simulations numériques. Pour maîtriser la spécificité du cœur CFV et certifier les calculs, plusieurs programmes ont été menés par les équipes du CEA. Il s'agit en particulier d'essais effectués en Russie sur un réacteur expérimental et d'analyses comparatives menées indépendamment par le CEA et le DOE (le Department of Energy des États-Unis), qui ont toutes les deux confirmé les performances de ce cœur.

« Le CEA a développé des partenariats internationaux afin de renforcer et multiplier ses efforts de R&D. »

les pompes électromagnétiques (destinées à faire circuler le sodium dans la boucle secondaire) ; Airbus Defence and Space intervient sur la fiabilité et sûreté de fonctionnement ; Alcen sur les cellules d'examen des objets irradiés ; JAEA, MHI et MFBR, sur la conception de systèmes de sûreté d'Astrid et sur la R&D associée ; Rolls-Royce sur les échangeurs compacts sodium-gaz et la manutention du combustible ; Velan sur la conception et le développement de vannes d'isolement du sodium sur la boucle secondaire, et Technetics Group France sur le développement de systèmes d'étanchéité en environnement sodium.

En parallèle, le CEA a développé un ensemble de partenariats internationaux afin de renforcer et multiplier ses efforts de R&D. Ils permettent de partager les coûts de développement et d'utilisation d'infrastructures expérimentales lourdes, telles

que les laboratoires d'études en sodium ou d'études des matériaux irradiés.

En Europe, les partenariats sont inscrits soit au niveau communautaire, sous l'égide de l'initiative ESNII dédiée aux programmes de quatrième génération, soit sous forme d'un ensemble de coopérations bilatérales dans le cadre du réseau de coopération Ardeco (Astrid R&D European Cooperation).

Hors Europe, ils procèdent d'initiatives multilatérales (le GIF évoqué précédemment) ou bilatérales, avec le Japon, dans le cadre d'un accord important signé avec les ministères MEXT et METI autour de la R&D et de l'ingénierie, avec la Russie, à travers un accord avec Rosatom pour des irradiations expérimentales de combustibles, avec l'Inde à travers l'IGCAR pour la sûreté, avec le Department of Energy des États-Unis pour des études de neutronique et de sûreté. Enfin, des contacts avec la Chine ont été noués en vue d'un futur partenariat. ■

Des lasers **ultrabrefs**

Philippe Martin

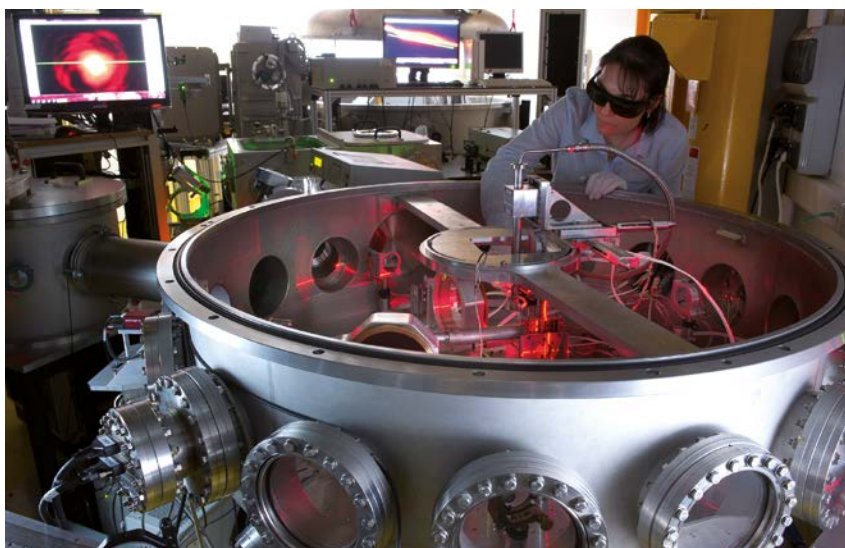
La production de rayons lumineux d'une brièveté inouïe donne l'accès à de nouveaux moyens d'observation et à d'autres outils inédits.

Voir des électrons se déplacer, les propulser à la vitesse de la lumière... voilà des utilisations du laser qui n'ont probablement pas été imaginées lors de son invention !

Les lasers « ultrabrefs » sont caractérisés par la brièveté de leurs impulsions : quelques femtosecondes ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$), soit seulement quelques oscillations du champ électromagnétique dans le cas d'une lumière visible. Cette fugacité leur impose un très large spectre de fréquences, comme l'indique le principe de Fourier selon lequel seul un nombre infini d'oscillations permet de définir une fréquence unique et précise. Ainsi, contrairement à une idée répandue, un laser n'est pas nécessairement monochromatique.

On connaît aujourd'hui deux intérêts majeurs présentés par les lasers ultrabrefs.

D'une part, ils sont à l'origine d'une science récente, dite ultrarapide. Par exemple, dans une expérience « pompe-sonde », une première impulsion (la pompe) excite un système moléculaire en fragmentant des molécules ; grâce à la seconde impulsion (la sonde), l'état du système peut être connu un bref instant après l'excitation. Il est ainsi possible de décrire une séquence très rapide de ruptures ou de formations de liaisons chimiques, avec la perspective de les contrôler. Depuis quelques années, on sait même utiliser ces lasers pour produire des impulsions lumineuses mille fois plus courtes, de quelques attosecondes ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$), grâce auxquelles on peut suivre « pas à pas » le déplacement d'électrons dans la matière ! Le laboratoire Attolab, un équipement d'excellence financé par le programme Investissements d'avenir, est dédié à ce nouveau champ d'études parfois nommé attoscience. Il doit être mis en service en 2016 à l'université Paris-Saclay. Les physiciens



© P. Stropia/CEA

L'ENCEINTE D'INTERACTION du laser UHI100 (100 térawatts de puissance crête) en cours de mise au point au CEA-Saclay.

et les chimistes qui l'utiliseront pourront réaliser des observations avec une résolution d'une attoseconde dans le temps et d'un angström (10^{-10} m) dans l'espace.

**Plus de 100 fois
la puissance électrique
mondiale**

D'autre part, en concentrant fortement l'énergie lumineuse dans le temps, ces lasers atteignent des puissances instantanées gigantesques, de l'ordre du pétawatt ($1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ watts}$) ; on parle de laser UHI (ultra-haute intensité). Ainsi, un seul d'entre eux, occupant quelques centaines de mètres carrés seulement, délivre un faisceau de lumière dont la « puissance crête » est plus de cent fois supérieure à toute la puissance électrique produite dans le monde – mais cela pendant quelques femtosecondes uniquement !

Le laser Mégajoule (LMJ), quant à lui, atteint une telle puissance mille fois plus longtemps. Cependant, les lasers UHI offrent des perspectives scientifiques différentes du LMJ car il est possible de les focaliser sur une surface de quelques micromètres carrés, où ils créent un champ électromagnétique si intense qu'il peut propulser des électrons à 99,999 % de la vitesse de la lumière.

Des études sont menées dans différents pays pour construire des accélérateurs de particules très compacts recourant aux lasers UHI. Les applications envisagées concernent la recherche fondamentale en général et la médecine en particulier : la destruction de cellules tumorales par un faisceau de particules rapides (radiothérapie) pourrait tirer profit d'accélérateurs à la fois plus compacts et moins chers. ■

Philippe MARTIN est chercheur à l'Iramis, Institut rayonnement matière du CEA-Saclay. Il y dirige le Laboratoire interactions, dynamiques et lasers.