

# IAEA BULLETIN

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE

La publication phare de l'AIEA | Novembre 2018

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



## Science et technologie nucléaires

Répondre aux défis actuels et futurs en matière de développement

Un nombre record de cellules cancéreuses détruites :  
la radiothérapie entre dans une nouvelle ère, p. 4

Engrais et atomes : à la recherche d'un  
équilibre pour augmenter la productivité  
et protéger l'environnement, p. 11

Danger en mer : ce que  
les atomes des palourdes  
nous apprennent  
sur l'acidification  
des océans, p. 14

Et aussi :  
Infos AIEA



### 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 : Nicole Jawerth

Rédaction : Miklos Gaspar

Conception 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 sollicitée 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 l'AIEA décline toute responsabilité à cet égard.

Couverture : O. Morozova/AIEA

Suivez-nous sur :



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

Créée en 1957 en tant qu'organe autonome, l'AIEA est le seul organisme des Nations Unies à être spécialisé dans les technologies nucléaires. Ses laboratoires spécialisés uniques au monde 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 mis en place 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 degré élevé de sûreté pour la protection des personnes et de l'environnement contre les effets néfastes 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'inspections, 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.

Les tâches de l'AIEA sont multiples et font 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, New York, Tokyo et Toronto. Elle exploite des laboratoires scientifiques à Monaco, Seibersdorf et Vienne. En outre, elle apporte son appui et contribue financièrement au fonctionnement du Centre international Abdus Salam de physique théorique de Trieste (Italie).

# La science et la technologie nucléaires au service d'un futur durable

Par Yukiya Amano, Directeur général de l'AIEA

Les avancées en informatique, en ingénierie et en physique de ces dernières décennies ont fortement accru la contribution de la science et de la technologie nucléaires dans des domaines aussi divers que les soins de santé, l'énergie et la protection de l'environnement. L'adaptabilité croissante des applications nucléaires aide les pays à faire face à de nombreux problèmes, tant anciens que nouveaux.

Dans le cadre de son mandat, qui consiste à mettre l'atome au service de la paix et du développement, l'AIEA aide les pays à profiter pleinement de la science et de la technologie nucléaires pour améliorer la vie de leurs populations et la protection de l'environnement. Elle est la mieux à même de les aider à renforcer leurs capacités, leurs connaissances et leurs compétences et à tirer profit des derniers progrès des applications nucléaires. La Conférence ministérielle de l'AIEA sur la science et la technologie nucléaires : enjeux actuels et futurs en matière de développement, qui aura lieu en novembre 2018, s'inscrit dans les efforts que nous ne cessons de déployer pour que les principaux penseurs et décideurs se rassemblent afin d'évaluer la situation actuelle et de s'interroger sur ce que l'avenir nous réserve.

Dans la présente édition du *Bulletin de l'AIEA*, découvrez certaines des applications innovantes de la science et de la technologie nucléaires à travers le monde.

Apprenez comment grâce aux dernières avancées en radiothérapie le traitement du cancer est plus efficace, plus sûr et plus supportable pour les patients que jamais auparavant (lire en page 4). Découvrez comment les techniques isotopiques permettent d'obtenir de précieuses informations sur la nutrition, qui aident à lutter contre l'apparition de modes de vie malsains, souvent associés à une prospérité croissante (lire en page 6). D'autres techniques isotopiques aident les agriculteurs à optimiser l'utilisation d'engrais pour stimuler la production alimentaire destinée à nourrir une population mondiale croissante et à en atténuer les effets négatifs comme contaminants de l'environnement et sources d'émissions de gaz à effet de serre (lire en page 11).

De nombreux pays se tournent vers la science nucléaire pour mieux surveiller les changements climatiques – considérés généralement comme le plus grand défi environnemental de notre époque –, les atténuer et s'y adapter. Les experts présents lors du Forum scientifique 2018 de l'AIEA se sont accordés à dire que la technologie nucléaire devait faire partie des solutions au problème que posent les changements climatiques (lire en page 17). Cette technologie a également attiré l'attention sur ce qu'on appelle parfois « l'autre problème posé par le CO<sub>2</sub> », c'est-à-dire l'acidification des océans, et permet aux scientifiques de lutter contre ses conséquences dans les océans et sur les moyens de subsistance des populations côtières (lire en page 14).

Le rôle des techniques nucléaires s'est considérablement accru au fil des années. Elles sont utilisées dans des domaines nouveaux et variés, comme l'exploration spatiale et la conservation d'œuvres d'art et objets historiques précieux (lire en page 9). Afin de maintenir cette dynamique positive, il faut veiller à la formation, théorique et pratique, de nouvelles générations de spécialistes du nucléaire et à l'échange des connaissances entre les différentes disciplines. L'histoire du jeune chimiste philippin que nous racontons montre que permettre à un non spécialiste d'utiliser des techniques nucléaires peut combler des lacunes scientifiques et ouvrir de nouvelles perspectives de recherche (lire en page 19). Les pays sont de plus en plus conscients de la nécessité d'accroître le nombre de femmes qui travaillent dans les sciences nucléaires afin que nous puissions tirer parti au mieux de tous les esprits les plus brillants de la planète (lire en page 21).

L'AIEA s'engage à aider tous les pays à utiliser les applications nucléaires de manière pacifique afin que leurs populations en bénéficient le plus possible.



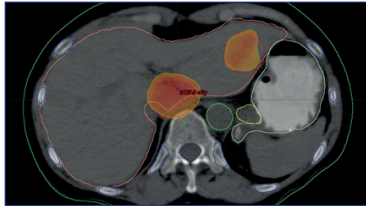
(Photos : C. Brady/AIEA)



## Avant-propos

### **1 La science et la technologie nucléaires au service d'un futur durable**

#### Améliorer la qualité de vie



**4 Un nombre record de cellules cancéreuses détruites : la radiothérapie entre dans une nouvelle ère**



**6 La précision de l'atome au service d'une politique de santé à Maurice**

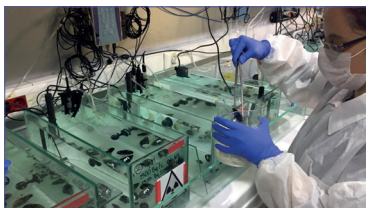


**9 Les rayons X permettent de lever le voile sur l'identité des auteurs d'un chef-d'œuvre vieux de plusieurs siècles en Albanie**

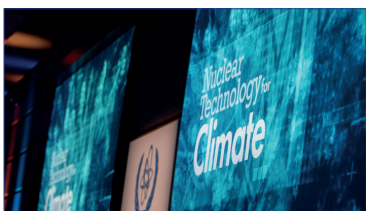


**11 Engrais et atomes : à la recherche d'un équilibre pour augmenter la productivité et protéger l'environnement**

#### Faire face aux défis posés par le changement climatique



**14 Danger en mer : ce que les atomes des palourdes nous apprennent sur l'acidification des océans**



**17 La technologie nucléaire au service de la lutte contre les changements climatiques**

Conclusions du Forum scientifique 2018 de l'AIEA

Applications de la science et de la technologie nucléaires :  
soutenir, aider et donner les moyens d'agir



**19 Face à l'absence de données environnementales, un jeune chimiste philippin se tourne vers la science nucléaire**



**21 Vers l'élimination des disparités entre hommes et femmes dans les sciences nucléaires**

Dans le monde — La voie à suivre

**23 Mettre fin au paradoxe de l'innovation et voir en quoi l'AIEA peut aider**

Séance de questions-réponses avec l'économiste en chef du pôle d'expertise pour la croissance équitable de la Banque mondiale

**25 Science et technologie nucléaires : la Malaisie sur la voie du Programme de développement durable à l'horizon 2030**

— Par Mohd Abdul Wahab Yusof

**27 Répondre aux besoins d'un monde qui change : la technologie nucléaire aujourd'hui et demain**

— Par Aldo Malavasi

Infos AIEA

**29 Défi de production participative de l'AIEA sur les matériaux de fusion nucléaire : les lauréats dévoilés**

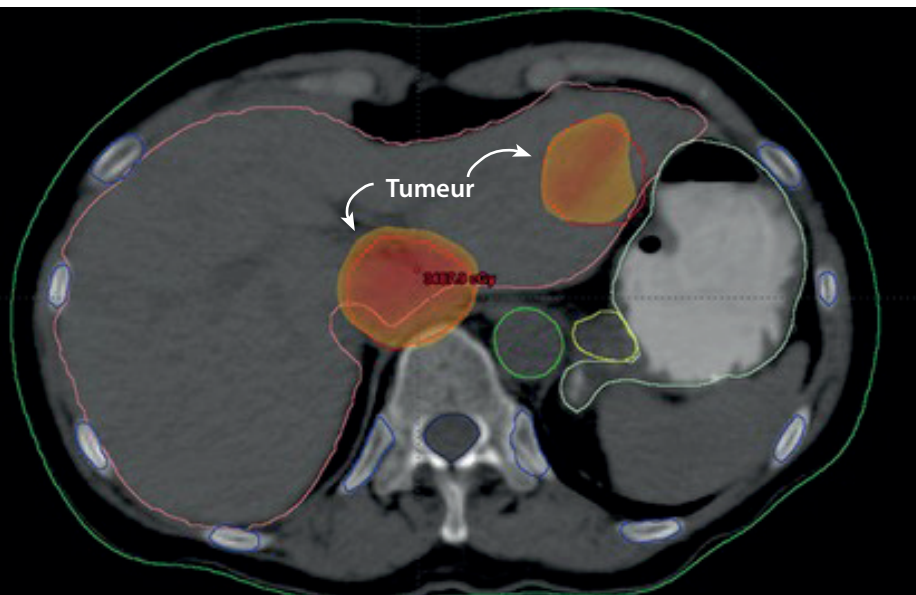
**30 Des scientifiques de 40 pays bénéficient de la formation en ligne de l'AIEA sur l'activation neutronique**

**31 L'Égypte et le Sénégal reçoivent des détecteurs gamma pour lutter contre l'érosion de sols**

**32 Publications**

# Un nombre record de cellules cancéreuses détruites : la radiothérapie entre dans une nouvelle ère

Par Nicole Jawerth



**Un cas de cancer du foie qui sera traité par une forme avancée de radiothérapie, la radiothérapie stéréotaxique corps entier.**

(Photo : Institut national du cancer, Égypte)

Les rayonnements ont révolutionné la médecine lorsqu'ils ont été appliqués la première fois au traitement du cancer, en 1901. Cependant, leur utilisation n'a pu évoluer qu'en fonction des innovations techniques. Aujourd'hui, grâce aux progrès de la physique, de la technologie et de l'informatique, la radiothérapie entre dans une nouvelle ère de précision, d'efficacité et de sûreté. L'AIEA contribue à faire en sorte que ses avancées profitent aux patients dans le monde entier.

« Ces avancées peuvent améliorer la qualité de vie du patient durant son traitement. Et, en ce qui concerne de nombreux types de cancer, elles peuvent permettre d'améliorer le ciblage de la tumeur, d'en réduire la récurrence et d'augmenter les taux de survie », a déclaré May Abdel-Wahab, directrice de la Division de la santé humaine de l'AIEA. « En outre, certaines de ces nouvelles techniques, comme la radiothérapie stéréotaxique corps entier (RSCE), peuvent venir compléter les nouveaux traitements d'immunothérapie en renforçant l'immunogénicité du cancer », a-t-elle expliqué.

Plus de 14 millions de cas de cancer sont diagnostiqués dans le monde chaque année. Environ la moitié des patients qui sont atteints par cette maladie bénéficient d'une radiothérapie à un moment ou à un autre de leur traitement (voir l'encadré « En savoir plus »), qui est souvent combinée avec d'autres méthodes, comme la chirurgie et la chimiothérapie.

De nombreux pays en développement éprouvent des difficultés à suivre l'évolution des technologies et des méthodes. Avec l'aide de l'AIEA, certains pays à travers le monde créent des services de radiothérapie et reçoivent des formations dans ce domaine, se convertissant ainsi à des techniques de pointe en toute sûreté. « L'AIEA travaille avec acharnement pour permettre aux pays de fournir des services de radiothérapie de grande qualité, de façon à ce que tous les patients puissent avoir accès à ces méthodes et à ces outils qui sauvent des vies et qu'ils en bénéficient », a poursuivi M<sup>me</sup> Abdel-Wahab.

## L'objectif de la radiothérapie

L'objectif de la radiothérapie est d'optimiser de façon sûre le traitement d'une tumeur grâce aux rayonnements, tout en réduisant le plus possible les dommages infligés aux tissus normaux et aux organes critiques adjacents du patient. À cette fin, les spécialistes doivent d'abord étudier la tumeur et planifier méticuleusement le traitement au moyen d'outils d'imagerie diagnostique et de planification. Ils utilisent ensuite un appareil de radiothérapie émettant un faisceau de rayonnements soigneusement dosés pour atteindre la tumeur de manière sûre.

Des doses plus élevées de rayonnements peuvent détruire davantage de cellules cancéreuses mais présentent également plus de risques pour les tissus normaux adjacents. « C'est pour cette raison qu'il est essentiel, afin que la radiothérapie soit sûre et efficace, de veiller à bien cibler les tumeurs et d'administrer des doses exactes de rayonnements », a déclaré M<sup>me</sup> Abdel-Wahab. « Bon nombre des avancées que nous constatons dans le domaine de la radiothérapie tiennent à l'amélioration et au perfectionnement de ces deux éléments. »

## Des plans de lutte contre le cancer plus précis

Des avancées en matière d'imagerie et de planification des traitements, par exemple, ont permis aux radio-oncologues de passer de la radiothérapie 2D à la radiothérapie 3D, avec ses propres images et le contourage qui en découle (processus qui consiste à prendre des images d'une tumeur et à étudier cette dernière afin d'en circonscrire le périmètre et de déterminer où commencent les tissus sains). L'essor des outils de planification automatisés permet également aux radio-oncologues d'exploiter la puissance de calcul pour cibler

la tumeur, prévoir avec exactitude la quantité de rayonnement à utiliser sur chacune de ses parties et l'atteindre sous des angles particuliers.

Cependant, la précision des traitements dépend de la qualité des images diagnostiques et des capacités des appareils de radiothérapie. L'imagerie diagnostique de générations précédentes était moins détaillée et les capacités des techniques de radiothérapie étaient plus limitées. Les spécialistes étaient ainsi contraints d'utiliser des doses de rayonnements plus faibles au cours de séances plus nombreuses pour assurer la sûreté du patient ; parfois, selon l'état de celui-ci, il fallait complètement exclure la radiothérapie des possibilités de traitement.

La situation a changé avec l'arrivée d'outils et de procédures comme la curiethérapie 3D et la radiothérapie guidée par l'image, dont les images détaillées permettent d'orienter et d'ajuster activement les rayonnements pendant le traitement. La RSCE permet également d'administrer un traitement très précis, où le patient reçoit des rayonnements selon plusieurs angles, et d'augmenter sensiblement les doses sur des périodes de traitement plus courtes.

### Délimiter et vaincre une tumeur

La RSCE a fortement contribué à améliorer la surveillance et la précision. Sa particularité est d'être basée sur des images 4D, qui rendent compte de la hauteur, de la largeur, de la profondeur et sur certains sites, du mouvement, permettant de planifier la thérapie et d'orienter des faisceaux de rayonnements très précis vers une tumeur selon des angles différents. Chaque faisceau pris séparément envoie une faible dose de rayonnement, ce qui augmente la sûreté et réduit les risques d'effets secondaires sur les tissus sains situés sur sa trajectoire. Lorsqu'ils convergent tous vers la tumeur, les cellules cancéreuses sont soumises à une dose combinée de rayonnements plus forte. En général, pour être traité efficacement, un patient a donc besoin de moins de séances.

« Pour certains types de cancers qui sont inopérables ou ne peuvent pas être traités efficacement avec une radiothérapie classique, la RSCE représente une nouvelle chance de survie du patient », a déclaré Tarek Shouman, responsable du service de radio-oncologie de l'Institut national égyptien du cancer, qui travaille avec l'AIEA depuis plus de 20 ans.

Tarek Shouman et l'équipe de l'Institut national du cancer utilisent maintenant la RSCE, en partie grâce à l'aide de l'AIEA, pour lutter contre le cancer du poumon à un stade précoce, le cancer récurrent de la tête et du cou et un type de cancer du foie appelé carcinome hépatocellulaire (CHC), cancer le plus répandu chez les égyptiens mâles.

« Pour les cancers du foie comme le CHC, la RSCE a radicalement amélioré les possibilités de traitement par rayonnements », a expliqué Tarek Shouman. Le cancer du foie est aujourd'hui le troisième type de cancer qui entraîne le plus de décès dans le monde. Pendant des années, il n'a pas pu être traité efficacement avec des rayonnements ; avec la radiothérapie classique, il est impossible d'administrer de manière sûre des doses de rayonnements suffisamment élevées pour traiter une tumeur au foie en raison des risques pour les tissus sains environnants. La RSCE permet de traiter même les toutes petites tumeurs du foie en administrant des doses de rayonnements plus élevées tout en préservant les tissus sains.

Selon certaines études, la RSCE peut réduire le nombre de séances de traitement du CHC et d'autres cancers, comme ceux du cerveau, des poumons, de la tête et du cou, qui varie entre une et cinq contre 30 à 35 au cours d'un traitement classique. Sur deux ans de traitement, les taux de réussite de la RSCE sont de 80 à 90 % pour certains cancers, soit autant que l'ablation chirurgicale d'une tumeur, avec moins de risques.

« La RSCE n'est qu'une nouvelle technique de radiothérapie parmi d'autres – dans ce domaine les progrès sont rapides. Nous prévoyons de continuer à travailler étroitement avec l'AIEA, afin de rester à la pointe dans ce domaine, tout en intensifiant notre collaboration avec d'autres pays et l'aide que nous leur apportons », a conclu Tarek Shouman.

## EN SAVOIR PLUS

### La radiothérapie

Le cancer correspond à une multiplication anormale et incontrôlée de cellules dans le corps. En radiothérapie, une équipe de radio-oncologues, de physiciens médicaux et radiothérapeutes cible les cellules cancéreuses avec des rayonnements ionisants émis par un appareil de radiothérapie. Selon le type de cancer et son emplacement, elle peut avoir recours à des faisceaux externes de rayonnements ou à des sources de rayonnements qui seront placées à l'intérieur du corps du patient. Les rayonnements endommagent l'ADN

des cellules cancéreuses. Celles-ci étant défectueuses, leur ADN ne peut donc pas être réparé, ce qui les empêche de se diviser et de croître et finit par entraîner leur destruction. Les cellules normales qui sont aussi exposées aux rayonnements lors du traitement sont mieux à même de se réparer parce qu'elles sont saines, ce qui augmente leurs chances de survie à la radiothérapie.



---

**« Il est primordial de connaître la composition corporelle, car il s'agit du marqueur approprié pour mesurer la graisse corporelle. Avec le bon marqueur, vous pouvez savoir exactement quelle est la situation dans le pays »**

— Noorejehan Joonus, chef des services de biochimie au Laboratoire central de la santé, Maurice

---



# La précision de l'atome au service d'une politique de santé à Maurice

Par **Luciana Viegas Assumpcao**

Un vent de prospérité économique souffle sur Maurice, île animée située dans l'océan Indien. Si l'enrichissement a créé des possibilités, il a également entraîné une hausse des habitudes nuisibles à la santé. Dans de nombreux pays, l'accroissement de la richesse s'accompagne souvent d'une augmentation de la graisse abdominale et des maladies connexes, qui pourraient être évitées. Afin de mieux comprendre l'influence de la nutrition sur la santé nationale, des pays comme Maurice se tournent vers les techniques nucléaires.

« L'étude de la nutrition suscite de plus en plus d'intérêt, afin de mieux cibler les interventions en matière de santé et d'évaluer leurs effets », a déclaré Cornelia Loechl, chef de la Section de études de nutrition de l'AIEA. « De nombreux pays, comme Maurice, sont confrontés à un double fardeau : la dénutrition et les carences en micronutriments coexistent avec le surpoids et l'obésité, augmentant les risques de maladies non transmissibles liées au régime alimentaire », a-t-elle expliqué.

Au cours des dernières décennies, le produit intérieur brut de Maurice a triplé, principalement grâce au secteur du tourisme et à l'industrie textile, et le pays affiche maintenant l'un des revenus par habitant les plus élevés d'Afrique. L'accès à des soins de santé complets est gratuit, lesquels sont dispensés, pour la majorité de la population, par des centres régionaux de santé.

Cependant, en raison d'une consommation accrue de mets de la restauration rapide, conjuguée à une baisse de l'activité physique et à l'allongement de l'espérance de vie, le pays présente maintenant les plus forts taux d'obésité et de diabète d'Afrique. Le nombre de maladies non transmissibles s'est envolé : elles ont été responsables de 80 % des décès en 2016, le diabète à lui seul représentant 24 % de la mortalité et le cancer 12 %.

« La pathologie du cancer à Maurice est très différente de celle du continent africain », a expliqué Shyam Manraj, directeur des services de laboratoire et coordonnateur du registre national du cancer au Ministère de la santé et de la qualité de vie. « Le pays a les taux les plus élevés de cancer du sein, de cancer colorectal et de cancer de l'endomètre du continent. Ces types de cancer sont généralement liés au régime alimentaire », a-t-il ajouté.

Afin de faire face à cette charge croissante, les autorités mauriciennes ont décidé d'améliorer le suivi de l'obésité et de ses effets. Avec l'aide de l'AIEA, le pays a mené plusieurs études depuis 2009 pour mesurer la composition corporelle grâce à une méthode faisant appel aux isotopes stables, appelée la technique de dilution du deutérium (voir l'encadré « En savoir plus »). Ces études donnent une image



**Les résultats d'études menées sur la composition corporelle au moyen de techniques isotopiques ont poussé le Gouvernement mauricien à contrôler plus strictement la nourriture vendue dans les échoppes scolaires comme ici, à l'école publique de Baichoo Madhoo.**

(Photo : L. Viegas Assumpcao/AIEA)

plus précise que celles qui sont fondées sur des méthodes de mesure classiques, comme l'indice de masse corporelle (IMC).

Selon Cornelia Loechl, « la technique de dilution du deutérium permet de déterminer la quantité de graisse corporelle et la masse maigre. C'est important parce qu'une quantité élevée de graisse corporelle peut avoir des conséquences négatives sur la santé ».

Le Laboratoire central national de la santé de Maurice a commencé par étudier l'ampleur de l'obésité chez les enfants âgés de six à treize ans, afin de définir à quel moment ils commencent à être en surpoids et de déterminer les risques pour la santé que cela implique. Les résultats ont montré que l'IMC dans ce groupe d'âge sous-estimait l'obésité et le surpoids chez les garçons comme chez les filles, et que de nombreux jeunes seraient atteints de maladies chroniques dans un avenir proche. « Nous avons observé une augmentation de la résistance à l'insuline, ce qui signifie que les enfants sont prédisposés à des maladies non transmissibles, en particulier au diabète », a déclaré Noorejehan Joonus, chef des services de biochimie au Laboratoire central de la santé, qui dirige ces études.

« Nous avons communiqué nos résultats au Ministère de la santé et au Ministère de l'éducation, et la place de l'éducation physique a augmenté à l'école », a-t-il ajouté. « Les enfants pratiquent désormais une activité physique tous les jours, plutôt qu'une seule fois par semaine. »



### Des enfants mauriciens boivent de l'eau enrichie en deutérium dans le cadre d'une étude destinée à déterminer leur composition corporelle.

(Photo : L. Viegas Assumpcao/AIEA)

En outre, le Gouvernement a renforcé d'autres mesures : une taxe qui existait déjà sur le sucre a été augmentée et la nourriture vendue dans les écoles est soumise à des contrôles plus stricts. Il a également développé les services de soutien à la nutrition dans tous les centres de santé régionaux. « Dans une phase prédiabétique, la situation est encore réversible, ce qui n'est plus le cas lorsque le diabète est déclaré, aussi donnons-nous très tôt des conseils en matière d'alimentation », a déclaré Anju Gowreesunkur, nutritionniste au Ministère de la santé et de la qualité de vie.

Depuis, Maurice a étendu les études à différents groupes de populations. En association avec la technique de dilution du deutérium, le laboratoire a commencé à utiliser des scanners d'absorptiométrie à rayons X en double énergie (DEXA) pour étudier le lien entre composition corporelle et résistance à l'insuline et le cancer du sein et le cancer colorectal. La DEXA fournit des informations sur la répartition de la graisse corporelle (voir l'encadré « En savoir plus ») qu'il est important de prendre en compte, car la graisse entourant les organes (le tissu adipeux viscéral) induit plus de risques de maladies chroniques comme le diabète.

« Ces études nous aident réellement à mettre au point notre programme de lutte contre le cancer », a déclaré Noorejhan Joonus. Le pays prévoit d'organiser un cours régional sur les applications isotopiques aux fins des évaluations nutritionnelles à l'Université de Maurice, en collaboration avec l'AIEA. « Il est primordial de connaître la composition corporelle, car il s'agit du marqueur approprié pour mesurer la graisse corporelle. Avec le bon marqueur, vous pouvez savoir exactement quelle est la situation dans le pays »

Avec de meilleures données, Maurice prévoit de continuer à améliorer ses politiques nutritionnelles de prévention des maladies, de façon à ce que sa richesse et sa prospérité ne soient pas acquises aux dépens de la santé de sa population. « Comme l'on a coutume de dire, "nous sommes ce que nous mangeons". Les recherches ne cessent de montrer que des maladies peuvent être évitées ou retardées simplement si l'on mange les bons aliments », a déclaré Anju Gowreesunkur.

## EN SAVOIR PLUS

### Dilution du deutérium et DEXA

La méthode de **dilution du deutérium** consiste à boire de l'eau contenant une quantité connue de deutérium, un isotope stable de l'hydrogène. Un isotope est un atome d'un même élément (d'hydrogène en l'occurrence) qui a le même nombre de protons mais un nombre différent de neutrons. Les isotopes d'un élément ont un poids atomique différent, ce qui permet aux chercheurs de les tracer à partir de leur masse.

Après quelques heures, le deutérium s'étant complètement mélangé à l'eau du corps, on prélève un échantillon de salive qui est représentatif de la quantité d'eau corporelle. Le taux de concentration de deutérium dans la salive peut alors être mesuré. Étant donné que la quantité de deutérium avalé et sa concentration dans l'eau corporelle sont deux éléments connus, il est possible de calculer la quantité d'eau corporelle totale. Une fois cette donnée connue, les chercheurs peuvent calculer les proportions de graisse et de masse maigre dans le corps, c'est-à-dire la composition corporelle.

La DEXA, ou **absorptiométrie à rayons X en double énergie**, est une technique d'imagerie qui permet

d'évaluer la répartition de la graisse corporelle. Des rayons X de deux niveaux d'énergie différents sont émis par un scanner qui balaie l'ensemble du corps. Les deux faisceaux d'énergie sont absorbés différemment selon les tissus corporels. L'appareil de DEXA mesure la quantité d'énergie absorbée par les différents tissus et transforme ces mesures en images. En superposant ces images, on peut visualiser et calculer les proportions relatives de constituants minéraux osseux, de tissus gras et de tissus maigres mous.

La DEXA a été conçue principalement pour mesurer la densité minérale osseuse chez l'adulte, dans le cadre du diagnostic de l'ostéoporose. Cependant, le scanner mesure également la composition corporelle avec un degré de précision élevé. Le principal avantage de la DEXA est qu'elle mesure les dépôts de graisse localisée, c'est-à-dire les endroits où est stockée la graisse corporelle. C'est important, car la graisse accumulée autour des organes (le tissu adipeux viscéral) comporte plus de risques pour la santé.

# Les rayons X permettent de lever le voile sur l'identité des auteurs d'un chef-d'œuvre vieux de plusieurs siècles en Albanie

Par Alejandra Silva



À l'aide d'un spectromètre à fluorescence X portable, des scientifiques ont analysé un portrait de saint Georges, l'un des saints les plus illustres de la religion chrétienne.

(Photo : A. Silva/AIEA)

Des chercheurs albanais ont eu recours aux rayons X pour tenter de découvrir qui avait peint un fragile chef-d'œuvre représentant saint Georges, l'un des saints les plus connus du monde chrétien et datant de plusieurs siècles. Ils ont notamment employé deux méthodes faisant appel aux rayons X, à savoir les essais non destructifs (END) et les analyses non destructives (AND), largement utilisées aux fins de l'étude des matériaux et de la qualité des objets, que ce soit pour analyser des objets du patrimoine culturel et des échantillons biomédicaux, comme le sang et les cheveux, ou pour détecter des fissures ou des cavités dans des oléoducs et des pièces d'avion.

« Les essais et analyses non destructifs permettent d'évaluer l'intégrité et les propriétés physiques des objets sans les endommager, ce qui est primordial dans le cas d'artéfacts anciens, souvent très fragiles », explique Elida Bylyku, directrice de l'Institut de physique nucléaire appliquée de Tirana (Albanie). « Grâce aux rayons X, on peut également voir l'intérieur d'un objet et déceler de possibles fissures ou défauts qui passeraient inaperçus autrement », poursuit-elle.

Une fois en possession du tableau, trouvé dans une vieille église, les chercheurs de l'Institut de physique nucléaire appliquée ont collaboré avec des experts de l'AIEA pour étudier le portrait au moyen des techniques d'END et d'AND. Leurs découvertes ont aidé les conservateurs du Musée national d'histoire de Tirana à comprendre l'histoire

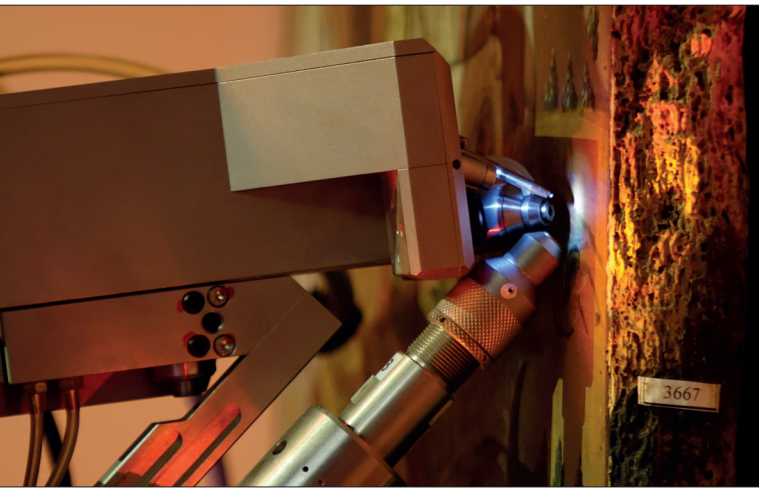
de la toile et à choisir les techniques qui convenaient le mieux pour restaurer la précieuse œuvre d'art.

« Lorsque nous avons reçu le portrait, nous avons d'abord pensé qu'il avait été réalisé par un artiste anonyme », explique Elida Bylyku. Après avoir vérifié l'intégrité des structures du tableau à l'aide de la radiographie industrielle, les chercheurs ont eu recours à la spectrométrie à fluorescence X pour identifier les matériaux utilisés pour réaliser l'icône (voir l'encadré « En savoir plus »). Ils ont alors comparé les matériaux en question avec ceux employés par divers artistes à différentes époques, et ont pu établir une correspondance.

« Grâce à la spectrométrie à fluorescence X, nous avons pu déterminer quels pigments avaient servi à réaliser le portrait de saint Georges, ce qui nous a permis de découvrir que l'icône avait été peinte par les frères Çetiri au XVIII<sup>e</sup> siècle », explique Elida Bylyku.

« Il est très important de connaître cette information pour pouvoir restaurer l'œuvre de manière fidèle. »

Le portrait de saint Georges est l'un des nombreux trésors du patrimoine culturel et archéologique que compte la collection du musée, riche de plusieurs milliers d'œuvres. Nombre d'entre elles ont été découvertes sur des sites historiques ou dans des églises. Elles sont souvent fragiles et dans un état de



**Des faisceaux de rayons X interagissent avec les atomes du portrait, révélant ainsi des indices sur son histoire et sa création.**

(Photo: A. Silva/AIEA)

dégradation certain, ce qui rend leur manipulation délicate. Étant donné que les techniques d'END et d'AND permettent d'intervenir sans avoir à toucher les objets, les chercheurs les utilisent souvent pour étudier des pièces de ce type.

### **Protéger le patrimoine culturel à l'échelle de la planète**

Les essais et analyses non destructifs peuvent révéler de précieux détails qui sont présents dans les œuvres

d'art et les objets du patrimoine culturel, mais qui sont invisibles à l'œil nu. « Chaque pièce contient une combinaison caractéristique d'éléments et d'isotopes, qui renseigne sur son origine, non seulement sur les techniques et matériaux employés, mais aussi sur la date et même le lieu probables de sa création », indique Patrick Brisset, spécialiste de la technologie industrielle à l'AIEA. « Si ces renseignements peuvent aider à préserver les œuvres et à percer les mystères entourant leur création, ils peuvent également servir à mettre au jour les contrefaçons. »

Des centaines de spécialistes dans le monde entier collaborent avec l'AIEA pour tirer parti des techniques d'END et d'AND afin d'étudier le patrimoine culturel, d'en assurer la préservation et de détecter les contrefaçons. Ils peuvent notamment recevoir des formations et bénéficier de l'équipement et des installations nécessaires pour effectuer leurs études dans le cadre de projets de recherche coordonnée et de coopération technique de l'AIEA. Ces projets sont également l'occasion pour les spécialistes de mettre en commun leurs compétences et leurs connaissances, ce qui permet de progresser dans ce domaine et de préserver l'histoire de la civilisation humaine.

« Nous travaillons avec l'Institut de physique nucléaire appliquée, car les icônes comptent parmi les objets les plus précieux de notre patrimoine. Notre objectif est donc de faire tout notre possible pour que ces artefacts puissent être analysés et préservés comme il convient », souligne Arta Dollani, directrice de l'Institut albanais des monuments culturels, qui collabore étroitement avec le Musée national d'histoire à la restauration d'objets du patrimoine culturel.

## **EN SAVOIR PLUS**

### **La spectrométrie à fluorescence X et la radiographie industrielle**

La **spectrométrie à fluorescence X** est une méthode d'analyse non destructive qui permet de détecter la présence d'éléments chimiques et d'en mesurer la concentration dans presque tous les types de matières. Les scientifiques utilisent généralement un petit appareil portatif, appelé « spectromètre à fluorescence X », pour bombarder l'échantillon à analyser avec des faisceaux de rayons X. Ceux-ci interagissent avec les atomes de l'échantillon et éjectent les électrons de la couche électronique interne de ces atomes. Quand un électron est éjecté, il laisse une place vacante qu'un électron d'une couche supérieure vient alors occuper. Lors du passage d'un électron d'une couche supérieure à une couche inférieure, de l'énergie est libérée sous forme de rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement prend la forme de rayons X, qui peuvent être détectés par le spectromètre et permettent d'identifier, sans doute possible, l'élément dont ils proviennent. Cette méthode est très précise, car l'énergie des rayons X émis est caractéristique de chaque élément.

La spectrométrie à fluorescence X est couramment utilisée en archéométrie pour connaître la composition des pigments ou des métaux utilisés dans des manuscrits, des peintures, des pièces de monnaie, des céramiques et d'autres artefacts.

La **radiographie industrielle** est une méthode d'essai non destructif à laquelle on a recours pour vérifier la structure interne et l'intégrité d'objets. Un rayonnement ionisant, comme le rayon X, génère une image de la structure interne de matériaux solides et durs. Il traverse le matériau et impressionne un film placé de l'autre côté de celui-ci. Suivant la quantité de rayonnement qui traverse l'objet, le film est plus ou moins noirci : les matériaux présentant des zones de plus faible épaisseur, des fissures ou des cavités ou constitués de matière de faible densité laissent plus passer les rayonnements. Les variations d'intensité sur l'image obtenue peuvent mettre en évidence d'éventuels défauts ou fêlures à l'intérieur de l'objet.



# Engrais et atomes : à la recherche d'un équilibre pour augmenter la productivité et protéger l'environnement

Par Nathalie Mikhailova

Quand il est question des engrais, l'équilibre est vital : une bonne dose au bon moment permet aux cultures de prospérer et de contribuer à nourrir une population mondiale en augmentation, mais tout excès peut ruiner les cultures, polluer les sols et l'eau et participer au réchauffement climatique. Alors comment trouver le bon équilibre ? On peut, par exemple, utiliser des techniques isotopiques pour optimiser l'épandage d'engrais et limiter leur impact en tant que contaminant agricole et source d'émissions de gaz à effet de serre.

## Aider les agriculteurs tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre

« Il n'y a jamais eu autant de bouches à nourrir dans le monde, mais la solution n'est pas d'employer plus d'engrais : leur utilisation excessive est l'une des raisons pour lesquelles le secteur agricole est devenu peu à peu l'une des principales sources de gaz à effet de serre au cours des 70 dernières années », a déclaré Christoph Müller, spécialiste des sols et des végétaux à l'Institut d'écologie végétale de l'Université Justus Liebig, à Giessen (Allemagne), et à l'École des sciences biologiques et environnementales de l'University College de Dublin. En 2014, le secteur agricole,

qui couvre la foresterie et d'autres utilisations des terres, a été à l'origine de 24 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre, d'après l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO).

« Il faut protéger l'environnement tout en aidant les agriculteurs, mais pour ce faire, il est tout d'abord nécessaire de comprendre précisément comment les engrais interagissent avec le sol et les cultures et à quel stade ils émettent des gaz à effet de serre », a ajouté Christoph Müller. « Les techniques nucléaires nous permettent d'obtenir ce genre d'informations détaillées et de trouver des moyens viables d'augmenter la production des cultures vivrières tout en limitant le plus possible l'impact sur l'environnement. »

Les végétaux et le sol transforment les engrais en nutriments utiles, mais certains des sous-produits de cette transformation sont des gaz à effet de serre : dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), oxyde nitreux ( $\text{N}_2\text{O}$ ) et méthane ( $\text{CH}_4$ ). Avec la bonne dose d'engrais, les végétaux poussent bien et la quantité de gaz à effet de serre émise est minimale. Néanmoins, lorsque la quantité d'engrais est trop élevée pour que les végétaux puissent l'absorber, le surplus reste dans le sol, ce qui entraîne une augmentation exponentielle des émissions.



**L'expérience d'enrichissement en CO<sub>2</sub> menée à l'air libre (FACE) consiste à pomper de l'air enrichi en CO<sub>2</sub> sur plusieurs sites expérimentaux constitués de tuyaux disposés en cercle, afin de simuler les quantités de CO<sub>2</sub> que devrait contenir l'atmosphère au milieu du siècle et d'en apprécier les retombées sur des pâturages typiques.**

(Photo : C. Müller/Université Justus Liebig à Giessen)

Christoph Müller, des scientifiques de neuf pays et des experts de l'AIEA effectuent, en partenariat avec la FAO, un suivi des isotopes en vue de comprendre les liens entre engrais, cultures, sols et émissions de gaz à effet de serre (voir l'encadré « En savoir plus »). De tels procédés sont également utilisés dans le cadre d'une expérience d'enrichissement en CO<sub>2</sub> menée à l'air libre (FACE), qui permet à des scientifiques d'étudier dans quelle mesure la qualité des cultures et les besoins en engrais peuvent être influencés par les niveaux de CO<sub>2</sub> plus élevés que contient l'atmosphère sous l'effet des changements climatiques. Les conclusions de leurs études isotopiques serviront à établir des principes directeurs visant à réduire la quantité d'engrais dans l'agriculture, sans compromettre la qualité et le rendement des cultures.

Les résultats de leurs recherches ont déjà permis de trouver des moyens d'optimiser l'application d'engrais sur plus de 100 hectares de pâturages et de cultures de riz, de maïs et de blé : les émissions de gaz à effet de serre ont diminué de 50 % et le rendement des cultures a augmenté de 10 %.

« Dans le cadre de l'expérience FACE, nous constatons aussi que les végétaux poussent plus, mais que leur qualité est modifiée », a ajouté Christoph Müller. FACE est une

expérimentation menée à grande échelle qui reproduit les changements climatiques dans des conditions naturelles. L'une des études les plus anciennes de ce type, qui se poursuit sur le site expérimental de Giessen (Allemagne), consiste à simuler les quantités de CO<sub>2</sub> que devrait contenir l'atmosphère au milieu du siècle et d'en apprécier les retombées sur des pâturages typiques.

Les végétaux qui poussent dans ces conditions, où le niveau de CO<sub>2</sub> est élevé, sont plus résistants et contiennent moins de protéines. L'estomac des vaches qui les broutent est davantage sollicité, et elles doivent en ingérer une plus grande quantité pour en extraire suffisamment de nutriments afin de produire du lait. Non seulement cela compromet la production de lait, mais aussi les vaches émettent plus de méthane, gaz à effet de serre 34 fois plus puissant que le CO<sub>2</sub>.

### **Des engrais détectés dans l'eau de boisson et ailleurs**

En plus de contribuer aux émissions de gaz à effet de serre, les engrais en surplus sont souvent emportés par les pluies

ou la fonte des neiges dans les fleuves et les cours d'eau pour finir dans l'océan et les systèmes d'adduction d'eau potable.

« Les contaminants agricoles peuvent rendre l'eau non potable et sont nocifs pour les écosystèmes et la biodiversité aquatiques », a déclaré Lee Heng, Chef de la Section de la gestion des sols et de l'eau et de la nutrition des plantes de la Division mixte FAO/AIEA des techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture. « Par exemple, les nutriments présents dans les engrais stimulent la croissance des algues, ce qui fait baisser le niveau d'oxygène dans l'eau et nuit aux poissons et à la vie aquatique. »

Les engrais ne sont que l'un des nombreux produits chimiques agricoles qui polluent l'environnement. Il y a aussi les pesticides, le sel présent dans l'eau d'irrigation, les sédiments et les résidus de médicaments vétérinaires. D'après Lee Heng, leur utilisation est de plus en plus fréquente, car les producteurs de denrées alimentaires cherchent à augmenter la production vivrière tout en luttant contre les effets des changements climatiques.

En collaboration avec des experts de la Division mixte FAO/AIEA, des scientifiques de 15 pays assurent le suivi de nombreux isotopes stables pour étudier les contaminants agricoles, leurs origines et leur migration (voir l'encadré « En savoir plus »). Grâce aux techniques employées, ils pourront identifier les sources des contaminants agricoles et mettre au point des pratiques innovantes durables pour neutraliser l'utilisation excessive de ces derniers et leur impact sur l'environnement.

Pendant plus de 20 ans, les scientifiques n'ont utilisé qu'un isotope à la fois pour identifier les contaminants agricoles, mais cette méthode ne permet pas d'obtenir suffisamment



**Des algues poussent dans le delta du Danube en se nourrissant des nutriments présents dans les engrais qui contaminent l'eau.**

(Photo : Division mixte FAO/AIEA)

d'informations pour les distinguer les uns des autres et en déterminer la signature isotopique spécifique.

« Avec plusieurs isotopes, il est possible d'obtenir un aperçu plus complet de la contribution de chaque produit chimique de chaque source, et les scientifiques peuvent donc déterminer l'approche à adopter pour contrecarrer l'action des polluants dans les champs et les paysages », selon Lee Heng.

## EN SAVOIR PLUS

### Des techniques faisant appel aux isotopes stables

Les isotopes sont des atomes d'un élément qui ont le même nombre de protons mais un nombre différent de neutrons, donc un poids atomique différent. Par exemple, l'azote 15 a le même comportement chimique que l'azote 14, mais un neutron de plus, ce qui le rend plus lourd. Les scientifiques peuvent exploiter ces connaissances pour comprendre et suivre la transformation des isotopes, mais aussi leur migration et leurs échanges avec les végétaux, les sols et les masses d'eau.

Les scientifiques utilisent l'azote 15 et le carbone 13 pour suivre le mouvement et retrouver l'origine des émissions d'oxyde nitreux, de méthane et de dioxyde de carbone dans l'agriculture. En utilisant des engrais marqués à l'azote 15, ils peuvent procéder à un suivi des isotopes et déterminer l'efficacité avec laquelle les cultures assimilent ces engrais ainsi que la quantité de résidus. Le suivi du carbone 13 permet

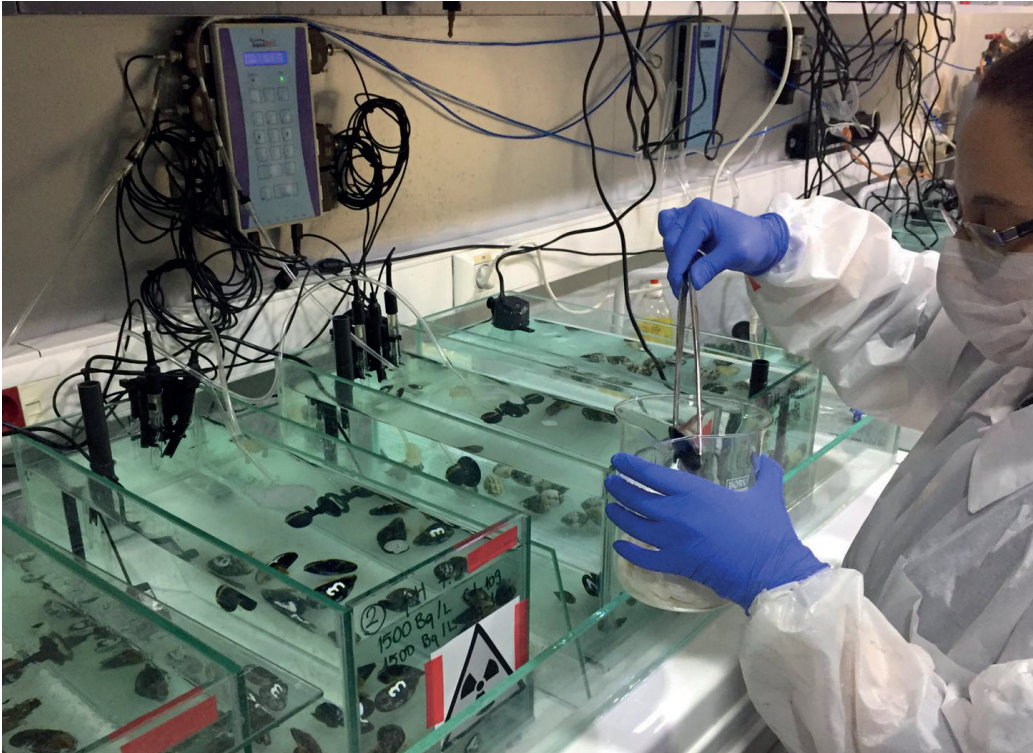
de suivre le mouvement et de retrouver l'origine du dioxyde de carbone et du méthane.

#### Des travaux d'analyse avec plusieurs isotopes

Les scientifiques s'appuient sur les isotopes stables du carbone, de l'hydrogène, de l'azote, de l'oxygène et du soufre pour assurer un suivi des contaminants agricoles depuis leur origine et de leur migration des sols vers les masses d'eau. Ils choisissent ceux-là en particulier parce que les engrais et les pesticides contiennent de l'azote, du soufre et du carbone qui se dissolvent et sont emportés par l'eau, qui elle-même contient des isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène. Puis ils procèdent à des mesures simultanées de ces isotopes en vue de distinguer le cycle de l'eau de celui des polluants et d'en apprendre davantage sur l'origine de ces derniers et leur destination.

# Danger en mer : ce que les atomes des palourdes nous apprennent sur l'acidification des océans

Par Laura Gil



**Pour les scientifiques du monde entier, les organismes marins comme les palourdes, les coraux et les petits escargots de mer sont des révélateurs des incidences que peuvent avoir les émissions de CO<sub>2</sub> sur les océans.**

(Photo : M. Belivermiş/Laboratoire de radioécologie de l'Université d'Istanbul)

Les palourdes et autres mollusques sont menacés. À mesure que les océans s'acidifient sous l'effet de la hausse des émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), il deviendra de plus en plus difficile pour certains de ces organismes marins de constituer leur coquille ou leur squelette. C'est une mauvaise nouvelle, pour les organismes eux-mêmes bien sûr, mais aussi pour les personnes qui en sont tributaires.

La bonne nouvelle ? Grâce aux techniques isotopiques, les scientifiques peuvent retracer l'évolution des atomes dont sont constitués ces animaux marins qui fabriquent leur propre coquille, ce qui leur permet de mieux comprendre l'impact de l'acidification des océans et des changements climatiques – premier pas vers une éventuelle solution au problème.

« À mesure que l'acidité des océans augmente, certains organismes absorbent et accumulent plus de radionucléides ou de métaux que d'autres, se développent plus lentement ou doivent s'alimenter davantage pour survivre. Il est possible de surveiller tous ces effets grâce aux techniques nucléaires », explique Murat Belivermiş, scientifique travaillant au Laboratoire de radioécologie de l'Université d'Istanbul, qui s'appuie sur les techniques isotopiques pour étudier les effets des changements climatiques et de l'acidification des océans sur les produits de la mer importants d'un point de vue socio-économique. M. Belivermiş a appris à utiliser les techniques nucléaires et isotopiques dans le cadre d'un programme de bourses auquel il a pris part en 2013, dans les Laboratoires de l'environnement de l'AIEA à Monaco.

Pour les scientifiques du monde entier, les organismes marins comme les palourdes, les coraux et les petits escargots de mer sont des révélateurs des incidences des changements climatiques sur les océans. Les émissions croissantes de CO<sub>2</sub> — véritable force motrice des changements climatiques — sont également responsables de l'accélération de l'acidification des océans. Il faut savoir en effet que les océans absorbent environ le quart du CO<sub>2</sub> que nous rejetons dans l'atmosphère, ce qui influe sur la chimie de l'eau de mer et, par ricochet, sur certains écosystèmes et organismes marins.

Les techniques nucléaires et isotopiques sont des outils très efficaces grâce auxquels les scientifiques peuvent étudier l'acidification des océans, phénomène que l'on désigne parfois comme « l'autre problème du CO<sub>2</sub> ». Des isotopes radioactifs, tels que le calcium 45, peuvent être utilisés comme traceurs pour mesurer avec précision les taux de croissance d'organismes calcifiants (voir l'encadré « En savoir plus » à la page 16). Il peut s'agir de moules et de palourdes, qui fabriquent leur coquille à partir de carbonate de calcium, minéral présent à l'état naturel dans les océans. Avec l'acidification des océans, il devient de plus en plus difficile pour ces organismes marins de trouver la matière dont ils ont besoin pour former et maintenir en état leur coquille à base de carbonate de calcium.

À l'aide de radiotraceurs, M. Belivermiş et ses collègues ont découvert que, lorsqu'elles étaient exposées à une eau de mer légèrement acidifiée, les palourdes absorbaient deux fois plus de cobalt que dans des conditions de





**La variation des niveaux de pH entraîne non pas la destruction, mais le blanchiment des coquilles d'huîtres : un pH de 8,1 correspond aux conditions ambiantes ; un pH de 7,8 équivaut au taux attendu en 2100 ; et un pH de 7,5 correspond au taux attendu en 2300.**

(Photo : N. Sezer/Laboratoire de radioécologie de l'Université d'Istanbul)

contrôle équilibrées, alors que d'autres organismes marins, tels que les huîtres, font preuve d'une plus grande résilience. Ces résultats montrent que l'acidification des océans présente un risque non seulement pour les palourdes, mais aussi pour les consommateurs ; le cobalt est un métal lourd dont l'organisme humain a besoin en quantités infimes, mais qui se révèle toxique à des concentrations élevées. Ce phénomène peut avoir des répercussions socio-économiques encore plus larges sur les populations côtières comme celles de la Turquie, qui sont tributaires des produits de la mer à la fois comme source d'alimentation et comme denrée d'exportation vers les pays européens.

« Certaines espèces, comme les palourdes, sont très importantes pour le secteur de la pêche, y compris pour de nombreux aquaculteurs en Turquie. Ce type de recherche pourrait donc aider les aquaculteurs à s'adapter aux changements climatiques, ce qui contribuerait au bout du compte à protéger l'économie nationale de la pêche », soutient M. Belivermiş.

M. Belivermiş et son collègue, Önder Kılıç, cherchent maintenant à étendre leur collaboration avec l'AIEA pour étudier les effets à long terme de l'acidification des océans sur la croissance, la valeur nutritionnelle et la santé des espèces utilisées comme produits de la mer en Turquie, comme la moule méditerranéenne ou le mulet.

« Les moules peuvent vivre jusqu'à deux ans », indique M. Belivermiş. « Pour que nous puissions étudier le cycle de vie complet d'un organisme et bien comprendre comment il s'acclimate à une eau acidifiée, nous devons réaliser des expériences sur une période beaucoup plus longue. »

### **Prendre la mesure des effets à long terme de l'acidification des océans**

Il reste encore beaucoup à faire pour comprendre les conséquences à long terme de l'acidification des océans

dans le monde. Les recherches portant sur les organismes marins durent souvent de quelques semaines à quelques mois, mais seules des études multigénérationnelles permettront d'évaluer de manière plus réaliste les effets de la transformation des océans au fil du temps.

Un projet de recherche coordonné de l'AIEA d'une durée de quatre ans, dont le lancement est prévu en 2019, rassemblera plusieurs scientifiques qui s'efforceront de mieux comprendre les effets à long terme de l'acidification des océans sur les organismes marins. Il aura pour objectifs de combler l'insuffisance de données sur les produits de la mer importants d'un point de vue socio-économique et d'étudier des stratégies d'adaptation possibles pour les secteurs de l'aquaculture et des produits de la mer.

Il donnera également aux scientifiques les moyens de mieux comprendre les conséquences à long terme de l'acidification des océans sur les éléments nutritifs essentiels contenus dans les produits de la mer, comme les acides gras insaturés qui sont bénéfiques pour notre système cardiovasculaire, et d'évaluer ainsi les éventuelles répercussions sur la santé humaine. Les scientifiques auront recours à la fois à des techniques traditionnelles et aux techniques nucléaires et isotopiques pour étudier les espèces qui procurent ces éléments nutritifs, parmi lesquelles les huîtres, les moules, les crevettes, les homards et les poissons.

« Les océans sont certes fragiles, mais ils se distinguent également par une assez forte résilience. Nous avons constaté qu'ils étaient capables de se régénérer dès lors qu'ils étaient bien gérés », affirme David Osborn, directeur des Laboratoires de l'environnement de l'AIEA. « Ce qui importe, c'est que nous reconnaissons les menaces que nous faisons peser sur les océans, leurs effets combinés, et que nous investissons les ressources nécessaires pour comprendre ces effets et pour agir en amont afin de les contrer de manière efficace. »

## EN SAVOIR PLUS

## Les techniques isotopiques et les effets de l'acidification des océans sur les organismes marins calcifiants

On entend par acidification des océans un ensemble de modifications de la chimie de l'eau de mer, notamment une diminution du pH, qui correspond à une augmentation de l'acidité. Ces changements peuvent être mesurés : depuis le début de la révolution industrielle, les niveaux de pH moyens des océans ont diminué de 0,11 unité, ce qui correspond à une augmentation de l'ordre de 30 % de l'acidité.

Bien qu'il soit difficile d'estimer l'impact total de l'acidification des océans sur la vie marine, nous savons que, en dessous d'un certain niveau de pH et de la concentration de carbonate correspondante, l'eau devient corrosive pour le carbonate de calcium, élément dont de nombreux organismes ont absolument besoin pour constituer leur coquille et leur squelette. Ce phénomène peut limiter la capacité de ces organismes à former leur coquille et leurs os, ce qui les fragilise et réduit leurs chances de survie. Un certain nombre de coraux, de petits escargots de mer (ptéropodes), de palourdes et de moules (mollusques bivalves) ainsi que le phytoplancton calcifiant semblent être particulièrement sensibles à ces changements.

Les scientifiques utilisent des techniques nucléaires et isotopiques pour étudier le rythme des processus biologiques qui s'opèrent dans des organismes marins tels que les moules, les huîtres et les coraux. Ils assurent le suivi de certains isotopes, tels que le calcium 45 ou le carbone 14, pour comprendre ces processus. Les isotopes sont des atomes d'un même élément qui contiennent le même nombre de protons mais un nombre différent de neutrons, ce qui fait en sorte qu'ils ont un poids atomique différent.

Par exemple, les scientifiques peuvent utiliser le radiotracteur calcium 45 pour mesurer le taux de calcification et la qualité de celle-ci, ce qui leur permet de déterminer à quelle vitesse et de quelle manière les coquilles et les squelettes se forment. Pour ce faire, ils ajoutent une quantité connue de calcium 45 dans un aquarium rempli d'eau de mer qui abrite également des organismes marins, comme des palourdes. En mesurant la quantité de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) radiomarké qui est absorbée par ces organismes au fil du temps, ils sont capables d'évaluer le processus de calcification. Ils se servent ensuite de cette information pour évaluer soigneusement les effets de l'acidification des océans.

(Photo : N. Jawerth/AIEA)



# La technologie nucléaire au service de la lutte contre les changements climatiques

## Conclusions du Forum scientifique 2018 de l'AIEA

Par Brianna Hartley



(Photo : F. Nassif/AIEA)

Si la lutte contre les changements climatiques est au cœur des discussions entre responsables politiques aussi bien qu'entre scientifiques, lors du Forum scientifique 2018 de l'AIEA, les experts de toutes les disciplines se sont néanmoins accordés à dire que la technologie nucléaire *fait partie* de la solution.

« C'est à nous que revient la tâche de défendre la technologie nucléaire et de la promouvoir à grande échelle », a déclaré la Princesse Sumaya bint El Hassan, Présidente de la société scientifique royale de Jordanie, lors de la séance d'ouverture du Forum scientifique 2018 sur la technologie nucléaire au service du climat : atténuation, surveillance et adaptation, qui s'est tenu lors de la 62<sup>e</sup> session de la Conférence générale de l'AIEA. « Nous devons œuvrer pour que l'idée d'une technologie nucléaire au service du climat soit clairement exprimée, accessible et acceptable pour tous. Il est de notre devoir de veiller à ce que le monde entier en soit conscient et à ce que l'importance de la technologie nucléaire dans la lutte contre les changements climatiques soit reconnue », a-t-elle ajouté.

Lors du Forum, qui s'est déroulé les 18 et 19 septembre 2018, des personnalités influentes, dont des économistes, des scientifiques et de hauts responsables venus de plus de 20 pays, se sont penchées sur les moyens de développer les applications de la technologie nucléaire pour surveiller et atténuer les effets des changements climatiques et s'y adapter.

### L'électronucléaire peut contribuer à limiter les émissions de gaz à effet de serre

Étant donné que la production énergétique est responsable des deux tiers des émissions de gaz à effet de serre, les orateurs ont souligné la manière dont l'électronucléaire, en tant que source d'énergie à bas carbone propre, fiable et d'un coût abordable, peut simultanément atténuer ces émissions et assurer une production d'énergie suffisante pour alimenter la croissance économique.

« Nous devons prendre appui sur la science et sur des faits, mais nous devons également utiliser dès maintenant les technologies éprouvées », a déclaré Agneta Rising, Directrice générale de l'Association nucléaire mondiale. « L'énergie nucléaire permet non seulement de décarboniser mais aussi, parallèlement, de stimuler l'économie », explique-t-elle.

S'il a des avantages, l'électronucléaire pose néanmoins certains problèmes : « En dehors des aspects financier et technique, de nombreux pays déclarent que l'acceptation par le public est un obstacle majeur », a expliqué Malcolm Grimston, chercheur principal au Imperial College de Londres.

« Pourquoi la source de production d'énergie à grande échelle la plus sûre est-elle considérée comme la plus dangereuse par de nombreuses personnes ? » s'est-il interrogé. Lors de son exposé, il a analysé la manière dont l'industrie nucléaire communique avec le public et est arrivé à la conclusion qu'elle devrait « traiter ces questions comme



(Photo : F. Nassif/AIEA)

une industrie normale ayant des problèmes normaux » pour que le public l'accepte mieux.

## Des données exactes sur les changements climatiques

La collecte de données exactes sur les changements climatiques aide les scientifiques et les décideurs à comprendre les difficultés auxquelles ils sont confrontés et à prendre les mesures nécessaires pour y faire face, ont expliqué les intervenants lors de la séance du forum portant sur la surveillance et les mesures des changements climatiques.

« Les gens veulent agir. Ils veulent savoir comment réduire leurs émissions, dans quel secteur, et surtout si ces actions ont des effets », a déclaré Oksana Tarasova, responsable de la Division de la recherche sur l'environnement de l'Organisation météorologique mondiale.

Pendant cette séance, les orateurs ont mis l'accent sur l'adaptabilité et la précision des techniques isotopiques aux fins de la collecte de données : celles-ci peuvent servir aussi bien à déterminer l'origine des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et les océans et à les mesurer qu'à étudier les ressources en eau douce et les ressources agricoles afin de pouvoir les gérer plus durablement.

« Ces connaissances sont importantes pour pouvoir prendre des décisions en connaissance de cause à partir de faits plus probants, mais de nombreux pays ne sont pas encore en mesure de les mettre en application », a expliqué Oksana Tarasova, qui a demandé la mise en place d'un plus grand nombre de formations à ces méthodes.

## S'adapter à un environnement en mutation

Les changements climatiques épuisent la planète et entraînent des phénomènes environnementaux plus extrêmes ; il

devient ainsi plus difficile de cultiver de quoi s'alimenter, de préserver les ressources naturelles et de repousser les insectes nuisibles. Leurs effets se font sentir dans les maisons, aux niveaux des écosystèmes et des économies partout dans le monde. Cependant, selon les orateurs de la séance du Forum consacrée aux effets des changements climatiques sur la santé et la sécurité alimentaire, la technologie nucléaire peut aider les scientifiques à trouver des solutions intelligentes pour les combattre.

« Nous devons mettre sur pied des systèmes capables de relever différents défis », a déclaré Natalia Alekseeva, responsable d'une équipe chargée de l'action nationale contre les changements climatiques à l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). « Par exemple, la création, au moyen de techniques nucléaires, de nouvelles variétés de plantes résistantes à la sécheresse, qui consomment moins d'eau, d'engrais et d'autres produits chimiques, contribue à la modification des systèmes agricoles de manière plus solide et plus durable », a-t-elle expliqué.

Les experts se sont demandé comment les techniques nucléaires et isotopiques aidaient à préserver les ressources en eau et en sol et à lutter contre les insectes ravageurs, ainsi qu'à améliorer la production et la santé animales. Ils ont expliqué comment la technologie nucléaire aidait également à surmonter les obstacles liés aux changements climatiques en vue d'assurer la sécurité sanitaire des aliments et de renforcer la sécurité alimentaire qui, elles, par ricochet, améliorent la nutrition et la santé.

« La technologie nucléaire à elle seule ne peut résoudre les problèmes posés par les changements climatiques, a déclaré Ilmi Hewajulige, principale directrice adjointe et chercheuse expérimentée de l'Institut de technologie industrielle du Ministère des sciences et de la recherche du Sri Lanka, mais nous pouvons l'utiliser pour lutter contre un grand nombre d'entre eux ».

# Face à l'absence de données environnementales, un jeune chimiste philippin se tourne vers la science nucléaire

Par Miklos Gaspar



**Le chimiste Wilfren Clutario a eu recours à la science nucléaire pour comprendre comment l'océan avait fait face à la pollution causée par un puissant typhon en 2013.**

(Photo : M. Gaspar/AIEA)

Lorsque le chimiste spécialiste de l'environnement Wilfren Clutario chercha à savoir dans quelle mesure l'océan avait été pollué par le typhon le plus puissant ayant jamais touché terre, qui avait coûté la vie à plus de 6 000 personnes et dévasté les deux tiers de Tacloban en 2013, il fut confronté à un problème : il n'existait aucune donnée de référence.

« On pouvait mesurer la concentration de nitrates et de matière organique dans la mer, mais il était impossible de savoir quelle part était d'origine naturelle et quelle part provenait de la contamination due au typhon », explique Wilfren Clutario. À l'époque, il était chercheur à l'Université d'État des Visayas orientales et utilisait des techniques classiques pour mesurer la concentration de divers composés chimiques sur les sites d'échantillonnage. Les rafales de vent provoquées par le typhon Haiyan, qui a frappé la ville le 8 novembre 2013, ont entraîné la formation de vagues semblables à celles d'un tsunami qui ont charrié des débris contenant des matières organiques, des contaminants et des cadavres d'animaux et d'êtres humains depuis le littoral jusque dans l'océan.

Chercheurs et décideurs ignoraient si l'océan pourrait tolérer les quantités de polluants qui y avaient été rejetées sous l'effet du typhon et craignaient que le site ne se transforme en une zone morte pendant des décennies. Comme le précise Wilfren Clutario, il fallait qu'ils puissent distinguer les éléments polluants des éléments naturels pour déterminer les mesures à prendre, le cas échéant, pour aider l'océan à « digérer » les débris, de sorte qu'il puisse retrouver son équilibre naturel.

Lorsqu'il exposa son problème de recherche lors d'une conférence en 2015, Wilfren Clutario piqua la curiosité de Raymond Sugang, chercheur principal de l'Institut philippin de recherche nucléaire (PNRI). Fort de son expérience en matière d'utilisation des techniques isotopiques pour caractériser la pollution de l'eau, ce dernier était impatient de proposer une solution à Wilfren Clutario. Depuis lors, les deux hommes collaborent étroitement. « Nous étions faits pour travailler ensemble », se plaît à dire Raymond Sugang.

Non seulement Wilfren Clutario a appris à utiliser les techniques isotopiques pour déterminer l'origine de l'azote et de la matière organique et leur déplacement vers l'océan (voir l'encadré « En savoir plus »), avec le concours du PNRI et de l'AIEA, en coopération avec l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, mais il a également ajouté un cours sur l'utilisation des techniques isotopiques dans le programme scolaire du Lycée scientifique des Philippines, sur le campus des Visayas orientales, où il enseigne. Il a depuis supervisé plusieurs projets de recherche menés par des lycéens sur le recours à ces techniques pour caractériser la contamination des masses d'eau douce de la région.

« Nous n'avons pas de bureau à Tacloban, mais nous avons Wilfren », se réjouit Raymond Sugang. De fait, par une journée ensoleillée du mois d'août 2018, le lycée accueillait, dans l'une de ses salles de classe, des chercheurs venus en nombre des quatre coins de la ville et de la province pour participer, à l'invitation du PNRI, à un atelier d'une journée

consacré à l'utilisation des techniques nucléaires et isotopiques dans un large éventail de domaines.

« Les techniques nucléaires ont de multiples applications, mais celles-ci sont encore méconnues, même dans la communauté scientifique », fait remarquer Wilfren Clutario, qui a pris part à des formations dispensées sous la direction de l'AIEA en Australie et en Malaisie pour approfondir sa connaissance du sujet. « Quand les gens, y compris les chercheurs, entendent le mot "nucléaire", ils pensent seulement à l'énergie nucléaire, mais ce n'est qu'un domaine parmi tant d'autres. »

« Étendre l'utilisation des applications nucléaires au sein de la communauté scientifique est au cœur de la mission du PNRI et nous comptons sur des chercheurs comme Wilfren Clutario pour y parvenir », affirme Carlo A. Arcilla, directeur du PNRI. « Nous organisons des ateliers dans tout le pays pour sensibiliser les scientifiques. »

## Protéger la chaîne alimentaire

Grâce à ses travaux de recherche, Wilfren Clutario a découvert que les concentrations d'azote relativement élevées observées dans les zones commerciales et côtières étaient naturelles, tandis que celles, relativement plus faibles, enregistrées dans les zones protégées et les pêcheries commerciales voisines pourraient être dues à la biomasse provenant des terres, comme les cadavres.

« L'azote est le traceur qui nous indique où les polluants ont fini par se déposer », explique Wilfren Clutario.

L'étape suivante consiste à analyser les poissons et les sédiments afin de déterminer dans quelles proportions ces contaminants se sont frayé un chemin jusque dans la chaîne alimentaire. Il est important de mesurer la concentration de métaux lourds dans les poissons, car il se peut que l'océan ait été contaminé par des substances toxiques contenues dans les débris.

Wilfren Clutario continue de prélever des échantillons. Les bureaux du PNRI situés près de Manille les analysent au moyen d'un spectromètre de masse à rapport isotopique fourni à titre gratuit par l'AIEA dans le cadre de son programme de coopération technique. Ces analyses permettront de savoir si les concentrations tendent ou non à diminuer et si ce processus se produit naturellement. « Il nous reste encore beaucoup à faire pour mieux comprendre l'océan », fait observer Wilfren Clutario.

Les événements tragiques de 2013 resteront gravés à jamais dans sa mémoire et, même s'il est impossible de changer le cours de l'histoire, il se dit heureux de pouvoir apporter sa contribution aux efforts de restauration.

« Lorsque j'ai vu le typhon et l'onde de tempête dévaster ma ville et tuer de nombreuses personnes que je connaissais, je n'avais pas idée que, quelques années plus tard, j'allais utiliser les techniques nucléaires pour aider Tacloban à se relever. »

## EN SAVOIR PLUS

### Les techniques faisant appel aux isotopes stables

Les isotopes sont des atomes d'un même élément qui ont le même nombre de protons mais un nombre différent de neutrons. Alors que tous les isotopes d'un même élément présentent des propriétés chimiques identiques, leur poids diffère en fonction du nombre de neutrons qu'ils renferment. Grâce à ces écarts de poids, les scientifiques sont capables de distinguer un isotope d'un autre en effectuant une analyse au moyen d'un spectromètre de masse à rapport isotopique. Cette méthode leur permet de déterminer la composition isotopique d'un matériau.

Dans le cadre des études sur la pollution de l'eau dont il est question ici, les chercheurs ont suivi les isotopes stables de l'azote et du carbone. Des espèces d'origines diverses contiennent des niveaux caractéristiques d'isotopes, qui donnent des informations sur leur alimentation et l'environnement dans lequel elles vivent. Les scientifiques peuvent étudier cette composition isotopique et s'en servir

comme d'une empreinte pour déceler la présence de différents types de matière organique dans le milieu environnant.

Dans l'océan, des plantes, comme les algues et les herbes marines, de même que des animaux sédentaires, comme les huîtres, permettent aux scientifiques d'en apprendre beaucoup sur la composition isotopique actuelle et passée de l'environnement. Étant donné que ces organismes ne se déplacent pas – ils filtrent l'eau pour en extraire les éléments nutritifs nécessaires à leur développement –, leur composition isotopique reflète les niveaux de concentration des différentes substances présentes dans l'océan à un moment précis. Ainsi, pour les chercheurs, l'analyse de la composition isotopique de ces plantes et de ces animaux est un moyen d'en savoir plus sur le passé de l'océan.

# Vers l'élimination des disparités entre hommes et femmes dans les sciences nucléaires

Par Miklos Gaspar et Margot Dubertrand



**Muhayaton Santoso, chercheuse principale de l'Agence nationale de l'énergie nucléaire en Indonésie (BATAN) a mené des recherches inédites sur la pollution atmosphérique en Indonésie.**

(Photo : BATAN)

Les femmes représentent moins d'un quart des travailleurs du secteur nucléaire dans le monde, ce qui, d'après les experts, nuit non seulement à la diversité dans l'industrie, mais aussi à la compétitivité. De nombreux organismes, notamment l'AIEA, s'emploient activement à augmenter la part de femmes dans toutes les catégories de postes.

« Bien qu'il y ait de nombreuses femmes talentueuses et très qualifiées dans l'industrie nucléaire, nous sommes encore largement sous-représentées. Il faut encore faire des efforts », a déclaré Gwen Perry-Jones, directrice exécutive du développement opérationnel à la centrale nucléaire de Wylfa Newydd au Royaume-Uni. « La diversité sur le lieu de travail est bénéfique à tous, et je soutiens pleinement les initiatives qui encouragent les femmes à intégrer l'industrie et les aident à s'orienter vers des postes élevés. »

Les femmes qui réussissent à jouer un rôle de chef de file apportent des contributions décisives. Muhayaton Santoso, chercheuse principale de l'Agence nationale de l'énergie nucléaire en Indonésie (BATAN), a mené des recherches inédites sur l'application de techniques nucléaires aux mesures de la pollution atmosphérique dans de nombreuses villes indonésiennes. En partie grâce à ses travaux, la ville de Bandung, troisième ville d'Indonésie, a reçu en 2017 le prix Environmentally Sustainable Cities (villes écologiquement durables) de l'ASEAN.

« En Indonésie, la pollution atmosphérique est un problème majeur dans les zones urbaines en raison de l'accroissement de l'activité industrielle et de la circulation, qui fait augmenter la quantité de substances toxiques dans l'air », a déclaré Muhayaton Santoso. « Je suis fière de pouvoir aider mon pays à traiter ce problème important. »

Agneta Rising, directrice générale de l'Association nucléaire mondiale, est une éminente spécialiste de l'énergie nucléaire et de l'environnement. Lorsqu'elle était vice-présidente chargée de l'environnement chez Vattenfall AB, exploitant public de centrales nucléaires et hydroélectriques en Suède, elle était à la tête d'un département pan-européen se consacrant aux questions d'énergie, d'environnement et de durabilité. Elle est également co-fondatrice et ancienne présidente de Women in Nuclear (WiN). Au cours de sa présidence, le nombre de femmes dans cette association a quadruplé.

« La présence des femmes est primordiale pour un développement solide du secteur nucléaire mondial. Pour être plus compétitive, une entreprise doit compter les meilleurs éléments parmi son personnel. L'industrie nucléaire devrait avoir des programmes visant à attirer et à recruter des femmes, sans quoi elle se privera de l'avantage concurrentiel dont elle pourrait bénéficier grâce à leurs talents », a-t-elle déclaré. « Lorsque les ressources humaines reflètent mieux la diversité de la société, notamment en matière de représentation des



### Des étudiantes philippines lors d'une expérience pratique les initiant à la science nucléaire.

(Photo : M. Gaspar/AIEA)

femmes, cela contribue à renforcer la confiance que la société place dans les technologies nucléaires. »

À l'heure actuelle, d'après des données fournies par l'AIEA, les femmes ne représentent que 22,4 % des travailleurs du secteur nucléaire.

## Women in Nuclear

WiN, association à but non lucratif qui compte 35 000 membres dans 109 pays, appelle à faire jouer aux femmes un rôle grandissant dans les domaines de la science et de la technologie nucléaires et à faire prendre conscience de l'importance d'une représentation plus équilibrée des hommes et des femmes dans des domaines historiquement dominés par les premiers. Elle fait aussi valoir ces domaines auprès des femmes placées devant un choix de carrière.

« Bien que la proportion de femmes occupant des postes de hauts responsables techniques ait augmenté au sein de chaque filière de la science et de la technologie nucléaires, elles sont encore sous-représentées », a affirmé Gabriele Voigt, présidente de WiN et ancienne responsable d'installations et de laboratoires nucléaires en Allemagne et à l'AIEA.

« Le problème est dû en partie au fait que trop peu de jeunes femmes étudient les sciences, la technologie, l'ingénierie et les mathématiques au cours de leurs études secondaires ou supérieures », a-t-elle déclaré. « L'autre problème est dû au plafond de verre et aux préjugés omniprésents, conscients ou inconscients, auxquels il est difficile de faire face en milieu professionnel. »

WiN contribue à changer cet état de choses en permettant aux jeunes filles de se familiariser avec des sujets relatifs au nucléaire dès leur jeune âge, en constituant un solide réseau

de femmes et en mettant des modèles à suivre à la portée de la jeune génération. Certains pays, notamment grâce à l'aide de l'AIEA, initient des lycéens, et en particulier des lycéennes, à la science nucléaire.

« Faire connaître la science, et en particulier la science nucléaire, aux jeunes filles est le meilleur moyen d'augmenter la part des femmes scientifiques dans ce domaine », a affirmé Micah Pacheco, cadre régionale scientifique du Ministère philippin de l'éducation, qui a supervisé l'introduction de programmes de formation à la science et à la technologie nucléaires dans plusieurs écoles de la région de Manille. « Le nucléaire est amusant - il faut le montrer aux filles ! »

## Les progrès de l'AIEA en matière de parité entre les sexes

À la fin de 2017, la part de femmes dans la catégorie des administrateurs et fonctionnaires de rang supérieur de l'AIEA avait atteint 29 %, contre 22,5 % dix ans auparavant. Yukiya Amano, Directeur général de l'AIEA, a déclaré qu'il souhaitait atteindre la parité entre les sexes aux postes les plus élevés d'ici à 2021.

« L'Agence a pris des mesures concrètes pour améliorer la représentation des femmes au Secrétariat en menant des activités de recrutement ciblées et de sensibilisation ; et nous avons constaté une amélioration dans la représentation des femmes à l'Agence », a affirmé Mary Alice Hayward, Directrice générale adjointe chargée de la gestion à l'AIEA. « Cependant, nous sommes conscients des obstacles qu'il reste à surmonter. L'égalité des sexes sur le lieu de travail ne consiste pas qu'à améliorer les statistiques, mais aussi à s'assurer que l'AIEA est un lieu où les femmes ont envie de travailler. »

Cela suppose de créer un environnement favorable, avec par exemple des arrangements de travail souples permettant au personnel de combiner travail et responsabilités familiales, mais aussi de mener des campagnes de sensibilisation spécialement destinées aux jeunes femmes pour mettre en avant les avantages de travailler à l'AIEA.

Un exemple réussi de parité entre les sexes aux postes les plus élevés de l'AIEA peut être trouvé à la Division de la technologie de l'information. Bien que ce domaine soit historiquement dominé par les hommes, une campagne active et une stratégie de recrutement ciblée ont permis de trouver de nombreuses candidates qualifiées.

Au Bureau des affaires juridiques, la majorité des postes d'administrateurs sont occupés par des femmes.

« Non seulement nous avons une directrice, mais aussi deux tiers des chefs de section sont des femmes, ce qui signifie que 75 % du personnel d'encadrement sont des femmes », a déclaré M<sup>me</sup> Peri Lynne Johnson, directrice du Bureau des affaires juridiques. « En outre, parmi nos juristes, nous comptons onze femmes et dix hommes, et nous nous efforçons d'assurer la parité entre les sexes parmi nos stagiaires. »



# Mettre fin au paradoxe de l'innovation et voir en quoi l'AIEA peut aider

Séance de questions-réponses avec l'économiste en chef du pôle d'expertise pour la croissance équitable de la Banque mondiale

By Aleksandra Peeva



*Si les nouvelles technologies peuvent stimuler le développement d'un pays, une étude menée en 2017 par la Banque mondiale laisse entendre cependant que de nombreux pays en développement investissent relativement peu pour réaliser ce potentiel technologique.*

*Pourquoi ?*

*Pour le savoir, nous avons interrogé William F. Maloney, économiste en chef du pôle d'expertise « Croissance équitable, finance et institutions » du Groupe de la Banque mondiale et co-auteur de l'ouvrage The Innovation Paradox : Developing-Country Capabilities and the Unrealized Promise of Technological Catch-Up. M. Maloney nous a fait part de son point de vue sur ce paradoxe de l'innovation et sur ce que peut faire l'AIEA pour aider les pays à optimiser leur potentiel technologique.*

**Q : D'après les résultats de votre récente étude, les pays en développement laissent échapper de formidables occasions en n'investissant pas suffisamment dans la recherche-développement (R-D). D'après vous, comment est-ce possible et comment faire évoluer la situation ?**

**R :** On pense souvent à tort que l'innovation consiste en un flot d'idées brillantes, mais en réalité c'est une accumulation de connaissances. Il est également important de préciser que les technologies les plus récentes ne sont pas les seules technologies dont les pays en développement peuvent profiter : des technologies existantes, qui ont déjà fait leurs preuves, comme certaines techniques nucléaires, peuvent leur être extrêmement bénéfiques, et ils doivent les expérimenter.

Néanmoins, plusieurs facteurs peuvent empêcher les pays et les entreprises d'engranger les bénéfices que, d'après nous, ils pourraient récolter en investissant dans la technologie. Dans l'étude sur le paradoxe de l'innovation, nous avançons deux explications au fait que la technologie n'est pas plus souvent adoptée.

La première est l'absence des facteurs de production complémentaires qui sont nécessaires à l'innovation. Il s'agit notamment de l'accès à du personnel qualifié, aux appareils nécessaires, à des financements ou, et nous insistons en particulier sur ce point, à des compétences en matière d'encadrement. Ces dernières sont vitales puisque des responsables incapables d'organiser leur service ou de mettre au point un plan de croissance à long terme sont aussi souvent incapables de choisir et d'utiliser de nouvelles technologies ou d'entreprendre des activités de R-D.

La deuxième est l'information. Les individus, les gouvernements et les entreprises ne connaissent pas ce qu'ils ne savent pas. L'une des ressources principales auxquelles les entreprises n'ont généralement pas recours sont les programmes d'amélioration des compétences

en matière d'encadrement qui permettent à un expert extérieur d'analyser leur performance et de proposer un plan d'amélioration. Il a été démontré que ces programmes ont des effets déterminants sur la productivité et l'innovation. Une des raisons de cette attitude est que souvent les entreprises surestiment largement la qualité de leur gestion et leurs capacités technologiques par rapport aux meilleures d'entre elles et, par conséquent, elles n'ont pas idée des améliorations qui peuvent être apportées.

**Q : D'après vos recherches, les gouvernements et le secteur privé des pays en développement doivent travailler en tandem pour mener à bien les initiatives axées sur la R-D. Quel rôle peuvent jouer des organisations internationales comme la Banque mondiale et l'AIEA ?**

**R :** Plus on s'éloigne de la frontière technologique, plus les problèmes se compliquent ; souvent, les pays en développement souffrent à la fois de la faiblesse de leur système d'enseignement et d'un mauvais fonctionnement de leurs marchés financiers, d'un climat des affaires médiocre et souvent aussi de l'impéritie de leurs gouvernements. Autant dire que nombre d'entre eux risquent de se retrouver piégés et de ne pas avoir les capacités de résoudre les problèmes qu'ils doivent résoudre afin d'adopter des technologies et d'en tirer profit pour se développer.

Il est fréquent que l'on exporte des modèles économiques des pays avancés vers les pays en développement. Cependant, en général, ces modèles économiques ne fonctionnent pas, parce que les contraintes des seconds ne sont pas les mêmes que celles des premiers et que les mesures incitatives qui y sont proposées sont conçues pour des situations différentes. Par exemple, le taux d'innovation de pays avancés peut être faible en raison de problèmes ordinaires comme l'incapacité des entreprises à recueillir tous les fruits de leurs travaux d'innovation. Donc on s'appuie essentiellement sur les systèmes de brevets, les instituts de recherche publics, les déductions fiscales ou les subventions pour la R-D.

Néanmoins, les pays en développement n'ont peut-être pas forcément des entreprises capables de mener un projet de R-D ou n'ont pas les ressources humaines pour s'en charger, ce qui signifie que les politiques doivent d'abord s'intéresser à ces questions.

Les organisations internationales, comme la Banque mondiale et l'AIEA, peuvent aider à consolider les gouvernements, à déterminer les principaux obstacles à l'innovation et à l'adoption de technologies et à mettre en place des politiques adéquates destinées à atténuer ces problèmes. À terme, cela permettra de doter les pays en développement de structures d'innovation plus élaborées.

**Q : L'AIEA n'est pas un organisme donateur ; nos compétences consistent à transférer aux États Membres - en particulier aux pays en développement - des connaissances et des technologies qui sont essentielles pour un développement durable sur le long terme. Dans ce contexte, comment peut-elle aider au mieux les pays à mettre fin au paradoxe de l'innovation ?**

**R :** Le transfert de technologies est un élément clé de la croissance, et pour le faciliter il faudra aborder les questions que j'ai évoquées – communication d'informations et renforcement des capacités. La question n'est jamais de se contenter de fournir un appareil, mais plutôt d'assurer la présence de facteurs complémentaires, comme un capital humain très bien formé. L'AIEA dispose du savoir-faire technique et de scientifiques qui ont le profil adéquat lui permettant d'enseigner comment saisir les occasions favorables à des transferts de technologies et mettre en place les capacités nécessaires à cette fin. C'est vital pour de nombreux pays en développement au capital humain faible, parce que s'ils n'ont pas des ingénieurs et des scientifiques capables de déterminer les opportunités et les modalités d'application d'une technologie, il n'y aura pas de transfert d'idées, même si le climat économique est relativement porteur.

L'établissement de contacts avec des institutions à l'extérieur des pays peut fluidifier la circulation de l'information et sensibiliser ceux-ci aux technologies existantes. C'est là un autre domaine essentiel dans lequel l'AIEA peut apporter une aide aux gouvernements.

# Science et technologie nucléaires : la Malaisie sur la voie du Programme de développement durable à l'horizon 2030

Par Mohd Abdul Wahab Yusof

Les activités nucléaires ont débuté en Malaisie en 1897, lorsque les rayons X ont été utilisés pour la première fois dans un hôpital de Taiping, dans l'État de Perak. À partir de ce modeste point de départ, la technologie nucléaire a évolué et prospéré dans notre pays grâce à la création en 1973 de PUSPATI (qui deviendra Nuklear Malaysia). La mise en service, en 1982, du réacteur TRIGA PUSPATI, notre premier réacteur de recherche, a dynamisé le secteur.

Les utilisations pacifiques de la technologie nucléaire ont positivement influencé le développement socio-économique national en améliorant la qualité de vie, en renforçant le bien-être social et en contribuant au produit intérieur brut (PIB). Nous travaillons actuellement à déterminer la valeur ajoutée que la technologie nucléaire apporte au PIB et à la croissance économique du pays en général, en nous fondant sur une étude menée antérieurement.

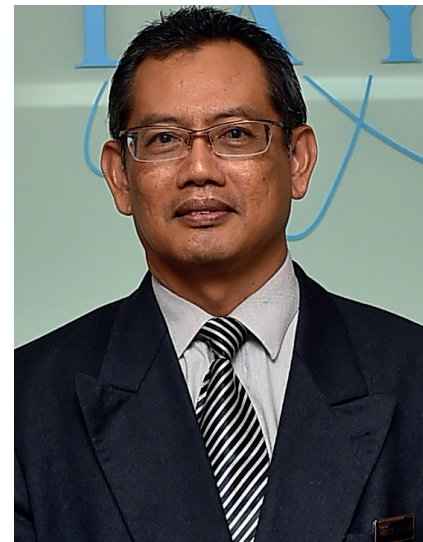
La Malaisie s'emploie à transformer et à moderniser le secteur de l'alimentation et de l'agriculture, pour qu'il soit viable et génère beaucoup de revenus. Ainsi, elle s'efforce notamment d'assurer la sécurité alimentaire, d'améliorer la productivité et de trouver des solutions aux effets des changements climatiques sur la durabilité des pratiques agricoles. Nous étudions la possibilité de recourir à l'agriculture de précision pour gérer différents facteurs, comme les conditions météorologiques, l'état des sols et la température, et en tenir compte. Il a été constaté qu'une nouvelle variété de riz mise au point à l'aide de techniques nucléaires, le NMR152, atténue les effets des changements climatiques grâce à sa capacité de résistance aux périodes de sécheresse et d'inondation. La serre gamma, la seule installation d'Asie du Sud-Est où se déroulent en continu des travaux de mutagenèse, peut continuer à contribuer à l'évolution d'une agriculture intelligente face au climat.

Les essais industriels faisant appel aux techniques nucléaires ont également favorisé la compétitivité de l'industrie manufacturière en Malaisie, en permettant de créer en Asie du Sud-Est un marché de niche à l'exportation qui propose des services d'essais non destructifs aux industriels de pays voisins. De même, de nombreux nouveaux matériaux et composites possèdent, grâce au radiotraitement, des caractéristiques souhaitables pour la fabrication, entre autres, d'appareils médicaux, de câbles et de plastiques biodégradables. Actuellement, Nuklear Malaysia collabore avec le constructeur automobile PROTON pour produire et tester à l'aide de rayonnements un matériau d'isolation de câbles qui supporte de hautes températures, afin de renforcer

la sécurité des voitures. En érigeant cet établissement au rang de centre collaborateur pour les essais non destructifs et le radiotraitement, l'AIEA a reconnu les réussites de la Malaisie dans ces domaines ainsi que les bienfaits de la collaboration étroite et précieuse qu'elle entretient avec notre pays dans le cadre de diverses activités régionales, y compris en matière de recherche, de développement et de formation.

La Malaisie reste déterminée à procurer à tous des soins de santé de qualité en accentuant les efforts visant à améliorer les services de santé, en particulier dans les branches de la médecine qui ont recours aux rayonnements, comme la radiologie, la radiothérapie et la médecine nucléaire. Nous continuerons de promouvoir et d'améliorer l'application des rayonnements en médecine aux fins du bien-être social. Les techniques nucléaires sont d'une importance primordiale pour la détection précoce, le diagnostic, le traitement et la prise en charge du cancer. Le secteur de la médecine radiologique s'est beaucoup développé en Malaisie depuis le XIX<sup>e</sup> siècle ; le point d'orgue a été atteint en 2006 avec la création de la première installation dotée d'un cyclotron et d'un appareil de tomographie à émission de positons/tomodensitométrie (PET/CT), qui a aussi constitué la première étape vers la création d'un Institut national du cancer. Actuellement, plus de 20 hôpitaux malaisiens recourent à la technologie nucléaire pour le diagnostic ou le traitement.

Afin que la Malaisie continue de tenir son rang dans le domaine de la technologie nucléaire parmi d'autres pays, nous devons suivre les tendances technologiques comme l'industrie 4.0, l'Internet des objets et les programmes nationaux et internationaux, comme le Programme 2030 et ceux visant à atteindre les objectifs de développement durable. Depuis les années 1970, le développement durable est au cœur de la stratégie de développement de la Malaisie, qui met l'accent sur l'éradication de la pauvreté, l'amélioration du bien-être de la population, l'accès universel à l'éducation et la protection de l'environnement. D'ailleurs, notre nouveau



Mohd Abdul Wahab Yusof,  
Directeur général de l'Agence  
nucléaire malaisienne

modèle économique et le 11<sup>e</sup> plan de la Malaisie transposent le Programme 2030 dans le contexte national.

Quelle perspective nous offre donc l'avenir ? Dans le futur, la fusion entre les techniques nucléaires et d'autres sera plus répandue. Je suis convaincu que les techniques nucléaires continueront de se perfectionner, notamment en se rapprochant de nouvelles technologies comme la nanotechnologie, la biotechnologie et les technologies de l'information et de la communication. Cela est important pour nous, en particulier lorsque nous sommes confrontés à des enjeux comme celui de l'acquisition de technologies qui pourraient gagner en importance à l'avenir et assurer à la Malaisie un meilleur développement et la rendre économiquement plus compétitive, de sorte qu'elle puisse devenir un pays pleinement industrialisé et à revenu élevé.

Afin de nous préparer à ces futures échéances, il faut renforcer l'implantation et le développement des technologies mises au point localement pour que les produits et les services du futur s'adaptent à la demande du moment. Il ne fait aucun doute que la science et la technologie nucléaires ont contribué au développement socio-économique du pays en générant des emplois, en suscitant la création de nouvelles entreprises, en mettant davantage en valeur le capital humain et en améliorant la qualité des services de santé. Grâce à elles, la Malaisie a pu accéder à des technologies de pointe, ce qui a entraîné une amélioration de la qualité des produits et des services, ainsi que du diagnostic et des moyens thérapeutiques en médecine, et doté le secteur agricole de moyens lui permettant de produire de nouveaux et meilleurs cultivars.



**Des scientifiques malaisiens utilisent des techniques nucléaires pour sélectionner de nouvelles variétés de plantes possédant des caractères souhaitables, comme la tolérance à l'humidité et de meilleurs rendements.**

(Photo : M. Gaspar/AIEA)

# Répondre aux besoins d'un monde qui change : la technologie nucléaire aujourd'hui et demain

Par Aldo Malavasi, Directeur général adjoint chargé des sciences et des applications nucléaires, AIEA

Si la science et la technologie nucléaires opèrent parfois à des échelles invisibles à l'œil nu, leurs retombées sont évidentes dans de nombreuses sphères de la vie. Elles accroissent la sécurité alimentaire en aidant des agriculteurs à produire plus de denrées alimentaires, à préserver l'eau et à lutter contre les insectes ravageurs. Les médecins et autres professionnels de la santé s'en servent pour soigner des patients et sauver des vies. Elles permettent aussi d'assurer la sûreté de produits comme les pneus de voiture et les avions, de combattre la pollution environnementale et de préserver des objets culturels, entre autres.

Cependant, les enjeux de développement évoluent à mesure que le monde change, et de nouveaux outils et méthodes sont nécessaires. Il revient à la communauté des spécialistes du nucléaire, et notamment à l'AIEA, de répondre à ce besoin.

Des chercheurs du monde entier utilisent des techniques nucléaires et isotopiques en collaboration avec les experts de l'AIEA et dans les laboratoires de celle-ci pour répondre à de nouveaux défis mondiaux, comme celui représenté par les changements climatiques ; ils s'efforcent de satisfaire les besoins nutritionnels et médicaux croissants d'une population mondiale en augmentation et d'appuyer l'expansion de l'industrialisation aux fins du développement.

Nous constatons d'ores et déjà que des travaux innovants sont menés dans le domaine des sciences nucléaires, comme par exemple l'application de nouvelles méthodes de lutte contre les insectes ravageurs, comme les moustiques vecteurs de maladies, faisant appel à la technique de l'insecte stérile et la mise au point de variétés de plantes qui peuvent résister aux nouvelles conditions climatiques tout en continuant d'avoir des rendements élevés. Les scientifiques étudient également le problème de plus en plus sérieux de la pollution par le plastique, et les moyens de traiter la question des particules de plastique présentes dans les océans qui intègrent notre chaîne alimentaire. Par ailleurs, de nouvelles méthodes en cours d'élaboration permettront d'assurer une surveillance de maladies et de virus mortels comme la fièvre Ebola et de créer de nouveaux vaccins irradiés destinés aux animaux et à l'homme.

Au fil des progrès de la technologie nucléaire, les scientifiques trouvent de nouvelles manières d'utiliser les rayonnements avec plus d'efficacité et de précision pour le diagnostic et le traitement de maladies comme le cancer, sauvant davantage de vies et améliorant la qualité de vie des patients. Leurs découvertes concernent également de nouveaux domaines de la médecine, comme la neuropsychiatrie et l'imagerie moléculaire appliquée au diagnostic précoce de

maladies comme la maladie d'Alzheimer.

L'AIEA est au cœur de cette recherche-développement tournée vers le futur. Son mandat, l'atome pour la paix et le développement, reflète l'étendue des nombreuses possibilités qu'offrent la science et la technologie nucléaires de contribuer au bien-être humain et au développement durable. Elle offre un cadre pour la collaboration scientifique, la recherche-développement et la formation dans un large éventail de domaines du développement, notamment l'alimentation et l'agriculture, la protection de l'environnement, la gestion de l'eau, le développement industriel et la santé humaine.



Les avantages de la science et de la technologie nucléaires essaient aux quatre coins du monde grâce au programme de coopération technique et aux activités de recherche coordonnée de l'AIEA, qui concernent plus de 145 pays chaque année et bénéficient de l'aide de ses 12 laboratoires spécialisés situés en Autriche et à Monaco.

Pour que la technologie nucléaire reste à l'avant-garde du développement mondial, plusieurs laboratoires de l'AIEA sont en train d'être complètement modernisés, grâce à quoi ils pourront continuer de s'adapter et répondre rapidement à des besoins urgents et nouveaux dans le monde entier. Un tout nouveau laboratoire de la lutte contre les insectes ravageurs, achevé en 2018, permettra de consolider davantage les techniques nucléaires essentielles à la lutte contre les insectes ravageurs qui peuvent s'attaquer aux cultures et nuire aux animaux d'élevage et aux hommes. Un laboratoire modulaire polyvalent, inauguré en novembre 2018, accueille trois nouveaux laboratoires qui se concentrent sur les techniques nucléaires les plus récentes dans trois domaines : la production et la santé animales, notamment la lutte contre des zoonoses comme la fièvre Ebola ou le virus Zika ; l'alimentation et la protection de l'environnement, avec notamment des techniques médico-légales de lutte contre la fraude alimentaire qui permettent de retrouver l'origine de produits ; et la gestion des sols et de l'eau et la nutrition des plantes pour préserver les précieuses ressources de la production agricole. En outre, une enceinte de dosimétrie, qui accueillera un nouvel accélérateur linéaire, est en cours de

construction. Cet accélérateur, qui devrait être opérationnel en 2019, fournira des services de dosimétrie aux hôpitaux pour les aider à étalonner et à utiliser en toute sûreté les rayonnements dans le cadre des soins administrés aux patients.

Les partenariats noués par l'AIEA étendent encore plus le rayon d'action de la science et de la technologie nucléaires. Pour donner quelques exemples, une division mixte, unique en son genre, a été établie en 1964 avec l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. En 1967, l'AIEA et l'Organisation mondiale de la Santé ont inauguré un partenariat officiel. Actuellement, les Laboratoires de l'environnement de l'AIEA, situés à Monaco, accueillent le Centre international de coordination sur l'acidification des océans. En outre, le réseau mondial de laboratoires ALMERA, créé en 1995, a pour mission de faciliter les mesures des niveaux de radioactivité dans l'environnement en cas de rejet accidentel ou intentionnel de radioactivité.

L'AIEA a également des partenariats avec 31 centres collaborateurs à travers le monde (voir encadré), qui travaillent avec elle dans le cadre de travaux de recherche et de formations en science nucléaire qu'ils dispensent, ce qui permet de rationaliser les échanges de ressources, de connaissances et de compétences avec des scientifiques. Ce réseau s'étendra à mesure qu'elle œuvrera avec les pays à la création de nouveaux centres collaborateurs.

L'AIEA, par l'assistance qu'elle fournit, et son réseau mondial de laboratoires, de centres collaborateurs et de partenariats, qui est sans équivalent, contribuent à préparer l'avenir. Elle aidera les pays dont les besoins en matière de développement continuent d'évoluer à avoir accès aux utilisations de l'atome pour la paix et le développement et à en tirer parti. Enfin, grâce aux innovations et aux progrès continus de la technologie, les outils exceptionnels que nous procure l'atome continueront de contribuer au bien-être du genre humain pendant de longues années encore.

## Un réseau rassemblant des scientifiques du monde entier

Les centres collaborateurs de l'AIEA forment un réseau qui s'étend au monde entier, de l'Afrique, l'Asie et l'Australie à l'Europe, le Moyen-Orient et l'Amérique du Nord et du Sud. Un centre collaborateur est un établissement ou un organisme scientifique qui offre une installation et des compétences uniques dans un domaine particulier lié à la technologie nucléaire, comme l'irradiation des aliments, la mesure de la radioactivité environnementale, les effets sanitaires des rayonnements, les essais non destructifs ou la gestion des ressources en eau.

Les centres sont sélectionnés pour leur aptitude, leur capacité et leur promptitude à contribuer directement à certains projets et activités de l'AIEA. Ils travaillent avec elle dans le cadre d'un plan établi d'un commun accord, en vue de faciliter et d'amplifier les applications de la science et de la technologie nucléaires dans le monde. Cette coopération vise à favoriser la conduite de travaux de recherche-développement originaux, tout en permettant aux scientifiques de mettre en commun leurs connaissances, leurs ressources et leurs compétences, de préparer des matières de référence, de valider des méthodes et de proposer des formations. Ces activités aident aussi les pays, tant ceux qui comptent un centre que ceux qui n'en ont pas, à bénéficier d'un appui scientifique alors qu'ils s'efforcent d'atteindre leurs objectifs de développement et leurs cibles fixées en fonction des objectifs de développement durable (ODD) des Nations Unies.

« Grâce au réseau de centres collaborateurs, les États Membres peuvent soutenir l'AIEA en menant des travaux de recherche-développement originaux et en proposant des formations en rapport avec les technologies nucléaires. Cela encourage les études scientifiques et la coopération entre États Membres, faisant de ces centres l'un des principaux mécanismes de coopération de l'AIEA », a déclaré Sasha Damjanac, chef de la Section d'administration des contrats de recherche.

En 2018, il existait 31 centres collaborateurs actifs dans le monde, et des discussions sont en cours dans plusieurs pays pour en établir de nouveaux.

— Par Sarah Kiehne

## Défi de production participative de l'AIEA sur les matériaux de fusion nucléaire : les lauréats dévoilés



Une équipe de quatre scientifiques de l'Institut Max Planck de physique des plasmas et du Centre de calcul et de traitement des données Max Planck à Garching (Allemagne) a remporté, au mois d'octobre 2018, le défi de production participative lancé par l'AIEA sur la visualisation, l'analyse et la simulation de matériaux destinés à la construction de réacteurs de fusion.

La fusion nucléaire, réaction atomique qui fait briller le soleil, pourrait à terme être une source illimitée d'énergie abordable, propre et sans carbone utilisant les isotopes de l'hydrogène obtenus à partir de l'eau et du lithium. Cependant, l'exploitation d'une énergie de fusion commercialement viable soulève d'importantes difficultés technologiques, comme la capacité à protéger la paroi et les autres composants de la cuve du réacteur des températures extrêmement élevées et des particules de haute énergie auxquelles ils sont exposés.

Quatorze équipes originaires de dix pays ont présenté des analyses innovantes de simulations de l'endommagement d'une paroi de réacteur, susceptible d'être causé par les neutrons de haute énergie qui sont libérés durant une réaction de fusion. Les simulations ont été évaluées à l'aune de leur intérêt scientifique, du caractère novateur de l'algorithme lui-même ou de son application au domaine de la science des matériaux ainsi que de l'utilité et de l'impact escompté de la visualisation.

« Parmi les propositions que nous avons reçues, certaines étaient d'une qualité exceptionnelle. C'était un peu comme si nous avions organisé une compétition de football locale et qu'une équipe championne du monde avait finalement décidé de participer », se réjouit

Sergei Dudarev, l'un des initiateurs du défi, qui est responsable du programme sur les matériaux à l'Autorité de l'énergie atomique du Royaume-Uni.

Les membres de l'équipe lauréate – Udo von Toussaint, Javier Dominguez, Markus Rampp et Michele Compostella – ont appliqué, pour la toute première fois, une technique issue de l'apprentissage automatique et de la science des données pour déterminer et classer les structures de défauts dans les cristaux endommagés dans le cadre de la simulation.

« Cette solution ouvre la voie à une nouvelle manière positive de classer automatiquement les structures de défauts, ce qui permet de déterminer, en termes quantitatifs, les facteurs communs et les différences entre les matériaux », explique Arjan Koning, chef de la Section des données nucléaires de l'AIEA. « Dans le contexte de l'étude des matériaux pour la chambre à vide d'un réacteur à fusion nucléaire comme l'ITER, il s'agit d'un moyen efficace de mesurer, classer et visualiser les dommages causés à un matériau donné par les neutrons de haute énergie qui sont libérés par le réacteur. La recherche d'un matériau adapté pour la première paroi de la cuve du réacteur est une étape essentielle vers un projet viable de construction d'une centrale à fusion. »

L'approche proposée par les lauréats présente plusieurs avantages par rapport aux méthodes existantes. En voici un aperçu :

- les nouveaux types de défauts ou ceux qui apparaissent de manière inattendue peuvent être identifiés et classés automatiquement ;

- l'approche est fondée sur une combinaison d'algorithmes puissants et précis tirés de la science des données ;
- elle permet de faire la distinction entre les véritables défauts et les petites altérations temporaires causées par le mouvement thermique des atomes ; et
- elle est suffisamment rapide pour être appliquée pendant la progression de l'endommagement simulé du cristal, ce qui permet de mieux comprendre comment les défauts se forment, se combinent et, dans certains cas, finissent par disparaître lorsque les atomes reprennent leur position initiale dans le réseau cristallin.

Jusqu'à présent, l'identification et la classification des défauts nécessitaient beaucoup de personnel et de temps, raison pour laquelle ces tâches n'étaient généralement réalisées qu'à la fin des simulations moléculaires. Ce nouvel algorithme peut être appliqué durant la simulation du défaut cristallin à chacune des étapes, ce qui peut aider à mieux comprendre à quel moment certains types de défauts apparaissent et disparaissent. On dispose ainsi de beaucoup plus d'informations sur le système, informations qui n'étaient guère accessibles jusqu'ici et qui nous permettent de distinguer les types de défauts qui sont susceptibles de durer de ceux qui ne le sont pas.

« Nous espérons que notre approche permettra d'accélérer considérablement l'analyse des simulations de la dynamique moléculaire », indique Udo von Toussaint. « La puissance de calcul des ordinateurs progresse constamment, alors que les capacités manuelles sont limitées. Dès que l'on peut utiliser les moyens informatiques plutôt que les moyens humains, c'est la garantie d'avancées scientifiques plus rapides. »

Comme a tenu à le préciser M. Toussaint, les lauréats du défi permettront à toutes les personnes intéressées de bénéficier d'un accès libre et gratuit à leur code. D'autres institutions et experts, essentiellement des spécialistes des matériaux, pourraient s'en servir pour analyser les résultats de leurs simulations, en particulier celles portant

sur l'endommagement des solides par irradiation.

Selon Arjan Koning, l'AIEA entend tirer parti de la réussite de son défi en mettant au point une application d'informatique

distribuée qui pourra être téléchargée par des volontaires pour exécuter des simulations d'endommagement de matériaux de fusion. Cette initiative pourrait donner une forte impulsion à l'étude de nouveaux matériaux destinés

à la construction d'un réacteur de fusion et ainsi aider les scientifiques à mieux comprendre leur comportement dans des conditions aussi extrêmes.

— Par Christian Hill et Aleksandra Peeva

## Des scientifiques de 40 pays bénéficient de la formation en ligne de l'AIEA sur l'activation neutronique



Que ce soit pour résoudre des affaires criminelles qui ont marqué l'histoire, pour trouver ce qu'il y a derrière l'effacement progressif d'une plage en Jamaïque ou pour déterminer la qualité de l'air dans votre salle de sport, l'activation neutronique est une méthode reconnue qui permet de révéler la composition et l'origine des matériaux. Grâce à un outil d'apprentissage en ligne élaboré par l'AIEA, les chercheurs de 40 pays sont en train de s'y former.

L'activation neutronique est un type d'analyse couramment employé dans près de la moitié des 238 réacteurs de recherche en exploitation dans le monde ainsi que dans certains générateurs de neutrons alimentés par accélérateur. Cette technique très sensible peut détecter la concentration d'un seul atome sur un million, sans que cela conduise à l'altération ni à la destruction du matériau examiné. Du fait de sa précision, elle offre plusieurs avantages par rapport à d'autres méthodes d'analyse et elle est particulièrement utile pour les analyses globales et l'étude de matériaux singuliers dont on doit préserver l'intégrité.

La technique consiste à irradier des atomes stables par un flux de neutrons, puis à mesurer la décroissance, ou le rayonnement, des éléments de l'échantillon. Les scientifiques s'en servent pour trouver la signature chimique de divers matériaux : plastiques, métaux, verre ou particules du sol et de l'air, pour n'en citer que quelques-uns.

« Aujourd'hui, les principaux champs d'application de cette méthode sont les sciences environnementales, l'archéologie, le patrimoine culturel et même la criminalistique », précise Nuno Pessoa Barradas, spécialiste des réacteurs de recherche à l'AIEA. « Les chercheurs qui travaillent dans ces domaines n'ont cependant pas toujours des connaissances en physique nucléaire ; ils ne sont donc pas forcément en mesure d'exploiter tout le potentiel de cette technique. »

### Renforcer les connaissances

Afin de combler le manque actuel de connaissances et de répondre à une demande croissante dans ce domaine, l'AIEA, par l'intermédiaire du projet de coopération technique « Constitution de réseaux pour des programmes de formation théorique et pratique et de sensibilisation à la science et à la technologie nucléaires », a conçu une formation en ligne sur l'analyse par activation neutronique. Lancée à la fin de 2017, celle-ci s'adresse à la fois aux novices et aux spécialistes.

En octobre 2018, un objectif décisif a été atteint : en moins d'un an, on a enregistré des inscriptions à la formation dans 40 des 52 pays possédant des réacteurs de recherche en service. Plusieurs établissements se servent de cet outil pour former du personnel et des étudiants, y compris au niveau universitaire.

« Nous sommes confrontés à une forte rotation du personnel et la formation des nouveaux venus exige beaucoup de temps,

en particulier dans un domaine aussi spécialisé », explique Katalin Gmélung du Centre hongrois de recherche sur l'énergie. « La formation en ligne donne accès à une foule d'informations qui permettent aux nouveaux employés de se familiariser avec le sujet et au personnel chevronné de rafraîchir ses connaissances. »

Découverte en 1935 par le chimiste d'origine hongroise George de Hevesy et la physicienne germano-danoise Hilde Levi, l'activation neutronique s'est imposée à l'origine comme un outil utile pour mesurer la masse d'éléments de terres rares.

Au cours des dernières décennies, on a découvert que cette méthode pouvait avoir d'autres applications, par exemple pour apporter de nouveaux éléments de preuve dans des affaires criminelles historiques. En 2013, on s'en est servi pour analyser des poils de moustache afin de réfuter la théorie selon laquelle Tycho Brahe avait été empoisonné au mercure. Au décès de ce membre de la noblesse danoise, c'est son assistant et principal suspect, le mathématicien et astronome Johannes Kepler – célèbre pour avoir découvert les lois du mouvement des planètes – qui avait hérité de ses précieuses notes.

Récemment, à la suite du vol d'une quantité de sable équivalant à 500 chargements de camions sur la plage de Coral Springs en Jamaïque, les autorités locales ont collaboré avec le Centre international de sciences environnementales et nucléaires pour appliquer la méthode de l'activation neutronique. Il a ainsi été possible d'analyser l'origine du sable de plusieurs plages susceptibles d'avoir récupéré une partie du sable dérobé, ce qui a permis de fournir de nouveaux éléments de preuve.

Aujourd'hui, l'activation neutronique sert également à effectuer des recherches et des tests sur la qualité de l'air intérieur (dans les écoles ou les centres de mise en forme, par exemple), l'objectif étant de déterminer la quantité et l'origine des polluants présents dans l'air.



À l'occasion d'un atelier organisé en septembre 2018 au Siège de l'AIEA à Vienne, on a procédé à une révision de la formation en ligne sur l'analyse par activation neutronique.

« Cette formation est pensée comme un outil évolutif qui peut être constamment mis à jour et enrichi au fur et à mesure des avancées réalisées dans le domaine, avec l'ajout de différents protocoles de laboratoire et domaines de recherche »,

souligne Nuno Pessoa Barradas. La première version remodelée devrait être mise en ligne au début de 2019.

— Par Luciana Viegas

## L'Égypte et le Sénégal reçoivent des détecteurs gamma pour lutter contre l'érosion de sols



En Égypte et au Sénégal, des experts seront mieux à même de lutter contre l'érosion du sol grâce à deux détecteurs de spectrométrie gamma qui leur ont été livrés en novembre 2018 dans le cadre du programme de coopération technique de l'AIEA. Ces détecteurs seront utilisés pour l'évaluation de l'érosion du sol dans des zones frappées par une grave dégradation des terres, phénomène qui fragilise l'agriculture dans de nombreuses régions du monde, notamment dans des zones arides et semi-arides d'Afrique.

L'Égypte et le Sénégal sont touchés par une forte dégradation des terres. Selon des études récentes, la productivité des sols dans la majeure partie du Nord-Est du delta du Nil a diminué de plus de 45 % au cours des 35 dernières années. Plusieurs facteurs sont responsables de ce phénomène, notamment la surexploitation des terres, des pratiques agricoles non durables et des événements météorologiques extrêmes, qui sont devenus plus fréquents au cours des dernières décennies. L'érosion du sol, forme courante de dégradation des terres due à des facteurs humains et environnementaux, peut entraîner la perte totale de la couche arable fertile, rendant les terres touchées impropres à l'agriculture.

L'agriculture est un secteur économique important dans la plupart des pays africains. Elle représente, par exemple, environ 12 % du produit intérieur brut (PIB) de l'Égypte et 17 % de celui du Sénégal. L'agriculture à faible consommation d'intrants pratiquée dans des fermes de subsistance

exploitées par des familles en est une composante importante. Elle génère une grande partie des emplois et assure les moyens d'existence d'exploitants pratiquant une agriculture de subsistance et de leurs familles. Étant donné que cette forme d'agriculture se pratique généralement sur des terres arides ou semi-arides ayant un faible potentiel agricole, comme des terres sèches ou montagneuses, elle est particulièrement vulnérable à l'érosion des sols.

Depuis plus de 20 ans, l'AIEA, en coopération avec l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), aide les pays à lutter contre la dégradation des terres en leur apprenant à se servir de techniques isotopiques pour évaluer l'érosion du sol.

Des radionucléides provenant des retombées, comme le césium 137, sont beaucoup utilisés comme traceurs pour évaluer l'érosion et la sédimentation des sols. Le césium 137 est présent dans l'atmosphère. Il est déposé sur le sol par les précipitations et s'accumule dans la couche supérieure. La couche arable du sol est emportée par l'érosion. Ce phénomène est mis en évidence par la mesure de niveaux de césium 137 en baisse. En revanche, là où le sol érodé se dépose, on relève des niveaux de césium 137 plus élevés.

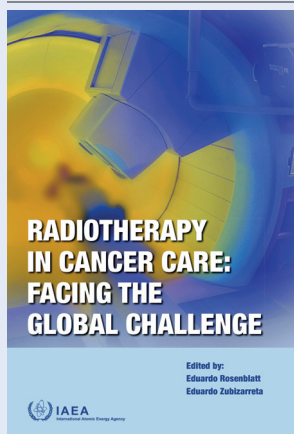
« L'évaluation de l'érosion au moyen du césium 137 présente de nombreux avantages par rapport aux méthodes classiques », déclare Emil Fulajtar, pédologue à la Division mixte FAO/AIEA des techniques nucléaires dans

l'alimentation et l'agriculture. Elle permet d'établir des taux d'érosion moyens à long terme alors que les méthodes traditionnelles permettent d'obtenir surtout des données à court terme. Cette technique nucléaire rend donc superflus les programmes de suivi longs requérant beaucoup de ressources : la redistribution des sols peut être évaluée au cours d'une seule campagne de prélèvement d'échantillons. Elle contribue également à déterminer la répartition spatiale de l'érosion, donnée essentielle pour des programmes de conservation des sols visant à assurer la gestion durable des terres et, par conséquent, la sécurité alimentaire.

Les spectromètres gamma utilisés pour mesurer les niveaux de césium 137 ont été fournis dans le cadre d'une initiative que gère la Division mixte FAO/AIEA afin d'aider des pays africains à améliorer leur capacité à lutter contre l'érosion des sols ; dans ce cadre, elle forme aussi certains de leurs scientifiques à l'utilisation de la méthode au césium 137 et favorise la création de capacités en matière de spectrométrie gamma sur le continent. Trois autres détecteurs de rayons gamma fixes ont déjà été livrés à Madagascar, en Algérie et au Zimbabwe, ainsi que trois détecteurs de rayons gamma portatifs au Maroc, en Tunisie et à Madagascar.

« Nous utiliserons les détecteurs gamma pour déterminer les "empreintes" de sédimentation dans le Nil afin de remonter aux sources de contamination, qui peuvent être, par exemple, l'eau s'écoulant d'exploitations industrielles ou agricoles situées sur les rives du fleuve », explique Mohamed Kassab, chargé de cours au centre de recherche nucléaire de l'Autorité égyptienne de l'énergie atomique. « Nous prévoyons également d'aider d'autres pays d'Afrique à créer des capacités en matière de mesure des rayonnements gamma et de services d'analyse », ajoute-t-il.

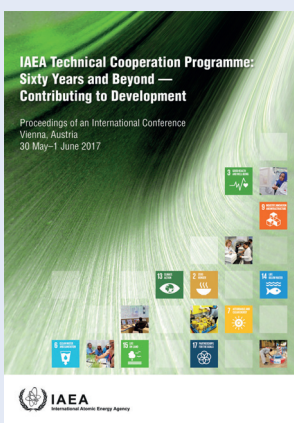
— Par Matt Fisher



## La radiothérapie dans les soins anticancéreux : un enjeu mondial

La publication intitulée *Radiotherapy in Cancer Care : Facing the Global Challenge* offre une vue d'ensemble des principaux thèmes et questions devant être pris en considération lors de l'élaboration d'une stratégie visant à combler le manque de ressources en radiothérapie dans le monde, en particulier dans les pays à revenu faible et intermédiaire. Il est reconnu que la radiothérapie est essentielle dans les traitements curatif et palliatif du cancer. Actuellement, l'accès au traitement radiologique est limité dans de nombreux pays et inexistant dans d'autres. Ce manque de ressources en radiothérapie accroît la charge du cancer et souligne les disparités persistantes entre les États en matière de soins de santé. Il est nécessaire de combler les écarts afin de faire face à ce problème d'inégalité en matière de santé à l'échelle mondiale. Cette publication, qui comprend des contributions de spécialistes du domaine, présente les réalisations en matière d'utilisation de la radiothérapie comme méthode de traitement du cancer dans le monde entier, et les questions que celle-ci soulève. Elle contient des chapitres consacrés à la protonthérapie, à la radiothérapie par ions carbone, à la radiothérapie peropératoire, à la radiothérapie pour enfants et aux affections malignes liées au VIH/sida, ainsi qu'aux questions de coût et de gestion de la qualité.

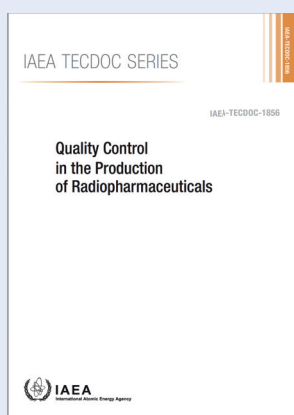
Publication hors-série ; ISBN : 978-92-0-115013-4 ; 62,00 euros ; 2017 (en anglais)  
[www-pub.iaea.org/books/iaea-books/10627/Radiotherapy-in-Cancer-Care](http://www-pub.iaea.org/books/iaea-books/10627/Radiotherapy-in-Cancer-Care)



## Programme de coopération technique de l'AIEA : soixante ans de contribution au développement

La publication intitulée *IAEA Technical Cooperation Programme : Sixty Years and Beyond — Contributing to Development* présente dans le détail la manière dont le programme de coopération technique de l'AIEA a contribué, au cours des soixante dernières années, à la mise en place dans les États Membres de l'infrastructure et de capacités nucléaires nationales répondant aux priorités des pays en matière de développement. Elle présente aussi des exemples de partenariats réussis et se tourne vers l'avenir en s'intéressant aux approches et aux mesures concrètes qui aideront les pays à exploiter au mieux la science et la technologie nucléaires en vue d'atteindre leurs objectifs de développement, notamment les cibles des objectifs de développement durable. Est également abordée l'application de la science et de la technologie nucléaires dans plusieurs grands domaines thématiques : la santé humaine et la nutrition, l'alimentation et l'agriculture, l'eau et l'environnement, la technologie des rayonnements et l'énergie et la sûreté. Enfin, la publication propose un tour d'horizon des problèmes communs liés à la collaboration régionale et à la constitution de réseaux ainsi que des approches adoptées par l'AIEA et les États Membres pour nouer des partenariats durables et mutuellement avantageux.

Collection des comptes rendus ; ISBN : 978-92-0-100318-8 ; 36,00 euros ; 2018 (en anglais)  
[www-pub.iaea.org/books/iaea-books/12280/Technical-Cooperation-Programme](http://www-pub.iaea.org/books/iaea-books/12280/Technical-Cooperation-Programme)



## Contrôle de la qualité dans le secteur de la production de radiopharmaceutiques

La publication intitulée *Quality Control in the Production of Radiopharmaceuticals* fournit des lignes directrices et de meilleures pratiques en ce qui concerne le contrôle de la qualité des radio-isotopes médicaux et des radiopharmaceutiques. Des progrès technologiques ont conduit à la production de nouveaux radiopharmaceutiques et à la création de nouvelles méthodes de production. Divers nouveaux agents diagnostiques (tels que les radiopharmaceutiques marqués au <sup>68</sup>Ga et les générateurs de <sup>68</sup>Ga) et agents thérapeutiques (comme les émetteurs alpha) font désormais partie de la « boîte à outils » des cliniciens. Il est essentiel que les radiopharmaceutiques soient préparés dans le cadre d'un système rigoureux de contrôle de la qualité, appliqué à la fois aux matières et au personnel, qui comprenne une documentation adéquate et un examen continu des résultats obtenus. Fruit du travail d'un groupe d'experts dont l'expérience couvre un large éventail de radiopharmaceutiques, cette publication a pour objet d'aider les professionnels à préparer des produits sûrs et de qualité destinés à être utilisés dans des procédures de médecine nucléaire.

IAEA-TECDOC ; ISBN : 978-92-0-107918-3 ; 18,00 euros ; 2018 (en anglais)  
[www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/13422/Quality-Control-in-the-Production-of-Radiopharmaceuticals](http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/13422/Quality-Control-in-the-Production-of-Radiopharmaceuticals)

**Pour obtenir de plus amples informations ou 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)



Conférence internationale sur  
**les changements  
climatiques et le rôle de  
l'électronucléaire**

**7-11 octobre 2019,  
Vienne (Autriche)**

Organisée par



**IAEA**

Agence internationale de l'énergie atomique  
*L'atome pour la paix et le développement*

**#Atoms4Climate**

CN-275