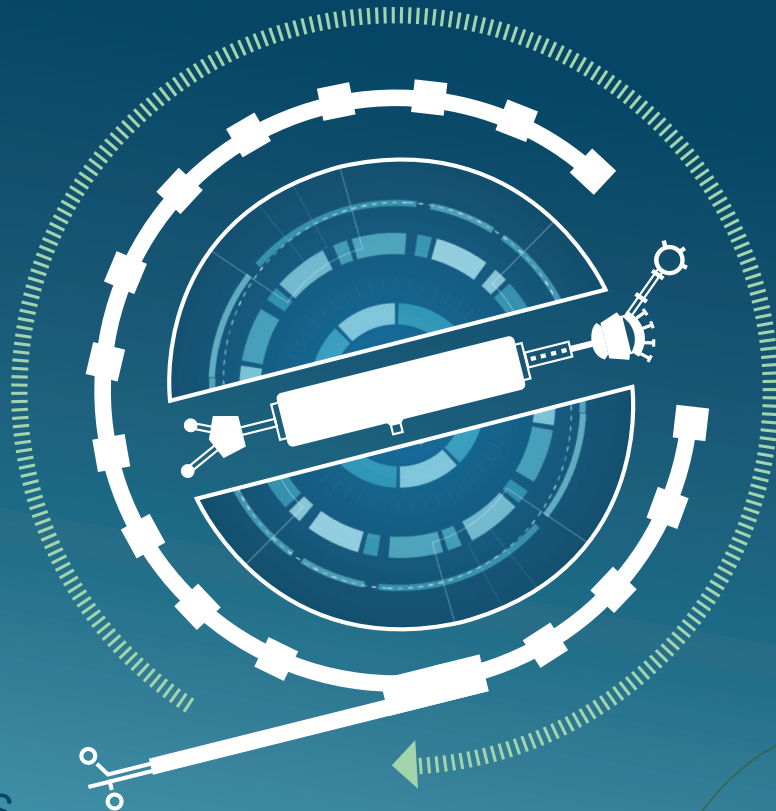


# IAEA BULLETIN

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE

La publication phare de l'AIEA | Mai 2022 | [www.iaea.org/fr/bulletin](http://www.iaea.org/fr/bulletin)



APPLICATIONS DES

## ACCÉLÉRATEURS

ET DES AUTRES SOURCES DE RAYONNEMENTS  
IONISANTS

Qu'est-ce qu'un accélérateur de particules ? p. 4

Redonner vie aux trésors archéologiques de l'Antiquité romaine  
grâce à la science nucléaire, p. 8

Mise en place d'installations émettant des rayonnements ionisants  
aux Philippines et au-delà, p. 22



### Le Bulletin de l'AIEA

est produit par

le Bureau de l'information  
et de la communication (OPIC)

Agence internationale de l'énergie atomique  
Centre international de Vienne  
B.P. 100, 1400 Vienne (Autriche)  
Téléphone : (43-1) 2600-0  
iaebulletin@iaea.org

Direction de la rédaction : Michael Amdi Madsen  
Rédaction : Miklos Gaspar  
Conception graphique et production : Ritu Kenn

Le Bulletin de l'AIEA est disponible à l'adresse  
suivante :

[www.iaea.org/bulletin](http://www.iaea.org/bulletin)

Des extraits des articles du Bulletin peuvent être  
utilisés librement à condition que la source soit  
mentionnée. Lorsqu'il est indiqué que l'auteur  
n'est pas fonctionnaire de l'AIEA, l'autorisation de  
reproduction, sauf à des fins de recension, doit être  
solicitée auprès de l'auteur ou de l'organisation  
d'origine.

Les opinions exprimées dans le Bulletin ne  
représentent pas nécessairement celles de l'Agence  
internationale de l'énergie atomique, et cette  
dernière décline toute responsabilité à cet égard.

Couverture : AIEA

Suivez-nous sur :



L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) a pour mission de prévenir la prolifération des armes nucléaires et d'aider tous les pays – en particulier ceux en développement – à tirer parti de l'utilisation pacifique, sûre et sécurisée de la science et de la technologie nucléaires.

Créée en tant qu'organisme autonome des Nations Unies en 1957, l'AIEA est le seul organisme du système des Nations Unies spécialisé dans les technologies nucléaires. Ses laboratoires spécialisés uniques en leur genre aident au transfert de connaissances et de compétences à ses États Membres dans des domaines comme la santé humaine, l'alimentation, l'eau, l'industrie et l'environnement.

L'AIEA sert aussi de plateforme mondiale pour le renforcement de la sécurité nucléaire. Elle a créé la collection Sécurité nucléaire, dans laquelle sont publiées des orientations sur la sécurité nucléaire faisant l'objet d'un consensus international. Ses travaux visent en outre à réduire le risque que des matières nucléaires et d'autres matières radioactives tombent entre les mains de terroristes ou de criminels, ou que des installations nucléaires soient la cible d'actes malveillants.

Les normes de sûreté de l'AIEA définissent un système de principes fondamentaux de sûreté et sont l'expression d'un consensus international sur ce qui constitue un niveau élevé de sûreté pour la protection des personnes et de l'environnement contre les effets nocifs des rayonnements ionisants. Elles ont été élaborées pour tous les types d'installations et d'activités nucléaires destinées à des fins pacifiques ainsi que pour les mesures de protection visant à réduire les risques radiologiques existants.

En outre, l'AIEA vérifie, au moyen de son système d'inspection, que les États Membres respectent l'engagement qu'ils ont pris, au titre du Traité sur la non-prolifération des armes nucléaires et d'autres accords de non-prolifération, de n'utiliser les matières et installations nucléaires qu'à des fins pacifiques.

Le travail de l'AIEA comporte de multiples facettes et fait intervenir un large éventail de partenaires aux niveaux national, régional et international. Les programmes et les budgets de l'AIEA sont établis sur la base des décisions de ses organes directeurs – le Conseil des gouverneurs, qui compte 35 membres, et la Conférence générale, qui réunit tous les États Membres.

L'AIEA a son siège au Centre international de Vienne. Elle a des bureaux locaux et des bureaux de liaison à Genève, à New York, à Tokyo et à Toronto. Elle exploite des laboratoires scientifiques à Monaco, à Seibersdorf et à Vienne. En outre, elle apporte son appui et contribue financièrement au fonctionnement du Centre international Abdus Salam de physique théorique à Trieste (Italie).

# Les accélérateurs et la technologie des rayonnements au service du développement durable

Par Rafael Mariano Grossi, Directeur général de l'AIEA

« Les protons confèrent à un atome son identité, et les électrons sa personnalité. » C'est ainsi que l'auteur Bill Bryson a un jour décrit de façon très imagée la structure de toute matière. C'est là une description tout à fait appropriée des constituants fondamentaux de l'univers. Chaque particule atomique, chaque élément chimique, chaque isotope nous révèle quelque chose sur la nature, l'histoire et les propriétés de la matière qu'ils composent. Les accélérateurs et les autres technologies des rayonnements sont des outils précieux pour étudier et utiliser les atomes.

On compte aujourd'hui plus de 20 000 accélérateurs en service dans le monde, de toutes tailles et de toutes formes. Ces appareils sont utilisés pour produire des radiopharmaceutiques, traiter des maladies, conserver des denrées alimentaires, surveiller l'environnement, renforcer des matériaux, comprendre les lois de physique fondamentale, étudier le passé et même élucider des affaires criminelles.

Cette édition du Bulletin de l'AIEA présente différents types d'accélérateurs et aborde les nombreuses façons dont l'AIEA promeut leur utilisation dans les domaines de la santé, de l'agriculture, de la recherche, de l'environnement et de l'industrie. Les diverses techniques faisant appel aux accélérateurs ont toutes un fonctionnement qui leur est propre et présentent différents avantages en fonction des types de rayonnement qu'elles produisent. Toute une gamme d'applications industrielles utilisant des accélérateurs et des sources de rayonnements sont indispensables à l'économie mondiale et à l'avancement du développement durable.

Les laboratoires de l'AIEA à Seibersdorf (Autriche) aident des chercheurs venus du monde entier à exploiter les rayonnements ionisants de diverses manières. Parmi les applications élaborées dans ces laboratoires, on trouve par exemple la mise au point de cultures résistantes aux contraintes environnementales, ainsi qu'une technique spéciale de lutte contre les ravageurs qui consiste à stériliser

les insectes mâles afin de réduire les populations de moustiques, de mouches tsé-tsé et de mouches des fruits en Amérique latine, en Afrique, en Asie et en Europe.

De nombreux autres exemples d'applications sont mis en avant dans cette édition du Bulletin : vous découvrirez notamment comment les rayonnements ionisants ont permis de préserver un ancien navire, comment ils sont utilisés pour transformer et recycler le plastique, comment ils protègent les denrées alimentaires contre l'altération et les ravageurs, et comment ils permettent de déterminer l'authenticité et l'âge de certains objets.

L'AIEA contribue à encourager l'innovation en ce qui concerne les technologies des accélérateurs et des rayonnements. Nous organisons à cette fin deux conférences importantes cette année : la toute première Conférence internationale sur les accélérateurs destinés à la recherche et au développement durable, et la deuxième Conférence internationale sur les applications de la science et de la technologie des rayonnements, qui aura pour objet d'examiner toute la gamme des sources de rayonnements ionisants existantes, au-delà des seuls accélérateurs.

Les spécialistes qui ont recours à ces technologies et qui en tirent le meilleur parti se réuniront à ces événements pour échanger leurs données d'expérience et meilleures pratiques afin de faire progresser et de disséminer les connaissances scientifiques en faveur du développement.

Alors que la société se tourne vers la science pour résoudre les grands problèmes existentiels, les scientifiques se tournent vers les accélérateurs et leurs applications pour trouver des réponses. L'AIEA les aide dans cette entreprise en veillant à ce que les pays de tous les continents aient accès à cette technologie nucléaire puissante et bénéfique.



(Photo : A. Abrunhosa/Université de Coimbra)

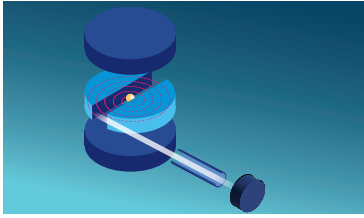


(Photos : AIEA)





## 1 Les accélérateurs et la technologie des rayonnements au service du développement durable



## 4 Qu'est-ce qu'un accélérateur de particules ?



## 6 Les accélérateurs : un outil pour comprendre l'environnement et lutter contre la pollution



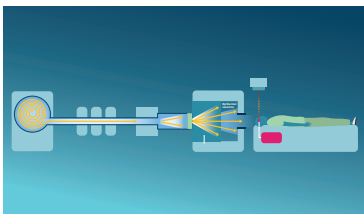
## 8 Redonner vie aux trésors archéologiques de l'Antiquité romaine grâce à la science nucléaire



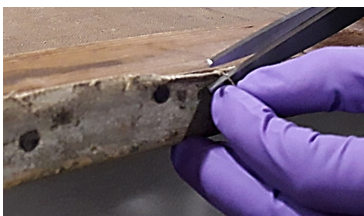
## 10 Pollution par le plastique Recycler à l'aide des rayonnements pour protéger l'environnement



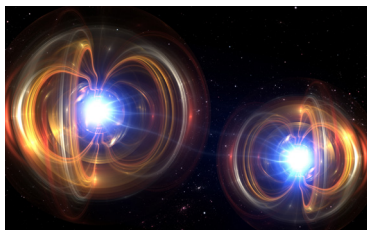
## 12 Simplifier la lutte contre les ravageurs qui touchent les aliments grâce à l'irradiation



## 14 Des neutrons pour les neurones et des cyclotrons pour les radio-isotopes



## 16 Les atomes au service de la vérité Des techniques d'analyse fondées sur les accélérateurs révèlent les contrefaçons



## 18 Modification quantique

Implantation d'atomes uniques à l'aide d'accélérateurs à des fins de biodétection



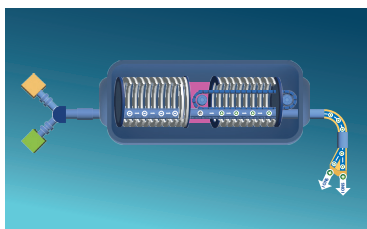
## 20 Mise au point de matériaux avancés grâce aux techniques nucléaires



## 22 Mise en place d'installations émettant des rayonnements ionisants aux Philippines et au-delà



## 24 Légiférer pour permettre l'utilisation sûre, sécurisée et pacifique des installations d'irradiation



## 26 Tout ce que vous devez savoir sur les faisceaux d'ions

### Q&R

## 28 L'irradiation industrielle au service d'un monde meilleur

### DANS LE MONDE

## 30 MYRRHA : un système piloté par accélérateur pour gérer les déchets radioactifs

— Par Hamid Aït Abderrahim, directeur général adjoint chargé des affaires internationales au SCK•CEN et directeur du projet MYRRHA

### INFOS AIEA

## 32 Actualités

## 36 Publications

# Qu'est-ce qu'un accélérateur de particules ?

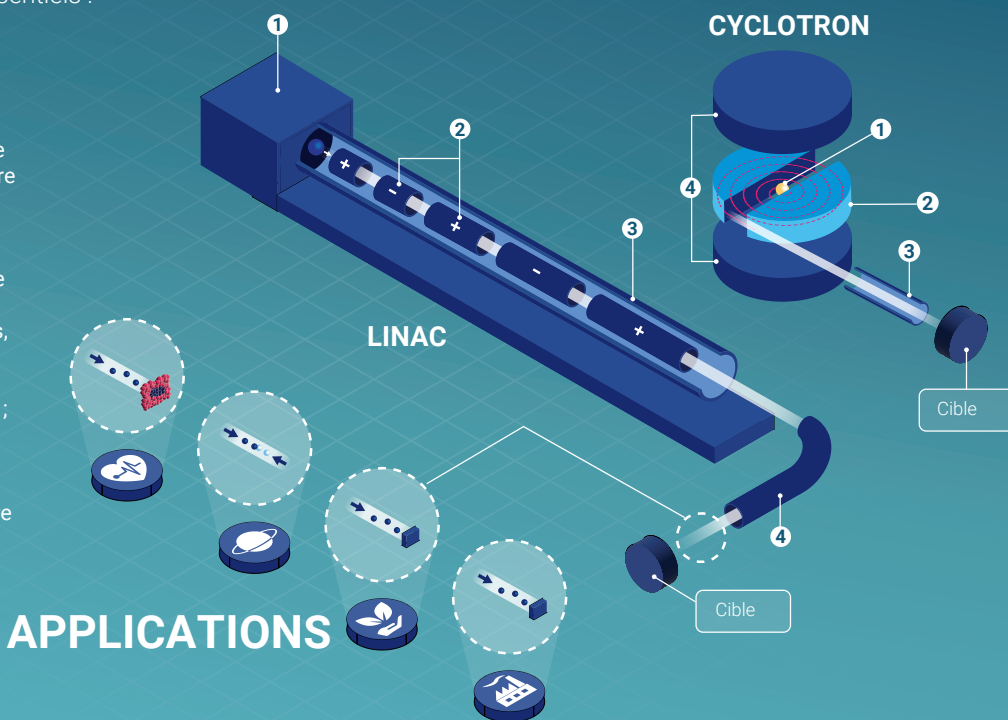
Par Sotirios Charisopoulos et Wolfgang Picot

## LES COMPOSANTS ESSENTIELS D'UN ACCÉLÉRATEUR DE PARTICULES

Les accélérateurs produisent et accélèrent des faisceaux de particules chargées de la taille d'un atome ou plus petites, telles que les électrons, les protons et les ions. Ils sont utilisés non seulement dans la recherche fondamentale pour nous aider à mieux comprendre de quoi est faite la matière, mais aussi dans un large éventail d'applications qui ont des retombées socioéconomiques et concernant la santé, le contrôle radiologique de l'environnement, la qualité des aliments, l'énergie ou les technologies aérospatiales, pour ne citer que quelques exemples.

Les accélérateurs peuvent être linéaires (rectilignes) ou circulaires et de taille très variable : certains mesurent des dizaines de kilomètres de long ; d'autres sont suffisamment compacts pour tenir dans une petite pièce. Mais tous les accélérateurs comportent quatre composants essentiels :

- ❶ une source qui produit les particules chargées ;
- ❷ un dispositif complexe qui augmente l'énergie des particules et les accélère au moyen d'un champ électrique statique ou oscillant ;
- ❸ une série de tubes métalliques à vide qui permettent aux particules de se déplacer sans rencontrer d'obstacles, tels que des molécules d'air ou des particules de poussière, qui risqueraient de disperser le faisceau ;
- ❹ un système d'électro-aimants qui concentre les particules du faisceau et les dirige ou modifie leur trajectoire avant de les propulser sur un échantillon de matière cible.



## APPLICATIONS DES FAISCEAUX DE PARTICULES



### SANTÉ

Les faisceaux sont employés pour stériliser le matériel médical et produire les isotopes radioactifs nécessaires à la synthèse des radiopharmaceutiques qui servent au diagnostic et au traitement du cancer. De gros accélérateurs permettent de détruire les cellules cancéreuses, de révéler la structure des protéines et des virus et d'optimiser les vaccins et les nouveaux médicaments.



### RECHERCHE

Les plus gros accélérateurs génèrent des collisions entre des particules subatomiques pour faire progresser notre connaissance de l'univers. Certains de ces accélérateurs sont également utilisés pour produire des neutrons.



### ENVIRONNEMENT

Les faisceaux de protons servent généralement à détecter les éléments chimiques présents à l'état de trace dans l'air, l'eau ou le sol. Ils nous permettent par exemple de déterminer la concentration et la composition de divers polluants et de fournir une signature unique renseignant sur la qualité de l'air.



### INDUSTRIE

Les faisceaux peuvent interagir avec les atomes d'un matériau cible, par exemple pour rendre ce matériau plus durable.

## TYPES D'ACCÉLÉRATEURS DE PARTICULES

### IMPLANTEURS IONIQUES

Les implanteurs ioniques sont très utilisés dans l'industrie, où ils servent notamment à rendre les matériaux plus résistants à l'usure. Dans le monde, environ 12 000 implanteurs sont utilisés pour produire des semi-conducteurs pour les téléphones portables et les panneaux solaires et renforcer les finitions en métal, en céramique ou en verre. Ces appareils peuvent aussi améliorer la fiabilité des matériaux entrant dans la composition des implants médicaux.

### LINACS

Les accélérateurs linéaires (linacs) peuvent être de toutes tailles, et mesurer de quelques mètres à plusieurs kilomètres de long. La plupart sont utilisés pour la recherche scientifique. Les linacs médicaux installés dans les hôpitaux créent des rafales de rayons X qui sont orientés vers les cellules tumorales pour les détruire. Un millier de linacs médicaux sont en service dans le monde.

### SYNCHROTRONS

Les synchrotrons sont des accélérateurs de particules géants. Il en existe plus de 70 dans le monde. Utilisés dans la recherche scientifique, ils nous aident à comprendre les lois fondamentales de notre univers. Les scientifiques utilisent les synchrotrons pour étudier la chimie, la biomédecine, le patrimoine naturel et culturel, l'environnement, et bien d'autres choses encore.

### LES ACCÉLÉRATEURS DE FAISCEAUX D'ÉLECTRONS DANS L'INDUSTRIE

On compte près de 10 000 accélérateurs de faisceaux d'électrons en service dans le monde. Ces appareils peuvent être utilisés pour rendre les matériaux plus durables et plus résistants aux températures extrêmes et aux produits chimiques. Les faisceaux d'électrons servent également à la stérilisation des produits médicaux et alimentaires ainsi qu'à la décontamination des eaux usées. Ils sont en outre très répandus dans les industries automobile et aérospatiale et sont employés à large échelle pour la fabrication de machines et de produits médicaux.

### CYCLOTRONS

Plus de 1 200 cyclotrons génèrent des faisceaux de protons ou de deutérons à des fins médicales dans le monde. Ils servent à produire des radio-isotopes, qui sont utilisés dans l'imagerie médicale pour diagnostiquer et traiter les cancers. De nombreux cyclotrons sont installés dans des hôpitaux pour produire des radiopharmaceutiques constitués de radio-isotopes de courte période.

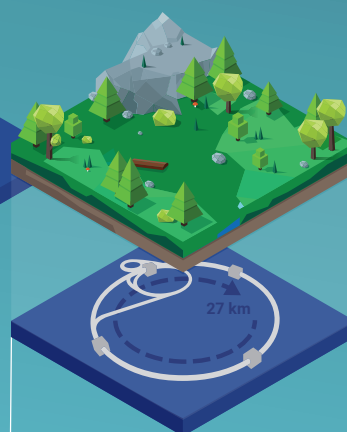
### ACCÉLÉRATEURS ÉLECTROSTATIQUES

Les accélérateurs électrostatiques, en particulier les accélérateurs tandem, sont plus abordables. Les scientifiques s'en servent pour examiner les propriétés des matériaux, surveiller l'environnement, soutenir la recherche biomédicale, étudier les objets du patrimoine culturel, entre autres usages. D'après les spécialistes, le nombre d'accélérateurs électrostatiques utilisés dans le monde – 300 actuellement – devrait augmenter au cours des prochaines années.

À L'HEURE ACTUELLE,  
PLUS DE  
**20 000**  
ACCÉLÉRATEURS  
SONT UTILISÉS  
DANS LE MONDE

**TAILLE**

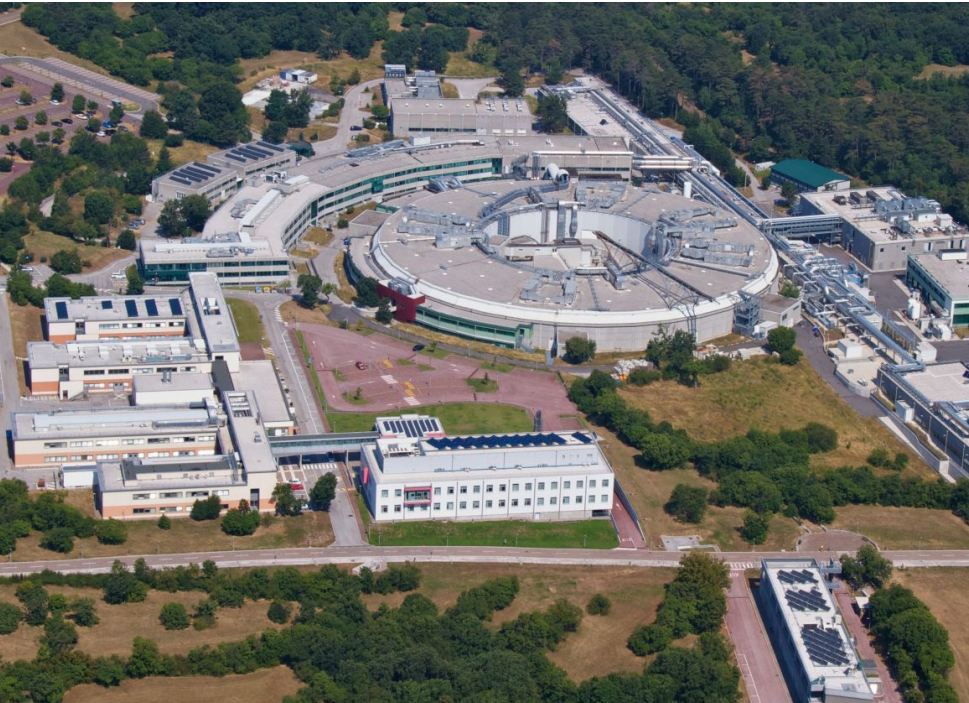
SUFFISAMMENT  
COMPACTS POUR  
TENIR DANS UNE  
PETITE PIÈCE  
LINAC  
MÉDICAL



OU MESURANT PLUSIEURS  
DIZAINES DE KILOMÈTRES  
SYNCHROTRON

# Les accélérateurs : un outil pour comprendre l'environnement et lutter contre la pollution

Par Lenka Dojcanova



**Elettra-Sincrotrone Trieste en Italie.**

(Photo : Elettra - Sincrotrone Trieste)

Les métaux lourds, tout comme certains produits chimiques toxiques, peuvent polluer l'air, l'eau et les sols et, partant, nuire à la flore et à la faune. Pour neutraliser ces éléments, les scientifiques doivent d'abord mieux comprendre leur comportement. Un effort auquel contribuent les accélérateurs, qui utilisent des faisceaux de particules chargées pour frapper certaines matières afin d'analyser ou de modifier leur surface, leur composition, leur structure ou d'autres propriétés.

« Les techniques faisant appel à des accélérateurs offrent des possibilités uniques en leur genre et donnent, de manière rapide, non destructive et économique, de précieuses indications sur la pollution », déclare M. Román Padilla, physicien spécialiste de l'instrumentation nucléaire à l'AIEA. « Des accélérateurs de particules capables d'appréhender et d'améliorer l'environnement, il en existe de toutes formes et toutes tailles, et les méthodes reposant sur des faisceaux d'ions produits par un accélérateur sont particulièrement adéquates pour caractériser des échantillons de sols, de sédiments, de biote, d'eau ou de fines particules d'air. »

Les accélérateurs les plus couramment employés à des fins de caractérisation d'échantillons prélevés lors d'un contrôle radiologique de l'environnement sont les accélérateurs électrostatiques (voir page 4).

L'évaluation de la pollution de l'air et de l'eau est essentielle face aux enjeux sanitaires mondiaux. Plus de 60 % de la population du globe vit en Asie, région qui compte 13 des plus grandes métropoles de la planète. La pollution de l'air et de l'eau est l'une des priorités majeures des zones fortement urbanisées du continent. Pour aider les experts à caractériser les échantillons d'air, l'AIEA recueille chaque semaine, en collaboration avec 15 pays asiatiques, des échantillons de particules en suspension, fines et grossières, qui ont une incidence sur la qualité de l'air que respirent plus de 110 millions de personnes. Entre 2002 et 2017, les techniques par faisceaux d'ions produits par un accélérateur ont non seulement révélé la présence de nombreux éléments dans les échantillons collectés, mais ont aussi permis d'identifier les sources probables de pollution atmosphérique.

En outre, les faisceaux d'électrons, qui sont différents des faisceaux d'ions (voir page 26), peuvent être utilisés pour le traitement des eaux usées ou des plastiques (voir page 10). Cette technique présente notamment un net avantage par rapport aux procédés classiques de traitement de l'eau tels que les traitements chimiques et biologiques, car les faisceaux d'électrons ne nécessitent aucun désinfectant chimique pour détruire les micro-organismes. Dans la province du Hubei, en Chine, une installation de traitement qui a recours à la technologie des faisceaux d'électrons s'est spécialisée dans la stérilisation des eaux usées médicales et la décomposition des antibiotiques. Dotée d'une capacité de traitement de 30 millions de litres d'eaux usées industrielles par jour, cette installation de traitement des eaux usées par irradiation est la plus grande du monde et a été construite sur la base d'une technologie transférée par l'AIEA. Le processus de traitement permet d'économiser 4,5 milliards de litres d'eau douce par an - de quoi étancher la soif de 100 000 personnes.

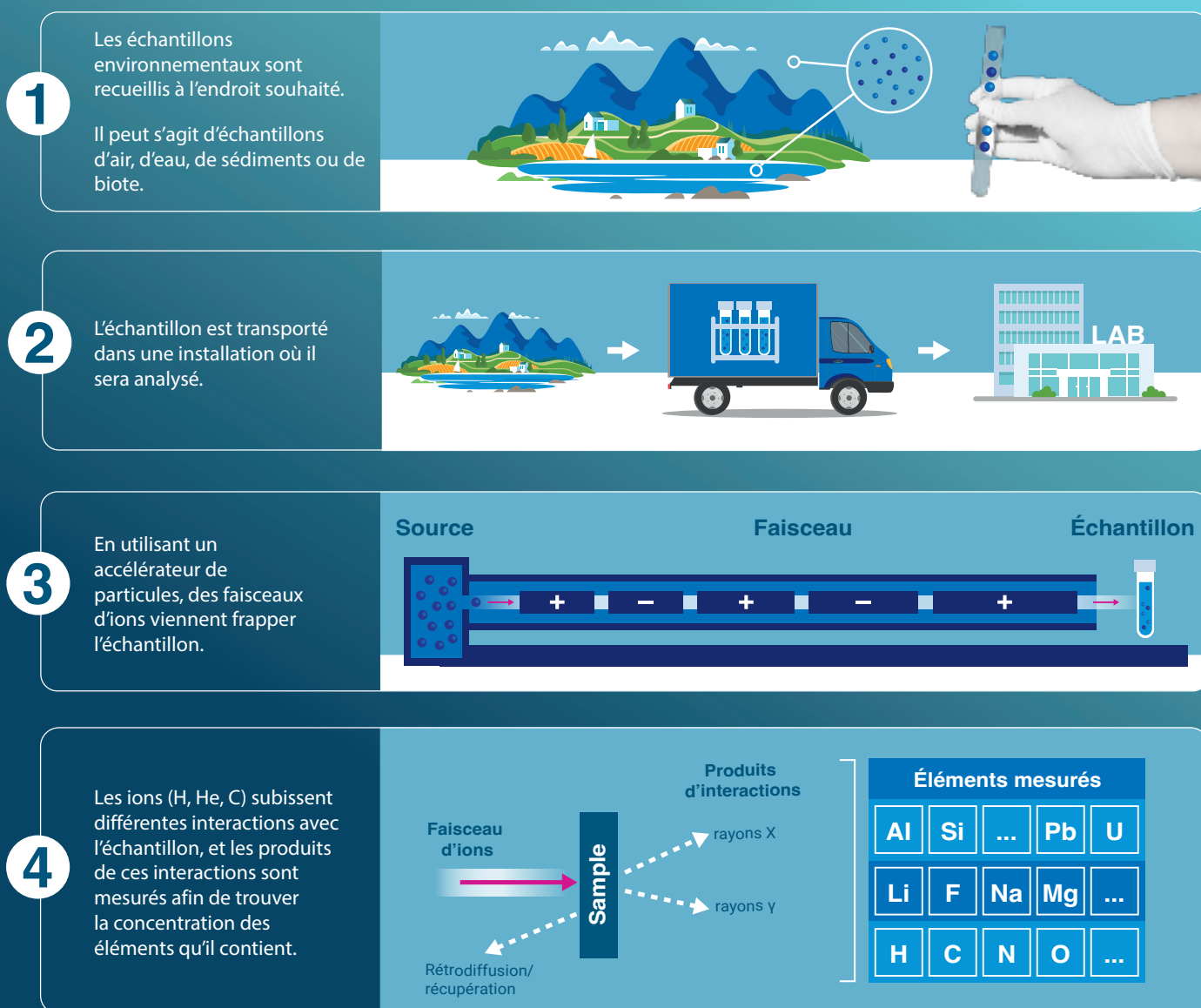
Les synchrotrons, un type particulier d'accélérateur annulaire, sont également utilisés dans les études environnementales et aident les experts à analyser les éléments, à cartographier leur distribution et à déterminer leur forme chimique. Ces accélérateurs complexes, dans lesquels les rayons X servent de sonde, peuvent être déployés dans des processus miniers et industriels, où les méthodes classiques ne peuvent fournir de données suffisantes pour anticiper des conséquences environnementales probables, l'évolution de la biodisponibilité



ou les risques associés à une contamination. Dans le secteur minier par exemple, les synchrotrons permettent de prédire le comportement futur de métaux ou de minéraux, et de prévoir ainsi leur déplacement ou leur dissolution.

Depuis plus de sept ans, l'AIEA exploite, conjointement avec le centre italien Elettra Sincrotrone Trieste (EST), un poste final polyvalent à la ligne de faisceaux à fluorescence X, et met au point de nouveaux équipements et de nouvelles méthodes d'analyse. Ces formes de collaboration permettent à l'Agence de soutenir et encourager les activités de recherche et de formation reposant sur le rayonnement synchrotron destinées à des groupes de chercheurs, notamment dans les pays qui n'ont pas suffisamment d'expérience ou

de moyens pour accéder aux installations de rayonnement synchrotron et pour les utiliser. Les expérimentations qui ont pu être ainsi menées ont servi à éclairer un certain nombre de questions environnementales dans plusieurs pays, notamment la présence de particules fines en suspension dans l'atmosphère et dans l'air à l'intérieur des bâtiments en Hongrie et en Jordanie, la distribution spatiale du plomb dans la végétation plantée en bordure de sites miniers en Espagne, la distribution et l'état chimique du cadmium accumulé dans les huîtres et les coquilles Saint-Jacques en Italie, la présence de titane dans les sols agricoles amendés avec des boues provenant de stations d'épuration des eaux au Mexique, ou encore les processus microscopiques associés à la décontamination de cours d'eau pollués par les mines en Italie.



(Illustrations : A. Vargas Terrones/AIEA)

# Redonner vie aux trésors archéologiques de l'Antiquité romaine grâce à la science nucléaire

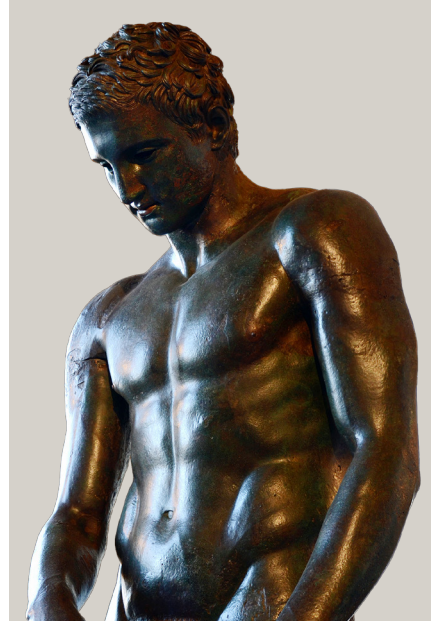
Par Michael Amdi Madsen

En 1996, le plongeur belge René Wauters fit la découverte archéologique de sa vie. Au large de Vele Orjule, un îlot croate de la mer Adriatique, il découvrit, par 45 mètres de fond, une mystérieuse statue antique en bronze. Pendant plus de dix ans, les chercheurs soumirent la statue à des examens minutieux reposant sur des techniques nucléaires afin de déterminer son âge, son origine et jusqu'aux méthodes employées pour l'ériger.

Cette statue représentant un athlète nu et musclé se raclant la peau pour en ôter la sueur et la poussière - un « Apoxyomène » - avait été ramenée à la surface en 1999 dans un état de corrosion très avancé et avait alors fait l'objet d'un long processus de désalinisation et de restauration, à l'issue duquel, en 2005, les archéologues étaient restés perplexes : le thème de l'Apoxyomène ayant été plusieurs fois exploré dans l'Antiquité, cette statue était-elle romaine ou grecque ? Il fut impossible de déterminer ses origines jusqu'en 2009, date à laquelle un accélérateur permit d'y voir plus clair.

« Pour déchiffrer le passé de cet Apoxyomène, il a fallu recourir à plusieurs techniques nucléaires afin de mieux comprendre sa structure au niveau atomique », explique Lena Bassel, administratrice adjointe chargée de projets pour la science du patrimoine à l'AIEA, qui aide des experts du monde entier à appliquer ces techniques à des fins de caractérisation d'artefacts. M<sup>me</sup> Bassel nous apprend ainsi que, selon une étude publiée dans le *Journal of Archaeological Science* en 2010, des chercheurs ont réussi, en appliquant la spectrométrie de masse par accélérateur à la matière organique trouvée à l'intérieur de l'Apoxyomène, à établir, par datation au carbone, que la statue avait été réalisée à une période comprise entre l'an 100 avant J.-C. et l'an 250 de notre ère.

Les chercheurs se sont également appuyés sur la technique de l'émission de rayons X induite par des microparticules (PIXE) pour déterminer la composition originale de l'alliage, et ont utilisé un spectromètre de masse multicollecteur à source plasma à couplage inductif pour mieux cerner la composition isotopique du plomb de la statue. Les isotopes sont des formes spécifiques d'un élément chimique qui varient selon leur masse atomique et leurs propriétés physiques. En examinant le rapport entre les différents isotopes du plomb dans un échantillon et en le croisant avec les propriétés connues de différentes zones géographiques, les scientifiques sont capables d'identifier la provenance de l'échantillon. « Ils ont utilisé la technique d'analyse reposant sur les accélérateurs et ont ainsi établi



**Les chercheurs ont utilisé des techniques faisant appel aux accélérateurs pour déterminer l'âge de l'Apoxyomène, son origine et les méthodes employées pour ériger cette statue.**

(Photo : Vassil / Wikimedia Commons)

que le plomb de la statue provenait des Alpes orientales ou de Sardaigne ; ils en ont conclu que la statue était une copie romaine d'un original grec », déclare M<sup>me</sup> Bassel.

Cinq ans plus tard, les chercheurs ont ré-examiné l'Apoxyomène à l'aide d'une technique PIXE à haute résolution latérale. Ils ont découvert que la partie incrustée des lèvres de l'athlète étaient faites de cuivre non allié très pur. La radiographie a révélé comment ces incrustations avaient été insérées, positionnées et fixées, et a permis de percer les techniques sophistiquées de moulage et d'assemblage des membres qui avaient été employées. Les chercheurs sont parvenus à la conclusion que l'Apoxyomène découvert en Croatie était manifestement une copie d'une statue beaucoup plus ancienne (datant du milieu du IV<sup>e</sup> siècle avant J.-C.), réalisée par une technique de moulage indirect cire perdue utilisant un alliage à faible teneur en plomb.

« Les techniques faisant appel aux accélérateurs jouent un rôle important dans la caractérisation des objets du patrimoine, et cet Apoxyomène nous montre qu'une approche combinant plusieurs types d'analyses est souvent nécessaire. L'AIEA s'efforce de promouvoir ces applications », précise M<sup>me</sup> Bassel. Depuis 2018, l'AIEA et ses États Membres ont mis en avant l'initiative intitulée « Atomes pour le patrimoine », et ont noué l'an dernier un partenariat stratégique avec l'Université de

Paris-Saclay, en France, en vue d'intensifier l'exploitation des techniques nucléaires dans la caractérisation et la préservation du patrimoine culturel et naturel. En collaboration avec l'AIEA, l'Université se concentrera principalement sur la recherche et le développement scientifiques, ainsi que sur le transfert de connaissances et bonnes pratiques avec des experts du monde entier.

## Une épave romaine exhumée du Rhône

Les techniques nucléaires exploitées en archéologie ne le sont pas seulement à des fins de caractérisation d'artefacts ; l'irradiation joue aussi, depuis longtemps, un rôle important dans la préservation de ces derniers. L'irradiation en 1977 de la momie du pharaon égyptien Ramsès II, vieille de 3 200 ans, destinée à éliminer les champignons et les insectes qu'elle contenait est restée célèbre, mais cette technologie a été depuis mise en œuvre dans de nombreux autres projets.

En 2004, un navire romain datant du premier siècle de notre ère a été découvert à Arles (France), gisant par moins de quatre mètres sous la surface du Rhône. Baptisé « Arles-Rhône 3 », le chaland en chêne de 31 mètres de long a probablement fait naufrage à la suite d'une crue soudaine qui l'a recouvert d'une couche d'argile fine.

« L'argile a permis de préserver le navire et ses précieux artefacts, mais les bactéries anaérobies ont dissous la cellulose du bois, qui a été remplacée par de l'eau. Cela a posé problème en 2011, lorsque des chercheurs ont envisagé de sortir le navire du lit du fleuve et de l'installer dans un musée, car, en séchant, le bois risquait de se désagréger », explique Laurent Cortella, ingénieur-chercheur à l'ARC-Nucléart, un atelier de restauration et de conservation situé à Grenoble.

ARC-Nucléart a eu l'idée de plonger le bois dans un bain de polyéthylène glycol, pour ensuite le lyophiliser et traiter certaines parties du navire par irradiation. « Comme pour

sécher de la colle avec un sèche-cheveux, les restaurateurs ont eu recours à l'irradiation pour solidifier la résine radio-réticulable et tenir ensemble la structure fibreuse du bois », précise Bum Soo Han, radiochimiste à l'AIEA, qui s'emploie, dans le cadre de l'initiative « Atomes pour le patrimoine », à promouvoir l'utilisation des technologies d'irradiation dans la préservation du patrimoine culturel. M. Han offre un soutien technique aux efforts de préservation culturelle à l'échelle mondiale et voit la demande pour de telles applications augmenter.

« Le chaland Arles-Rhône 3 est désormais exposé au Musée départemental Arles Antique, mais il n'est pas nécessaire de se rendre en France pour voir des exemples de préservation d'artefacts par irradiation ; ces techniques sont largement appliquées », indique M. Han. En 2017, l'AIEA a présenté, dans une publication intitulée « Uses of Ionizing Radiation for Tangible Cultural Heritage Conservation », quelques illustrations d'applications réussies de ces techniques dans le monde entier. M. Han planche actuellement sur la prochaine édition de cette série de publications de l'AIEA, qui portera sur les bonnes pratiques ayant recours aux rayonnements ionisants en matière de désinfection des artefacts et des archives du patrimoine culturel. Sa parution est prévue en 2023.



L'ancien navire romain Arles-Rhône 3 a été préservé grâce aux techniques nucléaires et est exposé au Musée départemental Arles Antique, en France.

(Photo : Cd13/MdDa/Chaland Arles Rhône 3 © Remi Benali)

# Pollution par le plastique

## Recycler à l'aide des rayonnements pour protéger l'environnement

Par Puja Daya

Située à plus de 5 000 kilomètres du continent le plus proche, l'île d'Henderson est peut-être l'endroit le plus isolé de la planète. Pourtant, malgré l'absence totale de population, cette île paradisiaque du Pacifique Sud est submergée par plus de quatre milliards de morceaux et de particules de plastique. Les déchets qui jonchent ses plages ne sont pas seulement déplaisants, ils sont également dangereux pour les animaux et les végétaux marins qui meurent coincés ou étranglés par le plastique. Ce type de décharge n'est qu'un exemple parmi d'autres de ce qui est advenu des plus de huit milliards de tonnes de plastique produites depuis 1950.

L'AIEA travaille avec des experts du monde entier pour changer ce destin et protéger la faune et la flore marines et l'environnement de la pollution par le plastique. Avec ses partenaires, elle étudie et développe des techniques fondées sur les rayonnements ionisants pour retraiter et recycler le plastique à un coût abordable. Une de ces techniques consiste à utiliser des accélérateurs de faisceaux d'électrons (voir page 26) pour irradier les déchets plastiques après consommation de façon à les recycler et à les transformer plus facilement en d'autres produits.

Cette technique est prometteuse car elle n'est pas entièrement nouvelle et a depuis longtemps fait ses preuves. On trouve des polymères irradiés partout, dans les pneus en caoutchouc des voitures comme dans les canalisations d'eau chaude ou les emballages alimentaires. « Si nous pouvons utiliser l'irradiation dans des applications industrielles pour donner de nouvelles propriétés au plastique, rien ne nous empêche de l'utiliser aussi pour modifier la forme et la structure de ce plastique afin d'en améliorer la recyclabilité et de réduire la quantité jetée », explique Celina Horak, chef de la Section des radio-isotopes et de la technologie des rayonnements de l'AIEA.

**Huit milliards de tonnes de plastique ont été produites depuis 1950. La plupart de ces déchets ne sont pas recyclés et finissent dans des décharges, dans les océans ou sur les plages.**

(Photo : M. Gaspar/AIEA)

Les plastiques sont composés de différents types de polymères, une substance formée de longues chaînes ou de réseaux de groupes d'atomes identiques appelés monomères. L'irradiation a divers effets sur les polymères qui sont bénéfiques pour le recyclage, la réduction et la réutilisation des déchets plastiques.

Un nouveau projet de recherche coordonné de l'AIEA visant à développer l'utilisation des rayonnements ionisants dans le recyclage des déchets polymères ouvre la voie de la recherche dans ce domaine. « L'irradiation des matériaux ne sert plus seulement à la fabrication mais aussi au recyclage. Les techniques fondées sur les rayonnements ionisants utilisées pour modifier les polymères sont donc pertinentes pour le traitement des déchets plastiques », affirme Bin Jeremiah Barba, spécialiste de la recherche scientifique à l'Institut philippin de recherche nucléaire. Les Philippines sont l'un des 18 pays qui collaborent pour déterminer comment les processus d'irradiation tels que la réticulation, la scission de chaîne, le greffage et d'autres modifications de surface peuvent aider les pays à développer des méthodes de recyclage plus abordables et accessibles.

### Réticulation

La réticulation désigne la formation de ponts entre les chaînes de polymères grâce à l'irradiation par faisceaux d'électrons. Ces liaisons permettent d'améliorer les propriétés des matériaux et de créer des produits plus durables, plus résistants et de meilleure qualité. C'est une pratique couramment utilisée dans la fabrication des pneus car elle permet de réduire la taille et l'épaisseur du caoutchouc, ce qui diminue le coût des matières premières et de la production et améliore la durabilité du produit.



## Dégradation

L'irradiation fonctionne quasiment en sens inverse dans le cadre de la scission de chaîne, qui consiste à couper, ou « dégrader », les polymères. « Ce processus fragilise la matière et la rend plus facile à broyer en polymères plus fins. Le polytétrafluoroéthylène, par exemple, un revêtement chimique plus connu sous son nom de marque, Téflon, est dégradé puis utilisé dans les lubrifiants pour huile de moteur et les additifs pour encre », explique Olgun Güven, un spécialiste de l'irradiation des polymères à l'Université Hacettepe, qui dirige les travaux dans ce domaine en Turquie. Dans le cadre du projet de recherche coordonnée, les experts cherchent à déterminer comment la scission de chaîne peut contribuer au recyclage chimique, qui consiste à décomposer un produit en ses éléments chimiques de base pour obtenir de nouvelles matières premières ou du combustible neuf. L'utilisation de la scission de chaîne aux fins du recyclage pourrait améliorer considérablement la production de nouveaux produits à partir de polymères à usage unique, ajoute M. Güven.

## Greffage

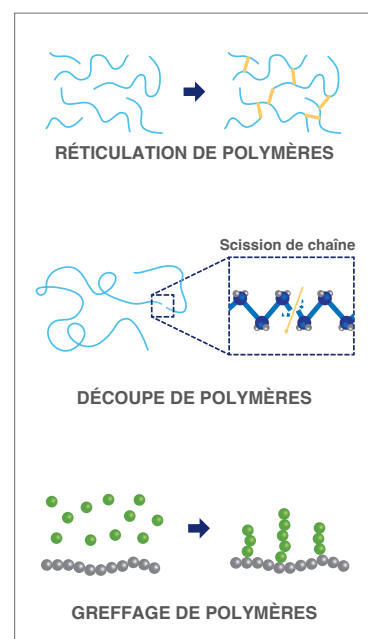
Le greffage consiste à faire pousser une courte chaîne polymérique adaptée à la surface d'un autre polymère pour en modifier les propriétés. Cette technique peut aussi être utilisée pour combiner des polymères normalement incompatibles afin de faciliter le remodelage et la restructuration des déchets.

Ce ne sont là que quelques exemples de la façon dont l'AIEA cherche à utiliser les rayonnements ionisants pour recycler les déchets plastiques. « Les outils utilisés dans l'industrie peuvent aussi servir au recyclage. Accessibles à un prix abordable, ils font partie de la solution pour réduire la quantité des déchets plastiques qui dégradent notre environnement », déclare Celina Horak. Elle ajoute que le projet de recherche coordonnée en cours améliorera et validera cette technologie

de recyclage du plastique et aidera à déterminer s'il est possible ou non de l'utiliser en pratique dans les pays. Il aboutira également à l'élaboration d'un plan pour le transfert et la mise à profit des connaissances.

En 2021, afin d'améliorer les capacités mondiales d'utiliser les techniques d'irradiation innovantes pour réduire les déchets plastiques par le recyclage, l'AIEA a lancé l'initiative Technologie nucléaire au service de la lutte contre la pollution par le plastique (NUTEC Plastics). Cette initiative, qui vise à aider les pays à utiliser diverses techniques nucléaires, fournit des données scientifiques permettant de caractériser et d'évaluer la pollution marine par les microplastiques, tout en montrant que les rayonnements ionisants peuvent être utilisés pour recycler le plastique et transformer les déchets plastiques en ressources réutilisables.

Les projets de recherche coordonnée menés dans le cadre de NUTEC Plastics aideront à générer des données scientifiques précises pour orienter les politiques en matière de pollution par le plastique, renforcer la méthode de suivi des plastiques et améliorer l'application à grande échelle de la technologie de recyclage. Les projets de coopération technique de l'AIEA menés dans le cadre de l'initiative permettent aux chercheurs de bénéficier de matériel et de formations pour diffuser les connaissances et faciliter les projets de recyclage du plastique. L'élaboration de lignes directrices, quant à elle, aidera les pays à mettre en place des installations qui permettront d'utiliser les techniques nucléaires pour lutter contre la pollution par le plastique.



# Simplifier la lutte contre les ravageurs qui touchent les aliments grâce à l'irradiation

Par Joanne Liou

Des épices, des graines, des fruits et des légumes qui voyagent depuis des contrées lointaines jusqu'à votre épicerie locale ? Cela est moins anodin qu'il n'y paraît. Une petite dose de rayonnements permet aux produits alimentaires de rester frais pendant tout le voyage sans propager d'organismes invasifs.

En partenariat avec l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), l'AIEA contribue aux progrès dans les domaines de l'irradiation alimentaire et phytosanitaire, afin d'aider à simplifier le processus de lutte contre les ravageurs et de faciliter le commerce international. L'irradiation alimentaire et l'irradiation phytosanitaire sont des traitements effectués après la récolte qui utilisent des rayonnements ionisants produits par une source, comme le cobalt 60, ou générés par des accélérateurs.

« Les rayonnements ionisants sont inoffensifs pour les aliments, mais pas pour les microbes ou les ravageurs invasifs, et ils permettent le commerce international », a déclaré Carl Blackburn, spécialiste de l'irradiation des aliments au Centre mixte FAO/AIEA des techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture.

**L'irradiation permet aux produits alimentaires, comme les fraises, de supporter de longs voyages tout en restant frais.**

(Photo : R. Mithare/Unsplash)

## Dispositifs d'irradiation locaux

Avant d'être expédiés vers leur destination finale, certains produits alimentaires sont d'abord préparés ou collectés sur leur lieu d'origine, emballés, puis acheminés vers une installation d'irradiation. Ces installations utilisent souvent le cobalt 60 comme source de rayonnements ionisants. « Le cobalt-60 est facile à utiliser pour les rayons gamma, mais il peut être difficile à obtenir et à transporter », a déclaré Carl Blackburn. « L'AIEA encourage une nouvelle approche simplifiée, en apportant l'irradiation sur place sous forme de rayonnements de faible intensité, comme des faisceaux d'électrons de faible énergie et des rayons X de faible énergie, où l'irradiateur peut être placé à l'intérieur d'une usine de production alimentaire ou d'un site de conditionnement. »

En 2021, un projet de recherche coordonné de l'AIEA a démontré qu'il était possible d'utiliser des faisceaux d'électrons de faible énergie et des rayons X mous pour réduire l'infestation et la contamination microbienne. « Cela signifie que les faisceaux d'électrons à faible énergie, ou électrons doux, peuvent être appliqués comme traitement de surface, et qu'ils n'ont pas d'incidence sur les propriétés qualitatives », a déclaré Setsuko Todoriki, qui a participé au projet et est responsable de la recherche à l'Organisation nationale de recherche sur l'agriculture et l'alimentation au Japon. « Leur niveau d'énergie



étant nettement plus faible que celui des faisceaux d'électrons classiques, les faisceaux d'électrons de faible énergie pourraient être installés sur les lignes de transformation et utilisés sur place. » Le projet a permis de développer des méthodes de dosimétrie pour les rayons X mous. Un nouveau projet de recherche coordonnée en cours, consacré aux traitements par faisceau de faible énergie, permet de développer et de promouvoir l'innovation en matière de traitement local des aliments grâce aux rayonnements, notamment l'élaboration d'outils et de techniques de dosimétrie des faisceaux d'électrons de faible énergie pour des aliments spécifiques, en collaboration avec des partenaires de l'industrie alimentaire.

### Mettre au point des traitements génériques

Au cours des 15 dernières années, le volume des produits de base irradiés pour raisons phytosanitaires a augmenté de manière significative pour atteindre près de 100 000 tonnes par an dans le monde. Toutefois, les produits alimentaires irradiés commercialisés ne représentent qu'une infime partie des produits traités par d'autres mesures phytosanitaires. Par exemple, le volume de mangues qui subissent un traitement à l'eau chaude au Mexique s'élève à environ 300 000 tonnes par an, a expliqué Guy Hallman, spécialiste des mesures phytosanitaires basé aux États-Unis d'Amérique. « L'irradiation phytosanitaire présente des avantages par rapport aux autres traitements phytosanitaires, tels que le froid, la chaleur et la fumigation, qui peuvent altérer

le goût ou la texture des aliments », a expliqué Guy Hallman. Le fait de disposer de normes en matière d'irradiation mieux acceptées au niveau international pourrait favoriser une plus large adoption de cette option de traitement et accroître les échanges, a-t-il ajouté.

La Convention internationale pour la protection des végétaux (CIPV), un traité multilatéral administré par la FAO, établit des normes pour prévenir et contrôler la propagation d'organismes nuisibles. Selon Carl Blackburn, ces normes constituent le fondement de tous les accords commerciaux bilatéraux relatifs aux fruits et légumes traités, mais les normes relatives au traitement par irradiation citent seulement des doses de rayonnement spécifiques à chaque espèce. Sur les 19 traitements par irradiation reconnus par la CIPV, seuls deux sont des traitements génériques qui empêchent les mouches des fruits de se propager par l'intermédiaire du commerce de produits frais et de se reproduire dans de nouvelles régions où elles pourraient faire des ravages sur l'agriculture et l'environnement.

En février 2022, l'AIEA a lancé un projet de recherche coordonnée pour remédier à ce problème et mettre au point au moins cinq traitements génériques d'irradiation phytosanitaire devant être adoptés par la CIPV afin de stimuler l'utilisation commerciale de l'irradiation phytosanitaire. Ces nouveaux traitements génériques par irradiation pourraient potentiellement résoudre plus de 90 % des problèmes de quarantaine concernant les fruits et légumes commercialisés, a déclaré Carl Blackburn.

## Les rayonnements pour stériliser les produits sanitaires

Au-delà des utilisations à des fins sanitaires, phytosanitaires et de qualité alimentaire, la technologie des rayonnements est utilisée à dose beaucoup plus élevée pour stériliser les produits sanitaires depuis les années 1950. Le traitement par rayonnements fait partie du processus de fabrication de près de la moitié des produits à usage unique dans le domaine médical, tels que les pansements, les gants, les blouses, les masques, les seringues et autres équipements. La radiostérilisation détruit les micro-organismes contaminants, tout en préservant les propriétés et les caractéristiques du produit.

« Près de 50 % des produits médicaux sont stérilisés à l'aide de technologies de rayonnements - rayons gamma, faisceaux d'électrons et rayons X - et il s'agit d'une tendance croissante », a déclaré Celina Horak, chef de la Section des radio-isotopes et de la technologie des rayonnements à l'AIEA. « En outre, les rayonnements ionisants sont un outil efficace et reconnu pour la stérilisation des équipements de protection individuelle (EPI), qui ont été très demandés pendant la pandémie de COVID-19. »

En 2020, après le début de la pandémie, l'AIEA a étudié la possibilité de stériliser des équipements médicaux usagés à l'aide de rayonnements ionisants. Il est ressorti de cette étude qu'il était possible de réutiliser des vêtements de protection médicale irradiés, à l'exception des masques respiratoires tels que les masques N95 et FFP2. L'étude a révélé que les masques usagés qui avaient été irradiés « présentaient une diminution significative de l'efficacité de la filtration dans le domaine submicronique ». Cette diminution est probablement due aux modifications des propriétés électrostatiques du filtre causées par l'irradiation.

# Des neutrons pour les neurones et des cyclotrons pour les radio-isotopes

Par Michael Amdi Madsen

Le glioblastome est une tumeur maligne agressive qui représente environ 15 % de toutes les tumeurs cérébrales. Même lorsqu'il est dans un premier temps contrôlé par le traitement, le cancer revient presque toujours. La chirurgie et la radiothérapie peuvent prolonger la survie de quelques mois, mais le cancer du cerveau met généralement fin à la vie dans un délai d'un à deux ans après le diagnostic, et moins de cinq pour cent des personnes atteintes survivent plus de cinq ans. Comme pour le glioblastome, de nombreux cancers crâniens sont difficiles à traiter en raison de la sensibilité des tissus cérébraux normaux à la chirurgie et à la radiothérapie, mais il y a un espoir que cela change bientôt, en partie grâce aux nouvelles thérapies rendues possibles par les accélérateurs produisant des sources intenses de neutrons.

« Si on vous parle d'effectuer des réactions nucléaires, vous n'imaginez probablement pas qu'une tête humaine soit le meilleur endroit pour le faire, mais vous auriez tort », a déclaré Ian Swainson, physicien nucléaire à l'AIEA. Il participe à l'élaboration des orientations de l'AIEA sur les applications des accélérateurs pour la production de neutrons, notamment dans le domaine médical. Il estime que l'utilisation de cette technologie dans le cadre d'un traitement du cancer en particulier, la thérapie par capture de neutrons par le bore (BNCT), est très prometteuse : « Tirer des neutrons sur des atomes de bore dans certains cancers du cerveau, de la tête et du cou peut permettre de sauver des vies ».

La BNCT utilise le pouvoir destructeur des neutrons et s'appuie sur le fait de localiser, autant que faire se peut, les dommages à la tumeur. L'exploitation de la capacité destructrice des neutrons est possible grâce aux isotopes 10 du bore. « Le bore 10 est non radioactif et excellent pour capturer les neutrons. En conséquence, dans le cadre d'une réaction nucléaire très localisée, le bore se brise en deux fragments énergétiques. Ainsi, en injectant à un patient des médicaments spéciaux qui délivrent du bore 10 sur les sites des tumeurs, nous visons le cancer en plein dans le mille », a expliqué Ian Swainson.

Technique encore essentiellement expérimentale, la BNCT n'est pas largement disponible, mais cela est en train de changer. En 2020, deux installations de BNCT ont commencé à administrer des traitements cliniques à Koriyama et à Osaka au Japon. La même année, l'AIEA et l'université japonaise d'Okayama ont décidé de renforcer leur coopération en matière de BNCT dans le cadre d'événements, d'échanges de connaissances et d'informations et de l'élaboration d'une base de données sur les installations de BNCT.

« La BNCT est une thérapie anticancéreuse de pointe », avait déclaré à l'époque Hirofumi Makino, président de l'Université d'Okayama. « C'est un mariage heureux entre la physique nucléaire moderne et la biologie cellulaire pharmaceutique contemporaine. Cependant, nous ne devons pas oublier que le développement de cette technologie médicale complexe a été une longue lutte. »

En 2001, l'AIEA a produit un rapport technique sur la BNCT, qui est devenu un ouvrage de référence dans ce domaine. À l'époque, les seules sources de neutrons concernées étaient les réacteurs de recherche. Depuis, une nouvelle génération de sources de neutrons compactes basées sur des accélérateurs et pouvant être installées directement dans les cliniques a été mise au point. Cela a conduit à un important regain d'intérêt pour la BNCT.

Des projets axés sur la BNCT sont également en cours en Argentine, en Chine, en Finlande et en République de Corée. « Il y a 20 ans, l'utilisation des neutrons des accélérateurs pour traiter le cancer n'était qu'une théorie. Maintenant c'est une réalité et nous traiterons de cette évolution dans un prochain document technique intitulé *Advances in Boron Neutron Capture Therapy* », a déclaré Ian Swainson.

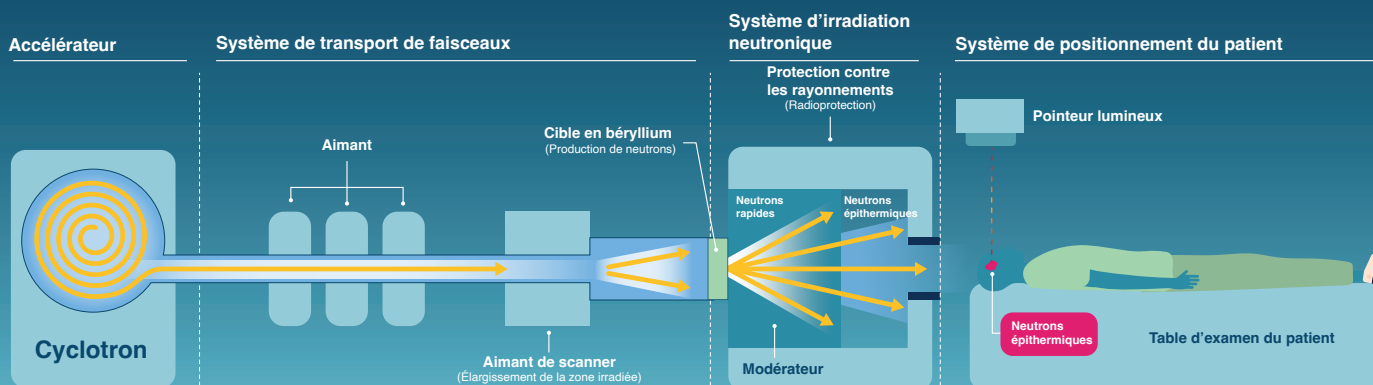
## Une révolution nommée cyclotron

Pour déterminer la faisabilité de la BNCT chez un patient, il faut lui injecter un composé du bore radiomarké au fluor 18 ( $^{18}\text{F}$ ), produit par des cyclotrons, puis soumettre le patient à l'imagerie à l'aide d'une technique de médecine nucléaire appelée tomographie à émission de positons-tomodensitométrie (PET-CT). Le composé marqué au  $^{18}\text{F}$  est appelé 4-borono-2- $^{18}\text{F}$ -fluoro-phénylalanine, ou FBPA.

« Le FBPA est important car il permet aux médecins de confirmer qu'une tumeur a absorbé un composé contenant du bore et qu'elle est prête pour la BNCT. Sans lui, la thérapie peut ne pas fonctionner. À mesure que la BNCT devient plus largement disponible, nous aurons besoin de cyclotrons pour répondre à la demande en FBPA », a déclaré Amirreza Jalilian, chimiste spécialiste des radio-isotopes et des radiopharmaceutiques à l'AIEA. Un cyclotron est un type d'accélérateur de particules qui produit des radio-isotopes utilisés en médecine nucléaire en envoyant un faisceau de particules sur des isotopes stables. L'interaction entraîne une réaction nucléaire qui produit des radio-isotopes de courte période. Comme ces radio-isotopes se désintègrent



## Représentation du système de BNCT approuvé sur le plan clinique au Japon



(Illustrations : A. Vargas Terrones/AIEA)

rapidement, ils doivent être produits sur le site où a lieu le traitement ou à proximité et être utilisés immédiatement.

Amirreza Jalilian note que, bien que le nombre de réacteurs de recherche utilisés pour la production de radio-isotopes soit plutôt stable, de nouveaux cyclotrons polyvalents et de plus en plus abordables se multiplient dans le monde. De nombreux radio-isotopes de courte période utilisés chez les patients peuvent être produits par des cyclotrons dans les hôpitaux, ce qui constitue un avantage majeur pour cette technologie.

Le fluorodésoxyglucose, un radiopharmaceutique, n'en est qu'un exemple parmi d'autres. Il nécessite du  $^{18}\text{F}$ , qui peut être produit à l'aide de cyclotrons. Ce radiotracer est utilisé dans environ 95 % des procédures de PET-CT et joue donc un rôle essentiel dans la neuro-imagerie et le diagnostic du cancer.

Un autre poids lourd parmi les radiopharmaceutiques est le gallium 68 ( $^{68}\text{Ga}$ ), composant clé de certains radiopharmaceutiques théranostiques - un type de médicament qui utilise des radio-isotopes à la fois pour le diagnostic et la thérapie par la libération de rayonnements. Ces radiopharmaceutiques jouent un rôle important dans le diagnostic et le suivi des cancers, et s'avèrent particulièrement prometteurs dans le traitement du cancer de la prostate. La production de  $^{68}\text{Ga}$  présente toutefois des difficultés.

« Aujourd'hui, la méthode la plus courante pour produire du  $^{68}\text{Ga}$  est un système sans accélérateur appelé générateur, mais les générateurs ne peuvent tout simplement pas produire suffisamment pour répondre à la demande. Les cyclotrons offrent un moyen alternatif efficace de production directe et

augmentent déjà considérablement la disponibilité du  $^{68}\text{Ga}$  », a déclaré Amirreza Jalilian, expliquant que dix centres dans le monde utilisent désormais régulièrement des cyclotrons pour produire du  $^{68}\text{Ga}$ . L'AIEA coordonne actuellement un projet de recherche visant à soutenir le partage de compétences spécialisées à l'échelle internationale en matière de production de  $^{68}\text{Ga}$  par cyclotron, et a publié en 2019 une publication consacrée à ce sujet intitulée *Gallium-68 Cyclotron Production*.

# Les atomes au service de la vérité

## Des techniques d'analyse fondées sur les accélérateurs révèlent les contrefaçons

Par Joanne Liou

L'analyse d'une peinture commence généralement par l'identification de l'artiste et la datation de l'œuvre et, à vrai dire, certains tableaux prétendument convoités se révèlent de véritables supercheries. Les contrefaçons d'œuvres d'art peuvent être lucratives et passer inaperçues, mais des techniques d'analyse comme la datation au carbone par spectrométrie de masse par accélérateur (SMA) permettent de les démasquer.

« Les techniques d'analyse nucléaire sont extrêmement puissantes pour déterminer la composition, l'origine, l'authenticité et l'âge d'échantillons ou d'objets. Elles ont donc une utilité directe en criminalistique », affirme Aliz Simon, physicienne nucléaire à l'AIEA. « Dans ce contexte, elles peuvent contribuer efficacement à différentes tâches, notamment à enquêter sur une fausse œuvre d'art, à détecter des cas de commerce illicite, des aliments contrefaits et de médicaments non conformes et à analyser des éléments de preuve, comme des morceaux de verre prélevés sur le lieu d'un délit. »

La criminalistique est l'utilisation de méthodes ou de techniques scientifiques pour l'examen d'éléments de preuve dans le cadre d'enquêtes judiciaires. Elle comprend toute une série de disciplines, de l'analyse de l'ADN et des empreintes digitales à l'analyse de la composition et du verre. Dans ce domaine, les accélérateurs servent à analyser la composition, la structure, l'âge et d'autres propriétés d'un matériau. « Les méthodes fondées sur les rayons X, les neutrons et les ions offrent des avantages par rapport aux méthodes traditionnelles », déclare Aliz Simon. « Elles permettent d'analyser une particule parmi des millions et d'en déterminer l'origine avec une grande précision, sans provoquer la moindre altération. »

### Datation au carbone

Toutes les matières vivantes, y compris les toiles (en fibres naturelles) et les cadres (en bois) d'un tableau, absorbent le carbone de l'atmosphère. Ils absorbent notamment du carbone 14, un isotope instable qui décroît à un rythme connu.

Lorsque les plantes ou les animaux meurent, cette absorption cesse et le carbone radioactif déjà accumulé décroît. On peut déterminer l'âge d'un matériau à partir de la quantité de carbone 14 présente, en mesurant les ratios isotopiques du carbone grâce à la SMA. La datation au carbone, comme on appelle cette technique, est largement utilisée pour dater les fossiles et a été appliquée plus récemment pour dater des œuvres d'art soupçonnées d'être des contrefaçons. « La datation au carbone d'une toile permet de déterminer la date la plus ancienne à laquelle l'œuvre a pu être réalisée, compte tenu du temps qui s'écoule entre la récolte du lin nécessaire à la fabrication de la toile et la peinture proprement dite de l'œuvre », explique Lucile Beck, responsable du Laboratoire de mesure du carbone 14 à l'Université Paris-Saclay (France).

La quantité de carbone 14 dans l'atmosphère a fluctué récemment, en particulier depuis le milieu des années 1940 et 1950, du fait des essais d'armes nucléaires. La concentration du carbone 14 dans l'atmosphère a atteint un pic vers 1964 avant de diminuer. « On peut facilement identifier les matériaux qui contiennent du carbone radioactif provenant d'armes modernes car leur concentration en carbone 14 est plus élevée que les niveaux d'avant les années 1950 », déclare M<sup>me</sup> Beck.

En 2019, dans le cadre d'une enquête menée par l'Office central français de lutte contre le trafic des biens culturels, M<sup>me</sup> Beck a examiné deux tableaux provenant d'une collection censée dater de la fin du XIX<sup>e</sup> et du début du XX<sup>e</sup> siècle. Les chercheurs ont prélevé des échantillons de fibres sur les toiles et les ont réduits à environ un milligramme de carbone, qu'ils ont ensuite analysé par SMA.

« Grâce à la datation au carbone par SMA, nous avons pu prouver que les deux tableaux, un impressionniste et un pointilliste, étaient des faux », conclut M<sup>me</sup> Beck. « La quantité de carbone 14 détectée dans les fibres était trop importante pour que les tableaux aient pu être peints au début du XX<sup>e</sup> siècle par les artistes présumés, qui sont morts dans les années 1940. Le contenu des fibres a révélé que les toiles avaient été fabriquées au milieu des années

1950 ou, plus probablement, après l'an 2000. » Les niveaux de carbone 14 mesurés correspondaient aux niveaux d'avant et après le pic des années 1960.

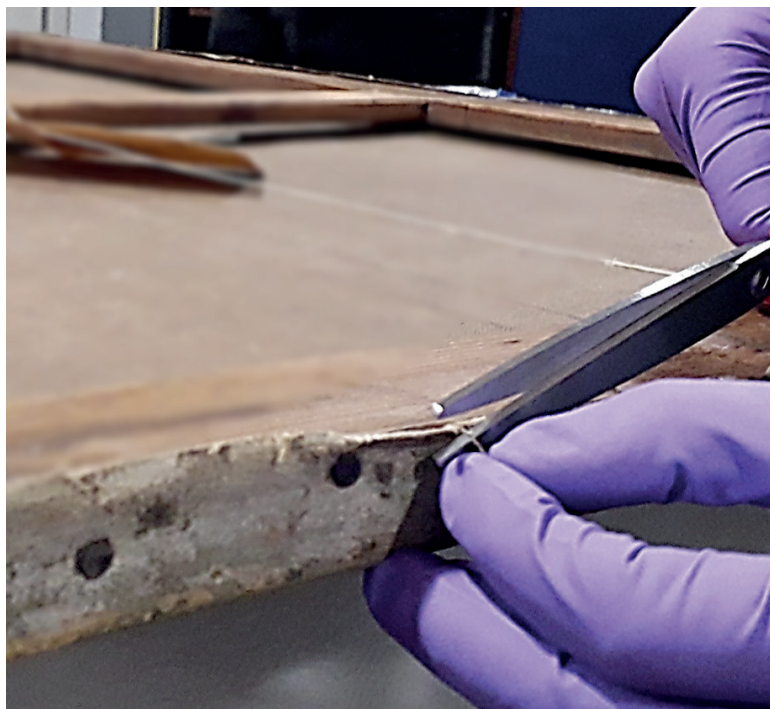
### **Accélérer l'utilisation de la science nucléaire en criminalistique**

En 2017, l'AIEA a lancé un projet de recherche coordonnée de quatre ans pour améliorer les techniques d'analyse nucléaire au service de la criminalistique. Ce projet s'articulait autour de trois grands domaines : l'analyse du verre, l'authentification des aliments et le patrimoine culturel, y compris l'enquête sur les contrefaçons d'œuvres d'art. Les participants venaient du Brésil, de la Croatie, de la Finlande, de la France, de la Hongrie, de l'Inde, d'Israël, de l'Italie, de la Jamaïque, du Portugal, de Singapour, de la Slovénie, de la Suisse et du Vietnam. Les résultats de certains travaux, notamment l'analyse d'échantillons de café et de verre de pare-brise et l'étude de contrefaçons d'œuvres d'art en France, ont déjà été publiés dans un numéro spécial de la revue *Forensic Science International*.

Dans le cadre du projet, en 2019, l'AIEA a organisé un atelier à Trieste (Italie), conjointement avec le Centre international Abdus Salam de physique théorique, pour mettre en évidence la manière dont les techniques fondées sur les accélérateurs peuvent compléter les méthodes classiques de criminalistique dans les enquêtes judiciaires. En parallèle, elle a lancé une formation en ligne sur les techniques d'analyse nucléaire au service de la criminalistique.

Forte de la réussite de ce projet, l'AIEA a signé en 2021 un mémorandum d'accord avec l'Institut interrégional de recherche des Nations Unies sur la criminalité et la justice (UNICRI) afin de renforcer la coopération en vue de prévenir et de contrer les activités illicites grâce à la science et à la technologie nucléaires.

Dans le prolongement, l'AIEA prévoit de lancer un projet de recherche coordonnée de suivi axé sur la détection du commerce illicite d'objets du patrimoine et de l'extraction illicite de métaux précieux.



**Une fibre d'une prétendue toile impressionniste est prélevée pour vérifier s'il s'agit d'une contrefaçon.**

(Photo : L. Beck/Université de Paris-Saclay)

# Modification quantique

## Implantation d'atomes uniques à l'aide d'accélérateurs à des fins de biodétection

Par Joanne Liou

Ces dix dernières années, les accélérateurs ont été employés intensivement dans le domaine de la technologie quantique afin de modifier et de caractériser les matériaux. Le principe consiste à utiliser des ions de haute énergie pour modifier les structures atomiques des matériaux, ce qui permet aux scientifiques de contrôler le comportement des atomes pris séparément. Les accélérateurs ont principalement été utilisés pour l'implantation ionique, une technique connue depuis plusieurs dizaines d'années largement utilisée dans l'industrie des semi-conducteurs.

« Dans le cas des semi-conducteurs, on implante un grand nombre d'ions dans, par exemple, du silicium, afin d'en modifier les propriétés électriques », explique Andrew Bettioli, professeur associé à l'Université nationale de Singapour. « Pour les technologies quantiques, l'objectif est très différent. On veut contrôler les ions individuellement. On n'implante donc pas des millions ou des milliards d'ions, on en implante un seul. »

La difficulté à cet égard est de déterminer quand, où et si, en fait, un ion unique est implanté. « Ce n'est pas parce que vous implantez un ion dans la matière que celui-ci se comporte forcément comme il le devrait en tant que qubit ou centre de couleur », ajoute Andrew Bettioli. Les qubits, ou bits quantiques, sont des versions complexes des bits porteurs d'information utilisés en informatique

conventionnelle, et les centres de couleur sont des défauts qui émettent de la lumière utilisée en détection quantique.

En mai 2021, l'AIEA a organisé un atelier de formation virtuel de quatre jours sur l'ingénierie des matériaux à l'aide de faisceaux d'ions, au cours duquel l'instrumentation par faisceau d'ions focalisé et la détection d'ions uniques ont été présentées sommairement. Plus de 80 personnes, dont la moitié issues de pays en développement, ont assisté à cet atelier, qui s'inscrivait dans le cadre d'un projet de recherche coordonnée. L'objectif était de faire mieux comprendre le domaine quantique et d'y intéresser de nouveaux acteurs. En parallèle, l'AIEA a lancé une formation en ligne consacrée à l'ingénierie des matériaux à l'aide de faisceaux d'ions pour les technologies quantiques, qui vise à mobiliser la prochaine génération d'experts du domaine quantique.

« L'AIEA joue un rôle de premier plan dans la coordination des travaux internationaux de collaboration et de recherche-développement sur les technologies quantiques en phase avec les initiatives nationales et internationales », déclare Aliz Simon, une physicienne nucléaire travaillant sur les accélérateurs à l'AIEA. « Elle poursuit ses travaux de recherche coordonnée afin d'exploiter les avantages des quanta pour le plus grand bien de la société. » Un nouveau projet de l'AIEA, dont le lancement est prévu plus tard dans l'année, favorisera la mise au point et l'optimisation d'une plateforme de biocapteurs basée sur les centres

de couleur dans un diamant, qui permettra d'étudier les mécanismes intracellulaires. Dans le domaine quantique, les diamants sont utilisés comme semi-conducteurs pour détecter les champs électriques et magnétiques dans des cellules vivantes prises individuellement.

### Centres de couleurs et détection quantique

Le diamant, sous sa forme la plus pure, est un réseau d'atomes de carbone comportant plus de 500 défauts connus qui émettent de la lumière. L'un de ces défauts est le centre azote-lacune (NV), qui est causé par l'absence d'un atome de carbone, qui crée une lacune, et la substitution d'un atome de carbone voisin par un atome d'azote. « Les centres NV peuvent survenir naturellement à des emplacements aléatoires. Avec les accélérateurs, on peut aussi les créer artificiellement par implantation ionique, à des endroits précis, dans des cristaux de diamant nanométriques », explique Andrew Bettiol. Les centres NV peuvent être intégrés dans des cristaux de diamant nanométriques, on peut les contrôler à température ambiante et ils sont biocompatibles, c.-à-d. qu'ils ne sont ni dangereux ni toxiques pour les systèmes vivants.

Les centres NV des diamants permettent de détecter les champs magnétiques grâce à une technique appelée « détection optique de la résonance magnétique » (ODMR). Cette capacité de visualiser les champs magnétiques a des

implications à la fois en biologie et en science des matériaux. « Il s'agit d'une manière optique d'observer l'émission de lumière et de détecter les minuscules champs magnétiques qui se produisent dans les processus biologiques », explique Andrew Bettiol. « Cette technique de biodétection quantique pourrait être utilisée pour visualiser ou mesurer des processus au niveau cellulaire qui ont un très petit champ magnétique, comme les champs magnétiques générés dans notre cerveau lorsque nos neurones s'activent. »

M. Bettiol utilise actuellement la technique ODMR pour détecter le paludisme. « Les globules rouges infectés par le paludisme ont de minuscules particules magnétiques que l'on peut détecter avec l'ODMR », indique-t-il. « Tout ce qui produit un champ électromagnétique pourrait potentiellement être détecté grâce à cette méthode. »

Le nouveau projet de l'AIEA permettra d'étudier plus en détail l'ODMR ainsi que la caractérisation et l'optimisation des dispositifs de détection. Il rassemble des chercheurs ayant un intérêt commun pour la biodétection et fait suite à un projet antérieur de plus grande portée visant à perfectionner les outils à faisceau d'ions basés sur les accélérateurs. « L'AIEA est un bon mécanisme de collaboration. Elle a créé une communauté d'experts qui peuvent échanger des informations et apprendre les uns des autres », se félicite Andrew Bettiol.

**Un nouveau projet de l'AIEA favorisera la mise au point et l'optimisation d'une plateforme de biocapteurs qui permettra d'étudier les mécanismes intracellulaires.**

(Photo : Adobe Stock)

# Mise au point de matériaux avancés grâce aux techniques nucléaires

Par Anass Tarhi

Des emballages alimentaires actifs à base de nanocomposites chargés d'huiles essentielles aux polymères super-absorbants radiogreffés, les matériaux avancés traités par irradiation jouent un rôle de plus en plus important dans la réduction des déchets alimentaires, l'amélioration de la performance agricole et des soins de santé et bien plus encore.

En plus d'être légers et faciles à fabriquer, les matériaux avancés modifiés à l'aide de techniques nucléaires sont plus performants et plus durables. Les technologies des rayonnements, notamment celles fondées sur les accélérateurs, ont affermi leur position et contribuent au développement durable via de nombreuses applications.

## Utilisations des matériaux avancés

Plusieurs procédés radio-assistés sont maintenant bien connus et appliqués dans le secteur industriel pour créer des matériaux avancés ou améliorer la production de matériaux de haute performance. L'exposition à des rayonnements, par exemple, accroît l'adéquation du plastique et du caoutchouc, ce qui permet la production de divers articles, comme des tubes en plastique résistant à la chaleur et à la pression qui servent pour les canalisations d'eau et de chauffage dans les bâtiments.

« On trouve des matériaux de haute performance produits par irradiation partout et dans tout », déclare Celina Horak, chef de la Section des radio-isotopes et de la technologie des rayonnements à l'AIEA. « Tous les objets du quotidien rendus plus solides et plus sûrs en contiennent. Certains de ces matériaux servent même à rendre notre mode de vie plus durable. »

Le radiotraitement est aussi utilisé pour faire sécher ou durcir des peintures, encres et revêtements sans solvant et pour améliorer la solidité, la résistance à la température et l'imperméabilité des emballages biosourcés et biodégradables. De la céramique poreuse contenant des nanoparticules d'argent générées in situ sert désormais à purifier l'eau dans les communautés rurales dans de nombreux pays.

## Avantages des matériaux avancés dans le contexte du changement climatique

Pour répondre à la demande énergétique croissante tout en luttant contre le changement climatique, des progrès doivent être réalisés dans la production, l'entreposage et le recyclage des énergies renouvelables. « Les technologies des rayonnements conviennent bien pour la fabrication de membranes spécifiques et de composites de base pour les piles à combustible, pour produire de l'énergie renouvelable plus efficacement », indique Xavier Coqueret, professeur à l'Université de Reims Champagne-Ardenne. Selon lui, le prétraitement par rayonnements peut être utilisé pour améliorer la biomasse lignocellulosique ou la conversion de l'énergie solaire par des systèmes photovoltaïques avancés.

Pour combattre un autre problème environnemental, à savoir la charge des déchets plastiques dans le monde, des méthodes de recyclage efficaces faisant appel aux rayonnements doivent être utilisées afin de concevoir des produits plastiques et composites avancés qui ne seraient pas réutilisables avec les méthodes traditionnelles, ajoute Xavier Coqueret (voir la page 10).

## Effets des rayonnements sur les matériaux avancés

Des matériaux solides, résistants et durables, essentiels dans l'industrie en général, sont d'autant plus importants dans le secteur nucléaire, où la sûreté des réacteurs et la faisabilité des opérations du cycle du combustible dépendent des matériaux utilisés. Les deux principales contraintes pour les matériaux utilisés dans les réacteurs nucléaires sont la chaleur - traitée grâce aux systèmes de refroidissement - et les rayonnements.

« Les matériaux structurels à l'intérieur des réacteurs nucléaires peuvent être endommagés par les neutrons rapides, qui expulsent les atomes et produisent de l'hydrogène ou de l'hélium sous forme de gaz. Cela peut provoquer un gonflement, la création de vides ou d'autres modifications structurelles et mécaniques qui limitent la durée de vie utile des matériaux », explique Ian Swainson, physicien nucléaire à l'AIEA. « Il est donc primordial de tester la résistance aux rayonnements des matériaux, et les accélérateurs offrent des moyens supplémentaires d'effectuer de tels tests. »

Les particules chargées perdent la plupart de leur énergie vers la fin de leur parcours à travers un matériau, provoquant des dégâts importants mais localisés. C'est pourquoi les chercheurs testent les matériaux susceptibles d'être employés dans les futurs réacteurs nucléaires en utilisant des particules chargées produites par des accélérateurs de faisceaux d'ions.

« On peut tester les matériaux plus rapidement avec un accélérateur qu'avec un réacteur », explique Ian Swainson, précisant que ce qui peut être fait en un jour avec un accélérateur peut prendre un an avec un réacteur à haut flux. En général, les échantillons ne deviennent pas radioactifs et les zones endommagées peuvent être soigneusement sectionnées et examinées à l'aide de techniques microscopiques.

En 2016, Ian Swainson a contribué à l'organisation d'un projet de recherche coordonné de l'AIEA d'une durée de cinq ans, dans le cadre duquel des échantillons d'un même matériau ont été distribués à plusieurs installations d'accélérateurs afin d'y être irradiés dans des conditions identiques, ainsi qu'au réacteur de recherche à neutrons rapide BOR-60, en Fédération de Russie, à des fins de comparaison. L'analyse postérieure aidera à améliorer la reproductibilité entre les installations d'accélérateurs et montrera avec quelle efficacité les accélérateurs permettent d'écartier les matériaux peu performants.

En août 2022, l'AIEA organisera la deuxième Conférence internationale sur les applications de la science et de la technologie des rayonnements (ICARST-2022) afin d'étudier ces questions et de mettre en lumière les applications et les nouveautés liées aux rayonnements ionisants. La conférence portera, entre autres, sur les avancées et les limites technologiques ou économiques actuelles dans des domaines spécifiques des matériaux avancés et permettra d'examiner les résultats obtenus avec des procédés d'irradiation bien connus en ce qui concerne l'amélioration de la performance des matériaux.

**Les barres utilisées dans les réacteurs nucléaires sont faites de matériaux avancés et doivent résister à la chaleur et aux rayonnements.**

(Photo : Adobe Stock)

# Mise en place d'installations émettant des rayonnements ionisants aux Philippines et au-delà

Par Puja Daya

Le cancer est la deuxième cause de mortalité aux Philippines, selon les chiffres de l'Observatoire mondial du cancer pour 2020, puisque le pays enregistre près de 100 000 décès liés au cancer par an. La détection précoce des tumeurs est essentielle pour réduire ce taux de mortalité, mais comme un scanner d'imagerie médicale coûte en moyenne près de 2 000 dollars des États-Unis, de nombreux Philippins ne peuvent même pas s'en offrir un.

« L'un des principaux problèmes rencontré aux Philippines est le manque de ressources pour maintenir et renforcer la détection du cancer. De ce fait, de nombreux patients atteints de cancer ne sont donc ni diagnostiqués ni traités », a déclaré Carlos Arcilla, directeur de l'Institut philippin de recherche nucléaire. Carlos Arcilla et son équipe espèrent remédier à ce manque de capacités en créant un nouveau cyclotron - un type d'installation de rayonnements ionisants - à Manille, afin de produire des radiopharmaceutiques essentiels au diagnostic et au traitement du cancer, ainsi que des maladies cérébrales et cardiovasculaires.

Actuellement, les Philippines ne disposent que de quatre cyclotrons, mais ceux-ci appartiennent à des acteurs privés, et parce que le pays ne dispose que d'un nombre limité d'installations de tomographie à émission de positons-tomodensitométrie (PET-CT), seuls cinq pour cent des patients atteints de cancer peuvent recevoir un diagnostic. Les cyclotrons sont des accélérateurs qui produisent des radiopharmaceutiques, qui sont administrés aux patients avant la réalisation d'une PET-CT - un examen médical qui crée des images 3D de haute qualité, généralement d'organes et de tissus, pour aider à détecter des maladies et à visualiser des tumeurs. Avec un nouveau cyclotron, les Philippines pourraient produire davantage de radiopharmaceutiques dans le pays, ce qui faciliterait l'accès à la PET-CT.

Doté d'un cyclotron et d'un scanner de PET-CT publics, le nouveau Centre de recherche et d'innovation en médecine nucléaire permettra à environ 5 000 patients supplémentaires par an d'avoir accès à une stadification précise de leur cancer.

« Nous comptons produire des radiopharmaceutiques pour le Centre et pour l'hôpital général national voisin de Diliman, ce qui nous permettra de traiter davantage de patients et de faire avancer la recherche sur le cancer », a déclaré Carlos Arcilla. Il a ajouté que le Centre serait également un centre de formation régional, afin que les Philippines comme les pays voisins puissent devenir autonomes s'agissant de la production et de l'utilisation de radiopharmaceutiques.

## Avantages des nouvelles installations émettant des rayonnements ionisants

Les radio-isotopes et les faisceaux de particules produits dans les installations émettant des rayonnements ionisants, telles que les cyclotrons, les synchrotrons et d'autres types d'accélérateurs, sont utilisés dans les domaines de la médecine et des soins de santé, de la sécurité hydrique, de l'alimentation et de l'agriculture, de la recherche, de la production d'énergie, des produits industriels et des produits de consommation, des enquêtes médico-légales et de la préservation du patrimoine culturel.

L'établissement partout dans le monde d'un plus grand nombre d'installations basées sur des accélérateurs permettra de rendre l'accès à ces bénéfices plus aisé et plus abordable. Ainsi, en plus des installations aux Philippines, de nouvelles installations sont en cours d'établissement en Argentine, en Malaisie et en Thaïlande, et toutes bénéficient du soutien de l'AIEA.





Au niveau mondial, la demande concernant ces installations émettant des rayonnements ionisants est en augmentation, et pour mieux aider les pays à y répondre, l'AIEA prévoit de publier cette année son Guide pour l'établissement d'installations émettant des rayonnements ionisants. « Il sera utile pour les personnes qui participent au développement d'installations émettant des rayonnements ionisants de bénéficier de conseils qui leur permettront d'entreprendre de façon organisée et méthodique, ce qui facilitera la mise en œuvre et l'utilisation à plein régime une fois que l'installation aura commencé à fonctionner et à fournir des services. C'est là l'objectif de cette publication qui regroupera des avis d'experts sur l'établissement de nouvelles installations et l'amélioration des installations existantes », a déclaré Nuno Pessoa Barradas, spécialiste des réacteurs de recherche à l'AIEA et responsable de la publication.

Les installations émettant des rayonnements ionisants peuvent être dotées de différents types d'équipements servant à l'ionisation. En Thaïlande, l'Institut de recherche par la lumière synchrotron prévoit de construire un deuxième synchrotron. Le premier synchrotron du pays (voir image) fonctionne depuis 20 ans et a aidé les experts thaïlandais à utiliser de façon durable les rayonnements ionisants pour préserver les objets du patrimoine culturel (voir page 8), mener des enquêtes médico-légales (voir page 16) et contribuer à la recherche-développement.

« La machine utilisée actuellement a eu un impact important dans le pays », a déclaré Supargorn Rugmai, directeur adjoint des affaires académiques et chef de la Division des installations de recherche à l'Institut de recherche par la lumière synchrotron. « Au début, nos connaissances étaient insuffisantes, mais grâce à la mise en place de programmes de formation régionaux, nous sommes en train de devenir des experts. Grâce à cette nouvelle installation,

nous pourrons avoir un impact social plus important et appliquer cette technologie à plus grande échelle. »

Les sources de rayonnement synchrotron permettent de mener à bien et de faire progresser la recherche dans les domaines industriel et médical ainsi que la recherche fondamentale. L'énergie du nouveau synchrotron de la Thaïlande sera deux fois et demie supérieure à celle de l'ancien. Ce nouveau synchrotron servira à faire progresser la recherche scientifique et améliorera l'économie du pays grâce à l'utilisation de ses rayons X de haute intensité aux fins de l'amélioration des produits industriels et de l'innovation appliquée à ces derniers.

En Argentine et en Malaisie également, des experts développent de nouvelles installations d'accélérateurs de faisceaux d'électrons. Ces installations permettront une plus grande production de radio-isotopes pour les diagnostics et les traitements médicaux, ainsi que des progrès de la recherche et de la technologie dans ces pays.

Dans le cadre de son programme de coopération technique, l'AIEA envoie des experts en Argentine, en Malaisie, aux Philippines, en Thaïlande et dans d'autres pays pour aider à l'établissement d'installations émettant des rayonnements ionisants et à leur fonctionnement en toute sûreté ; ces experts forment des experts locaux afin que ces derniers puissent gérer et maintenir ces installations de manière indépendante. En plus de ce soutien, l'AIEA publie des normes de sûreté, propose des sessions virtuelles et héberge une plateforme d'apprentissage en ligne, le Portail des connaissances sur les accélérateurs, qui est un site conçu pour et par des spécialistes des accélérateurs qui propose des supports de formation, des informations sur les accélérateurs du monde entier, et bien plus encore.

**Le synchrotron de l'Université de technologie de Suranaree (Thaïlande) est utilisé dans les domaines de l'agriculture, de la médecine, de la pharmacie et de l'industrie.**

(Photo : Institut de recherche par la lumière synchrotron)



# Légiférer pour permettre l'utilisation sûre, sécurisée et pacifique des installations d'irradiation

Par Anthony Wetherall et Chenchen Liang

Lorsqu'elle est sûre, sécurisée et pacifique, la technologie nucléaire promet des avantages considérables à la société, mais les rayonnements ionisants essentiels à tant d'applications peuvent présenter des risques importants pour la santé des personnes et pour l'environnement. Des dispositions juridiques bien structurées sont nécessaires pour évaluer, gérer et contrôler ces rayonnements afin de limiter autant que faire se peut ces risques.

Les installations émettant des rayonnements ionisants, qui sont importantes dans de nombreux domaines faisant appel à la technologie nucléaire (voir page 22), ne présentent pas de risques radiologiques comparables à ceux des centrales nucléaires et ne sont donc pas soumises aux mêmes exigences de sûreté radiologique et de sécurité nucléaire que les réacteurs. Ces installations et les activités connexes doivent être soumises à des normes de sûreté conformes à une approche graduée, c'est-à-dire qu'elles doivent être autorisées, réglementées et inspectées par des organismes de réglementation.

Les États ont la responsabilité fondamentale d'établir, de maintenir et de renforcer des cadres juridiques nationaux complets, y compris des cadres réglementaires. Dans de nombreux pays, la hiérarchie juridique place au niveau le plus élevé les instruments constitutionnels et en dessous de ceux-ci un cadre législatif au niveau statutaire, composé de textes de loi promulgués.

Ce cadre constitue la base juridique de la mise en œuvre d'instruments internationaux contraignants et non contraignants comme la Convention commune sur la sûreté de la gestion du combustible usé et sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs et le Code de conduite sur la sûreté et la sécurité des sources radioactives, ainsi que les normes de sûreté et les orientations sur la sécurité nucléaire pertinentes de l'AIEA.

Le cadre législatif est le socle d'un système de contrôle réglementaire et prévoit la création ou la désignation d'un organisme de réglementation doté de l'indépendance, des ressources humaines et financières nécessaires et d'un ensemble de fonctions clairement définies. Cela comprend l'établissement de normes, les procédures d'autorisation, l'inspection et l'application des règles, ainsi que la délimitation et la coordination claires des responsabilités. Ce cadre législatif est essentiel pour l'utilisation sûre, sécurisée et pacifique des rayonnements ionisants et les pays comptent sur le soutien de l'AIEA pour en établir un.

## Légiférer n'est pas toujours une tâche aisée

Au fil des ans, des gouvernements nationaux ont demandé de l'aide pour établir ou renforcer leurs cadres juridiques nationaux en matière de technologie nucléaire. « L'expérience nous montre que l'élaboration d'une législation nucléaire n'est pas toujours une tâche aisée », a déclaré Wolfram Tonhauser, chef de la Section du droit nucléaire et du droit des traités à l'AIEA. « Les trois grands domaines techniques - la sûreté, la sécurité et les garanties - doivent tous être traités de manière adéquate et complète. »

En outre, la législation nucléaire nationale doit se conformer aux exigences constitutionnelles et institutionnelles du système juridique de chaque pays, tout en recherchant le plus haut degré possible d'harmonisation et de cohérence avec les cadres législatifs des autres pays dans le domaine nucléaire.

Il importe que les responsables politiques et les décideurs reconnaissent le caractère particulier de la technologie nucléaire et de ses applications, notamment parce que cette technologie peut soulever des questions politiques, sensibles et stratégiques, et comporter des risques de sécurité à l'échelle nationale, internationale et régionale. En outre, les législateurs doivent tenir compte de la dimension intersectorielle des technologies nucléaires et des installations et activités connexes, celles-ci pouvant concerner de multiples secteurs et domaines, tels que la santé, l'énergie, l'industrie, les transports, l'eau, l'alimentation et l'agriculture.

De ce fait, l'élaboration d'une législation rend nécessaire une évaluation complète des divers politiques, lois, cadres et dispositions réglementaires existants. Souvent, il est nécessaire d'apporter des changements majeurs ou complexes aux politiques existantes, ce qui entraîne d'importants problèmes réglementaires entre les divers organismes concernés. Pour de nombreux rédacteurs de textes de loi, le nucléaire est un domaine hautement spécialisé, complexe et technique, ce qui conduit souvent à l'utilisation d'une terminologie et de définitions techniques dans la législation nationale.

Dans le cadre de son programme d'assistance législative, l'AIEA aide les autorités nationales à relever ces défis et d'autres. Il est mis en œuvre dans le cadre du programme de coopération technique de l'AIEA afin de faire connaître le droit nucléaire et de renforcer les capacités dans ce domaine, de sorte que des normes de sûreté et de sécurité soient élaborées, y compris pour les installations émettant des rayonnements

ionisants et les autorisations, dispositions réglementaires et inspections y relatives.

L'appui multiforme de l'AIEA comprend des réunions avec les décideurs, les responsables politiques, les hauts fonctionnaires et les législateurs tels que les parlementaires ; l'organisation d'ateliers nationaux, sous-régionaux et régionaux pour un large éventail de responsables ; et l'examen des projets et de la législation nucléaire promulguée. Le programme permet également de renforcer les capacités grâce à des sessions de formation, notamment à l'Institut de droit nucléaire - le programme annuel de formation en droit nucléaire sur deux semaines axé sur la rédaction de textes législatifs qu'organise l'AIEA. Rien qu'au cours de la dernière décennie, plus de 500 responsables ont été formés à l'Institut de droit nucléaire et plus de 200 activités bilatérales de rédaction législative ont été menées, et 53 ateliers nationaux et 18 ateliers régionaux et sous-régionaux ont été organisés.

Plus récemment, des webinaires sur le droit nucléaire ont fait progresser le dialogue dans ce domaine avec les États Membres. Au cours des dix dernières années, une dizaine de pays en Asie et dans le Pacifique, dix en Europe et une vingtaine en Afrique ont adopté une législation nouvelle ou révisée en bénéficiant de l'assistance à la rédaction de l'AIEA. Le Brunéi Darussalam et les Philippines, avec leurs cyclotrons nouvellement installés, et la Jordanie, avec ses accélérateurs, ne sont que quelques exemples de pays bénéficiant de cette assistance. Enfin, les manuels de droit nucléaire de l'AIEA, notamment le Manuel de droit nucléaire : Législation d'application, restent les publications de référence dans ce domaine.

**Rien qu'au cours de la dernière décennie, plus de 500 responsables ont été formés à l'Institut de droit nucléaire.**

(Photo : D. Calma/AIEA)



# Tout ce que vous devez savoir sur les faisceaux d'ions

Par Puja Daya et Sotirios Charisopoulos

Que ce soit pour déterminer l'origine des polluants, caractériser les contaminants alimentaires, visualiser des cellules biologiques une par une ou dater des objets anciens, les scientifiques utilisent des faisceaux d'ions. Mais que sont-ils et comment sont-ils utilisés ?

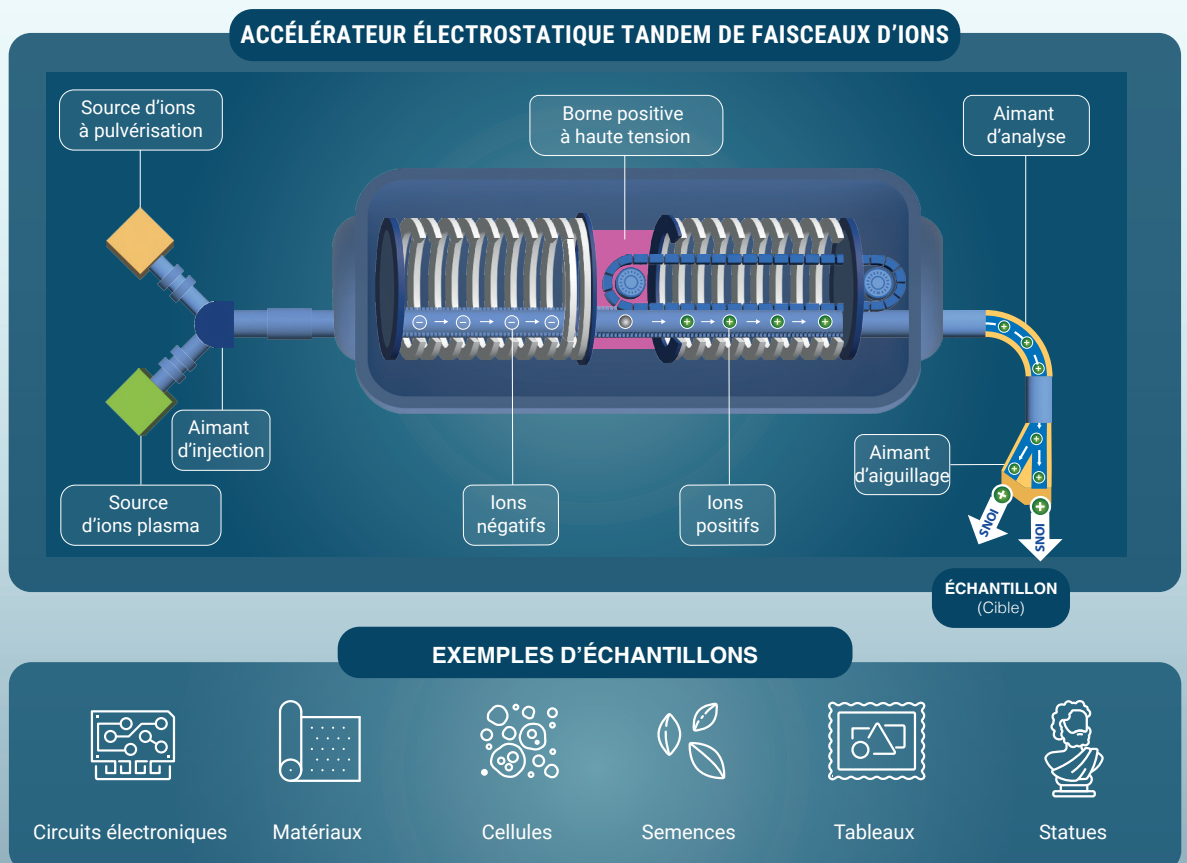
Comme leur nom l'indique, les faisceaux d'ions sont des flux d'atomes chargés électriquement, des ions, qui sont produits par des instruments spéciaux appelés sources d'ions. Les ions prennent de la vitesse lorsqu'ils entrent dans un champ électrique, généré dans un accélérateur de particules, et ils sont guidés et focalisés par des champs magnétiques de façon à suivre des trajectoires parallèles dans un tube métallique à vide. En fonction du type d'accélérateur, les faisceaux d'ions peuvent atteindre une vitesse proche de celle de la lumière.

Dans le cas des accélérateurs électrostatiques tandem (voir la figure ci-dessous), des faisceaux d'ions sont bombardés sur un échantillon de matière ou un objet. L'interaction avec la matière peut modifier la trajectoire des ions, ou la collision peut libérer des particules ou des rayonnements – principalement des rayons X ou gamma – qui peuvent ensuite être détectés et analysés.

Les propriétés de l'énergie et du rayonnement émis permettent d'en savoir plus sur la composition de l'échantillon bombardé, notamment son caractère cristallin ou non, sa dureté et ses propriétés physiques présentant un intérêt pour les nouvelles technologies. On peut bombarder des échantillons et des objets de différentes formes et dans différents états de la matière, comme des feuilles minces, des boulettes de terre, des cellules humaines, animales ou végétales, des semences, des pierres, des liquides et même des objets anciens ou des statues. Selon la forme et la composition de la matière, on peut procéder au bombardement dans le vide ou dans l'air.

Compte tenu de leurs capacités uniques d'analyse et de modification, les faisceaux d'ions accélérés sont utilisés dans de nombreuses applications. Dans le cadre de la sélection des plantes par mutation, ils servent à irradier des matières végétales et des semis afin d'accélérer le processus d'évolution naturelle grâce à des mutations induites et de mettre au point des cultures ayant un plus haut rendement ou une meilleure résistance aux maladies et à la sécheresse.

Les protons et d'autres ions sont largement utilisés pour produire les radioisotopes nécessaires à la mise au point de radiopharmaceutiques pour le diagnostic et le traitement du cancer. En cancérothérapie, des faisceaux de protons et d'ions carbone sont utilisés pour bombarder les tumeurs cancéreuses,



en particulier lorsqu'il n'y a pas d'autre option thérapeutique. Ils transmettent de l'énergie à la tumeur afin de la faire chauffer et de la désintégrer.

Face à la demande croissante de matériaux plus solides et de meilleure qualité, une grande variété de faisceaux d'ions sont également utilisés pour modifier les propriétés des matériaux et les rendre plus résistants. C'est le cas pour les vaisseaux spatiaux et les réacteurs à fusion, par exemple, qui nécessitent des matériaux pouvant résister à des niveaux de rayonnement très élevés.

## Faisceaux d'électrons

Les faisceaux d'électrons sont semblables aux faisceaux d'ions : ce sont des flux d'électrons générés par des sources d'électrons dans divers accélérateurs. Ils servent à produire des rayons X, qui sont utilisés en médecine pour irradier et détruire des cellules cancéreuses. Les faisceaux d'électrons ou les rayons X sont aussi utilisés pour irradier les aliments et tuer les bactéries dangereuses sans dégrader la valeur nutritionnelle, la qualité ou le goût de la nourriture.

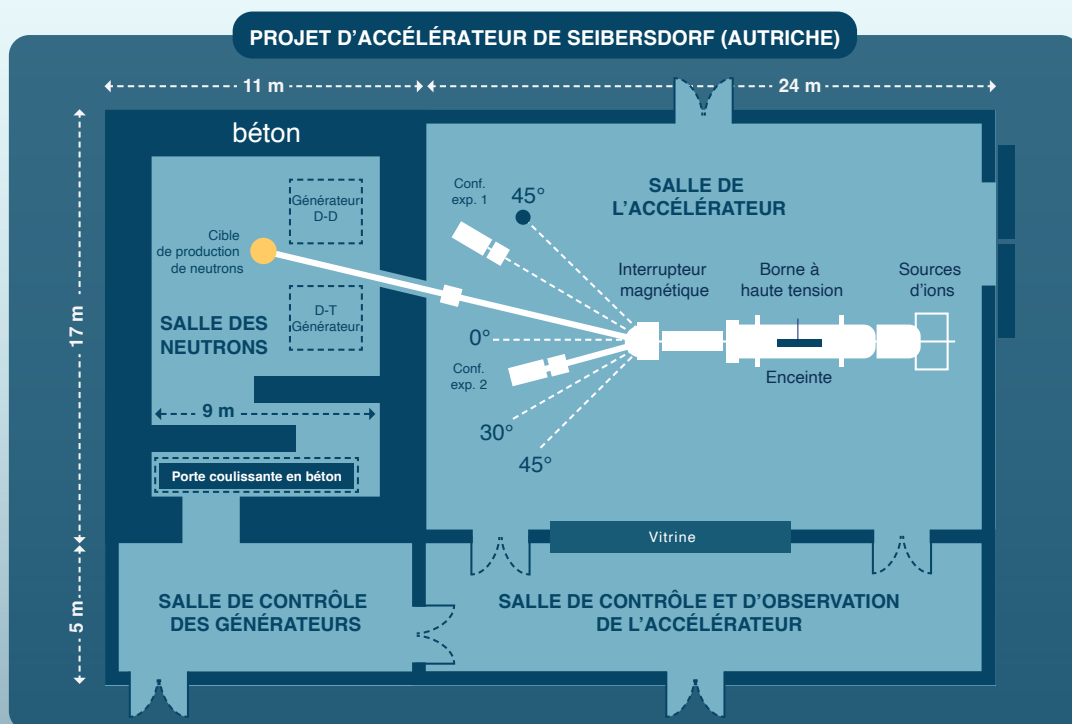
## Projet d'installation de faisceaux d'ions de l'AIEA

L'utilisation de faisceaux d'ions et d'électrons peut profiter à de nombreux pays dans le monde, et l'AIEA prévoit d'établir

sa propre installation de faisceaux d'ions tandem ultramoderne à Seibersdorf (Autriche). Grâce à cet accélérateur, elle soutiendra la recherche et aidera les scientifiques du monde entier à améliorer leurs connaissances théoriques et pratiques des diverses applications des faisceaux d'ions, y compris la production de particules secondaires comme les neutrons.

« Les faisceaux de particules sont des sondes exceptionnelles qui peuvent être utilisées non seulement pour mieux comprendre l'univers, mais aussi pour analyser et mettre à profit les processus physiques capables d'améliorer la vie et de soutenir la croissance économique », explique Danas Ridikas, chef de la Section de la physique de l'AIEA. « Les accélérateurs de particules sont des investissements rentables qui contribuent au développement durable. Avec un nouvel accélérateur de faisceaux d'ions tandem, l'AIEA pourra aider davantage les pays à renforcer leurs capacités relatives aux technologies des accélérateurs et à leurs applications. »

L'AIEA cherche à lever quelque 4,6 millions d'euros pour financer le projet, notamment l'accélérateur tandem, l'infrastructure nécessaire et l'instrumentation associée et les ressources nécessaires à son exploitation.



(Illustrations : A. Vargas Terrones/AIEA)

# L'irradiation industrielle au service d'un monde meilleur

Par Michael Amdi Madsen

*Le terme « rayonnement » suscite parfois de la crainte, mais les rayonnements jouent depuis plus d'un siècle un rôle invisible, bénéfique et bien souvent déterminant dans l'industrie et en matière de sécurité sanitaire des aliments. Qu'elles soient utilisées pour stériliser les appareils médicaux, décontaminer les produits frais ou renforcer les polymères industriels, les techniques d'irradiation font partie intégrante du monde moderne.*

*Pour mieux comprendre l'importance que revêtent les techniques d'irradiation industrielle et comment elles ont évolué, nous nous sommes entretenus avec Paul Wynne, Président et Directeur général de l'Association internationale d'irradiation (Aii).*

*L'Aii est une organisation à but non lucratif regroupant des entreprises, des établissements de recherche, des universités et des organismes publics du monde entier. Elle soutient le secteur de l'irradiation et la communauté scientifique qui s'y rattache à l'échelle mondiale.*



**Question : Dans quel domaine l'irradiation industrielle faisant appel aux accélérateurs a-t-elle eu la plus forte incidence et comment voyez-vous l'avenir de cette technologie ?**

**Réponse :** Les accélérateurs sont utilisés depuis une soixantaine d'années dans le secteur industriel pour améliorer les propriétés des polymères. Une de leurs applications principales est le traitement des isolants pour câbles afin d'améliorer leur résistance aux températures élevées, ce qui renforce la protection contre les incendies et rend le matériel plus durable. Il existe de nombreuses autres applications impliquant la modification de divers produits chimiques au moyen de faisceaux d'électrons, telles que la fabrication de composites bois-plastique pour plancher ou de mousses pour l'industrie automobile. Nombre de ces applications sont brevetées et utilisées dans des usines.

L'introduction des accélérateurs de forte puissance a élargi la gamme des produits pouvant être traités. Cette technologie vient ainsi concurrencer les irradiateurs gamma au radio-isotope cobalt 60. Cela a notamment rendu possibles la stérilisation des appareils et emballages médicaux et des substances entrant dans la composition des médicaments et des cosmétiques, ainsi que le contrôle microbiologique des aliments. Pour l'heure, l'irradiation gamma reste toutefois la technique la plus répandue pour toutes ces applications.

**Question : Observe-t-on un passage des techniques d'irradiation utilisant des sources radioactives aux technologies faisant appel à des accélérateurs ?**

**Réponse :** Il y a en effet un facteur qui favorise une telle évolution : il s'agit de l'accroissement des besoins de stérilisation des appareils médicaux, stimulé par la hausse rapide de la demande de ces dispositifs. L'irradiation est la méthode privilégiée pour la stérilisation d'un peu moins de la moitié du volume total des appareils qui doivent être traités, et 80 % des appareils irradiés sont stérilisés au moyen de rayonnements gamma. Dernièrement, en raison de diverses circonstances, dont certaines pourraient n'être que temporaires, l'offre de cobalt 60 a été incapable de suivre l'augmentation de la demande. En général, le choix de la méthode importe peu aux fabricants d'appareils médicaux : ceux-ci souhaitent seulement pouvoir stériliser leurs produits adéquatement.

La stérilisation par irradiation gamma au cobalt 60 présente deux grands avantages : la simplicité et la fiabilité. Les accélérateurs ont aussi des atouts : ils n'ont besoin que d'électricité pour fonctionner et l'émission des rayonnements ionisants peut être interrompue à tout moment. Ce sont les forces du marché qui détermineront laquelle de ces technologies prédominera à l'avenir, mais pour l'instant, il est essentiel qu'elles restent toutes disponibles pour que la demande de stérilisation puisse être satisfaite.

Il importe de souligner que tout ce qui peut être traité par des accélérateurs d'électrons peut également être traité par irradiation gamma, mais que l'inverse n'est pas vrai. Une cible de métal peut toutefois être introduite dans certains accélérateurs pour convertir le faisceau d'électrons en rayons X, dont les propriétés sont semblables à celles des rayons gamma.

**Question : La demande d'applications industrielles faisant appel à des accélérateurs augmente, en particulier dans les pays en développement. Quels sont les défis à relever pour rendre ces technologies plus accessibles ?**

**Réponse :** À l'avenir, la majeure partie de la croissance du marché traditionnel de l'irradiation gamma sera probablement transférée vers les accélérateurs. Le nombre de fournisseurs d'accélérateurs dépasse celui des fournisseurs de cobalt 60, mais les fournisseurs de machines de haute énergie et de forte puissance ne sont pas plus d'une douzaine et les fabricants d'accélérateurs capables de produire des rayons X sont encore moins nombreux. La production de systèmes utilisant des rayons X reste limitée, mais, partant d'un faible niveau, elle connaît une croissance rapide.

De nombreux pays en développement n'ont pas encore vraiment adopté les accélérateurs à large échelle, essentiellement en raison des investissements élevés que ces machines requièrent, de leur complexité par rapport aux irradiateurs gamma et de l'absence d'un approvisionnement abondant et stable en électricité. Les ressources humaines, les contraintes financières et les prescriptions en matière de sûreté constituent divers obstacles qui devraient toutefois pouvoir être surmontés plus aisément que les problèmes qui concernent les infrastructures et la taille du marché. Pour l'instant tout du moins, les technologies faisant appel aux accélérateurs ne semblent pas être une solution adaptée pour tous les pays en développement.

**Question : L'Aii et l'AIEA collaborent dans le cadre de diverses initiatives, telles que des conférences internationales et des ateliers pour jeunes chercheurs. Comment ces initiatives favorisent-elles une plus large utilisation des technologies faisant appel aux accélérateurs ?**

**Réponse :** Les objectifs de l'Aii sont alignés sur certains des objectifs que poursuit l'AIEA. L'Aii a pour mission de promouvoir l'utilisation sûre et bénéfique des technologies des rayonnements en suivant une approche technologiquement neutre. Alors que les partenaires de l'AIEA sont des gouvernements et leurs organismes, l'Aii représente principalement le marché de l'irradiation industrielle. L'Aii collabore avec l'AIEA dans le cadre d'un nombre croissant d'initiatives.

**Question : Quelles sont les évolutions dans le secteur de l'irradiation industrielle faisant appel aux accélérateurs qui vous semblent les plus prometteuses ? Pourraient-elles révolutionner l'industrie ?**

**Réponse :** Les techniques d'irradiation linéaire faisant appel aux électrons ou aux rayons X de faible énergie constituent une nouvelle approche très prometteuse. Grâce à l'intégration d'accélérateurs ou de lampes émettrices miniatures, cette innovation pourrait rendre les technologies des rayonnements accessibles aux fabricants dans de nombreux secteurs. Les rayons de faible énergie ayant un pouvoir de pénétration dans la matière restreint, leurs applications possibles sont limitées, mais les émetteurs de ce type de rayonnements ont l'avantage d'être compacts et de pouvoir être intégrés dans des chaînes de fabrication. Parmi les premières applications de cette technique, on compte la stérilisation des seringues avant leur utilisation par l'industrie pharmaceutique, ainsi que la stérilisation à grande vitesse des produits sur les lignes de conditionnement aseptiques, utilisées dans la production de lait et de boissons non alcoolisées.

Pour vous donner un exemple, une entreprise suisse a conçu une machine servant à la décontamination des aliments de la taille d'une grande armoire. De tels dispositifs sont également utilisés dans la lutte contre les ravageurs, lors du recours à la technique de l'insecte stérile, technique largement promue par l'AIEA, et dans la recherche en radiobiologie. Davantage d'efforts doivent être déployés pour élargir l'éventail des applications possibles de ces technologies, en particulier en recourant à des dispositifs compacts produisant des rayons X de faible énergie, mais il ne fait aucun doute que ces technologies pourraient révolutionner le secteur de l'industrie.

# MYRRHA : un système piloté par accélérateur pour gérer les déchets radioactifs

Par Hamid Aït Abderrahim



Hamid Aït Abderrahim est directeur général adjoint chargé des affaires internationales au SCK•CEN et directeur du projet MYRRHA et de son organisation à but non lucratif. Professeur de physique des réacteurs et de génie nucléaire à l'Université catholique de Louvain, il participe en tant que coordonnateur et partenaire à divers projets de la Commission européenne relatifs aux systèmes nucléaires progressifs, à la séparation

des déchets nucléaires de haute activité et à la gestion de la transmutation. Il est membre de plusieurs conseils scientifiques, organismes de recherche et instituts internationaux et a été nommé grand officier de l'Ordre de la couronne par le roi de Belgique en 2014 pour ses travaux dans les domaines de l'énergie nucléaire et de la fermeture du cycle du combustible.

Un des principaux – faux – arguments avancés contre l'électronucléaire est que « le problème des déchets nucléaires n'a pas de solution ». Le combustible nucléaire usé non retraité conserve un niveau de radiotoxicité supérieur à celui de l'uranium naturel pendant environ 300 000 ans, et la grande majorité de l'uranium et du plutonium qu'il contient reste non consommée. Des solutions techniques existent pour le stockage définitif à long terme, mais il y a également une autre option : le recyclage du combustible nucléaire.

L'uranium et le plutonium contenus dans le combustible usé peuvent tous les deux être retraités et réutilisés dans du combustible neuf pour produire de l'électricité. Cependant, les opérations de retraitement standard produisent des actinides mineurs, des éléments proches de l'uranium dans le tableau périodique qui ne peuvent pas être brûlés

dans les réacteurs actuels. Il faut encore 10 000 ans pour que les déchets radioactifs qui contiennent ces résidus reviennent à leur niveau de rayonnement naturel.

Le réacteur de recherche polyvalent hybride pour des applications de haute technologie (MYRRHA) en construction au Centre d'étude de l'énergie nucléaire (SCK•CEN), en Belgique, s'appuie sur le concept de système piloté par accélérateur (ADS) et vise à traiter les actinides, en particulier les actinides mineurs. L'objectif est de faire la démonstration technique du système piloté par accélérateur et de prouver la faisabilité de la transmutation des actinides mineurs à l'échelle industrielle. En réduisant la radiotoxicité, on pourrait réduire le volume des déchets radioactifs de haute activité de 99 % et ramener la durée d'entreposage nécessaire à seulement 300 ans.

MYRRHA diffère de la plupart des réacteurs actuels sur deux grands aspects. Premièrement, il utilise des neutrons rapides, indispensables pour fissurer les actinides mineurs. Deuxièmement, il peut fonctionner en mode sous-critique, c.-à-d. sans réaction de fission en chaîne auto-entretenu, car il est couplé à un accélérateur de protons de haute énergie qui produit les neutrons primaires nécessaires dans le cœur du réacteur par spallation. C'est nécessaire pour contrôler la réactivité lorsqu'on brûle les actinides mineurs et cela a en plus pour avantage que, dès que l'accélérateur est mis à l'arrêt, la réaction de fission en chaîne s'arrête et le réacteur s'éteint. Mesure de sûreté essentielle, le réacteur est conçu de façon que la chaleur de décroissance résiduelle puisse être dissipée par la circulation naturelle, sans système actif ni intervention.

La transmutation d'une grande partie du combustible usé dans le monde nécessitera un réseau d'installations industrielles. Jusqu'à présent, les technologies associées au projet MYRRHA ont été prouvées individuellement en laboratoire dans des installations expérimentales. MYRRHA



est donc une centrale pilote pré-industrielle destinée à intégrer et à tester les technologies à grande échelle tout en augmentant sensiblement la fiabilité.

De nombreuses difficultés scientifiques, techniques et réglementaires devront être surmontées pendant la mise en œuvre de ce projet pionnier. Un examen préalable à l'autorisation a été réalisé par l'organisme de réglementation nucléaire belge, après d'étroites consultations avec les développeurs du projet, et aucun problème susceptible de mettre en doute l'autorisation future de MYRRHA n'a été soulevé. Nous espérons que cela poussera de nombreux jeunes en Belgique et ailleurs à s'intéresser au domaine nucléaire, qui revêt une grande importance pour le pays.

Si le projet porte avant tout sur la gestion des déchets radioactifs, l'installation a de nombreuses autres applications dans des domaines de pointe de la recherche-développement. Le projet MYRRHA est divisé en trois phases. La première, en cours, verra la construction de la partie basse énergie [100 mégaélectronvolt (MeV)] de l'accélérateur de protons, avec le lancement d'un grand nombre de travaux de recherche vers 2027. Ces travaux tourneront autour du système de séparation isotopique en ligne (ISOL@MYRRHA), qui permet de sélectionner les isotopes spécifiques à utiliser dans les radiopharmaceutiques et de produire des faisceaux d'ions radioactifs pour toute une série d'expériences de physique nucléaire, avec le concours d'une installation de grande puissance adaptée à la recherche sur les matériaux de fusion.

La grande précision des mesures qui peuvent être faites sur les faisceaux radioactifs produits par ISOL@MYRRHA peut aussi aider à comprendre la validité du « modèle standard » de la physique des particules. Si la première phase est une réussite et si l'accélérateur fait preuve de la fiabilité exceptionnelle nécessaire à l'ADS, on portera la puissance de l'accélérateur de protons à son maximum (600 MeV) lors de la deuxième phase. La dernière phase consistera à construire le réacteur sous-critique lui-même. Le plomb-bismuth (Pb-Bi) est utilisé comme caloporteur pour dissiper la chaleur générée par le réacteur nucléaire. Le cœur du réacteur, conçu de manière flexible, peut être chargé avec du combustible à mélange d'oxydes, des actinides mineurs et des cibles pour la production d'isotopes médicaux. Des dispositifs permettront de réaliser des tests d'irradiation et de corrosion sur les futurs

matériaux structurels des réacteurs à fission rapide et même des futurs réacteurs de fusion. Le réacteur MYRRHA refroidi au Pb-Bi peut servir d'installation expérimentale de test technologique pour les réacteurs à neutrons rapides refroidis au plomb de la quatrième génération.

Le gouvernement belge a investi quelque 200 millions d'euros dans le projet jusqu'à présent, avec un supplément de 558 millions d'euros en 2018 pour la période 2019-2038 sur la base d'un budget global estimé à environ 1,6 milliard d'euros. Une entité à but non lucratif a été créée. Cela permettra à MYRRHA d'attirer l'investissement de gouvernements et d'entités étrangers pour les deuxième et troisième phases et de fonctionner comme une organisation internationale. MYRRHA a été inscrit sur la liste du Forum stratégique européen pour les infrastructures de recherche (ESFRI), qui recense les projets considérés par les chercheurs comme étant à la pointe du progrès, et le Comité de collaboration européen pour la physique nucléaire (NuPECC) a inclus ISOL@MYRRHA dans son plan à long terme concernant les principales installations européennes de physique nucléaire. Le Plan stratégique européen pour les technologies énergétiques (plan SET), destiné à promouvoir les technologies bas carbone, mentionne également MYRRHA, ce qui permet au projet de recevoir un financement de la Banque européenne d'investissement.

Par ailleurs, le recyclage de l'uranium et du plutonium en combustible pour les systèmes à spectre de neutrons rapides réduit la demande d'extraction de minerai d'uranium et augmente considérablement la quantité d'énergie récupérée de ce minerai, et de nombreuses entreprises demandent vivement une amélioration de l'efficacité de l'utilisation des matières premières et de la réduction des déchets. C'est pourquoi MYRRHA a été intégré dans les politiques nationales belges d'investissement stratégique et dans le plan national intégré sur l'énergie et le climat.

### Rendu en 3D de l'installation MYRRHA.

(Photo: MYRRHA)



## Vers une transition énergétique « juste »

### Dans le secteur des énergies propres, l'énergie nucléaire offre les emplois les mieux rémunérés



**Selon une nouvelle étude, les investissements dans la production d'énergie nucléaire génèrent des emplois plus nombreux et mieux rémunérés que ceux axés sur d'autres sources d'électricité bas carbone.**

(Photo : AIEA)

Selon une nouvelle étude présentée lors d'un événement de l'AIEA, le passage aux énergies propres générera des créations de postes supérieures en nombre aux pertes d'emplois dues à l'abandon progressif des combustibles fossiles, et le secteur de l'énergie nucléaire continuera d'offrir les emplois les mieux rémunérés et de fournir de nombreux postes durables favorisant les économies locales et régionales.

À l'heure où plus de 130 pays se sont engagés ou envisagent de s'engager à atteindre un objectif de zéro émission nette de gaz à effet de serre à l'horizon 2050, il est essentiel de se préparer aux répercussions que cette transition énergétique aura sur le marché du travail. Des représentants du secteur des énergies propres ont participé à un récent webinaire de l'AIEA consacré aux solutions susceptibles de garantir une amélioration du niveau de vie et la création d'emplois à mesure que les investissements énergétiques s'aligneront sur les objectifs climatiques.

Pour reprendre les propos tenus par Henri Paillère, Chef de la Section

de la planification et des études économiques de l'AIEA, lors du webinaire intitulé « Investing in Low Carbon Technologies : Job Creation for Just Energy Transitions », « Il ne faudrait pas que le renoncement aux combustibles fossiles laisse certains sur le bord du chemin. Tel est le sens du concept de transition "juste". Il convient d'investir massivement dans toutes les technologies propres, en veillant à ce que cela crée des emplois, dynamise la croissance économique et soutienne le développement durable. »

Les investissements dans les sources d'énergie propres telles que le solaire, l'éolien et le nucléaire ont une incidence sur le produit intérieur brut (PIB) deux à sept fois plus importante que ceux axés sur les sources fossiles telles que le gaz, le charbon et le pétrole, selon un document de travail du Fonds monétaire international (FMI). Une analyse soumise lors du webinaire par l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA) prévoit que, dans l'hypothèse où la hausse de la température au niveau mondial se limiterait à 1,5° Celsius, conformément

aux objectifs climatiques mondiaux, le nombre d'emplois dans le secteur des énergies renouvelables pourrait passer de 12 à 38 millions d'ici 2030.

Les autres emplois liés à la transition énergétique pourraient atteindre le chiffre de 74 millions sur la même période, contre 16 millions aujourd'hui, affirme Michael Renner, Chargé de programme au Centre de connaissances, de politiques et de finances de l'IRENA. À l'inverse, les emplois dans le secteur des énergies conventionnelles seraient ramenés de 39 à 27 millions.

Le document du FMI considère que, de toutes les sources d'énergies propres, l'énergie nucléaire est celle dans laquelle les investissements ont un effet multiplicateur maximal sur le plan économique. Le document montre également que l'énergie nucléaire crée environ 25 % d'emplois de plus que l'énergie éolienne par unité d'électricité, tandis que les travailleurs de l'industrie nucléaire gagnent un tiers de plus que ceux du secteur des énergies renouvelables.

Philippe Costes, Conseiller principal à l'Association nucléaire mondiale (WNA), livre des conclusions similaires. « Le nucléaire offre des emplois dont les salaires sont de quelque 25 à 30 % supérieurs à ceux pratiqués dans toute autre filière énergétique. Mais surtout, outre qu'il génère des emplois locaux à proximité des centrales et dans les économies régionales pendant les travaux de construction des installations, à l'instar de l'éolien, le nucléaire est le seul secteur qui fournisse des postes importants et durables dans les économies locales et régionales en cours d'exploitation », a souligné M. Costes durant le webinaire.

Toujours selon M. Costes, les études de l'Association nucléaire mondiale montrent que l'énergie

nucléaire induit près de 25 % d'emplois de plus par unité d'électricité en France et aux États-Unis d'Amérique que l'énergie éolienne, et que ces emplois sont bien rémunérés, s'inscrivent dans la durée et se situent principalement au niveau local. Le niveau croissant d'implantation locale reflète lui aussi les avantages économiques à long terme du nucléaire pour les pays primo-accédants, a ajouté M. Costes, citant l'exemple de la République de Corée, où l'essor de l'énergie nucléaire a coïncidé avec la montée en puissance de son économie, qui s'est hissée au 11<sup>e</sup> rang mondial au milieu des années 1990. Le nucléaire produit près du tiers de l'électricité de la République de Corée.

D'après l'Agence internationale de l'énergie (AIE), environ 60 % des 30 millions de travailleurs

dont dépendront les énergies propres, l'efficacité énergétique et les technologies à faibles émissions d'ici à 2030 occuperont des emplois nouveaux et hautement qualifiés, nécessitant une formation post-secondaire sanctionnée par des certifications professionnelles ou des diplômes universitaires. Comme l'a souligné Daniel Wetzel, Chef de l'Unité « Tracking Sustainable Transitions » à l'AIE, il faut que les pouvoirs publics et les institutions académiques commencent à mettre en place les politiques requises pour former cette main-d'œuvre dont nous aurons besoin à l'avenir.

— Par Nicholas Watson et Lucy Ashton

## La souche de la fièvre aphteuse identifiée en Tunisie en un temps record avec l'aide de l'AIEA et de la FAO



À Nabeul, dans le nord-est de la Tunisie, un vétérinaire prélève un échantillon de salive sur une vache soupçonnée d'avoir la fièvre aphteuse. (Photo : T. Ben Hassine/Ministère tunisien de l'Agriculture, des Ressources hydrauliques et de la Pêche)

Au début de l'année 2022, un laboratoire de virologie tunisien a reçu des échantillons de salive provenant de vaches soupçonnées par les vétérinaires d'avoir la fièvre aphteuse. Cette maladie hautement contagieuse qui touche les ongulés tels que les vaches, les porcs et les chèvres peut perturber les échanges régionaux et internationaux d'animaux et de produits d'origine animale. Elle se caractérise par de la fièvre et l'apparition, entre les sabots, dans la bouche, sur la langue

et sur les lèvres de l'animal, de plaies semblables à des cloques.

Quelques jours après avoir soumis les échantillons à un service de séquençage génétique, Soufien Sghaier, virologue au laboratoire de virologie de l'Institut de la recherche vétérinaire de Tunisie (IRVT), a eu communication des résultats, lesquels ont confirmé la circulation d'une souche de fièvre aphteuse. Il a ainsi pu avertir les autorités vétérinaires et leur demander de mettre en place

des mesures de contrôle afin d'éviter que la maladie ne se propage. Cette confirmation rapide a été rendue possible grâce à l'AIEA, dans le cadre d'un partenariat avec l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), qui facilite le service de séquençage et dispense la formation nécessaire au traitement des résultats.

« Les résultats du séquençage d'un cas suspect de fièvre aphteuse nous sont

parvenus très vite. Les échantillons ont été envoyés à un laboratoire de Berlin le vendredi, et nous avons obtenu les résultats le lundi après-midi », explique M. Sghaier. « Nous avons ainsi pu procéder à une analyse et identifier la souche spécifique de la fièvre aphteuse en un temps record. Dès le mardi, le rapport relatif à la souche de la fièvre aphteuse était envoyé aux autorités vétérinaires. » Les souches de la fièvre aphteuse doivent être identifiées pour pouvoir sélectionner le vaccin efficace ou mettre un autre vaccin au point.

L'intérêt du séquençage génétique tient au fait qu'il permet de déterminer si une maladie en circulation est endémique ou vient d'ailleurs. « Le séquençage génétique peut nous aider à comprendre à quel groupe appartient l'agent pathogène - l'organisme à l'origine d'une maladie - et quel vaccin est capable de le combattre efficacement », explique Ivancho Naletoski, administrateur en santé animale au Centre conjoint FAO/AIEA des techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture. Il est possible de créer, à partir du séquençage génétique, un arbre phylogénétique qui établit la lignée d'une espèce.

## Améliorer la radioprotection dans les actes médicaux ayant recours à la fluoroscopie

Moins risquées que les interventions chirurgicales classiques, avec des séjours hospitaliers plus courts et des délais de rétablissement plus rapides, les actes médicaux très peu invasifs guidés par imagerie sont de plus en plus pratiqués partout dans le monde. En 2020, ce sont au total quelque 24 millions d'actes de ce type qui ont été réalisés, chiffre plus de six fois supérieur à ce qu'il était en 2008. Mais ils présentent un inconvénient : si des précautions appropriées ne sont pas prises, les patients et le personnel médical peuvent être exposés à des radiations inutiles provenant des rayons X qu'utilise la fluoroscopie pour permettre aux médecins de « voir » les gestes qu'ils posent intra corpore.

« Nous nous sommes aperçus que de nouveaux problèmes de radioprotection étaient apparus du fait de l'évolution des techniques et de la complexification de ces procédures, et avons recensé un certain nombre de lacunes potentielles dans les directives et les formations destinées à améliorer

« Grâce à notre analyse phylogénétique, nous avons déterminé que nous disposions déjà d'un vaccin capable de protéger notre bétail. Les autorités vétérinaires ont procédé à une vaccination périfocale pour réduire le risque de propagation de la fièvre aphteuse », indique M. Sghaier. La vaccination périfocale, ou vaccination tampon, peut contribuer à empêcher que le virus ne se propage à d'autres régions géographiques.

### Le service de séquençage génétique de l'AIEA-FAO

Le service gratuit de séquençage génétique donne aux pays la possibilité de demander un séquençage en vue d'une analyse approfondie d'agents pathogènes. À ce jour, plus de 5 300 échantillons ont été soumis par 30 laboratoires de 24 pays d'Afrique, d'Asie et du Pacifique, d'Europe et d'Amérique latine.

« La mise en place de technologies de séquençage génétique dans des laboratoires locaux est fort onéreuse », note M. Naletoski. « Il n'y a pas vraiment lieu de séquencer chaque isolat ; seuls quelques échantillons

provenant de foyers sélectionnés sont nécessaires. En termes de faisabilité économique, le fait que les contreparties puissent passer par un intermédiaire pour avoir accès à un service de séquençage est une sage solution. » L'AIEA a établi et communiqué des instructions techniques par étapes concernant le traitement des données brutes et la génération, sur la base des résultats obtenus, d'arbres phylogénétiques des agents pathogènes circulant localement.

En outre, le Centre conjoint FAO/AIEA a organisé des cours destinés aux laboratoires sur l'utilisation du service de séquençage, au Maroc en 2017 et en Argentine en 2018. Au plan national, le service intervient dans les programmes de surveillance des maladies. À l'échelle planétaire, il vient étayer certaines études qui traitent de ces questions et apporte sa contribution aux travaux de la communauté scientifique mondiale. À ce jour, plus de 30 articles reposant sur des résultats obtenus par ce service sont parus dans des revues à comité de lecture, et des dizaines de séquences ont été publiées dans des bases de données librement accessibles.

— Par Joanne Liou

la radioprotection des patients et du personnel », explique Jenia Vassileva, spécialiste en radioprotection à l'AIEA.

La fluoroscopie affiche sur un moniteur une image radiographique continue, produite par un faisceau qui traverse l'organisme.

Lors d'une récente réunion de l'AIEA tenue dans le cadre du soutien apporté à la communauté médicale, plus de 100 experts de 42 pays et 18 organisations internationales et associations professionnelles ont évoqué les progrès réalisés et les problèmes rencontrés en matière de radioprotection dans les procédures interventionnelles assistées par la fluoroscopie. Les discussions ont principalement porté sur les moyens de renforcer la radioprotection des patients et du personnel médical lors de l'application de ces procédures, qui peuvent exposer les malades à des lésions cutanées et les membres du personnel médical qui effectuent de tels actes à des cataractes radio-induites.

### Gestion de la radioprotection des patients et du personnel médical

Souvent, les réactions tissulaires se limitent à des rougeurs cutanées ou à la chute de cheveux, mais il arrive que, dans quelques cas, des réactions plus graves sous forme d'ulcération ou de nécrose surviennent - parfois des semaines, des mois, voire des années plus tard.

« Parmi les facteurs associés à des doses élevées d'irradiation figurent la corpulence du patient et la complexité médicale de la procédure, qui nécessitent une fluoroscopie prolongée ; dans la plupart des cas cependant, les réactions tissulaires graves non intentionnelles tiennent à une méconnaissance et à un manque de sensibilisation de l'opérateur », a déclaré le Président de la réunion, Stephen Balter, professeur de radiologie et de médecine cliniques à l'Université Columbia (États-Unis d'Amérique).



**La fluoroscopie affiche sur un moniteur une image radiographique continue, produite par un faisceau qui traverse l'organisme. La radioprotection des patients et du personnel médical pendant cette procédure est d'une importance primordiale.** (Photo : Desislava Kostova-Letterova, Hôpital national de cardiologie, Sofia, Bulgarie)

Hal Workman, un patient présentant une grave lésion cutanée apparue à la suite d'une intervention cardiaque réalisée 14 ans auparavant, a expliqué ce qu'il avait enduré : « Il a fallu plus d'un an avant que quelqu'un puisse établir que cette lésion était due à la longue intervention sous fluoroscopie que j'avais subie, et pendant plus de 15 mois, je n'ai jamais pu trouver le sommeil pendant plus de deux heures. Je n'ai jamais autant souffert de ma vie. »

Les participants ont également pris connaissance des dernières avancées de la technologie en matière de fluoroscopie, notamment un type de carte de dose cutanée faisant ressortir visuellement par des couleurs ou une échelle de gris la distribution des doses de rayonnements. Les opérateurs disposent ainsi d'informations sur la surveillance des doses afin de régler plus finement les paramètres de la procédure et d'éviter de blesser les tissus cutanés.

« Vingt années d'efforts ont abouti à une diminution spectaculaire des cas de lésions cutanées », s'est réjoui M. Balter. « Les améliorations apportées aux appareils utilisés pour

la fluoroscopie et aux dispositifs médicaux auxquels ces procédures font appel y contribuent largement. » Il a tenu à souligner l'importance de la planification, en particulier pour les patients obèses et les malades appelés à subir plusieurs interventions, et a insisté sur la nécessité de surveiller constamment la dose administrée et d'anticiper les éventuelles réactions cutanées lorsque la quantité de rayonnements requise dans une procédure complexe était importante.

La surveillance des doses administrées au personnel médical continue par ailleurs de poser problème dans de nombreux pays. Les efforts visant à renforcer la radioprotection impliquent, par exemple, l'utilisation de dosimètres électroniques en temps réel, de systèmes vidéo pour le suivi automatique du personnel et de simulateurs virtuels.

De surcroît, a indiqué M<sup>me</sup> Vassileva, une sensibilisation du personnel médical à la protection contre les rayonnements contribuerait grandement à réduire l'exposition des soignants et des patients. Les participants à la réunion ont estimé que les formations pratiques

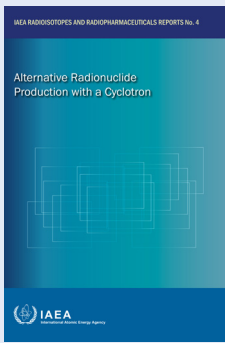
reposant sur des vidéos, comme les nouveaux tutoriels de l'AIEA sur la radioprotection dans les procédures interventionnelles, étaient efficaces à cet égard.

### **Une étude de l'AIEA pour mieux faire prendre conscience du problème**

Afin de pallier le manque de données concernant les réactions tissulaires des patients et de pouvoir comparer les pratiques suivies dans les différents pays, l'AIEA a lancé une étude internationale sur les doses reçues par les patients et les réactions tissulaires survenues lors de procédures interventionnelles assistées par la fluoroscopie.

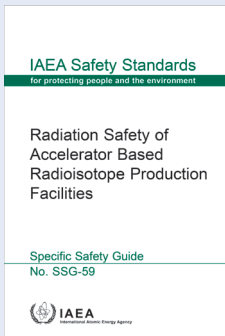
« Notre objectif est de recueillir des données à l'échelle mondiale, ce qui nous aidera à réajuster les valeurs de dose utilisées au moment d'entamer une procédure de suivi pour des patients présentant un risque de réaction cutanée », précise M<sup>me</sup> Vassileva.

— Margherita Gallucci et Natalia Ivanova



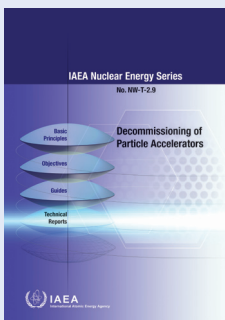
## Alternative Radionuclide Production with a Cyclotron (en anglais)

Les cyclotrons servent actuellement à préparer une large gamme de radionucléides utilisés pour la tomographie d'émission monophotonique (SPECT) et la tomographie à émission de positons (PET). D'où de nombreuses demandes d'appui de la part des États Membres de l'AIEA concernant la production de radiopharmaceutiques à partir de radio-isotopes obtenus au moyen de cyclotrons. Cette publication décrit les méthodes potentielles de production de radionucléides à l'aide de cyclotrons dans différentes gammes d'énergie ; elle indique comment procéder pour la mise au point des cibles et explique en détail comment séparer chimiquement les radionucléides des matières cibles. Elle s'adresse à des scientifiques, à des exploitants qui envisagent de se tourner vers cette technologie, à des manipulateurs ayant déjà recours à des cyclotrons et désireux de mieux utiliser les machines existantes, ou encore à des gestionnaires en passe de doter leur pays d'installations destinées à la production de radionucléides. Les étudiants inscrits dans des filières de qualification connexes du cycle supérieur pourront également tirer profit de cette publication.



## Radiation Safety of Accelerator Based Radioisotope Production Facilities (en anglais)

Utilisés partout dans le monde, les radio-isotopes entrent dans toute une série d'applications qui touchent à la médecine, à l'industrie, à la recherche et aux travaux universitaires. Ils sont en grande partie produits dans des accélérateurs de particules, et le nombre - déjà considérable - d'institutions qui exploitent des accélérateurs linéaires ou des cyclotrons et qui produisent et distribuent des radiopharmaceutiques par exemple, s'accroît. La production de radio-isotopes au moyen d'accélérateurs de particules présente des risques non négligeables d'irradiation pour les travailleurs, le public et l'environnement lorsque ces appareils sont exploités sans que des mesures de radioprotection adéquates aient été prévues. Ce guide de sûreté donne des conseils pratiques relatifs à la mise en place de mesures de radioprotection et de sûreté dans les installations concernées par la production et l'utilisation de radio-isotopes.



## Decommissioning of Particle Accelerators (en anglais)

Cette publication rend compte de l'expérience et des enseignements tirés de la mise en œuvre de projets de déclassement d'accélérateurs de particules. Elle donne, sur la base de ces informations et en réponse aux questions et préoccupations fréquentes de celles et ceux qui sont amenés à jouer un rôle dans ce processus, des renseignements pratiques. Elle s'adresse aux exploitants d'installations abritant des accélérateurs, en particulier lorsque ces derniers sont proches de la phase de déclassement, ou à ceux qui s'occupent d'une installation dans l'attente d'un démantèlement différé, ainsi qu'aux régulateurs, aux gestionnaires de déchets, aux responsables appelés à prendre des décisions au niveau gouvernemental, aux autorités locales, aux entrepreneurs chargés des opérations de déclassement et aux concepteurs d'accélérateurs. Les enseignements à retenir qui figurent dans cette publication devraient faciliter la planification du déclassement dès la conception de nouvelles installations et contribuer à réduire au minimum la production de déchets radioactifs sans compromettre les caractéristiques structurelles ni l'efficacité de la construction.



## Compact Accelerator Based Neutron Sources (en anglais)

La production de neutrons au moyen d'accélérateurs a démarré dans les années 1970 avec la construction de puissants accélérateurs de protons permettant d'accéder aux neutrons par spallation. Dans le même temps sont apparus des procédés de production de neutrons de faible énergie faisant appel à des accélérateurs d'électrons, des accélérateurs de faisceaux d'ions, des cyclotrons et des accélérateurs linéaires à faible énergie. Ces sources diverses et variées qui produisent des neutrons à partir d'un accélérateur sont désormais appelées « sources compactes de neutrons alimentées par accélérateur » (compact accelerator based neutron sources - CANS). Cette publication donne un aperçu des différents types de technologies actuellement disponibles ou prévues dans un avenir proche en la matière. Elle illustre de nombreuses applications analytiques et autres des neutrons. Son but est également, eu égard à la grande diversité des puissances et des coûts associés à ces sources, de montrer qu'en plus de remplacer les réacteurs de recherche nationaux à flux moyens pour certaines fonctions, des sources de neutrons régionales plus petites peuvent se révéler viables, ce qui pourrait à terme élargir l'accès aux installations neutroniques.

**Pour obtenir de plus amples informations ou pour commander une publication, veuillez écrire à l'adresse suivante :**

Unité de la promotion et de la vente

Agence internationale de l'énergie atomique

Centre international de Vienne, B.P. 100, 1400 Vienne (Autriche)

Mél. : [sales.publications@iaea.org](mailto:sales.publications@iaea.org)



Lisez cette publication et d'autres numéros du Bulletin de l'AIEA en ligne à l'adresse  
[www.iaea.org/bulletin](http://www.iaea.org/bulletin)

Pour de plus amples informations sur l'AIEA et les travaux qu'elle mène, rendez-vous sur le site  
[www.iaea.org](http://www.iaea.org)

ou suivez-nous sur

