

# IAEA BULLETIN

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE

La publication phare de l'AIEA | Novembre 2019

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



## Les réacteurs de recherche

La contribution des réacteurs de recherche  
à l'imagerie médicale, p. 12

Exploiter pleinement les réacteurs de recherche  
de manière stratégique, p. 20

Gérer le vieillissement des réacteurs de recherche  
pour assurer une exploitation sûre et efficace, p. 30

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'Agence internationale de l'énergie atomique (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'AIEA, et celle-ci décline toute responsabilité à cet égard.

Photo de couverture : AIEA

Suivez-nous sur :



L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) 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 créé la collection Sécurité nucléaire, dans laquelle sont publiées des orientations sur la sécurité nucléaire faisant l'objet d'un consensus international. Ses travaux visent en outre à réduire le risque que des matières nucléaires et d'autres matières radioactives tombent entre les mains de terroristes ou de criminels, ou que des installations nucléaires soient la cible d'actes malveillants.

Les normes de sûreté de l'AIEA définissent un système de principes fondamentaux de sûreté et sont l'expression d'un consensus international sur ce qui constitue un 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, à New York, à Tokyo et à Toronto. Elle exploite des laboratoires scientifiques à Monaco, à Seibersdorf et à Vienne. En outre, elle apporte son appui et contribue financièrement au fonctionnement du Centre international Abdus Salam de physique théorique de Trieste (Italie).

# Exploiter les possibilités offertes par les réacteurs de recherche

Par Cornel Feruta, Directeur général par intérim de l'AIEA

Depuis des décennies, les réacteurs de recherche sont très utiles pour apporter des innovations dans la science et la technologie nucléaires dans le monde entier.

Il y en a actuellement 224 en service dans 53 pays. Leurs nombreuses applications comprennent la production de radiopharmaceutiques pour les soins oncologiques et la médecine nucléaire, la création de nouveaux matériaux pour la recherche et l'industrie, et la formation de scientifiques et d'ingénieurs nucléaires. Ils ne sont généralement pas utilisés pour produire de l'électricité.

Depuis plus de 60 ans, l'AIEA aide les pays à mettre en place, à exploiter et à entretenir des réacteurs de recherche pour leur permettre de tirer parti des nombreux avantages que ces réacteurs offrent pour la science et la société.

Cette édition du Bulletin de l'AIEA, consacrée aux réacteurs de recherche, présente les nombreuses façons dont l'AIEA aide les pays à tirer le meilleur parti de ces réacteurs. Elle donne un aperçu de leurs utilisations (page 4), par exemple aux fins de la production de radio-isotopes destinés à l'imagerie médicale (page 12) et de la formation théorique et pratique de professionnels du nucléaire (page 14). Vous y trouverez aussi des photos de l'intérieur d'une installation de réacteur de recherche en Jordanie (page 16).

L'approche par étapes de l'AIEA offre aux pays qui se lancent dans un programme de réacteur de recherche

une méthode globale et progressive pour la mise en place de l'infrastructure nécessaire à l'utilisation sûre et fiable de ces outils polyvalents (page 6). Pour les pays qui possèdent déjà des réacteurs de recherche ou qui prévoient d'en construire d'autres, les services d'examen par des pairs de l'AIEA permettent d'évaluer et d'améliorer la sûreté, la sécurité et l'exploitation (page 22).

De nombreux pays collaborent avec l'AIEA en vue de maximiser l'utilisation de leurs réacteurs de recherche, en particulier ceux construits il y a plusieurs dizaines d'années sans plan stratégique à long terme (page 20). Par exemple, la Belgique adopte actuellement des plans de vieillissement et de gestion afin d'optimiser l'utilisation de son réacteur de recherche au cours des prochaines décennies (page 30). L'Ouzbékistan, pour sa part, travaille avec des experts de l'AIEA au déclassement de l'un de ses réacteurs de recherche (page 32).

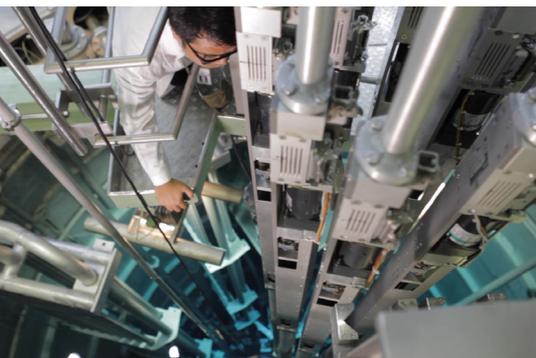
Les réacteurs de recherche doivent toujours être utilisés de manière sûre et sécurisée. Ainsi, nombre de pays collaborent avec l'AIEA en vue d'intégrer des systèmes et des mesures de sécurité aux réacteurs de recherche qu'ils possèdent déjà ou sont en train d'acquérir (page 24), d'appliquer la réglementation en matière de sûreté (page 8) et de mettre en place une culture de sûreté solide (page 10).

L'AIEA contribue activement aux efforts internationaux visant à remplacer l'uranium hautement enrichi (UHE) par de l'uranium faiblement enrichi



(UFE) dans le combustible des réacteurs de recherche afin de réduire au minimum l'utilisation civile d'UHE et les risques associés en matière de sécurité et de prolifération (page 26). Les inspecteurs des garanties de l'AIEA vérifient que la technologie et les matières nucléaires des réacteurs de recherche ne sont pas détournées des utilisations pacifiques (page 28).

Tous ces domaines seront abordés lors de la conférence internationale de l'AIEA sur les réacteurs de recherche ayant pour thème « Défis à relever et occasions à saisir pour garantir l'efficacité et la durabilité », qui se tiendra du 25 au 29 novembre 2019. Cette conférence permettra aux exploitants, aux directeurs, aux utilisateurs, aux concepteurs et aux fournisseurs de réacteurs ainsi qu'aux organismes de réglementation de mettre en commun les meilleures pratiques et d'apprendre les uns des autres. J'espère que les informations contenues dans cette édition du Bulletin de l'AIEA favoriseront les débats à cette conférence et ailleurs.

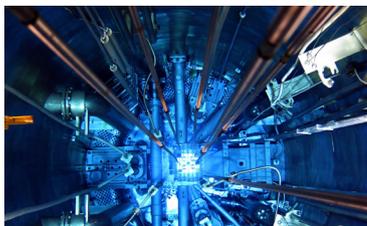


(Photos : AIEA)

## 1 Exploiter les possibilités offertes par les réacteurs de recherche



### 4 À la découverte des réacteurs de recherche et de leur utilisation



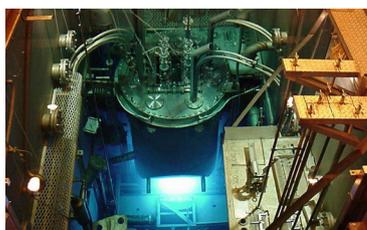
### 6 Développer l'infrastructure nucléaire pour mieux tirer parti des réacteurs de recherche



### 8 Réglementer les réacteurs de recherche, au Maroc et ailleurs



### 10 La direction et la gestion pour la sûreté Entretien avec le directeur des opérations du Groupe de recherches et de consultations nucléaires (NRG), aux Pays-Bas



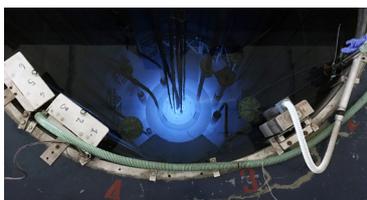
### 12 La contribution des réacteurs de recherche à l'imagerie médicale



### 14 Les réacteurs de recherche au service du développement des compétences et des connaissances



### 16 La sûreté du début à la fin Visite de l'installation jordanienne de réacteur de recherche



## 20 Exploiter pleinement les réacteurs de recherche de manière stratégique



## 22 Renforcer la sûreté, la sécurité et la fiabilité

Les missions d'examen par des pairs de l'AIEA portant sur les réacteurs de recherche



## 24 Trouver la formule adéquate

Comment la sécurité nucléaire acquiert sa juste place dans les réacteurs de recherche

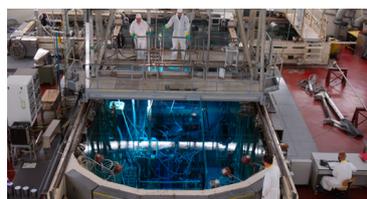


## 26 Les pays se tournent vers l'uranium faiblement enrichi pour alimenter leurs réacteurs de recherche



## 28 La recherche sous contrôle

La mise en œuvre des garanties dans les réacteurs de recherche



## 30 Gérer le vieillissement des réacteurs de recherche pour assurer une exploitation sûre et efficace



## 32 Le déclassé du premier réacteur de recherche de l'Ouzbékistan

Dans le monde

## 34 Inscrire les réacteurs de recherche dans la durée

— Par Helmuth Boeck

Infos AIEA

## 36 Infos AIEA

## 40 Publications

# À la découverte des réacteurs de recherche et de leur utilisation

Par Nicole Jawerth et Elisa Mattar

Depuis plus de 60 ans, les réacteurs de recherche constituent des outils polyvalents utilisés dans le monde entier pour tester des matériaux, faire avancer la recherche scientifique et mettre au point et produire des matières radioactives essentielles au diagnostic, et parfois au traitement, de maladies. Si la gamme de modèles de réacteurs de recherche est vaste, l'éventail de leurs applications, qui offrent des avantages socio-économiques aidant des pays du monde entier à atteindre leurs objectifs de développement durable, l'est encore davantage.

Plus de 800 réacteurs de recherche ont été construits à ce jour. Bien que beaucoup aient été mis à l'arrêt et déclassés au fil des ans, 224 sont encore en service dans 53 pays. Neuf réacteurs de recherche sont en chantier et plus de dix ont été construits au cours des dix dernières années. Étant donné que la plupart de ces réacteurs ont été construits dans les années 1960 et 1970, la moitié de ceux en service dans le monde ont plus de 40 ans et près de 70 % ont plus de 30 ans.

## Qu'est-ce qu'un réacteur de recherche ?

Les réacteurs de recherche sont de petits réacteurs nucléaires qui servent principalement à produire des neutrons, à la différence des réacteurs nucléaires de puissance, qui sont plus grands et servent à produire de l'électricité. Par rapport aux réacteurs nucléaires de puissance, les réacteurs de recherche sont de conception plus simple, fonctionnent à des températures plus basses et nécessitent beaucoup moins de combustible, engendrant donc beaucoup moins de déchets. Compte tenu de leur rôle important dans la recherche-développement, de nombreux réacteurs de recherche sont situés sur des campus universitaires ou dans des établissements de recherche.

La puissance des réacteurs de recherche est exprimée en mégawatts (MW). Un mégawatt équivaut à un million de watts, le watt étant une unité de puissance. La puissance des réacteurs de recherche varie entre 0 MW (comme celle d'un assemblage critique) et 200 MW. À titre de comparaison, un grand réacteur nucléaire de puissance peut produire 3 000 MW, ce qui correspond à 1 000 MW électriques. Toutefois, la puissance de la plupart des réacteurs de recherche est inférieure à 1 MW.

## Comment les réacteurs de recherche sont-ils utilisés ?

Les réacteurs de recherche produisent des neutrons, particules subatomiques présentes dans la quasi-totalité des atomes, qui sont utiles pour les études scientifiques aux niveaux atomique et microscopique. Ils sont notamment utilisés pour produire des radio-isotopes en médecine et pour irradier des matières dans le cadre de la mise au point de réacteurs de fission et de fusion. Ces particules sont principalement utilisées dans les domaines de l'industrie, de la médecine, de l'agriculture, de la criminalistique, de la biologie, de la chimie et de la géochronologie.

À la différence des réacteurs de puissance, les réacteurs de recherche se prêtent bien à la formation théorique et pratique, en raison de leur complexité moindre. En effet, leurs systèmes et leur conception générale sont simples et facilement accessibles, ce qui permet de simuler différentes conditions d'un réacteur en toute sûreté. Les réacteurs de recherche peuvent être utilisés pour former les exploitants de réacteurs, le personnel d'exploitation et de maintenance d'installations nucléaires, le personnel de radioprotection et d'organismes de réglementation, des étudiants et des chercheurs.

## Quelques utilisations des réacteurs de recherche

La recherche à l'aide de neutrons a commencé après la découverte de ces particules par James Chadwick en 1932. Vers la moitié des années 1950, l'utilisation des neutrons dans le domaine de la recherche s'est répandue, notamment parce que les chercheurs ont commencé à appliquer les techniques de diffusion neutronique. Aujourd'hui, les neutrons produits par des réacteurs de recherche sont utilisés à des fins très diverses, dont quelques exemples sont présentés ci-après.

La **diffusion neutronique** est une technique d'analyse qui permet de comprendre la structure et le comportement de solides et de matières condensées. Lorsque les neutrons interagissent avec les atomes de la matière, leur énergie et d'autres de leurs propriétés peuvent subir des changements

qui permettent d'étudier la structure et la dynamique de la matière. De par leurs propriétés, les neutrons sont aussi très utiles pour étudier l'hydrogène, de petits ou grands objets, ainsi que d'innombrables matériaux, notamment des matériaux magnétiques. Ainsi, ils permettent par exemple de comprendre comment les os se régénèrent, d'étudier les protéines du cerveau, d'améliorer les batteries et de créer des aimants.

Pour **analyser des matériaux**, on associe souvent des techniques neutroniques à des techniques faisant appel aux rayons X, car elles fournissent des informations complémentaires. Les neutrons sont sensibles aux éléments plus légers, en particulier l'hydrogène dans l'eau et la matière biologique, tandis que les rayons X sont plus sensibles aux éléments plus lourds, tels que le fer dans l'acier. La combinaison de techniques neutroniques et de techniques faisant appel aux rayons X permet d'obtenir une plus grande sensibilité à tous les composants d'un échantillon ou d'un objet.

L'utilisation de neutrons aux fins de la **recherche sur les matériaux** aide les scientifiques à comprendre et à élaborer des technologies dans des domaines divers : de l'électronique à la médecine en passant par les matériaux de construction pour des conditions extrêmes, comme le matériel destiné au travail dans l'espace ou dans les centrales nucléaires.

En outre, les neutrons produits par les réacteurs de recherche peuvent servir à caractériser des objets du patrimoine culturel, comme des peintures ou des monuments. Les techniques neutroniques permettent de distinguer différents types de matériaux utilisés dans les œuvres d'art, comme des peintures, ainsi que les composants élémentaires et la texture d'objets historiques, comme des pierres. Ces techniques sont appelées « essais non destructifs », car elles permettent aux chercheurs d'étudier les objets sans les endommager.

L'**irradiation neutronique** peut également servir à créer de nouveaux matériaux ayant des propriétés utiles. Par exemple,

on irradie du silicium à l'aide de neutrons pour en modifier la conductivité en vue de son utilisation dans des semi-conducteurs de forte puissance.

Les réacteurs de recherche sont aussi utilisés pour **produire des radio-isotopes**, éléments instables qui retrouvent la stabilité après avoir subi une décroissance radioactive. Au cours du processus de décroissance, divers types de rayonnements sont émis et peuvent être utilisés à des fins médicales ou industrielles.

L'une des utilisations les plus fréquentes des radio-isotopes est le diagnostic et le traitement de maladies telles que le cancer ou les maladies cardio-vasculaires. Le radio-isotope le plus utilisé en médecine est le technétium 99m, qui est obtenu à partir du molybdène 99 et est utilisé en imagerie diagnostique (voir page 12).

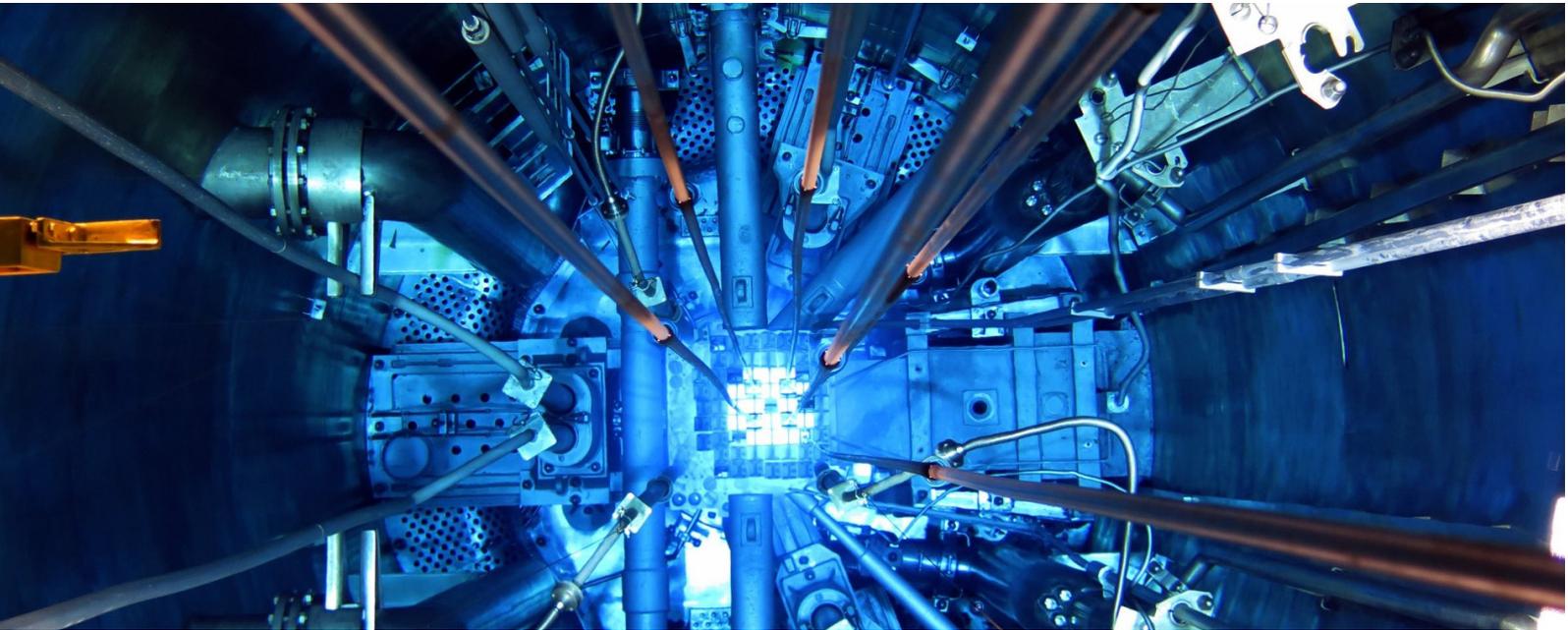
### Appuyer l'utilisation des réacteurs de recherche

Depuis plusieurs dizaines d'années, l'AIEA promeut l'utilisation des réacteurs de recherche dans le monde entier. Elle fournit un appui aux pays à toutes les phases d'un projet de réacteur de recherche : planification, construction, mise en service, exploitation, déclassement en fin de vie utile et démantèlement. Elle aide aussi les pays à optimiser l'utilisation efficace et durable de leurs réacteurs de recherche (voir page 20) et aide ceux qui ne possèdent pas de tels réacteurs à y avoir accès afin qu'ils puissent eux aussi bénéficier de leurs avantages. Cet appui est fourni sous la forme de formations, d'ateliers, d'une mise en commun des compétences et des meilleures pratiques, de services d'examen par des pairs (voir page 22), ainsi que de documents d'orientation, de normes et de cours en ligne. L'AIEA apporte également son concours en ce qui concerne la sûreté et la sécurité des réacteurs de recherche, notamment le remplacement sûr et sécurisé du combustible à l'uranium hautement enrichi par du combustible à l'uranium faiblement enrichi (voir page 26).



# Développer l'infrastructure nucléaire pour mieux tirer parti des réacteurs de recherche

Par Matt Fisher



Le cœur d'un réacteur de recherche.

(Photo : AIEA)

On peut employer les réacteurs de recherche à des fins très diverses, qui vont de la formation des ingénieurs nucléaires à la recherche scientifique, en passant par la production de radio-isotopes et la mise au point de matériaux avancés. Toutefois, avant qu'un pays ne puisse lancer un nouveau projet de réacteur de recherche, l'infrastructure appropriée doit être en place.

« L'AIEA donne des orientations sur les questions liées à l'élaboration et à la mise en œuvre de projets de réacteurs de recherche. Elles portent notamment sur le cadre juridique et réglementaire, la mise en valeur des ressources humaines, les garanties, la sûreté et la sécurité », déclare Andrey Sitnikov, responsable technique de l'infrastructure nucléaire des réacteurs de recherche et du renforcement des capacités à l'AIEA.

« L'approche par étapes de l'AIEA aide les pays à mettre au point leurs programmes de réacteurs de recherche de manière efficace et globale, en vue de pouvoir utiliser leurs réacteurs de recherche en toute sûreté et fiabilité. »

## L'approche par étapes

L'approche par étapes est un dispositif complet divisé en trois phases, qui énonce tout ce qu'il incombe à un pays de réaliser dans 19 domaines touchant au développement de l'infrastructure, notamment la sûreté nucléaire, les ressources humaines, le financement et la gestion. Ce dispositif peut être appliqué dans le cadre des programmes électronucléaires comme dans celui des programmes de réacteurs de recherche.

Si l'approche ne diffère guère, dans ses grandes lignes, pour les programmes de réacteurs de recherche et les programmes électronucléaires, la distinction majeure concerne le niveau d'utilisation : les réacteurs de recherche ont un large éventail d'applications, tandis que les réacteurs nucléaires de puissance servent avant tout à produire de l'électricité. Par conséquent, lorsqu'un pays applique l'approche par étapes à des réacteurs de recherche, il doit commencer par définir à quelles fins ces derniers seront utilisés. Connaître le but dans lequel un réacteur de recherche sera employé est en effet essentiel pour déterminer quels éléments d'infrastructure particuliers seront nécessaires, comme par exemple le type de spécialistes qu'il faudra recruter ou d'installations qu'il faudra construire, mais aussi pour mettre en œuvre l'approche par étapes de manière efficace.

## Trois phases principales de mise au point

Le processus de mise au point d'un réacteur de recherche s'organise en trois phases principales : l'élaboration d'un rapport de faisabilité afin de justifier que le projet de réacteur de recherche répond à un besoin, la préparation de la construction du réacteur (qui comprend notamment la mise en place d'un cadre juridique et réglementaire), et enfin la construction et la mise en service du nouveau réacteur.

La fin de chaque phase marque l'accomplissement d'une « étape » ; ces repères permettent au pays de suivre sa progression et d'évaluer son niveau de préparation avant de

passer au travail de la phase suivante. La première étape est franchie lorsqu'un pays est prêt à s'engager dans un programme de réacteur de recherche ; la deuxième étape s'achève lorsqu'un pays est prêt à entamer la négociation d'un contrat portant sur la construction et l'exploitation du réacteur ; la troisième étape est atteinte lorsque le réacteur est prêt à entrer en service.

## Examiner et améliorer

Évaluer l'infrastructure déjà en place et celle qui doit encore être créée ou renforcée est une étape importante de la mise en place ou du développement d'un programme de réacteur de recherche. L'AIEA aide les pays, à leur demande, à faire le point sur leur situation et à définir les domaines qui pourraient nécessiter des améliorations dans le cadre de missions d'Examen intégré de l'infrastructure nucléaire pour les réacteurs de recherche (INIR-RR). Il s'agit de missions d'examen par des pairs coordonnées par l'AIEA. Elles ont par nature une portée globale et sont menées par des équipes internationales composées d'experts de l'AIEA et d'experts externes qui ont une expérience directe de l'infrastructure nucléaire spécialisée pour les réacteurs de recherche.

Avant chaque mission, le pays concerné commence par établir un rapport d'autoévaluation sur les 19 questions liées à l'infrastructure figurant dans la publication de l'AIEA sur les considérations et les étapes spécifiques d'un projet de réacteur de recherche (intitulée en anglais « *Specific Considerations and Milestones for a Research Reactor Project* »). Ensuite, les experts évaluent la situation en s'appuyant sur les éléments factuels rassemblés lors de la mission INIR-RR, y compris les plans stratégiques et les considérations relatives au site.

À l'issue de la mission, l'équipe INIR-RR rédige un rapport comprenant des recommandations sur les actions à mettre en œuvre. Une mission de suivi a éventuellement lieu environ deux ans après la mission initiale et permet d'évaluer la suite donnée aux recommandations. Habituellement, le pays et l'AIEA mettent en place ensemble, en tenant compte des conclusions de l'examen, un plan d'action visant à renforcer les capacités de façon ciblée, axé sur quelques-unes des 19 questions liées à l'infrastructure.

## La toute première mission INIR-RR

La toute première mission INIR-RR a eu lieu au Nigeria en février 2018. Le Nigeria dispose d'un réacteur source de neutrons miniature (RSNM) consacré à la recherche, d'une puissance de 30 kWth, qui est en exploitation depuis 2004 et sert à des activités de formation et à l'analyse par activation neutronique, mais qui ne peut pas être employé à d'autres applications.

Les autorités du pays envisagent de se doter d'un réacteur de recherche polyvalent plus grand et plus versatile, destiné à des applications qui comprennent notamment la production

de radio-isotopes pour le traitement du cancer et pour la conservation des aliments. Le réacteur de recherche polyvalent permettrait également au Nigeria de relever son niveau d'expérience dans l'exploitation de réacteurs de plus grande dimension, et aiderait le pays sur la voie d'un éventuel programme électronucléaire à l'avenir.

Puisque le Nigeria dispose déjà d'un programme de réacteur de recherche, la plupart des exigences relatives à l'infrastructure nécessaire au réacteur de recherche polyvalent ont déjà été satisfaites, dans une certaine mesure ; toutefois, l'exploitation d'un réacteur de recherche de plus grande dimension nécessite de renforcer et d'élargir l'infrastructure existante. Dans ses recommandations, l'équipe de la mission INIR-RR engageait à mettre davantage l'accent sur le développement des ressources humaines. Le Nigeria prévoit de mettre en service le réacteur d'ici 2025.

## Développer, pour faire plus

Un réacteur de recherche polyvalent fait également partie des plans du Viet Nam pour développer son programme et élargir ainsi le champ de ce que le pays peut accomplir grâce aux réacteurs de recherche. À l'heure actuelle, le Viet Nam exploite un réacteur de recherche relativement petit (de type piscine de 500 kWth), qu'il consacre à diverses applications, notamment une production à petite échelle de radio-isotopes et la recherche-développement en matière de faisceaux de neutrons.

Une mission INIR-RR a été menée au Viet Nam en décembre 2018. L'équipe de la mission a conclu que le Viet Nam avait réalisé des avancées considérables sur la voie de la mise en place de l'infrastructure nécessaire à un réacteur de recherche polyvalent. Les recommandations formulées comprenaient notamment la conduite d'une évaluation plus détaillée de l'utilisation du réacteur de recherche polyvalent et le renforcement de l'indépendance de l'organisme de réglementation.

« Le réacteur de recherche de 10 à 15 MWth que nous avons en vue renforcera nos capacités en matière de recherche scientifique, de formation théorique et pratique, et de production de radio-isotopes », affirme Hoang Anh Tuan, directeur général de l'Autorité vietnamienne de l'énergie atomique. Le Viet Nam prévoit de mettre en service le réacteur de recherche polyvalent d'ici 2026. « La mission INIR-RR nous a aidés à définir les domaines dans lesquels l'infrastructure devait être développée plus avant, notamment notre stratégie de gestion des déchets radioactifs et notre cadre réglementaire. »

# Réglementer les réacteurs de recherche, au Maroc et ailleurs

Par Laura Gil

Les réacteurs de recherche ont beau être plus petits, plus simples et nécessiter moins de combustible que les réacteurs nucléaires de puissance, ils n'en doivent pas moins se conformer à des réglementations très strictes en matière de sûreté et de sécurité.

« Toute activité ou pratique mettant en jeu des sources de rayonnements ionisants, à moins qu'elle ne soit exemptée ou exclue d'un régime réglementaire, doit être réglementée et contrôlée. En l'absence de contrôle, elle risque de faire plus de mal que de bien », avance Khammar Mrabit, directeur général de l'Agence marocaine de sûreté et de sécurité nucléaires et radiologiques (AMSSNuR). « Garantir la sûreté et la sécurité passe nécessairement par la supervision réglementaire. »

Aider les organismes de réglementation des quatre coins de la planète à assurer la sûreté et la sécurité nucléaires des réacteurs de recherche est l'une des fonctions clés de l'AIEA. Dans le cas du Maroc, qui exploite un réacteur de recherche TRIGA Mark II, l'AIEA a aidé l'organisme de réglementation à devenir un modèle en matière de robustesse des inspections, d'indépendance et de fiabilité.

Le réacteur de recherche TRIGA Mark II, qui fait partie du Centre national de l'énergie, des sciences et des techniques nucléaires (CNESTEN), est entré en service en 2007. La législation nucléaire du pays, adoptée en 1971, ainsi que sa loi sur la responsabilité civile, adoptée en 2005, n'avaient pas envisagé la possibilité de menaces telles que le terrorisme nucléaire, et selon Khammar Mrabit, l'organisme de

réglementation ne disposait pas à l'époque d'un degré suffisant d'indépendance ; aussi a-t-il demandé l'aide de l'AIEA.

« D'un côté, il y a la législation et la réglementation, et de l'autre, il y a les exploitants, qui sont responsables au premier chef de la sûreté. Entre les deux, et en continu, il faut avoir un organisme de réglementation indépendant doté de fonctions, rôles et responsabilités bien définis en matière, par exemple, d'autorisation et d'inspection », explique Khammar Mrabit.

L'AIEA a appuyé le Maroc en ce qui concerne l'élaboration et l'adoption d'une nouvelle législation nucléaire en 2014 et la création d'un nouvel organisme de réglementation indépendant sous les auspices du Chef du gouvernement du pays. En 2016, des experts de l'AMSSNuR ont élaboré un plan d'action stratégique en vue d'actualiser leur système réglementaire. Plus de 30 parties prenantes venant des ministères compétents, des organisations professionnelles, des établissements d'appui technique et de l'AIEA ont pris part à ce processus.

Le réacteur de recherche TRIGA Mark II est la plus grande installation nucléaire du Maroc, et revêt de ce fait une haute priorité aux yeux des autorités et des experts techniques du pays. Il contribue à de nombreuses activités, notamment la recherche et la formation en médecine nucléaire, les applications industrielles et la gestion des déchets radioactifs. L'appui de l'AIEA en matière de supervision réglementaire comprend des missions d'examen (voir page 22), une aide à l'élaboration de réglementations et l'apport de compétences techniques.



En outre, le Maroc est devenu un pôle de formation en matière de supervision réglementaire des réacteurs de recherche, en Afrique du Nord et au-delà.

« Il est nécessaire d'avoir une vision et un plan clairs », dit Farhana Naseer, spécialiste de la sûreté nucléaire à l'AIEA. « Le Maroc a adopté dès le départ une approche cohérente, stratégique et graduée. L'expérience du pays sera une bonne source de meilleures pratiques et un modèle pour les autres pays. »

## Le FORO

Dans d'autres régions aussi, des pays mettent en commun les meilleures pratiques en matière de supervision réglementaire des réacteurs de recherche. Par exemple, les organismes de réglementation du FORO (Forum ibéro-américain d'organismes de réglementation radiologique et nucléaire) mettent en commun leurs propres bonnes pratiques et s'appuient mutuellement en matière d'inspections réglementaires dans le cadre d'un projet conjoint.

« L'idée est d'échanger nos données d'expérience et de nous doter de critères réglementaires communs pour tous les réacteurs », dit Gerardo Lázaro, coordonnateur du projet et expert chargé de l'inspection des réacteurs de recherche à l'Institut péruvien de l'énergie nucléaire. « Nous faisons du très bon travail depuis 30 ans, en nous servant des normes de l'AIEA comme point de référence », affirme-t-il. « L'expérience accumulée dans tous les réacteurs de recherche de la région est considérable. Il est important de partager ces données d'expérience et les connaissances que nous avons acquises pour continuer à nous améliorer. »

L'objectif du projet est de produire, avec l'appui de l'AIEA, un manuel d'inspection standardisé en espagnol à l'intention des exploitants de réacteurs nucléaires de recherche. La finalisation du manuel est prévue pour 2020. Le manuel sera complété par des orientations de référence en matière de réglementation concernant la supervision de la gestion du vieillissement des réacteurs de recherche. La question du vieillissement suscite un intérêt croissant car tous les réacteurs de recherche des pays du FORO ont accumulé plusieurs années d'exploitation.

Il existe à l'heure actuelle 16 réacteurs de recherche en exploitation dans neuf pays d'Amérique latine et des Caraïbes ; 15 d'entre eux se trouvent dans des pays du FORO. Ces réacteurs fournissent des services essentiels, qui vont de la recherche et de l'enseignement universitaires à des applications dans les domaines de l'agriculture et de l'environnement, sans oublier la production de radio-isotopes à des fins médicales ou industrielles.



**Une équipe effectue l'inspection réglementaire d'un réacteur de recherche.**

(Photo : AMSSNuR)

# La direction et la gestion pour la sûreté

## Entretien avec le directeur des opérations du Groupe de recherches et de consultations nucléaires (NRG), aux Pays-Bas

Par Laura Gil

*La sûreté est primordiale dans toute installation nucléaire, y compris les réacteurs de recherche. Il est indispensable de faire comprendre au personnel l'importance de la sûreté et des mesures nécessaires au maintien d'une culture de sûreté. Une culture de sûreté fragile peut engendrer des mesures de sûreté insuffisantes, ce qui peut in fine nuire au bien-être de la population et à l'environnement. Mais comment assurer la sûreté ? Quels sont les principaux problèmes de sûreté rencontrés dans les réacteurs de recherche, et pourquoi la direction et la gestion sont-elles essentielles pour y répondre ? Pour le savoir, nous avons interrogé Jelmer Offerlein, directeur des opérations et l'un des cinq dirigeants du NRG. Il possède des dizaines d'années d'expérience dans la gestion et la direction pour la sûreté.*

*Le NRG est une entreprise de recherche qui emploie 650 personnes et exploite le réacteur à haut flux de la Commission européenne, réacteur de recherche polyvalent situé aux Pays-Bas. Le NRG produit des isotopes, mène des travaux de recherche technologique nucléaire, donne des conseils aux entreprises du secteur nucléaire en matière de sûreté et de fiabilité des installations nucléaires, et offre des services dans le domaine de la protection radiologique.*

**Q : Pouvez-vous nous dire quelques mots sur la stratégie du NRG et son approche en matière de sûreté ?**

**R :** La stratégie du NRG est assez simple : nous souhaitons devenir le premier producteur mondial d'isotopes médicaux. C'est en 2008 que nous avons décidé d'entreprendre cette activité et, 11 ans plus tard, nous sommes l'un des plus grands producteurs de molybdène 99, mais pas encore le premier. Cela prend du temps.

Le secteur des isotopes médicaux se développe. Les quantités produites augmentent chaque année, ce qui est bien sûr positif, mais il faut pouvoir adapter son organisation. Il faut plus d'opérateurs, de matériel, de conteneurs, d'outils, de formations et de personnel qualifié, sans pour autant compromettre la sûreté et la fiabilité.

Pour assurer la sûreté, il faut une stratégie claire. Nous avons remarqué que, par le passé, nous faisons beaucoup de choses en même temps. Si l'on fait cinq ou six choses à la fois, la qualité s'en ressent et, par conséquent, le niveau de sûreté peut diminuer aussi. Il est plus judicieux d'en faire moins, mais mieux. Pour y arriver, il est nécessaire de mettre en place une stratégie claire et ciblée.

**Q : Quel rôle jouent les dirigeants et les responsables de la gestion dans la sûreté des réacteurs de recherche ?**

**R :** Je pense qu'il est très important de prendre en considération les attentes des personnes. Nous avons eu par le passé des responsables qui ne parlaient jamais de la sûreté. Or, si le sujet n'est jamais abordé, les employés ne savent pas ce qu'on attend d'eux. Un dirigeant doit écouter son personnel, connaître ses préoccupations et le motiver.

Un dirigeant doit aussi montrer l'exemple, en particulier en matière de sûreté. Je vais vous raconter une anecdote pour illustrer mon propos. Elle concerne la manière dont nous nous garons sur le site de notre installation de réacteur de recherche. Pour des raisons de sûreté, les voitures doivent être garées en marche arrière sur un emplacement. Un matin, alors que je venais de commencer à travailler comme responsable en gestion, j'ai garé ma voiture en marche avant. Un collègue m'a dit : « Jelmer, tu t'es garé dans le mauvais sens ! » J'ai alors pris conscience que si je garais ma voiture dans le mauvais sens, tout le monde aurait le droit de le faire. Ça m'a vraiment ouvert les yeux et je me suis rendu compte à quel point il était important de montrer l'exemple. Lorsque la sûreté est en jeu, on ne peut pas se permettre de « se garer » dans le mauvais sens. Depuis, je n'ai plus jamais répété cette erreur.

**Q : En ce qui concerne la culture de sûreté, la direction et la gestion sont deux concepts distincts. En quoi consiste cette distinction et pourquoi est-elle importante pour la sûreté ?**

**R :** Celui qui assure la gestion supervise un groupe de personnes, à qui il dit quoi faire. Le dirigeant, quant à lui, fait partie du groupe et le guide. Je dirais que le responsable de la gestion élabore les plans annuels, assure leur suivi et veille à ce qu'ils soient mis en œuvre. Le dirigeant, lui, donne au groupe son inspiration, lui explique pourquoi ces plans sont nécessaires et travaille avec lui à leur exécution. Enfin, un bon responsable de la gestion est aussi un bon dirigeant, et inversement.

**Q : En quoi l'AIEA a-t-elle contribué à la sûreté de votre réacteur de recherche ?**

**R :** Le NRG collabore étroitement avec l'AIEA depuis longtemps. L'AIEA nous a aidés à créer une plateforme de partage d'expériences et de connaissances et à élaborer des guides de sûreté en consultation étroite avec des entreprises du secteur nucléaire. Elle a également mené au NRG des missions d'évaluation intégrée de la sûreté des réacteurs de recherche (INSARR) en mettant principalement l'accent sur les aspects techniques de la sûreté. Comme nous souhaitions faire le point sur notre culture de sûreté et recevoir un avis sur les domaines à améliorer, nous avons demandé à l'AIEA d'effectuer une mission d'évaluation indépendante de la culture de sûreté (ISCA).

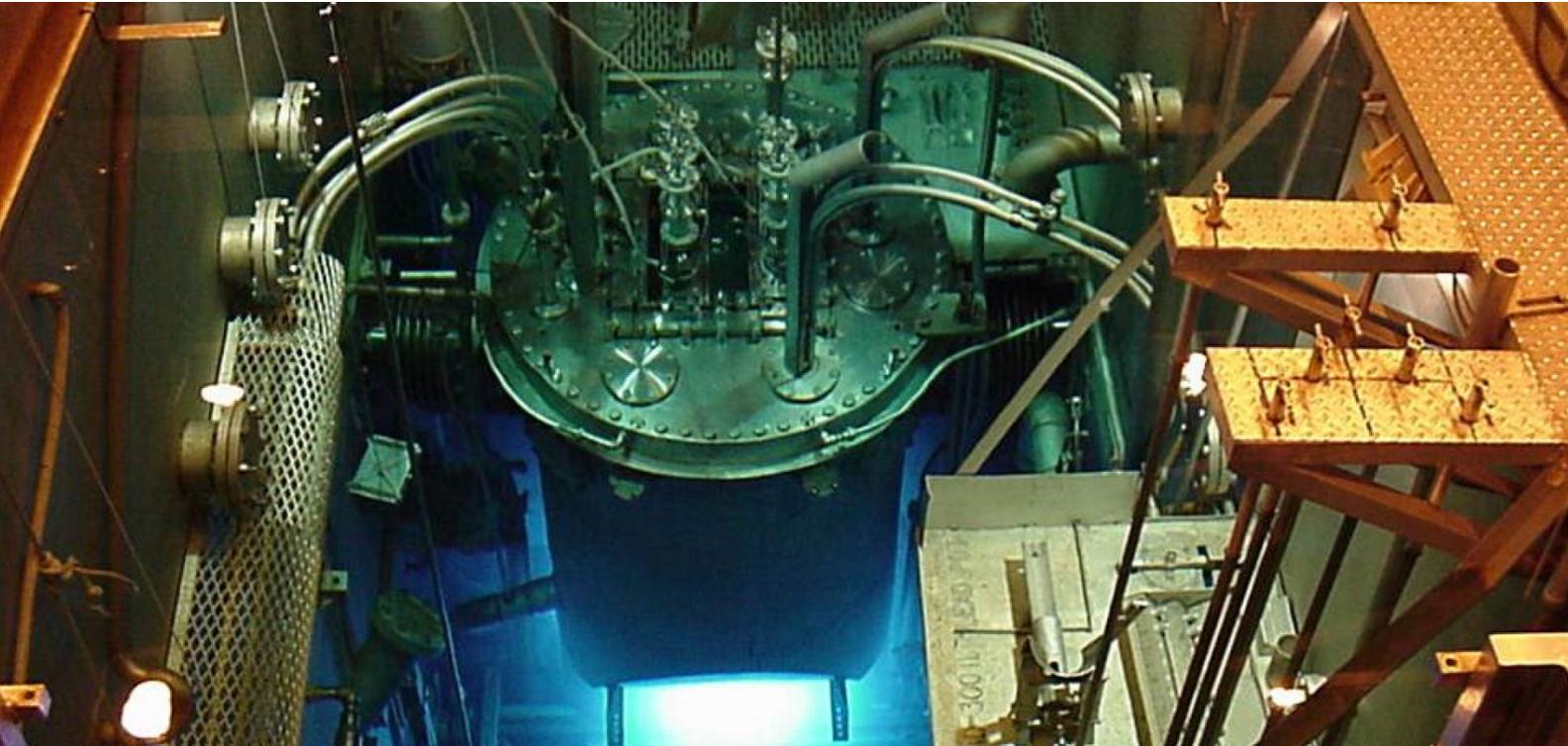
En 2017, une équipe ISCA dirigée par un expert est venue évaluer notre culture de sûreté. Elle a examiné des documents, interrogé des employés, étudié notre système intégré de gestion ainsi que notre programme de formation et de qualification, et organisé des groupes de discussion pour observer la dynamique et les interactions entre les employés. Le rapport de l'ISCA montrait que nous étions incontestablement sur la bonne voie, mais qu'il fallait apporter des améliorations dans certains domaines.

Par exemple, nous travaillons dans un environnement assez cloisonné. Nos installations sont séparées par de grandes clôtures de sécurité, ce qui ne favorise pas le contact entre les employés. En ce qui concerne la sécurité, ces clôtures sont parfaites, mais pour ce qui est de l'interaction et de la communication avec les collègues, ce n'est pas l'idéal. En outre, nous nous sommes efforcés de mieux définir nos rôles et nos responsabilités et de mieux intégrer ces rôles dans notre système de gestion.

Nous avons travaillé sur ces domaines à améliorer. L'équipe est revenue 18 mois plus tard pour voir si nous avons suivi ses recommandations et a constaté que nous avons amélioré notre culture de sûreté. Bien sûr, le travail ne s'arrête pas là. Le monde évolue rapidement et nous devons sans cesse nous adapter et nous améliorer.

# La contribution des réacteurs de recherche à l'imagerie médicale

Par Aleksandra Peeva et Nicole Jawerth



**Le réacteur de recherche SAFARI-1 en fonctionnement.**

(Photo : Necsa)

Plus de 80 % des images médicales utilisées chaque année aux fins du diagnostic de maladies telles que le cancer sont obtenues à l'aide de produits pharmaceutiques issus, pour la plupart, de réacteurs de recherche. Ces radiopharmaceutiques contiennent du technétium  $^{99m}\text{Tc}$ , radio-isotope dérivé du molybdène 99 ( $^{99}\text{Mo}$ ), produit essentiellement dans des réacteurs de recherche.

« Il est possible de produire le molybdène 99 et même le technétium  $^{99m}$  par d'autres moyens, mais les réacteurs de recherche offrent un rapport coût-efficacité particulièrement intéressant et conviennent bien à cette opération, surtout dans le cadre d'une production commerciale à grande échelle », affirme Joao Osso, chef de la Section des radio-isotopes et de la technologie des rayonnements de l'AIEA. « En effet, les réacteurs de recherche peuvent produire de grandes quantités de molybdène 99 ayant les caractéristiques souhaitées, ce qui permet d'isoler ensuite facilement le technétium  $^{99m}$  à l'hôpital, au moyen d'un générateur. Ainsi, l'approvisionnement en radiopharmaceutiques se fait à flux constant et de manière fiable, bénéficiant à davantage de patients. »

## Du réacteur au patient

Les réacteurs de recherche sont des réacteurs qui, au lieu de produire de l'électricité, servent avant tout à produire

des neutrons destinés à d'autres applications. Ces neutrons peuvent être utilisés à diverses fins, comme la production de molybdène 99 par irradiation de cibles d'uranium 235.

Comme tout radio-isotope, le molybdène 99 est un atome instable, sujet à la décroissance radioactive. Il faut 66 heures pour que la moitié d'une quantité de molybdène 99 produite, quelle qu'elle soit, se désintègre. Ce laps de temps est appelé « période ». Le produit de la décroissance radioactive du molybdène 99 (appelé « produit de filiation » ou « descendant ») est le technétium  $^{99m}$ .

Pour obtenir le technétium  $^{99m}$ , on transfère les cibles d'uranium 235 irradiées dans une unité de traitement, habituellement située à proximité d'un réacteur de recherche. On y sépare le molybdène 99 des autres produits de fission et le purifie. Le molybdène 99 purifié est ensuite emmené dans une installation de production disposant de générateurs de  $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ , qui sont des dispositifs servant à contenir et à transporter le molybdène 99 et à en extraire chimiquement le technétium  $^{99m}$  à l'hôpital même ou dans une autre installation médicale.

Dans un générateur classique, de l'oxyde d'aluminium contenant du molybdène 99 est lavé au moyen d'une solution saline. Le molybdène 99 reste lié à l'oxyde tandis que la solution retire

le technétium 99m. On obtient ainsi une solution de technétium 99m qui sert à produire différents radiopharmaceutiques pouvant être injectés dans le corps d'un patient. Une fois dans l'organisme, les faibles quantités de rayonnement résultant de la désintégration du technétium 99m sont détectées par une caméra spéciale placée à l'extérieur de l'organisme du patient de façon à obtenir des images médicales aux fins du diagnostic de maladies.

### Périodes courtes et production à flux constant

Le technétium 99m ayant une période de six heures, il doit être utilisé rapidement après son extraction sinon il perd son efficacité. Étant donné la courte durée de vie du molybdène 99 et celle encore plus courte du technétium 99m, il est nécessaire de produire ces radio-isotopes en continu pour répondre à la demande mondiale.

L'un des principaux producteurs mondiaux de molybdène 99 et d'autres radio-isotopes est l'installation sud-africaine de recherche atomique fondamentale (SAFARI-1), qui fait partie de l'entreprise publique South African Nuclear Energy Corporation (Necsa). Elle abrite le principal réacteur de recherche produisant des isotopes médicaux sur le continent africain. Grâce à une collaboration avec NTP Radioisotopes (entreprise productrice de radio-isotopes, filiale de Necsa), le réacteur SAFARI-1 est devenu l'un des cinq plus grands fournisseurs mondiaux de molybdène 99 et contribue à l'approvisionnement en radio-isotopes de plus de 50 pays dans le monde entier. Sa production répond à environ 20 % de la demande mondiale de molybdène 99, et le technétium 99m produit par des générateurs à partir de molybdène 99 issu de SAFARI-1 est utilisé dans plus de 40 hôpitaux et autres installations médicales dans toute l'Afrique.

« Pour donner à ce réacteur une envergure mondiale dans le domaine des produits radiochimiques et des radiopharmaceutiques, il a fallu mettre en œuvre des systèmes de gestion, des programmes de maintenance, une formation du personnel et des plans stratégiques de manière structurée et contrôlée », affirme Koos de Bruyn, cadre supérieur à SAFARI-1. Les efforts ainsi déployés ont également servi l'utilisation secondaire du réacteur à des fins de recherche et d'enseignement, ainsi qu'à des fins industrielles.

Grâce à l'appui de l'AIEA, SAFARI-1 a été constamment développé et amélioré depuis le début de son exploitation en 1965, notamment avec le remplacement du combustible à l'uranium hautement enrichi par du combustible à l'uranium faiblement enrichi en 2009 (pour plus d'informations à ce sujet, voir page 26) et le passage de cibles à l'uranium hautement enrichi à des cibles à l'uranium faiblement enrichi, achevé en 2017. Ces activités ont permis d'assurer une meilleure utilisation du réacteur et une transition réussie vers un usage plus commercial.

« Dans les années 1990, nous avons changé notre méthode d'exploitation et mis davantage l'accent sur la maintenance et



**Une plaque cible de molybdène 99 et le support utilisé pour irradier les plaques dans un réacteur de recherche.**

(Photo : Necsa)

la gestion, notamment en constituant une équipe spéciale de personnes hautement qualifiées dans divers domaines. Cela nous a permis de passer d'une faible utilisation du réacteur à une utilisation extrêmement soutenue de notre installation, dont la viabilité se trouve ainsi renforcée », précise Koos de Bruyn. Sur neuf ans, de 1995 à 2004, le réacteur a été plus utilisé qu'au cours des trois décennies précédentes. Sept années ont ensuite suffi pour parvenir à un résultat identique. En 2019, l'utilisation de SAFARI-1 a quasiment quadruplé par rapport à 1995.

Au cours des 15 dernières années, SAFARI-1 a été exploité 24 heures sur 24 presque en continu environ 300 jours par an. Il est prévu qu'il continue d'assurer un approvisionnement en molybdène 99 jusqu'en 2030 au moins. Toutefois, compte tenu de son vieillissement, son remplacement par un nouveau réacteur de recherche polyvalent de 15 à 30 MWth est envisagé. Des premières études de faisabilité à son achèvement, ce processus pourrait durer jusqu'à dix ans.

« Si un nouveau réacteur de recherche polyvalent est construit, il sera conçu de façon à pouvoir fonctionner de manière souple pendant 60 ans au moins. Ainsi, nous pourrions nous adapter à d'éventuels changements, comme les fluctuations du marché des isotopes ou l'évolution des besoins de la recherche, tout en procurant à l'Afrique du Sud et à la région une installation essentielle pour tester des matériaux et mettre au point des combustibles nucléaires », affirme Koos de Bruyn.

# Les réacteurs de recherche au service du développement des compétences et des connaissances

Par Nicole Jawerth



Des étudiants mènent à distance des expériences de laboratoire en temps réel grâce à la connexion établie avec une salle de cours du réacteur de recherche RA-6, en Argentine.

(Photo : P. Cantero/CNEA)

Les réacteurs de recherche constituent une ressource importante pour la formation de professionnels du nucléaire dans le monde. Cependant, seulement un quart environ des pays possèdent leurs propres réacteurs de recherche.

« Qu'un pays n'ait pas de réacteur de recherche ne devrait pas limiter les options en matière de formation théorique et pratique des professionnels du nucléaire. En effet, il existe aujourd'hui un éventail de possibilités », affirme Christophe Xerri, directeur de la Division du cycle du combustible nucléaire et de la technologie des déchets, à l'AIEA.

Pour veiller à ce que les étudiants et les professionnels du nucléaire aient accès à la formation théorique et pratique dont ils ont besoin, que leur pays dispose ou non d'un réacteur de recherche, l'AIEA apporte son appui à des cours internationaux, sur le terrain ou à distance, et facilite la collaboration entre pays pour accroître l'accès aux réacteurs de recherche.

Un réacteur de recherche sert avant tout à produire des neutrons, et non de l'électricité. Bien que les utilisations principales de ces réacteurs soient la recherche et des applications nucléaires, ils jouent aussi un rôle majeur dans la formation théorique et pratique des professionnels, débutants ou confirmés, qui travaillent dans des installations nucléaires ou dans les domaines de la radioprotection et de la réglementation nucléaire.

« Les réacteurs de recherche permettent de mieux comprendre, de manière pratique, les principes fondamentaux qui sous-tendent le fonctionnement d'un réacteur. De par leur conception, ils permettent de simuler en toute sécurité différents types de conditions pouvant régner dans le réacteur, ce qui n'est pas possible avec un réacteur nucléaire de puissance », déclare David Sears, spécialiste principal de la sûreté à l'AIEA.

## Créer des connexions en ligne

Pour les étudiants en physique et en génie nucléaire, la réalisation d'expériences sur un réacteur de recherche est un moyen d'apprentissage essentiel. Toutefois, il n'est pas toujours possible d'être présent sur le site d'un réacteur de recherche, surtout si le pays où l'étudiant réside n'en possède pas. Des solutions, comme le projet de réacteur-laboratoire par Internet de l'AIEA, permettent de remédier à cette lacune. Mis en place en 2015, le réacteur-laboratoire par Internet s'intègre de façon économique et pratique à la formation des étudiants et des professionnels en connectant, grâce à Internet, des salles de cours partout dans le monde à d'autres salles associées à des réacteurs de recherche en service. Les participants peuvent ainsi participer en direct à des expériences de physique des réacteurs et en apprendre davantage sur le fonctionnement des réacteurs.

« Lorsque j'ai eu accès au réacteur-laboratoire par Internet en 2018, j'en savais déjà beaucoup sur les réacteurs, mais je n'en

avais jamais vu jusque-là », confie José David Cremé Angel Bello, aujourd'hui enseignant-chercheur au département de physique atomique et moléculaire de l'Institut supérieur de technologies et sciences appliquées, à Cuba. « Dans ma formation d'ingénieur nucléaire, le projet de réacteur-laboratoire par Internet a constitué une expérience fantastique, car nous n'avons pas de réacteur nucléaire à Cuba : j'ai donc pu voir et mettre en pratique ce que nous avons étudié de façon théorique, interagir en temps réel avec un réacteur nucléaire et mener des expériences. Cela m'a aidé à me préparer à la vie professionnelle. »

José David Cremé Angel Bello était étudiant en génie nucléaire lorsqu'il a pu participer à un projet de réacteur-laboratoire par Internet mis en place grâce à un accord entre l'AIEA et la Commission nationale de l'énergie atomique (CNEA) de l'Argentine. Cet accord, signé en 2013, a servi de base au projet de réacteur-laboratoire par Internet en Amérique latine, l'un des premiers projets de ce type, outre un projet de réacteur-laboratoire par Internet avec la France. Si le projet de réacteur-laboratoire par Internet mené avec la France a pris fin à la mise à l'arrêt définitif du réacteur hôte, d'autres projets de ce type ont ensuite été étendus à l'Afrique, à l'Asie et au Pacifique ainsi qu'à l'Europe, avec des réacteurs hôtes en République de Corée, en République tchèque et au Maroc. On envisage maintenant de nouveaux hôtes dans d'autres régions d'Asie du Sud-Est et d'Europe.

## Se former sur le terrain

Tandis que le réacteur-laboratoire par Internet permet une utilisation pédagogique à distance des réacteurs de recherche, les cours en présentiel organisés par l'AIEA sont toujours un moyen essentiel de renforcer les compétences, les connaissances et les réseaux. Depuis des décennies, l'AIEA appuie et coordonne la formation de centaines d'étudiants, de jeunes professionnels et de spécialistes confirmés. Ces cours couvrent des sujets tels que l'exploitation et la maintenance, les inspections réglementaires de sûreté, la sécurité nucléaire et la protection physique, ainsi que des utilisations spécifiques à certaines applications, comme la production de radio-isotopes destinés à la médecine et les essais de matériaux pour l'industrie.

« Pouvoir visiter un réacteur de recherche, y effectuer des expériences et y être aux commandes est une expérience précieuse », affirme Luka Snoj, physicien spécialiste des réacteurs à l'Institut Jozef Stefan, en Slovénie, et intervenant dans le cadre de l'Initiative en faveur des réacteurs de recherche d'Europe orientale (EERRI), cours de formation collective avec bourse de l'AIEA. Cette initiative comporte un cours de six semaines à l'intention des jeunes professionnels, qui aborde tous les aspects des réacteurs de recherche.

« De nombreux participants aux cours de l'EERRI mettent à profit l'expérience acquise et les contacts noués une fois de retour dans leur pays, où ils deviennent de brillants scientifiques ou ingénieurs, et même parfois des experts du nucléaire de premier plan », poursuit Luka Snoj. « Pour nous, en tant qu'hôte, l'EERRI représente un important moyen d'accroître la visibilité internationale de notre réacteur et nous a permis de nouer des contacts sur le terrain en vue de collaborations à long terme, de visites scientifiques et de formations. » L'EERRI n'est qu'un exemple des activités soutenues par l'AIEA, qui comprennent des cours régionaux et des sessions

d'écoles régionales sur les réacteurs de recherche en Afrique, en Amérique latine ainsi qu'en Asie et dans le Pacifique.

Pour assurer des formations plus avancées et faciliter l'élargissement de l'accès aux réacteurs de recherche dans le cadre de travaux scientifiques, l'AIEA a lancé en 2014 l'initiative des Centres internationaux désignés par l'AIEA s'appuyant sur des réacteurs de recherche (ICERR). Dans le cadre de cette initiative, des centres de recherche de premier plan du monde entier se portent volontaires pour proposer activement des possibilités de coopération internationale. Pour avoir accès à un ICERR, un pays doit signer un accord bilatéral avec celui-ci afin de lui être affilié. L'AIEA facilite ce processus, par exemple en communiquant des informations sur les capacités qu'offrent les ICERR.

« L'initiative des ICERR joue un rôle important non seulement en matière de formation des opérateurs, mais aussi en matière de facilitation de l'accès aux réacteurs de recherche les mieux adaptés à certaines expériences particulières », explique Christophe Xerri. Il existe des ICERR en Belgique, en France, en République de Corée et en Russie, ainsi que deux aux États-Unis.

## En apprendre plus en ligne

Les cours de formation en ligne élaborés par l'AIEA sont une ressource utile qui complète la formation théorique et pratique relative aux réacteurs de recherche. Ces cours (en anglais) sont proposés notamment sur les sujets suivants :

- introduction à l'intention du personnel des réacteurs de recherche (également en espagnol),
- analyse par activation neutronique,
- techniques nucléaires d'analyse en criminalistique,
- radioprotection opérationnelle et gestion des déchets radioactifs,
- programmes d'inspection réglementaire,
- sûreté des réacteurs de recherche,
- planification stratégique dans le cadre des organismes nucléaires nationaux.

# La sûreté du début à la fin

## Visite de l'installation jordanienne de réacteur de recherche

Par Aabha Dixit

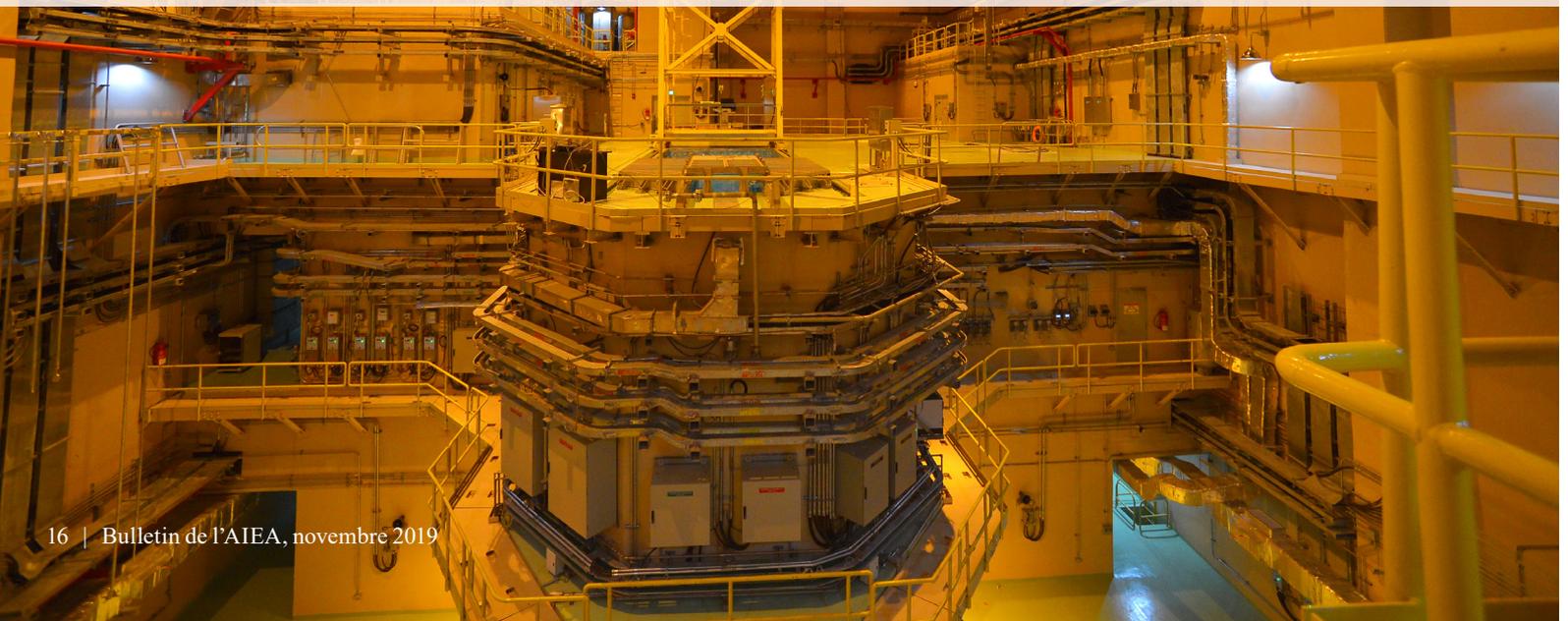


Vue de la salle du réacteur jordanien de recherche et de formation.

Une fois construit sur le campus de l'Université jordanienne des sciences et des technologies, à Irbid (Jordanie), le réacteur jordanien de recherche et de formation a reçu sa licence d'exploitation en novembre 2017.

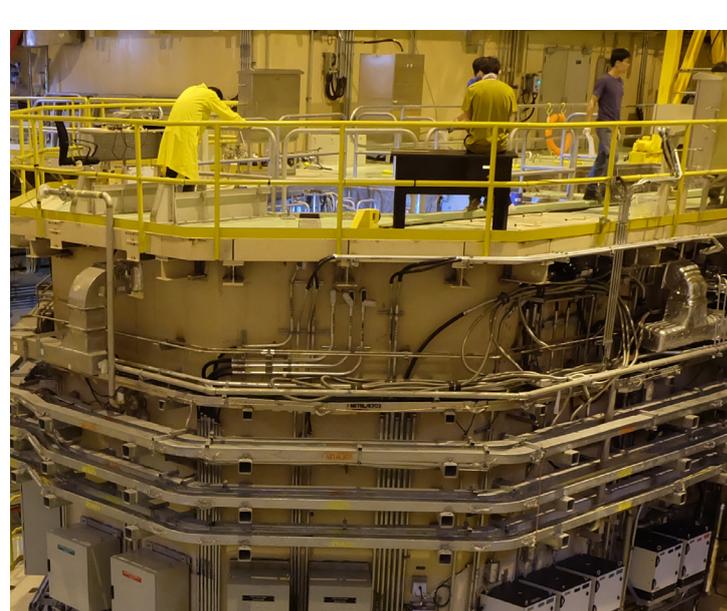
En outre, l'Office jordanien de contrôle des produits alimentaires et pharmaceutiques a délivré une autorisation de distribution de la ligne de produits à base d'iode 131 du réacteur : différents dosages de cet isotope sous forme liquide ou sous forme de capsules. L'iode 131 est un isotope radioactif souvent utilisé dans les radiopharmaceutiques destinés au diagnostic et au traitement de maladies, comme le cancer de la thyroïde. Le réacteur jordanien de recherche et de formation approvisionne 13 établissements médicaux jordaniens en radiopharmaceutiques et continue de développer sa clientèle.

Des programmes en cours visent à étendre la gamme des radiopharmaceutiques produits au réacteur jordanien de recherche et de formation, ainsi qu'à fournir d'autres services d'irradiation, comme la production de silicium ayant des spécifications adaptées à l'industrie de l'électronique.

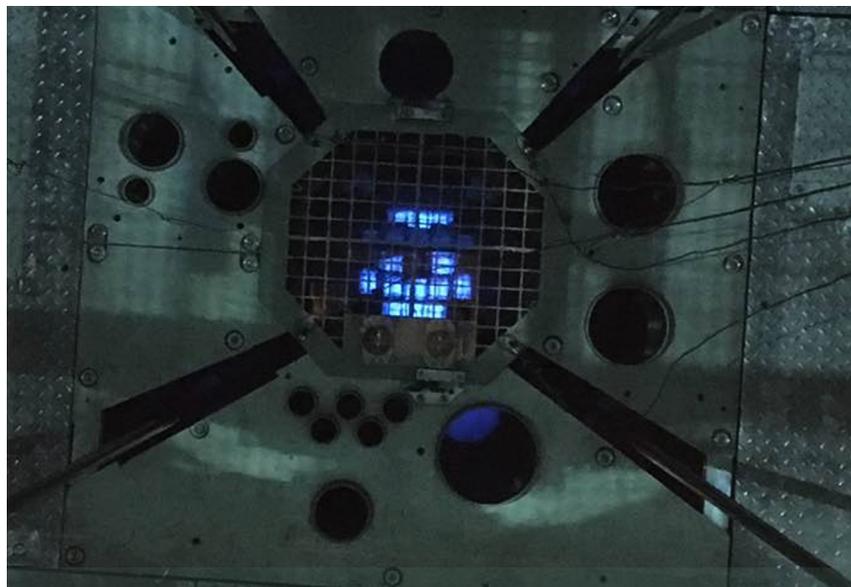


Les réacteurs de recherche sont souvent utilisés à des fins plus larges que la seule recherche ; ils servent en effet à la formation théorique et pratique, aux essais de matériaux et à la production de radio-isotopes destinés à des applications médicales ou industrielles. Comme les réacteurs nucléaires de puissance, les réacteurs de recherche doivent satisfaire aux normes de sûreté les plus strictes à toutes les étapes du projet, de la conception et la mise en service à l'exploitation et la maintenance.

Cette visite en images du projet de réacteur jordanien de recherche et de formation vous permettra d'en apprendre davantage sur l'utilisation d'un réacteur de recherche et la mise en œuvre de la sûreté nucléaire à chaque étape du processus. Le réacteur jordanien de recherche et de formation est un réacteur de 5 mégawatts (MW), conçu pour pouvoir évoluer jusqu'à 10 MW, donnant ainsi à la Jordanie la possibilité d'étendre à l'avenir les capacités de ce réacteur de recherche.

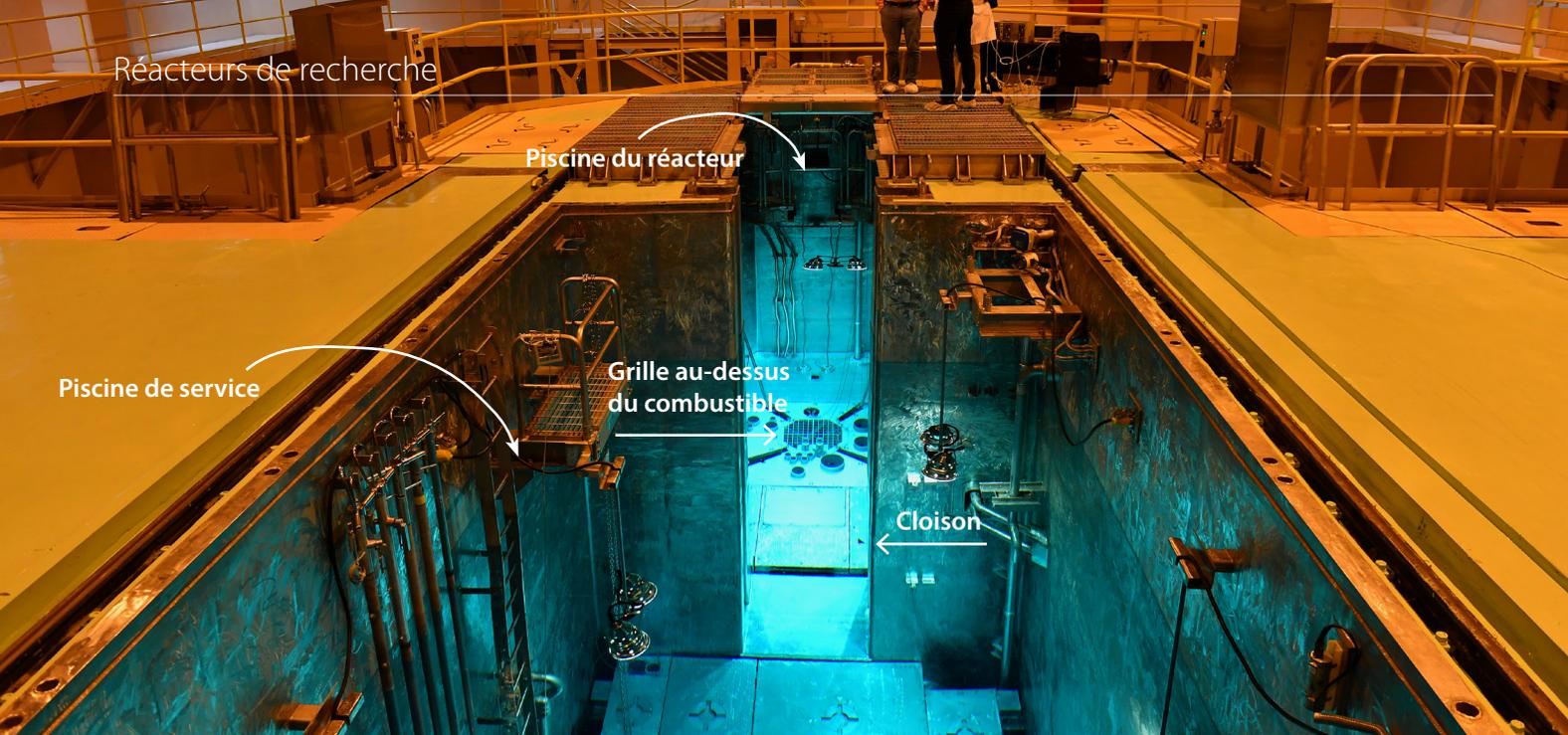


Les ouvertures de passage des faisceaux de neutrons du réacteur jordanien de recherche et de formation serviront à mener des expériences, et les emplacements d'irradiation à l'intérieur de la cuve permettront la production de radio-isotopes destinés à une utilisation médicale ou industrielle, ainsi que d'autres activités de recherche.



L'intense lumière bleue émise dans la piscine du réacteur est un effet de l'interaction avec l'eau des électrons libérés par le combustible nucléaire. Le phénomène à l'origine de cette lumière d'un bleu éclatant est connu sous le nom d'« effet Tcherenkov ». À mesure que le réacteur monte en puissance, cette lumière s'intensifie.

Les orifices circulaires autour de la grille correspondent aux emplacements d'irradiation, situés à l'intérieur du réflecteur à eau lourde, qui servent à la production de radio-isotopes, au dopage par transmutation neutronique et à d'autres types d'irradiation.



La piscine du réacteur et la piscine de service adjacente contiennent environ 325 545 litres d'eau très pure (déminéralisée). À elles deux, elles font 3,7 mètres de large et 10 mètres de profondeur. La photo montre la piscine bleutée du réacteur, derrière la piscine de service. On y voit la grille qui surmonte les assemblages combustibles (ensemble organisé de plaques de combustible alimentant le réacteur). Elle sert à entreposer les assemblages combustibles suivant une disposition particulière à des fins de sûreté nucléaire. On distingue également la cloison qui sépare la piscine du réacteur de la piscine de service.

L'eau sert d'écran de protection contre les risques liés aux rayonnements. Dans ce type de réacteurs, on utilise une eau très pure afin de préserver l'intégrité physique des assemblages combustibles et d'empêcher les rejets de matières radioactives. La cloison entre les deux piscines contribue à faciliter les travaux d'exploitation et de maintenance, et permet de manipuler plus facilement les composants nucléaires. En outre, elle permet de séparer les deux piscines en cas de fuite d'eau accidentelle.

Le réacteur jordanien de recherche et de formation, à la pointe du progrès, abrite trois installations d'irradiation mises au service de l'analyse par activation neutronique, de l'analyse criminalistique et de la recherche archéologique.

Les bancs de cellules chaudes sont un élément important du réacteur jordanien de recherche et de formation. Ils permettent de manipuler des substances hautement radioactives, comme celles utilisées lors de la production de radio-isotopes à des fins médicales et industrielles. Les cellules chaudes sont des chambres spécialement conçues pour assurer la protection des employés qui utilisent les bras de manipulation pour manier des matières radioactives.





Aux fins de la formation des opérateurs et des ingénieurs en technologie nucléaire du réacteur jordanien de recherche et de formation, le centre de formation de ce dernier est équipé d'un simulateur pleinement fonctionnel. Le simulateur aide les apprenants à comprendre et à mettre en pratique tout ce qu'il faut savoir sur le fonctionnement d'un réacteur de recherche, notamment les scénarios d'incidents liés à la sûreté possibles, afin de bien les préparer à exploiter le réacteur.



Des employés surveillent les systèmes du réacteur dans la salle de commande principale lors de la phase initiale d'essais d'exploitation.

« La formation dispensée par l'AIEA à l'intention de nos ingénieurs, de nos scientifiques et de notre personnel chargé de projets a été spécialement adaptée à nos besoins. Elle nous a aidés à bien préparer notre personnel et à lui procurer les connaissances et les compétences qui ont permis à la Jordanie d'exploiter cette installation polyvalente de pointe, dotée de caractéristiques de sûreté avancées », affirme Samer D. Kahook, directeur du réacteur jordanien de recherche et de formation et commissaire à la recherche nucléaire au sein de la Commission jordanienne de l'énergie atomique.

À la demande des autorités jordaniennes, le réacteur jordanien de recherche et de formation a accueilli des missions d'examen par des pairs de l'AIEA, notamment une mission d'Évaluation intégrée de la sûreté des réacteurs de recherche (INSARR) en décembre 2016 et une mission de suivi INSARR en mars 2018.

Grâce à de telles missions d'experts, l'AIEA a contribué à l'évaluation du programme d'utilisation du réacteur jordanien de recherche et de formation, en ce qui concerne ses installations de production de radio-isotopes et d'analyse par activation neutronique. L'AIEA a également aidé à la conduite, au réacteur jordanien de recherche et de formation, de missions d'examen par des pairs et de missions d'experts en lien avec la mise en place de systèmes intégrés de gestion.

Ces missions permettent d'obtenir un retour d'expérience essentiel, qui aide à affiner et à renforcer la gestion, l'exploitation et la maintenance efficaces, fiables et sûres des réacteurs de recherche comme celui-ci.

L'installation comporte en outre une unité de traitement des déchets radioactifs, dont la licence d'exploitation a été délivrée en mars 2019. Cette unité gèrera les déchets radioactifs provenant du réacteur, mais aussi de l'industrie et des hôpitaux. Après leur traitement, les déchets radioactifs seront entreposés, puis finalement envoyés dans un site de stockage définitif.



# Exploiter pleinement les réacteurs de recherche de manière stratégique

Par Aleksandra Peeva

Les réacteurs de recherche peuvent avoir des incidences sur la science, l'éducation, l'industrie et la médecine, mais une planification stratégique est nécessaire à l'exploitation pleine et entière de leurs possibilités. Certains des 224 réacteurs de recherche actuellement en service dans 53 pays fonctionnent à leur capacité maximale, mais d'autres sont sous-exploités.

« De nombreux réacteurs de recherche ont été construits pour répondre à un besoin immédiat à l'époque. Aujourd'hui, des années plus tard, leur mission doit être redéfinie », explique Nuno Pessoa Barradas, spécialiste des réacteurs de recherche à l'AIEA.

De nombreux réacteurs de recherche en service ont été construits dans les années 1950 et 1960, alors qu'ils étaient nouveaux et que beaucoup de pays voulaient explorer et découvrir leur potentiel. Maintenant que celui-ci est mieux compris et que de nouvelles applications sont en cours de mise au point, il est largement reconnu que certains réacteurs de recherche pourraient être mieux utilisés pour être pleinement exploités.

De nombreux pays collaborent aujourd'hui activement en vue de maximiser l'utilisation des réacteurs de recherche existants, et certains ont construit, ou prévoient de construire, de nouveaux réacteurs de recherche en vue d'en exploiter pleinement le potentiel. L'objectif étant de tirer parti de ces outils efficaces à des fins multiples, notamment pour élaborer des programmes électronucléaires, mener des travaux de recherche-développement, fournir des services d'analyse et d'irradiation

et produire des radio-isotopes destinés à la médecine et à l'industrie.

Au cours des cinq dernières années, l'AIEA a aidé des experts et des responsables de plus de 40 pays à définir les priorités et à améliorer les plans d'activité de plus de 50 réacteurs de recherche. Ces plans prévoient habituellement l'évaluation des besoins nationaux et régionaux en matière de services et de produits potentiels des réacteurs de recherche, l'établissement d'un ordre de priorité de ces besoins et leur mise en correspondance avec les capacités du réacteur, ainsi que la définition des objectifs pour une exploitation à long terme durable de ce dernier.

## Améliorer l'utilisation durable

Début 2019, l'AIEA a entrepris en Italie une mission d'experts au cours de laquelle une équipe internationale d'experts a examiné le Triga Mark II de 250 kW de puissance, réacteur de recherche de l'Université de Pavie. La mission visait principalement à permettre une utilisation plus durable du réacteur de recherche.

L'équipe a évalué le plan stratégique et le plan d'action correspondant du réacteur de l'université ainsi que son niveau d'utilisation. Cette évaluation reposait sur des indicateurs clés de performance, les possibilités offertes par le réacteur et les contraintes pouvant limiter la création de ses services et

**Cœur du réacteur de recherche  
Triga Mark II, à l'Université de Pavie.**

(Photo : N. Pessoa Barradas/AIEA)

produits, ainsi que les points à améliorer pour permettre une utilisation efficace, efficiente et durable de l'installation.

Les experts ont conclu que le réacteur de recherche était bien utilisé et jouait un rôle important dans le développement socio-économique du pays, ainsi que dans les domaines de la médecine, de l'archéologie et de la science des matériaux, entre autres. Ils ont également formulé des recommandations et des suggestions visant à améliorer encore l'utilisation de l'installation (notamment un avis sur le plan stratégique de celle-ci) et l'élaboration d'activités d'information active et de communication, ainsi qu'à développer les activités de formation.

« L'utilisation et la planification stratégique sont deux aspects particulièrement importants pour nous et pour les parties prenantes », déclare Andrea Salvini, responsable du réacteur de recherche de l'Université de Pavie. « La mission de l'AIEA nous a permis de nous concentrer sur la consolidation de notre communauté d'utilisateurs et l'amélioration de nos moyens scientifiques dans de nouveaux domaines. »

L'expérience acquise dans le cadre de la mission menée à Pavie devrait aider l'AIEA à renforcer encore son intervention dans les pays qui sollicitent son aide pour améliorer l'utilisation d'un réacteur de recherche, notamment grâce à un nouveau service appelé « examen intégré de l'utilisation des réacteurs de recherche (IRRUR) ».

« La mission a permis d'obtenir des indications précieuses. Elle pourrait être reproduite pour aider d'autres pays à élaborer des stratégies nationales efficaces en vue d'utiliser et d'exploiter les réacteurs de recherche de manière efficace et durable, notamment des organisations qui n'auraient pas la possibilité d'effectuer une évaluation intégrée », précise Nuno Pessoa Barradas.

Les missions d'examen sont l'un des moyens employés par l'AIEA pour aider les pays à améliorer l'utilisation durable de leurs réacteurs de recherche. De plus, début 2019, l'AIEA a lancé un cours de formation en ligne qui donne des orientations relatives à la mise en place d'une planification stratégique en vue d'une utilisation efficace et durable de différentes installations exploitées par des organismes nucléaires nationaux, notamment les réacteurs de recherche. Le cours se fonde sur la publication de l'AIEA de 2017 intitulée *Strategic planning for research reactors*. Il vient compléter des cours appuyés par l'AIEA, des visites d'experts et des visites avec bourse, des ateliers sur les applications des réacteurs de recherche, ainsi que des réunions techniques et d'autres publications. Beaucoup de ces ressources sont accessibles sur le portail d'information sur les réacteurs de recherche, via la plateforme IAEA CONNECT.



# Renforcer la sûreté, la sécurité et la fiabilité

## Les missions d'examen par des pairs de l'AIEA portant sur les réacteurs de recherche

Par Elisa Mattar

Du choix du site et de la conception à la mise en service, à l'exploitation et à la protection des matières nucléaires, la création et l'entretien d'un réacteur de recherche est un processus complexe. À chaque étape, les pays peuvent solliciter auprès de l'AIEA un examen par des pairs afin d'obtenir une aide en matière de renforcement de la sûreté et de la sécurité nucléaires des réacteurs de recherche, mais aussi d'amélioration de la performance de ces derniers.

« L'objectif des missions d'examen par des pairs est de veiller à ce que l'utilisation des réacteurs reste efficace et durable, dans l'intérêt de la société », indique Amgad Shokr, chef de la Section de la sûreté des réacteurs de recherche à l'AIEA.

Les missions d'examen par des pairs de l'AIEA, effectuées sur demande, sont menées par des équipes d'experts internationaux pluridisciplinaires. Ceux-ci comparent les pratiques en vigueur avec les normes de sûreté de l'AIEA et les bonnes pratiques internationales, ainsi qu'avec les orientations de l'AIEA en matière de sécurité et d'exploitation.

Les missions mettent en évidence les points pouvant faire l'objet d'améliorations et donnent lieu à la formulation de recommandations à l'intention des installations hôtes. Les missions de suivi, lorsqu'elles sont demandées, sont menées généralement 12 à 18 mois plus tard en vue d'examiner les mesures prises dans les installations hôtes en réponse aux conclusions de la mission initiale. Dans le cadre de ces visites de suivi, l'AIEA peut également aider à donner suite à ces conclusions, sur demande et selon que de besoin. Elle aide également les pays à tenir compte des recommandations résultant de la mission et, le cas échéant, apporte son concours dans le cadre de ses projets de coopération technique.

Les services d'examen par des pairs de l'AIEA qui portent spécialement consacrés aux réacteurs de recherche sont l'Évaluation intégrée de la sûreté des réacteurs de recherche (INSARR) et l'Évaluation de l'exploitation et de la maintenance des réacteurs de recherche (OMARR), mais le Service consultatif international sur la protection physique (IPPAS), dont le champ est plus vaste, couvre aussi les réacteurs de recherche.

### INSARR : la sûreté pendant toute la durée de vie

Les missions INSARR examinent la sûreté nucléaire à toutes les phases de la durée de vie utile d'un réacteur de recherche. Elles couvrent ainsi la conception et le choix du site, la mise en service et l'exploitation des réacteurs de recherche. Les aspects passés en revue comprennent l'organisation et la gestion,

les programmes de formation, l'analyse de la sûreté, les limites et conditions d'exploitation, les procédures d'exploitation, la maintenance, la radioprotection, les modifications, les expériences menées et la planification des interventions d'urgence. L'exploitant de l'installation hôte peut demander soit une mission complète, soit un examen axé sur des points particuliers.

En 2017, une mission INSARR a été effectuée en Jamaïque, sur le site de l'unique réacteur de recherche du pays, de type JM-1. « La mission INSARR de 2017 nous a permis d'établir une feuille de route pour exploiter l'installation en toute sûreté au cours des dix prochaines années », déclare Charles Grant, directeur général du Centre international de sciences environnementales et nucléaires de la Jamaïque.

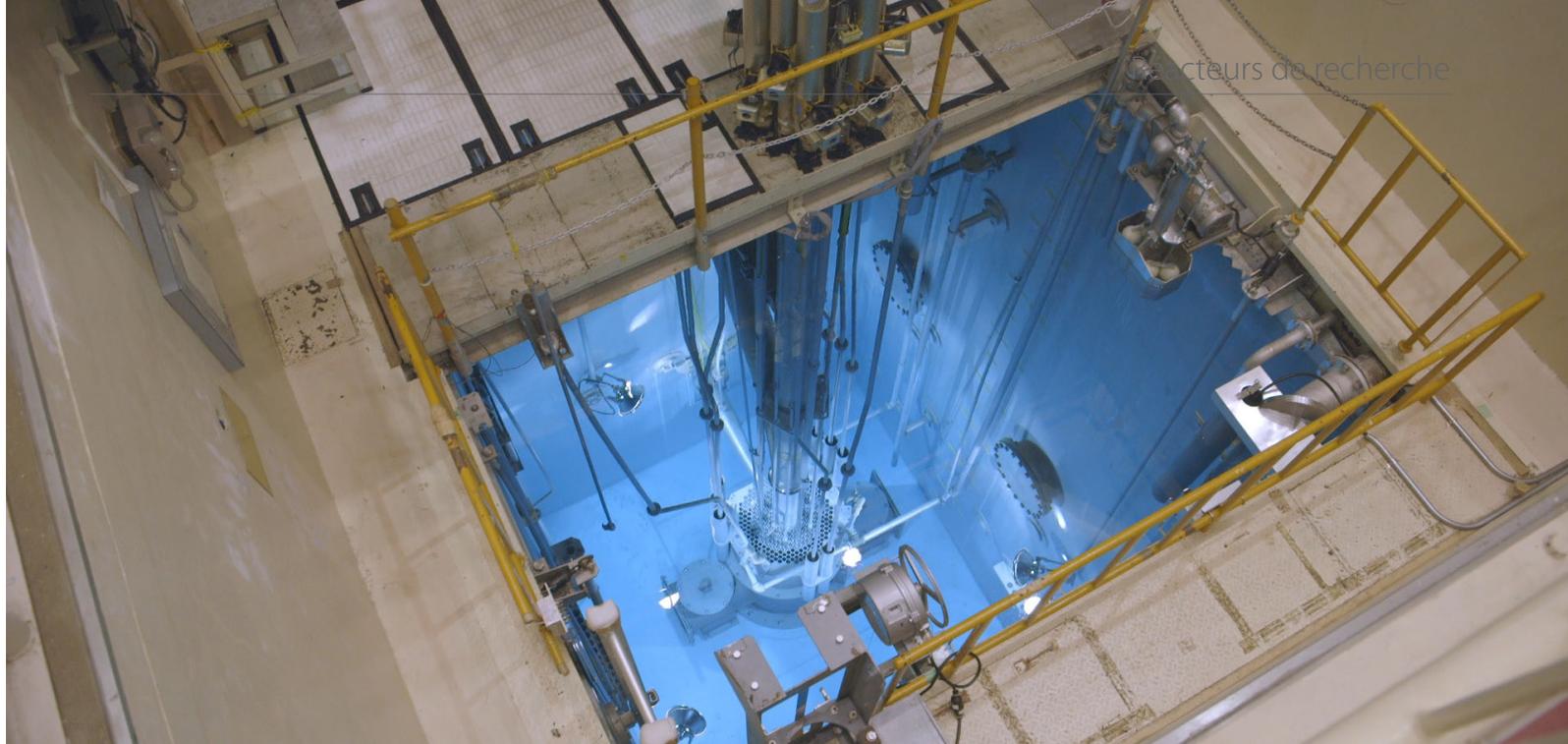
Depuis le lancement du service INSARR en 1997, plus de 90 missions INSARR ont été menées dans les réacteurs de recherche de 45 pays du monde entier.

« Une analyse des examens INSARR effectués depuis 2005 montre que plus de 75 % des questions soulevées ont été résolues ou étaient en bonne voie de l'être au moment où la visite de suivi a eu lieu », affirme Amgad Shokr. « Ces conclusions mettent en lumière des améliorations considérables en matière de sûreté dans de nombreux réacteurs de recherche du monde entier, et montrent que les hôtes trouvent ce service utile. »

### OMARR : au service d'une exploitation fiable et efficace

Les missions d'examen OMARR se concentrent sur les aspects liés à l'exploitation et à la maintenance qui doivent être pris en compte pendant toute la durée de vie utile d'un réacteur de recherche, notamment lors du lancement d'un nouveau projet de réacteur de recherche ou de la réalisation d'une étape particulière (pour en savoir plus sur l'approche par étapes, voir page 6). Ces missions déterminent des points à améliorer, répondent à des difficultés spécifiques en matière d'exploitation, et créent une plateforme de mise en commun de données d'expérience et de bonnes pratiques entre les experts internationaux et le personnel local.

« Environ 50 % des réacteurs de recherche en service dans le monde ont plus de 40 ans », fait observer Ram Sharma, ingénieur nucléaire à la Section des réacteurs de recherche de l'AIEA. « Ils se heurtent à une série de problèmes, notamment liés au vieillissement. Les missions OMARR aident à atteindre une utilisation optimale de toutes les ressources financières et



### Vue plongeante de la piscine d'un réacteur de recherche.

(Photo : JAEA)

humaines des installations de réacteurs de recherche tout au long du cycle d'exploitation. »

En se fondant sur les normes de l'AIEA et les normes internationales, ainsi que sur des rapports techniques connexes, les équipes chargées de missions OMARR formulent des recommandations et des suggestions relatives à l'exploitation et à la maintenance, à la gestion du vieillissement, aux ressources humaines, à l'assurance de la qualité, aux systèmes de gestion, à la gestion des ressources et de la configuration des installations, ainsi qu'aux modifications de ces dernières. Les résultats attendus sont notamment une exploitation à long terme plus efficace, une meilleure performance, une sûreté et une culture de sûreté renforcées, et une utilisation optimisée des ressources humaines et financières.

Lors de la mise en œuvre des recommandations de la mission OMARR ou de la planification d'une exploitation à long terme, les pays peuvent demander une mission de suivi OMARR pour traiter des questions en suspens relatives aux réacteurs de recherche.

En 2019, une mission OMARR a été effectuée en Indonésie. Elle a aidé le pays à planifier l'exploitation de son réacteur de recherche. « La mission OMARR a été très utile en ce qui concerne notre programme d'exploitation à long terme, et elle est venue à point nommé appuyer des activités en cours », affirme Anhar Riza Antariksawan, président de l'Agence nationale de l'énergie nucléaire d'Indonésie (BATAN). « Son aide nous a été particulièrement précieuse pour remettre notre réacteur en exploitation à pleine puissance avec du combustible TRIGA neuf, une fois que ce dernier sera disponible, et pour déterminer les modifications qui seraient nécessaires si nous voulions utiliser à la place des plaques de combustible produites localement. »

### IPPAS : sécuriser et protéger

Si les missions INSARR et OMARR portent principalement sur les installations, les missions d'examen IPPAS, quant à elles, sont menées à l'échelle nationale et concernent la protection physique des matières nucléaires et autres matières radioactives. L'équipe chargée de l'examen compare les mesures de sécurité nucléaire mises en œuvre au niveau national avec les publications de la collection Sécurité nucléaire de l'AIEA, la Convention sur la protection physique des matières nucléaires et d'autres instruments juridiques internationaux.

« Une mission IPPAS constitue une étape importante pour un pays s'agissant d'intervenir dans un domaine nécessitant des améliorations, dans une installation ou au niveau national », déclare Kristof Horvath, administrateur principal chargé de la sécurité nucléaire à l'AIEA. « Ces missions sont une bonne occasion de tirer des enseignements, sans qu'il soit besoin d'une inspection ou d'autres mesures intrusives. »

En collaboration avec les autorités nationales (police, douanes et organismes de réglementation), les missions IPPAS couvrent également le transport de matières nucléaires et les situations d'urgence. Elles portent aussi sur la législation et la réglementation nationale, l'octroi d'autorisations, les mesures prévues en cas de vol ou de sabotage, et la sécurité informatique.

Une mission IPPAS a été menée en Hongrie en 2013, après la mise en place par le pays d'un nouveau régime de sécurité nucléaire, et une mission de suivi a eu lieu en 2017. « La mission de 2013 a abouti à des améliorations considérables, notamment en ce qui concerne notre cadre législatif, la sécurité informatique et la sécurité pendant le transport », déclare Zsolt Stefanka, chef par intérim du Département des sources de rayonnements, des garanties et de la sécurité de l'Autorité hongroise de l'énergie atomique.

# Trouver la formule adéquate

## Comment la sécurité nucléaire acquiert sa juste place dans les réacteurs de recherche

Par Inna Pletukhina

La société tire de nombreux avantages des réacteurs de recherche. Cependant, ceux-ci ne peuvent remplir leur mission qu'à la condition que les matières nucléaires soient bien protégées et ne tombent pas entre les mains de terroristes. Aujourd'hui, l'un des moyens dont disposent les pays pour protéger leurs matières nucléaires est de collaborer avec l'AIEA pour intégrer des systèmes et des mesures de sécurité nucléaire dans la conception de leurs réacteurs de recherche.

Cependant, une telle intégration n'a pas toujours existé.

« Il y a plus de 30 ans, lorsque la plupart des réacteurs de recherche ont été construits, ils étaient conçus à des fins d'enseignement ou de recherche, ou à des fins industrielles, conformément aux normes de sûreté, mais n'intégraient pas de spécifications complètes en matière de sécurité », indique Juan Carlos Lentijo, Directeur général adjoint de l'AIEA chargé de la sûreté et de la sécurité nucléaire. « Depuis, il y a longtemps que la sécurité des matières et des installations nucléaires est

devenue une préoccupation centrale, et la plupart des réacteurs de recherche construits à l'époque ont été mis en conformité. »

Atteindre les objectifs de la sécurité nucléaire, c'est-à-dire empêcher et détecter les actes criminels ou les actes non autorisés délibérés mettant en jeu des matières nucléaires ou d'autres matières radioactives, et répondre à de tels actes, est une tâche que rendent plus difficile les caractéristiques particulières et la grande diversité des types de réacteurs de recherche et des installations connexes. Pour les réacteurs de recherche plus anciens, d'autres complications découlent de vulnérabilités inhérentes aux installations, résultant de l'évolution des menaces, de l'inadéquation des mesures et des équipements de sécurité, et de l'attractivité des matières nucléaires et autres matières radioactives en ce qui concerne l'enlèvement non autorisé et le sabotage.

Les plans d'origine d'une installation de réacteur de recherche ont parfois été dessinés de sorte que les bâtiments offrent un

Les mesures de protection physique contribuent à assurer la sécurité nucléaire des réacteurs de recherche.

(Photo: D. Calma/AIEA)



accès le plus ouvert possible, avec des mesures de protection physique minimales. Par exemple, les réacteurs de recherche conçus avec une piscine ouverte permettent un accès facile aux matières nucléaires présentes dans le cœur du réacteur. Une telle conception est intéressante dans le cadre pédagogique, mais présente un risque pour la sécurité.

Si chaque réacteur de recherche comporte ses propres exigences en matière de sécurité nucléaire, certaines difficultés sont communes à tous, comme l'accès d'un grand groupe de personnes au réacteur de recherche dans le cadre d'une formation pratique au plus près du réacteur. À la différence des centrales nucléaires, qui sont exploitées par un personnel relativement stable sur plusieurs années, les réacteurs de recherche sont souvent utilisés par des étudiants et des chercheurs qui y mènent des projets courts et s'en vont une fois leurs travaux achevés. Il est donc nécessaire de prendre des mesures de sécurité nucléaire qui permettent de poursuivre l'enseignement et la recherche sans retards dans l'accès, tout en maintenant un haut niveau de protection.

D'après Doug Shull, administrateur principal chargé de la sécurité nucléaire à l'AIEA, étant donné la diversité des matières utilisées, des niveaux de puissance, des produits de fission, des configurations, des modalités de financement et du personnel des réacteurs de recherche, il n'est pas possible de standardiser les systèmes et mesures de sécurité nucléaire.

« Pour les réacteurs de recherche, il n'existe pas d'approche universelle en matière de protection. Une évaluation et une mise en œuvre au cas par cas sont nécessaires », explique-t-il. « Compte tenu de la conception et des caractéristiques uniques de chaque réacteur, les systèmes de protection physique doivent être conçus de sorte que l'installation puisse remplir sa mission tout en assurant l'efficacité des mesures de protection en cas d'événement de sécurité nucléaire. »

Si chaque pays est responsable de la sécurité nucléaire à l'intérieur de ses frontières, beaucoup s'appuient sur les conseils de l'AIEA relatifs aux systèmes de sécurité nucléaire et aux mesures de protection disponibles, et sur son assistance concernant les mises à niveau de la protection physique, les menaces internes et les programmes appuyant la culture de sécurité nucléaire.

## Les plans intégrés d'appui en matière de sécurité

Pour de nombreux pays, l'intégration de la sécurité nucléaire dans les réacteurs de recherche s'effectue en grande partie dans le cadre des Plans intégrés d'appui en matière de sécurité nucléaire (INSSP) de l'AIEA. Ces plans sur mesure aident les pays à mettre en place leur régime de sécurité nucléaire. Sur demande du pays, ils font l'objet d'une coordination avec l'AIEA visant à aider celui-ci à passer en revue son régime de sécurité nucléaire et à recenser les points nécessitant des améliorations. Ils mettent également en relief les possibilités

d'aide à la mise au point d'un régime de sécurité nucléaire efficace et durable.

En raison de leur souplesse, les INSSP peuvent être adaptés pour répertorier les besoins particuliers du programme de réacteurs de recherche d'un État. Ils peuvent comprendre des activités de formation en sécurité nucléaire et un appui à la mise au point de procédures administratives, d'exercices ou d'améliorations de la protection physique.

« L'élaboration d'un INSSP avec l'assistance de l'AIEA nous a aidés à évaluer l'ensemble de notre régime de sécurité nucléaire et nous a permis de déterminer comment adapter la sécurité nucléaire à notre réacteur de recherche et comment tirer le meilleur parti de l'assistance de l'AIEA dans le cadre de ce processus », affirme Nasiru Bello, directeur chargé de la sûreté nucléaire, de la sécurité physique et des garanties à l'Autorité nigériane de réglementation nucléaire.

Le Nigeria possède un réacteur de recherche, en service depuis 2004, et a élaboré son INSSP en 2010. L'INSSP a aidé ce pays à prendre, avec l'appui de l'AIEA, des mesures de renforcement de la sécurité nucléaire sur le site de son réacteur de recherche, conformément aux publications de la collection Sécurité nucléaire de l'AIEA. Cette approche systématique était également axée sur la formation du personnel du réacteur de recherche et le renforcement des capacités en matière de réglementation.

L'AIEA continue de chercher des moyens de renforcer son appui : l'un des outils les plus récents qu'elle élabore à cet effet est la description de l'installation d'un institut hypothétique de recherche atomique (HARI). Il s'agit d'un document de référence décrivant de nombreux aspects, dont la sécurité, liés aux réacteurs de recherche et aux installations connexes. Il permet de faire mieux connaître à un pays les recommandations en matière de sécurité nucléaire, de renforcer les connaissances et d'acquérir une expérience pratique en matière de prise en compte des recommandations de sécurité nucléaire. La description de l'HARI viendra s'ajouter aux outils permettant aux pays de répondre à leurs priorités, que celles-ci aient été définies dans un INSSP, lors de missions d'examen par des pairs ou par d'autres moyens.

# Les pays se tournent vers l'uranium faiblement enrichi pour alimenter leurs réacteurs de recherche

Par Laura Gil



Chargement d'uranium hautement enrichi sécurisé en vue de son transport.

(Photo : GAEC)

**A**u cours des dernières décennies, plus de 3 500 kg d'uranium hautement enrichi (UHE) ont été retirés de sites de réacteurs de recherche dans le monde entier, dans le cadre d'efforts déployés au niveau mondial avec l'appui de l'AIEA. À la demande d'États Membres, l'AIEA a aidé au passage à des combustibles à l'uranium faiblement enrichi (UFE) dans les réacteurs de recherche en vue de réduire les risques de prolifération liés à l'UHE, qui contient plus de 20 % d'uranium 235 fissile.

Lorsque la plupart des réacteurs de recherche ont été construits, dans les années 1960 et 1970, compte tenu de la technologie sur laquelle ils reposaient, l'utilisation d'UHE était nécessaire pour réaliser des expériences à des fins de recherche scientifique. Aujourd'hui, cependant, la plus grande partie de ces travaux de recherche peuvent être effectués avec de l'UFE, dans lequel la concentration d'uranium 235 radioactif est inférieure à 20 %.

« La communauté internationale a trouvé des solutions technologiques pour passer du combustible à l'UHE à du combustible à l'UFE dans les réacteurs de recherche », déclare Thomas Hanlon, ingénieur nucléaire expert à l'AIEA. « La difficulté est de les mettre en œuvre sans entraver la recherche scientifique. »

Il y a actuellement environ 220 réacteurs de recherche en service dans 53 pays, dont 171 ont été construits avec un cœur à l'UHE. Soixante-et-onze réacteurs fonctionnant avec du combustible à l'UHE ont été convertis à l'UFE depuis 1978. Les réacteurs nucléaires de puissance, qui servent à produire de l'électricité, fonctionnent à l'UFE.

L'AIEA a appuyé le passage du combustible à l'UHE à du combustible à l'UFE, ainsi que la réexpédition d'UHE, dans les pays suivants : l'Autriche, la Bulgarie, le Chili, la Chine, la Géorgie, le Ghana, la Hongrie, la Jamaïque, le Kazakhstan, la Lettonie, la Lybie, le Mexique, le Nigeria, l'Ouzbékistan, la Pologne, le Portugal, la République tchèque, la Roumanie, la Serbie, l'Ukraine et le Viet Nam. L'AIEA a appuyé la réduction au minimum de l'utilisation d'UHE dans le cadre de projets de coopération technique, de missions de recherche d'informations, de projets de recherche coordonnée, de réunions techniques et de consultation, et d'une aide en matière d'approvisionnement.

## Apprendre de l'expérience des autres

Un cas récent est celui du Ghana où, avec l'appui de l'AIEA, la conversion réussie, en 2017, du réacteur de recherche GHARR-1, réacteur source de neutrons miniature (RSNM), a fait du pays un modèle à suivre pour d'autres exploitants de RSNM. La Commission ghanéenne de l'énergie atomique (GAEC) a construit un centre de formation international sur les RSNM qui permet à des stagiaires d'autres pays de s'entraîner à l'extraction d'UHE factice de la cuve du réacteur.

« Réduire l'enrichissement, c'est aussi réduire l'attrait de la matière nucléaire et rendre le monde meilleur », explique Benjamin Nyarko, directeur général de la GAEC, qui ajoute que le passage d'un uranium enrichi à 90,2 % à un uranium enrichi à 13 % était accompagné d'évolutions technologiques qui ont permis d'augmenter de plus de 10 % la puissance du réacteur.

En 2018, l'UHE a été retiré du réacteur de recherche NIRR-1, le seul en service au Nigeria, qui utilise désormais de l'UFE. L'AIEA a apporté son appui à la conversion du réacteur, mais aussi à la formation du personnel concerné et à la mise en commun de l'expérience d'autres pays. Pour préparer la conversion du réacteur, des experts nigériens ont effectué un essai à blanc de retrait d'UHE au centre de formation ghanéen. Après la conversion du réacteur du Nigeria, il ne reste plus aucun réacteur de recherche fonctionnant à l'UHE en Afrique.

La conversion nécessite un personnel très bien formé et un équipement spécifique. L'étape la plus complexe du processus est souvent le transport de l'UHE usé, par camion, bateau ou avion. Une fois le combustible à l'UHE arrivé à destination, il est soit entreposé de manière sécurisée, soit dilué à des niveaux d'enrichissement moindres.

« Au Chili en 2010, nous avons expédié environ 14 kg d'UHE vers les États-Unis. Il s'agissait de la troisième et dernière opération et, à son terme, il ne restait plus de combustible de ce type dans le pays », se souvient Rosamel Muñoz Quintana, chef de la communication institutionnelle à la Commission chilienne de l'énergie nucléaire. « Cela a suscité un grand intérêt du public. Des camions et des avions spécialement aménagés ont été employés, et tous les aspects de la sécurité et de la radioprotection requis pour ce genre d'opérations ont été pris en compte. »

## Convertir davantage de réacteurs de recherche à l'UFE

Il reste encore à faire. Si 71 réacteurs de recherche utilisent maintenant de l'UFE et 28 réacteurs de recherche fonctionnant à l'UHE ont été définitivement mis à l'arrêt, 72 réacteurs de recherche fonctionnent encore à l'UHE. Dans nombre de cas, il y a à cela des raisons scientifiques.

« Il faut beaucoup d'inventivité aux ingénieurs pour parvenir à une capacité similaire du réacteur en utilisant de l'UFE dans un espace initialement prévu pour de l'UHE », explique Thomas Hanlon. « C'est un peu comme essayer de faire un expresso aussi serré que d'habitude en utilisant la même quantité d'eau dans la même tasse, mais avec moins de grains de café. »



Des experts procèdent à un essai à blanc dans le centre de formation du RSNM ghanéen.

(Photo : GAEC)

# La recherche sous contrôle

## La mise en œuvre des garanties dans les réacteurs de recherche

Par Adem Mutluer



**Les inspecteurs des garanties de l'AIEA sont formés à la détection de toutes les matières nucléaires présentes dans une installation de réacteur de recherche.**

(Photo : D. Calma/AIEA)

Une grande partie du travail de l'AIEA en matière de vérification nucléaire consiste à s'assurer que l'utilisation faite des matières et de la technologie nucléaires dans les réacteurs de recherche a une fin pacifique. Si seulement 30 pays possèdent des centrales nucléaires et des installations du cycle du combustible, plus de 50 exploitent des réacteurs de recherche. En 2018, les garanties de l'AIEA ont été mises en œuvre dans quelque 150 installations disposant de réacteurs de recherche. Ces installations représentent un défi pour les garanties puisque leurs conceptions, à la différence de celles des réacteurs nucléaires de puissance, sont très variées, aussi les mesures de contrôle qui leur sont appliquées doivent-elles être spécialement adaptées à chaque type de réacteur.

« Une puissance faible ne réduit pas le niveau de préoccupation », affirme Djamel Tadjer, inspecteur principal chargé de la coordination au niveau de l'État à l'AIEA. « Les réacteurs de recherche procurent de nombreux avantages en matière de santé et de développement, mais ils présentent aussi le risque d'être utilisés de manière abusive et le risque que des matières nucléaires soient détournées de leur utilisation pacifique. Par conséquent, l'application des garanties dans les réacteurs de recherche est un élément essentiel du travail de vérification de l'AIEA. »

Un des sous-produits de l'exploitation des réacteurs de recherche est le plutonium, matière pouvant être utilisée dans

l'électronucléaire et la recherche, mais aussi pour la fabrication d'armes nucléaires. Même une petite quantité de plutonium produite par un seul réacteur de recherche est une source d'inquiétude en matière de garanties.

Lors de la vérification, l'AIEA prend en considération le temps nécessaire pour qu'un réacteur de recherche produise ce que l'on appelle une quantité significative de matières nucléaires, c'est-à-dire la quantité approximative de matières nucléaires pour laquelle on ne peut pas exclure la possibilité de fabriquer un dispositif nucléaire explosif. De plus, l'AIEA reçoit de l'État hôte des renseignements sur la conception et le plan de l'installation concernée, ainsi que sur la forme, la quantité, la localisation et le mouvement des matières utilisées. Elle se fonde sur ces informations pour définir une méthode de contrôle adaptée aux caractéristiques de l'installation. Elle peut alors vérifier l'exactitude et l'exhaustivité des renseignements descriptifs fournis par l'État et confirmer que l'utilisation de l'installation et des matières nucléaires est conforme à ce qui a été communiqué.

### Différentes utilisations et conceptions

De nombreux réacteurs de recherche disposent de cellules chaudes. Ce sont des chambres de confinement qui protègent les employés des rayonnements nucléaires. L'employé

se tient à l'extérieur de la cellule chaude et se sert de bras de manipulation pour manier en toute sûreté l'équipement et les matières nucléaires placés à l'intérieur. Les cellules chaudes sont le plus souvent utilisées pour la séparation isotopique à des fins médicales, mais elles peuvent également servir à extraire à petite échelle le plutonium du combustible irradié produit par un réacteur de recherche. Les inspecteurs des garanties de l'AIEA sont formés à la détection de l'extraction de plutonium.

Un plus petit nombre de réacteurs de recherche utilisent de l'uranium hautement enrichi (UHE), c'est-à-dire de l'uranium contenant plus de 20 % d'uranium 235, autre matière pouvant servir à la fabrication d'armes nucléaires. Même si de nombreux réacteurs de recherche ont déjà été convertis pour fonctionner avec de l'uranium faiblement enrichi (UFE), matière qui ne peut pas être utilisée directement pour fabriquer des armes nucléaires, les inspecteurs de l'AIEA vérifient encore toutes les matières nucléaires présentes dans une installation de réacteur de recherche afin de vérifier l'exactitude et l'exhaustivité de la déclaration de l'État.

« En raison des différences de conception et d'utilisation des réacteurs de recherche, il n'existe pas de liste de contrôle générique pour répondre aux exigences en matière de garanties dans ce type d'installations », indique Djamel Tadjer. « Nous apprenons donc aux inspecteurs à rechercher tout indice d'utilisation abusive des réacteurs de recherche ou de détournement de matières nucléaires. Il s'agit pour eux de déceler des incohérences puis de savoir poser les bonnes questions. »

### Satisfaire aux obligations en matière de garanties

L'application des garanties ne relève pas du seul travail des inspecteurs. Il incombe aussi aux États de satisfaire à des prescriptions. L'AIEA peut aider les États à se conformer à ces prescriptions pour ce qui est de l'intégration des garanties

dans la conception d'une installation, de la mise en œuvre de la comptabilité des matières nucléaires et du respect des prescriptions légales de mise en œuvre des garanties. Son aide comprend des orientations concernant la prise en compte de considérations relatives aux garanties dans la conception des réacteurs de recherche. En outre, l'AIEA propose des missions consultatives dans le pays visant à faire en sorte que les systèmes nationaux de comptabilité et de contrôle des matières nucléaires (SNCC) satisfassent aux obligations.

La prise en considération des prescriptions en matière de garanties dès les premières étapes du processus de conception d'un réacteur de recherche facilite, par la suite, les activités de vérification des matières nucléaires, ce qui est tout à l'avantage de l'exploitant de l'installation. Par exemple, la mise en place éventuelle d'une télésurveillance est rentable et permet de maintenir l'efficacité des garanties tout en réduisant la nécessité de mener des activités d'inspection sur place. La télésurveillance peut par exemple se faire à l'aide d'un moniteur de puissance thermohydraulique avancé qui permet de calculer la production de plutonium du réacteur en évaluant la circulation du fluide caloporteur et l'extraction de chaleur. S'ils connaissent la quantité de plutonium produite par le réacteur sur une période donnée, les inspecteurs peuvent ajuster en conséquence la fréquence des inspections, ce qui fait gagner du temps à l'inspecteur comme à l'exploitant.

« Pour l'application des garanties dans les réacteurs de recherche, ainsi que dans n'importe quelle installation nucléaire, la coopération entre l'État et l'AIEA est très importante », affirme Djamel Tadjer. « La collaboration et le recours à des technologies modernes, comme le moniteur de puissance thermohydraulique avancé, permettent à l'AIEA de vérifier de façon plus efficace et plus efficiente que les matières nucléaires sont toujours utilisées à des fins pacifiques. »

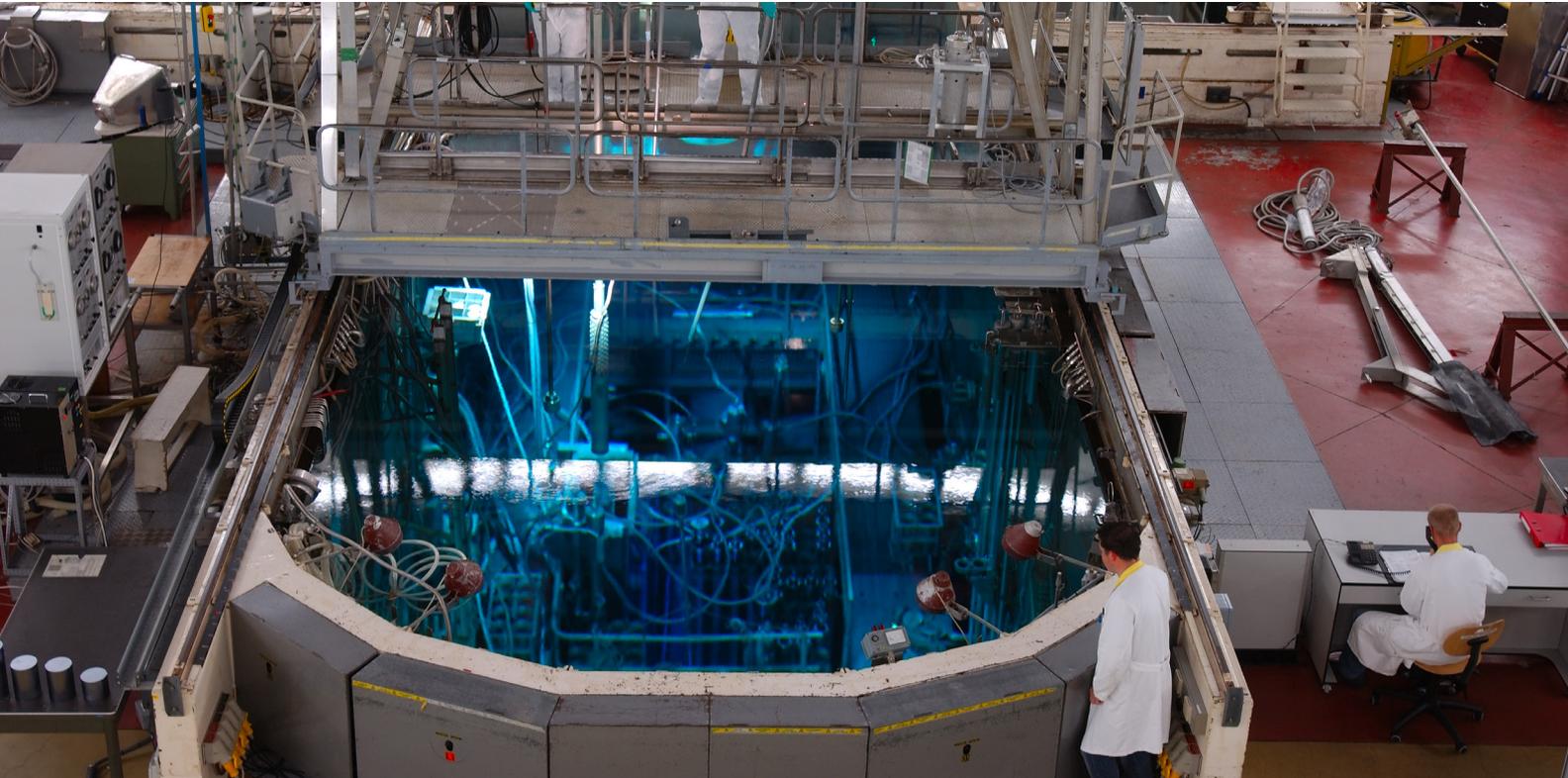
### Une cellule chaude est une chambre de confinement qui protège les employés des rayonnements nucléaires

(Photo : AIEA)



# Gérer le vieillissement des réacteurs de recherche pour assurer une exploitation sûre et efficace

Par Joanne Liou



Zone de confinement du réacteur belge BR2.

(Photo : SCK-CEN)

Étant donné que deux tiers des réacteurs de recherche en service dans le monde ont aujourd'hui plus de 30 ans, les exploitants et les organismes de réglementation se concentrent sur la rénovation et la modernisation des réacteurs pour veiller à ce qu'ils continuent à fonctionner de manière sûre et efficace.

« Normalement, la durée de vie des réacteurs de recherche est déterminée par le besoin auquel ils répondent et leur conformité aux prescriptions de sûreté les plus récentes, puisque la majorité de leurs systèmes et composants peuvent être remplacés, rénovés ou modernisés sans grande difficulté », déclare Amgad Shokr, chef de la Section de la sûreté des réacteurs de recherche à l'AIEA. « La rénovation et la modernisation ne devraient pas se limiter aux seuls systèmes et composants ; il convient aussi que les exploitants passent en revue les procédures de sûreté au regard des normes de sûreté de l'AIEA afin d'éviter une interruption des services fournis par les réacteurs de recherche. »

Depuis plus de 60 ans, les réacteurs de recherche sont des centres propices à l'innovation et au développement en ce qui concerne les programmes de sciences et de technologie nucléaires partout dans le monde. Ces petits réacteurs nucléaires produisent principalement des neutrons, et non de

l'électricité. Ces neutrons sont utilisés à des fins de recherche, d'enseignement et de formation, et trouvent des applications dans des domaines tels que l'industrie, la médecine et l'agriculture (pour en savoir plus, voir page 4).

On distingue deux types de vieillissement des réacteurs de recherche : le vieillissement physique, c'est-à-dire la dégradation de l'état matériel des systèmes et composants du réacteur, et l'obsolescence, qui se produit lorsque la technologie utilisée dans les ordinateurs et les systèmes de contrôle-commande, ou les règlements de sûreté, sont dépassés.

Le vieillissement des installations est l'une des préoccupations qui ont amené l'AIEA à lancer en 2001 son Plan de renforcement de la sûreté des réacteurs de recherche, qui vise à aider les pays à assurer un haut niveau de sûreté des réacteurs de recherche. Il comprend le Code de conduite pour la sûreté des réacteurs de recherche, qui donne aux pays des orientations relatives à l'élaboration et à l'harmonisation des lois, des réglementations et des politiques sur la sûreté des réacteurs de recherche.

Dans le cadre de ce plan, les pays travaillent avec l'AIEA à la mise en œuvre de programmes systématiques de gestion du vieillissement qui prévoient notamment l'utilisation de

bonnes pratiques pour réduire au minimum la dégradation de la performance des systèmes et composants, surveiller et évaluer de façon continue la performance des réacteurs, et mettre en œuvre des améliorations concrètes en matière de sûreté. Ces programmes de vieillissement peuvent aussi tirer parti de programmes d'exploitation dans d'autres domaines, comme la maintenance, les essais périodiques, les inspections et les examens périodiques de la sûreté.

« Si le nombre de réacteurs de recherche en service décroît, leur âge moyen en revanche est en augmentation », fait observer Ram Sharma, ingénieur nucléaire spécialisé dans l'exploitation et la maintenance des réacteurs de recherche à l'AIEA. « C'est pourquoi il est extrêmement important d'établir et de mettre en œuvre des plans de gestion, de rénovation et de modernisation, et de les améliorer continuellement, pour veiller au bon rapport coût-efficacité de l'exploitation et de l'utilisation des réacteurs de recherche existants afin d'en tirer le meilleur parti. L'appui de l'AIEA, par exemple sous la forme de missions d'examen par des pairs, peut jouer un rôle clé dans la réalisation de cet objectif. » Pour en savoir plus sur les services d'examen par des pairs de l'AIEA en lien avec les réacteurs de recherche, lisez l'article à la page 22.

## Un appui complet

Pour faire face au vieillissement de leurs réacteurs de recherche, les pays peuvent bénéficier de divers appuis de l'AIEA. Celle-ci propose notamment une aide en matière d'élaboration de normes de sûreté et d'optimisation de la disponibilité des réacteurs, mais aussi en matière d'adoption des pratiques recommandées dans les publications des collections de l'AIEA sur la sûreté, et d'utilisation des informations diffusées par l'AIEA sur l'élaboration et la mise en œuvre de projets de modernisation et de rénovation. Cette aide s'étend aux nouveaux programmes de réacteurs de recherche et à l'évaluation des plans visant à prendre en compte le vieillissement de manière proactive à toutes les phases de la durée de vie d'un réacteur de recherche, de la conception et du choix des matériaux à la construction et à l'exploitation des installations.

Les missions d'examen sont entreprises à la demande d'un pays et reçoivent l'appui de l'AIEA et d'équipes d'experts internationaux qui procèdent à des évaluations et formulent des recommandations sur les améliorations pouvant encore être apportées. En novembre 2017, la première mission d'examen par des pairs portant sur la gestion du vieillissement a été menée à bien au réacteur belge BR2, l'un des trois réacteurs en service au Centre belge d'étude de l'énergie nucléaire (SCK•CEN). Elle reposait sur la méthode des missions SALTO (Questions de sûreté concernant l'exploitation à long terme), conçue pour les centrales nucléaires et adaptée aux réacteurs de recherche.

« La mission a mis en évidence un certain nombre de points qui avaient été négligés, comme la gestion du vieillissement des installations de production de radio-isotopes et des dispositifs expérimentaux », confie Frank Joppen, ingénieur en sûreté nucléaire au SCK•CEN. « En conséquence,

les systèmes de classement des composants ont été mis à jour, et les informations obtenues dans le cadre de la maintenance, de l'inspection et de la surveillance sont maintenant utilisées pour améliorer encore les programmes de gestion du vieillissement. »

Le réacteur BR2, en exploitation depuis 1963, est l'un des plus anciens réacteurs de recherche en Europe occidentale. Il assure environ un quart de l'approvisionnement mondial en radio-isotopes destinés à une utilisation médicale ou industrielle, notamment pour le traitement du cancer et l'imagerie médicale. Il produit également un type de silicium utilisé comme matériau semi-conducteur dans les composants électroniques. Le réacteur BR2 est l'objet d'une autorisation de maintien en exploitation jusqu'au prochain examen périodique de la sûreté en 2026, à l'issue duquel une décision pourrait être prise quant à la prorogation de son exploitation pour une nouvelle période de 10 ans.

« Le programme de gestion du vieillissement du réacteur BR2 sera développé plus avant, ce qui implique la prise en compte des observations faites lors de la mission de l'AIEA », souligne Frank Joppen. « L'efficacité du programme sera passée en revue et sera l'objet du prochain examen de la sûreté. »

Les prochaines missions de gestion du vieillissement des réacteurs de recherche menées par l'AIEA sont programmées en 2020, à la demande des Pays-Bas et de l'Ouzbékistan. « La mission menée au réacteur BR2 a montré qu'il était possible d'appliquer efficacement la méthode SALTO aux réacteurs de recherche. Nous continuerons de renforcer l'efficacité et l'efficacité de cette mission, et celles d'autres services, en vue de tirer le meilleur parti des réacteurs de recherche », affirme Amgad Shokr.

## Le réacteur belge BR2, au SCK•CEN.

(Photo : SCK•CEN)



# Le déclasséement du premier réacteur de recherche de l'Ouzbékistan

Par Kendall Siewert

À Tachkent, en Ouzbékistan, un terrain vague sablonneux, entouré de verdure, semble prêt à accueillir un nouveau projet de construction. Cet espace est en fait le résultat du déclasséement du réacteur IIN-3M, après sa mise à l'arrêt définitif.

« Il a été décidé de déclasser le réacteur IIN-3M car il avait rarement été utilisé ces dernières années, l'équipement était obsolète et l'installation était située près d'un aéroport dont les autorités envisageaient l'agrandissement », explique Fakhruilla Kungurov, chef de laboratoire à l'Institut de physique nucléaire de l'Académie des sciences d'Ouzbékistan. « C'était la première fois qu'une installation nucléaire était déclassée en Ouzbékistan. L'AIEA nous a aidés à chaque étape du processus, dans les situations où nous manquions de l'expérience et des connaissances nécessaires. »

Le déclasséement du réacteur IIN-3M, sur le Complexe d'irradiation et de technologie (RTC) de l'Ouzbékistan, a débuté en 2015 et s'est achevé en 2019. Le processus consistait à décontaminer, à démanteler et à démolir l'installation afin de la soustraire à l'obligation de contrôle réglementaire, de même que le site sur lequel elle était bâtie. Le réacteur avait été mis à l'arrêt en 2013, après avoir principalement servi, depuis 1975, à l'essai de semi-conducteurs et d'autres dispositifs. C'était l'un des deux réacteurs de recherche du pays, le second étant toujours en service.

Les réacteurs de recherche constituent une source de neutrons destinés à des applications dans l'industrie, la médecine, la recherche, l'enseignement et la formation, par exemple, tandis que d'autres réacteurs nucléaires, plus grands, sont conçus pour produire de l'électricité. Lorsqu'ils ont rempli leur mission et sont mis à l'arrêt définitif, ils doivent faire l'objet d'un déclasséement, comme toute autre installation nucléaire. L'objectif du déclasséement est de retirer toutes les sources de radioactivité, les matières contaminées ou toute autre structure, afin que le site puisse servir à d'autres fins.

Plus de 60 % des réacteurs de recherche en service ont aujourd'hui plus de 40 ans. Le nombre croissant de réacteurs vieillissants a pour conséquence une augmentation des activités de déclasséement dans le monde. Il existe actuellement plus de 220 réacteurs de recherche en service, tandis que 443 ont été déclassés.

Les raisons qui peuvent amener un pays à opter pour le déclasséement d'un réacteur de recherche sont variées : coûts prohibitifs de la prolongation de la durée de vie du réacteur, manque de fonds ou obsolescence technologique, par exemple. Un pays peut, à l'inverse, choisir de rénover ses réacteurs et d'en poursuivre l'exploitation pour continuer à tirer les bénéfices de leur utilisation. Cependant, que l'exploitant et les autorités décident de déclasser un réacteur aujourd'hui ou bien plus tard, il est indispensable d'avoir un plan d'action.

Vladimir Michal, chef d'une équipe spécialisée dans le déclasséement à l'AIEA, indique que l'Agence propose aux pays, sur demande, un appui et une expertise afin de bien les préparer à procéder au déclasséement de manière sûre et sécurisée. En outre, l'AIEA fait paraître des normes de sûreté et des publications de référence qui donnent des orientations et divulguent les bonnes pratiques dans ce domaine.

« Il appartient aux pays de choisir entre la poursuite de l'exploitation et la mise à l'arrêt d'un réacteur, mais il est essentiel de déclasser les réacteurs qui ne sont plus en service », déclare Vladimir Michal. « L'absence de déclasséement des réacteurs inactifs, ou un déclasséement mal exécuté, risquent d'entraîner une détérioration des structures et d'exposer la population et l'environnement à un risque accru. »

## Mettre en place un plan

De nos jours, intégrer un plan de déclasséement dans le projet initial d'un réacteur de recherche est une pratique courante, mais ce n'était pas le cas dans les années 1970, lorsque le réacteur IIN-3M, comme beaucoup d'autres, a été construit.

« L'impression qui dominait dans les premières années de la construction de réacteurs de recherche était que le déclasser serait une tâche facile à accomplir, qui demanderait peu de ressources et de planification. Cependant, il est clair qu'il n'en est pas ainsi », fait remarquer Fakhrulla Kungurov. « Par conséquent, nous n'avions pas de plan de déclasser ni d'informations sur la façon de retirer ou de démonter l'équipement. C'est alors que l'appui de l'AIEA s'est avéré crucial. »

Du personnel de l'AIEA et d'autres experts internationaux se sont rendus en Ouzbékistan en août 2012 pour évaluer le site du réacteur. Le but de cette visite était d'évaluer l'état de l'installation et de réunir les informations nécessaires pour aider les autorités ouzbèkes à préparer le déclasser.

Sur la base des résultats de la visite de 2012 et d'autres réunions, les experts de l'AIEA ont travaillé avec l'équipe nationale à l'élaboration d'un plan de déclasser, comprenant notamment un calendrier du projet et une estimation des coûts, conformément aux recommandations et orientations de l'AIEA en matière de planification du déclasser.

« L'estimation des coûts du déclasser a été l'une des tâches les plus difficiles du processus de planification, car les exploitants du réacteur l'exécutaient pour la première fois, et la documentation nécessaire est considérable », déclare Fakhrulla Kungurov. Tous les renseignements relatifs au déclasser du réacteur IIN-3M, comme la description détaillée des procédures, de l'équipement et des outils à utiliser, ont été soumis pour approbation à l'organisme national de réglementation de l'Ouzbékistan avant le début des travaux sur le terrain.

## Préparer le déclasser

Une étape importante devant toujours précéder le processus de déclasser est l'enlèvement de tout le combustible et de toutes les sources radioactives, comme indiqué dans les normes de sûreté de l'AIEA. Elle requiert un équipement spécial et des experts très bien formés.

En ce qui concerne le réacteur IIN-3M, les experts ont travaillé avec l'AIEA, en coopération avec la Russie et les États-Unis, pour extraire le combustible du réacteur et le réexpédier dans

son pays d'origine, la Russie. En l'occurrence, la forme sous laquelle se présentait le combustible usé (uranium hautement enrichi liquide) posait une difficulté particulière ; c'était en effet la première fois que l'on renvoyait ce type de combustible dans son pays d'origine par voie aérienne. La coopération a également porté sur la préparation et le transport de diverses sources radioactives liquides retirées du service depuis le site jusqu'à une installation de stockage définitif.

Les processus de décontamination, de démantèlement et de démolition pouvaient alors commencer. Le processus de déclasser consistait notamment à démonter l'équipement (par exemple la cuve du réacteur) pièce par pièce, à éliminer la contamination superficielle et ramener les rayonnements à un niveau sûr, et à retirer les couches de béton servant de caisson au réacteur. L'AIEA a apporté son concours à chaque étape du processus.

Une fois le processus de déclasser achevé, l'AIEA a appuyé une étude du site, à la demande du Gouvernement ouzbek, afin de vérifier que les niveaux de radioactivité étaient sûrs. Ses conclusions ont attesté la réussite du déclasser, puisqu'elles ne faisaient état d'aucune radioactivité résiduelle significative. Les mesures ainsi faites en toute indépendance s'accordaient avec l'évaluation du site menée par le Gouvernement ouzbek. Ensemble, tous ces résultats confirmaient donc que le site pouvait être utilisé à d'autres fins en toute sûreté.

## L'installation du réacteur de recherche IIN-3M durant la phase de démolition du déclasser.

(Photo : Académie des sciences d'Ouzbékistan)

# Inscrire les réacteurs de recherche dans la durée



Maître de conférences en sûreté des réacteurs à l'Institut de physique atomique et subatomique de l'Université technique de Vienne. Helmuth Boeck possède 45 ans d'expérience dans l'utilisation et l'exploitation de réacteurs de recherche. Il a en outre pris part, en sa qualité d'expert, à plus de 80 missions appuyées par l'AIEA.

Les réacteurs de recherche sont indispensables pour fournir des radio-isotopes destinés à la médecine et à l'industrie, des faisceaux de neutrons destinés à la recherche sur les matériaux et aux essais non destructifs, ainsi que des services d'analyse et d'irradiation pour les secteurs public et privé. Leur utilisation joue également un rôle stratégique dans la formation théorique et pratique d'une nouvelle génération de scientifiques et d'ingénieurs, à l'appui des programmes de sciences et technologie nucléaires.

Sur les 841 réacteurs de recherche construits à ce jour, un grand nombre ont déjà été déclassés ou sont en passe de l'être. En outre, plus de la moitié des 224 réacteurs de recherche encore en service ont plus de 40 ans. Actuellement, neuf réacteurs de recherche sont en construction dans le monde et une trentaine de nouveaux réacteurs de recherche sont à un stade de planification plus ou moins avancé. Cependant, de nombreux réacteurs de recherche ont été mis à l'arrêt en raison d'un manque de fonds, d'une utilisation trop faible ou d'un manque de planification stratégique, alors qu'aucun de ces aspects n'était auparavant considéré comme un problème important. Si un réacteur de recherche est géré et utilisé correctement, sa durée d'exploitation peut dépasser 60 ans. Il est toutefois primordial de mettre en place des programmes appropriés de gestion de la durée de vie bien à l'avance, notamment en matière de sûreté, de sécurité et d'utilisation.

## Collaborer en vue de réduire les coûts et de renforcer l'utilisation

Les principales difficultés que rencontrent aujourd'hui les exploitants de réacteurs

de recherche sont des problèmes liés au financement et à l'utilisation. D'ordinaire, les réacteurs de recherche ne reçoivent pas d'appui financier de l'État, de l'industrie ou du secteur privé s'ils n'apportent pas d'avantages visibles. Ces derniers peuvent concerner la recherche universitaire dans le cadre d'un programme national d'enseignement supérieur et de recherche, la production de radio-isotopes médicaux, ou la recherche sur les matériaux dans le cadre d'un programme de coopération national ou international. Selon le niveau de puissance du réacteur de recherche, qui influe sur la façon dont il est utilisé, un programme de recherche polyvalent pourrait être la solution optimale.

Une manière possible de réduire les coûts d'exploitation tout en augmentant l'utilisation est de nouer des partenariats régionaux autour des réacteurs de recherche, regroupant au moins deux installations qui peuvent ainsi partager leurs périodes de fonctionnement et/ou le matériel onéreux. Au cours des dix dernières années, plusieurs partenariats de ce type ont été entrepris et ont bénéficié d'un appui financier dans le cadre des cours de formation collective avec bourses de l'AIEA.

L'Initiative en faveur des réacteurs de recherche d'Europe orientale (EERRI) en est un exemple. Elle a été mise en place par quatre pays, à savoir l'Autriche, la Hongrie, la République tchèque et la Slovénie, qui exploitent au total six réacteurs de recherche de conceptions différentes. Dans le cadre de ce réseau, 15 cours de formation collective avec bourses, d'une durée de six semaines chacun, ont été dispensés depuis 2009, rassemblant au total plus de 120 participants. Ces derniers ont reçu une formation sur au moins cinq réacteurs de recherche, dont les niveaux de puissance allaient de 100 kW à 10 MW, et ont

suivi des cours sur des sujets tels que la physique des réacteurs, les systèmes de contrôle-commande, la radioprotection et l'analyse par activation.

Comme exemples d'initiatives similaires, on peut citer le Réseau mondial de réacteurs de recherche TRIGA (GTRRN), créé pour répondre aux problèmes courants rencontrés avec les réacteurs de recherche de type TRIGA (il y en a 30 en service dans le monde), notamment l'approvisionnement en combustible, l'appui technique et l'amélioration de l'utilisation.

## **Viellissement, mise à l'arrêt et déclassé**

D'après la base de données sur les réacteurs de recherche de l'AIEA, plusieurs réacteurs de recherche dans le monde sont à l'arrêt prolongé pour diverses raisons, par exemple parce qu'ils n'ont pas de plan d'utilisation, ou parce que leur situation technique ne satisfait pas aux normes de sûreté acceptées au niveau international et requerrait des travaux importants de rénovation ou de modernisation. Dans certains cas, la rénovation ou la modernisation peuvent être si coûteuses qu'il revient moins cher de maintenir le réacteur à l'arrêt, mais même ainsi, il y a les coûts de maintenance. Par conséquent, plusieurs réacteurs de recherche sont en sommeil dans l'attente d'un avenir indéterminé, ce qui risque de soulever, à long terme, de réelles questions de sûreté et de sécurité.

Cette situation est accentuée par le problème de la gestion du combustible usé des réacteurs, qui doit être menée de manière efficace, notamment en ce qui concerne l'entreposage dans une installation prévue à cet effet au niveau national, le retraitement, le stockage définitif ou la réexpédition dans le pays d'origine. Ces options sont généralement onéreuses et doivent faire l'objet d'une gestion en temps utile, dans le respect des normes internationales de sûreté et en assurant en amont le financement nécessaire.

## **Des systèmes de gestion orientés vers la planification stratégique**

Pour exploiter à long terme un réacteur de recherche, il convient de mettre en place un programme de gestion du vieillissement efficace, qui devrait généralement comprendre, entre autres, une évaluation détaillée de la sûreté en vue de l'exploitation à long

terme, ainsi que des plans de rénovation et de modernisation adéquats pour mettre les installations en conformité avec les normes de sûreté en vigueur.

Pour de nombreux réacteurs de recherche, les plans de déclassé, qui auraient dû être élaborés au début de la durée de vie utile et maintenus à jour par la suite, n'existent pas. L'AIEA a élaboré plusieurs normes de sûreté visant à donner des orientations en matière de mise en place de programmes de gestion du vieillissement, de déclassé et de gestion des réacteurs de recherche à l'arrêt prolongé.

Ces questions liées à la mise à l'arrêt, au vieillissement et au déclassé peuvent être prises en compte lors de la mise en place d'un système de gestion global. En outre, il est nécessaire que ces systèmes soient élaborés de telle sorte que soient pris en compte des objectifs importants, notamment la sûreté, la santé, la sécurité et des questions connexes, afin d'améliorer l'exploitation continue et les services du réacteur de recherche, comme indiqué dans les normes de sûreté de l'AIEA. Le système devrait fournir des orientations générales aidant à la création, à la mise en œuvre et à l'évaluation d'un réacteur de recherche, ainsi que des orientations spécifiques relatives à une exploitation conforme aux normes internationales.

Pour mettre en place un système de gestion, il convient de dresser un plan stratégique, adapté à l'installation, qui implique tous les partenaires, tels que les autorités nationales, l'industrie, les utilisateurs et les gestionnaires d'installations, afin de rationaliser les fonds disponibles et les dépenses d'exploitation. Le plan stratégique doit être révisé périodiquement afin de prendre en compte l'évolution de la mission du réacteur de recherche au fil du temps. L'AIEA a mis au point de nombreux documents en vue d'aider les pays à élaborer des plans stratégiques et à les mettre en œuvre.

En conclusion, nous avons vu comment il était possible d'entretenir, et éventuellement d'améliorer, les réacteurs de recherche pour en assurer la durabilité. En fonction de la situation particulière d'un réacteur de recherche, l'organisme exploitant peut décider de mener des actions en vue de l'améliorer, en s'appuyant notamment sur l'expérience et le soutien de l'AIEA de façon à assurer la durabilité du réacteur.

## L'AIEA et la FAO contribuent à la mise au point d'une variété de banane résistante à une maladie fongique répandue



Essais sur le terrain dans le Guangdong (Chine) où l'on peut observer les différences entre la nouvelle variété de banane résistante au TR4 (ZJ4) et la variété vulnérable (BaXi).

(Photo : G. Yi/Guangdong, Chine)

Les bananes sont peut-être le fruit le plus apprécié au monde, mais les bananiers du monde entier sont de plus en plus menacés par un nouveau champignon qui les détruit et qui menace les moyens de subsistance des cultivateurs et le secteur tout entier.

Cantonné à l'Asie du Sud-Est pendant des décennies, le *Fusarium* souche Tropicale 4 (TR4) a été détecté pour la première fois en Afrique et en Amérique latine en 2019. Son apparition en Colombie en août de la même année a amené le pays à déclarer une situation d'urgence nationale.

L'AIEA, en coopération avec l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), a travaillé avec des chercheurs du monde entier pour appuyer la mise au point de nouvelles variétés de bananes résistantes à la maladie.

« Comme les variétés de bananes que l'on cultive actuellement ne contiennent pas de pépins, il est difficile de les améliorer par croisement », déclare Ivan Ingelbrecht, chef du Laboratoire FAO/AIEA de la sélection des plantes et de la phytogénétique. C'est pourquoi

les techniques telles que l'irradiation ou la mutagenèse chimique, qui permettent de produire de nouvelles variétés dotées des caractéristiques recherchées, sont souvent privilégiées pour combattre la maladie.

Après des années de recherche, des experts chinois ont introduit une nouvelle variété de banane Cavendish (la banane la plus couramment exportée) résistante au TR4. « Ils ont mis au point cette nouvelle variété grâce à des techniques de mutagenèse chimique. D'autres pays, dont les Philippines, sont à des stades avancés de mise au point de leurs propres variétés de bananes grâce à l'irradiation gamma », ajoute Ivan Ingelbrecht.

La fusariose représente un obstacle majeur pour la production de bananes depuis plus d'un siècle. Cette maladie est provoquée par un champignon tellurique appelé *Fusarium oxysporum f. sp. cubense*. L'agent pathogène peut survivre dans le sol pendant des dizaines d'années, ce qui le rend difficile à éradiquer. Le TR4 est une nouvelle souche de ce champignon qui est apparue récemment. « Le champignon s'introduit dans les racines

de plantes vulnérables et perturbe l'absorption d'eau, les feuilles se flétrissent et le bananier finit par mourir », explique Ivan Ingelbrecht.

La FAO estime à environ 400 millions de dollars É.-U. les dommages annuels directs causés par le TR4 en Asie du Sud-Est, sans compter les impacts socio-économiques indirects.

« L'introduction d'une nouvelle variété de Cavendish aura des retombées positives pour de nombreux cultivateurs. Elle a pu être réalisée grâce aux travaux effectués en étroite collaboration avec l'AIEA et la FAO sur des techniques de mutagenèse, déclare Yi Ganjun, vice-président de l'Académie des sciences agricoles du Guangdong, à Guangzhou (Canton). Cette technologie de pointe a permis une avancée remarquable dans la lutte contre la fusariose. »

« Les résultats prometteurs de cette nouvelle variété de banane « locale » résistante au TR4 suscitent un immense espoir chez les cultivateurs qui ont testé avec succès les nouveaux plants sur le terrain, ajoute Yi Ganjun. Des techniques de mutagenèse peuvent contribuer à la mise au point de

nouveaux plants adaptés aux conditions environnementales locales. »

La nouvelle variété est à présent multipliée et diffusée dans d'autres provinces. « Ces experts chinois sont prêts à aider leurs confrères et conseurs d'autres pays à mettre au point des variétés de bananes résistantes au TR4 et adaptées à leurs conditions climatiques et à leurs sols », explique Yi Ganjun.

Des scientifiques cultivent *in vitro* des milliers de petits plants de bananiers dans des tubes à essai adaptés pour la mutagenèse au moyen de produits chimiques, de rayons gamma ou de rayons X. Ces techniques permettent d'accélérer le processus naturel de mutation des plantes et de créer une diversité génétique propre à la production de nouvelles variétés, notamment celles qui ont les caractéristiques souhaitées. Un projet de recherche coordonné auquel ont participé des scientifiques de six pays, notamment la Chine et les Philippines, constitue depuis 2015 le fer de lance des travaux de mise au point de variétés de bananes résistantes au TR4.

« Compte tenu des résultats obtenus grâce à la mutagenèse chimique et des progrès encourageants réalisés au



**Des sélectionneurs sur une plantation de la nouvelle variété de banane Cavendish dans le Guangdong (Chine).**

(Photo : G. Yi/Guangdong, Chine)

moyen de l'irradiation dans plusieurs pays asiatiques, la mise au point de nouvelles variétés résistantes au TR4 semble possible dans un avenir relativement proche dans d'autres régions du monde, explique

Ivan Ingelbrecht. L'AIEA et la FAO sont résolues à aider les pays à y arriver. »

— Par Miklos Gaspar

## Un outil à 1 dollar pour combattre la pollution atmosphérique

Un nouvel outil tout simple qui coûte moins d'un dollar à fabriquer pourrait contribuer aux efforts mondiaux de réduction de la pollution de l'air causée par les émissions d'ammoniac tout en améliorant l'accès à la nourriture. Ce petit dispositif en plastique a été conçu par des scientifiques brésiliens en collaboration avec l'AIEA et l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Après avoir testé et confirmé la précision de l'outil au moyen de techniques isotopiques, les scientifiques le déploient à présent pour aider les pays à contrôler et à mieux gérer les émissions d'ammoniac provenant de l'agriculture, notamment du secteur de l'élevage.

L'ammoniac, un composé d'azote et d'hydrogène, est l'un des principaux produits dérivés de l'agriculture ; il est rejeté sous forme de gaz, par exemple lors de la dégradation d'engrais ou de effluents d'élevage. La présence de ce gaz ( $\text{NH}_3$ ) dans l'atmosphère peut agir comme une source secondaire d'oxyde nitreux ( $\text{N}_2\text{O}$ ), un gaz à effet de serre puissant, et peut endommager

les écosystèmes en aggravant la pollution de l'eau et en provoquant des problèmes de santé chez l'homme.

Quand l'engrais n'est pas épandu correctement, jusqu'à la moitié de l'azote qu'il contient peut être rejeté dans l'atmosphère, une perte qui engendre également de lourdes conséquences financières. Il est important de comprendre ce phénomène pour pouvoir formuler des recommandations aux agriculteurs sur la meilleure façon de gérer l'utilisation de l'engrais, ce qui peut aider à optimiser la productivité et les retombées positives.

« En moyenne, 35 % des engrais azotés utilisés au Brésil se perdent dans l'atmosphère sous forme d'ammoniac, ce qui est lourd de conséquences sur l'environnement et l'économie », déclare Segundo Urquiaga, pédologue au Centre national de recherche en agrobiologie de l'Entreprise brésilienne de recherche agropastorale (Embrapa).

La population mondiale ne cesse de croître et la demande alimentaire augmente avec elle. Cela se traduit par

une expansion du secteur de l'élevage et une dépendance croissante à l'égard des engrais synthétiques et des engrais organiques azotés pour la production alimentaire. Cela signifie également plus d'émissions d'ammoniac. Cette tendance devrait se poursuivre au cours des prochaines décennies et représente une menace pour la santé des populations et pour l'environnement.

Des experts de pays tels que le Brésil cherchent des solutions pour mesurer et limiter les rejets d'ammoniac dans l'atmosphère. Beaucoup de techniques sophistiquées, comme les tunnels de ventilation, la spectroscopie par mesure du temps de déclin dans une cavité et des techniques micrométéorologiques, sont déjà disponibles, mais elles sont coûteuses et nécessitent l'intervention de techniciens hautement qualifiés sur le terrain.

« Auparavant, la procédure pour mesurer et limiter les rejets d'ammoniac était laborieuse, longue et relativement onéreuse, ajoute Segundo Urquiaga. Cette nouvelle technique est



**Un nouvel outil tout simple fabriqué à partir d'une bouteille en plastique pourrait contribuer aux efforts visant à surveiller et à réduire les émissions d'ammoniac provenant de l'agriculture et à améliorer la sécurité alimentaire.**

(Photo : Embrapa)

économique, rapide et peut s'appliquer n'importe où. Son utilisation aura un impact direct sur les agriculteurs, qui économiseront alors des ressources, mais réduiront aussi la pollution atmosphérique qu'ils engendrent. »

## Un nouvel outil unique en son genre

Ce nouvel outil est si simple qu'on pourrait le confondre avec le projet scientifique d'un écolier. On crée une chambre en coupant le fond d'une grande bouteille en plastique et en l'attachant à la partie supérieure de la bouteille ouverte. On insère dans la bouteille une languette de mousse préalablement trempée dans une solution acide qui absorbe l'ammoniac. La languette descend du goulot jusque dans un petit récipient en plastique retenu au sol par trois broches en métal. On place le dispositif à côté de plantations ou d'un élevage, on prélève la languette toutes les 24 heures et on l'envoie au laboratoire pour analyse.

Cet outil simple et unique en son genre, ainsi que son mode d'emploi, ont été mis au point par des scientifiques de la division mixte FAO/AIEA des techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture, de l'Embrapa et de

l'Institut d'agronomie du Paraná (IAPAR) au Brésil.

« Ce dispositif pourrait nous permettre de comprendre les rejets d'ammoniac et de nous tourner vers des solutions plus écologiques qui permettent de conserver suffisamment d'azote et favoriser ainsi la production végétale, en particulier sur les sols moins fertiles et manquant d'azote, ce qui peut avoir un effet important sur la production alimentaire », déclare Mohammad Zaman, pédologue et phytonutritionniste de la division mixte FAO/AIEA.

Le dispositif peut être utilisé seul pour mesurer les rejets d'ammoniac avec précision, et peut aussi être associé à d'autres pratiques agricoles destinées à réduire les émissions de gaz à effet de serre ainsi que leur impact sur l'environnement. Ces pratiques comptent par exemple des systèmes d'irrigation au goutte-à-goutte, l'application d'engrais avec inhibiteurs de nitrification et la rotation de cultures faisant intervenir des légumineuses fixatrices d'azote.

## Simple mais fiable

Étant donné la simplicité de cet outil, la fiabilité de ses résultats a suscité de grandes inquiétudes. Pour tester celle-ci, les scientifiques ont utilisé une technique isotopique qui consiste

à ajouter de l'azote 15 à de l'engrais (voir l'encadré « En savoir plus ») pour pouvoir surveiller, mesurer et comparer la quantité d'ammoniac retenue à l'intérieur de la bouteille par rapport à la quantité rejetée, qui a été mesurée à l'aide de la méthode du bilan massique d'azote permettant de vérifier la quantité de cet élément dans le sol au fil du temps. Comme l'ammoniac contient de l'azote, l'ajout d'azote 15 permet aux scientifiques de suivre les rejets d'ammoniac.

Les résultats des tests ont montré que le dispositif était fiable et pouvait servir à surveiller les émissions d'ammoniac provenant d'engrais organiques ou synthétiques épandus sur les cultures annuelles et pérennes, ainsi que des effluents d'élevage. « Cette technique est bien plus efficace et plus précise pour mesurer et contrôler l'ammoniac que la technique en chambre fermée classique », précise Segundo Urquiaga.

Des experts de six pays (Brésil, Chili, Costa Rica, Éthiopie, Iran et Pakistan) ont déjà commencé à utiliser ce nouveau dispositif. « Son utilisation devrait se répandre davantage, en particulier après la publication des résultats du projet dans une édition spéciale d'une revue scientifique internationale révisée par un comité de lecture », ajoute Mohammad Zaman. De plus, il est prévu de recommander au Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) de faire figurer cet outil au nombre des techniques à utiliser dans les systèmes agricoles du monde entier, surtout dans les pays en développement.

## EN SAVOIR PLUS

L'azote joue un rôle important dans la croissance végétale et la photosynthèse, processus par lequel les plantes utilisent la lumière du soleil pour synthétiser les nutriments provenant du dioxyde de carbone et de l'eau. Cet élément est souvent ajouté dans le sol sous forme d'engrais. En utilisant de l'engrais marqué à l'aide d'un isotope stable, l'azote 15 (atome possédant plus de neutrons que l'azote « normal »), les scientifiques peuvent suivre le cheminement de l'engrais, déterminer l'efficacité avec laquelle les cultures absorbent celui-ci, et surveiller les pertes d'azote sous forme d'ammoniac. Cette technique permet aussi d'évaluer la quantité optimale d'engrais à épandre.

— Par Nicole Jawerth et Elisa Mattar

## Un nouveau conteneur de transport de sources radioactives disponible pour les États Membres de l'AIEA grâce à une contribution des

L'AIEA aura dorénavant accès à un nouveau conteneur de transport de sources radioactives scellées retirées du service grâce à une contribution de l'Administration nationale de la sécurité nucléaire (ANSN) du Ministère de l'énergie des États-Unis d'Amérique, annoncée au cours d'une cérémonie tenue en marge de la 63<sup>e</sup> Conférence générale de l'AIEA.

Le conteneur, de modèle 435-B du type B(U), est destiné au transport national et international de divers types de sources et dispositifs radioactifs. Il est agréé pour le transport de sources de très haute activité, telles que des sources de téléthérapie et des irradiateurs, et de sources de plus faible activité, comme celles utilisées pour la radiographie gamma industrielle et la curiethérapie à débit de dose élevé ou moyen.

L'arrivée du conteneur a donné lieu à une cérémonie d'inauguration au Siège de l'AIEA à Vienne.

« Pour les États Membres, l'une des plus grosses dépenses liées à l'enlèvement de sources est le coût du transport et de la location d'un conteneur de transport autorisé, déclare Mikhail Chudakov, directeur général adjoint et chef du Département de l'énergie nucléaire à l'AIEA. Maintenant que nous avons directement accès à un conteneur autorisé, l'AIEA est en mesure d'assurer plus efficacement le transport sûr et sécurisé de sources radioactives scellées retirées du service depuis les locaux des utilisateurs jusqu'à un destinataire autorisé en vue de leur gestion ultérieure. »

Les sources radioactives, qui sont destinées à diverses applications, notamment dans les domaines de la médecine, de l'industrie, de la recherche et de l'agriculture, doivent être gérées correctement non seulement pendant leur utilisation mais aussi à la fin de leur durée d'utilité, lorsqu'elles doivent être transportées, généralement, loin de leur lieu d'utilisation.

Les options de gestion des sources radioactives scellées retirées du service comprennent l'entreposage provisoire et à long terme, le recyclage, le rapatriement et le stockage



**Le directeur général adjoint de l'AIEA Mikhail Chudakov et la sous-secrétaire à la sécurité nucléaire au Ministère de l'énergie Lisa E. Gordon-Hagerty coupent le ruban devant une maquette à l'échelle 1/10 du conteneur de transport de sources radioactives scellées retirées du service, offert par les États-Unis à l'AIEA dans le but d'être utilisé dans d'autres pays.**

(Photo : S. Krikorian/AIEA)

définitif, le transport étant aussi une étape importante de la gestion. Lorsqu'elles sont enlevées d'un pays pour être acheminées vers une installation autorisée, les sources doivent être transportées selon certaines règles.

« L'accès à ce conteneur de transport agréé permettra à l'AIEA d'appuyer plus facilement la gestion sûre et sécurisée de nos sources radioactives scellées retirées du service », déclare Marinko Zeljko, directeur de l'Agence nationale de réglementation de la sûreté radiologique et nucléaire de Bosnie-Herzégovine.

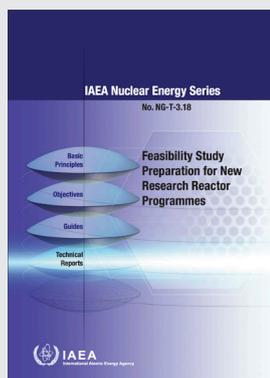
Le transport de ces sources en vue de la gestion de leur fin de vie représente un défi pour de nombreux pays en raison du manque de conteneurs adaptés et spécifiquement autorisés à cette fin. Grâce à ce conteneur 435-B, l'AIEA peut à présent aider les organismes responsables à transporter ces sources plus efficacement.

« La mise à disposition du conteneur 435-B renforce encore plus la coopération entre les États-Unis et l'AIEA, et j'espère qu'elle est

perçue comme un symbole de notre engagement à long terme aux côtés de l'AIEA dans ses efforts d'amélioration de la gestion de la fin de vie de sources radioactives, déclare Lisa E. Gordon-Hagerty, sous-secrétaire à la sécurité nucléaire au Ministère de l'énergie et administratrice à l'ANSN. Ces efforts ne feront pas que renforcer la sécurité mondiale, ils promouvront aussi la santé et la sûreté du public. »

Depuis 2014, l'AIEA a appuyé l'enlèvement de plus de 60 sources radioactives scellées retirées du service de haute activité dans plus de 15 États Membres. Un grand nombre de missions de consolidation et de conditionnement de sources radioactives scellées retirées du service de plus faible activité ont abouti à l'entreposage sûr et sécurisé de milliers d'entre elles. En 2018, l'AIEA a aidé cinq pays d'Amérique du Sud à enlever 27 sources radioactives scellées retirées du service dans le cadre de son plus grand projet d'enlèvement jamais réalisé.

— Par Matt Fisher

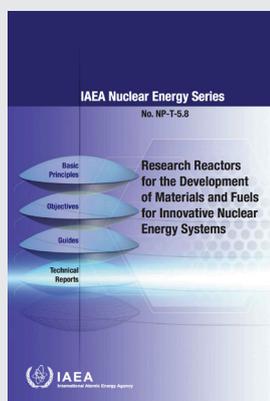


## Préparation d'une étude de faisabilité pour de nouveaux programmes de réacteurs de recherche

La publication intitulée *Feasibility Study Preparation for New Research Reactor Programmes* décrit les divers éléments à inclure dans un rapport d'étude de faisabilité complet, solide et cohérent relatif à un nouveau projet de réacteur de recherche. Elle donne des orientations à l'intention des équipes et des organismes d'appui principaux d'un nouveau réacteur de recherche pour leur permettre d'entreprendre une étude de faisabilité solidement fondée et complète, susceptible d'être soumise aux décideurs pour examen afin que ces derniers appuient les propositions et approuvent un plan d'action relatif à la construction d'une telle installation. Elle aborde des éléments devant être pris en compte avant l'autorisation de construction d'un nouveau réacteur de recherche, notamment la justification de celui-ci, des questions importantes liées à l'infrastructure nucléaire qui en découlent, l'analyse coûts-avantages et la gestion du risque. Ces questions sont traitées pour aider les États Membres à bien comprendre tous les rôles, obligations et engagements relatifs à la mise en place et à l'exploitation d'un réacteur de recherche, et à assumer ceux-ci pendant toutes les phases du cycle de vie des projets. La publication contient également un modèle générique pour la préparation d'un rapport d'étude de faisabilité et fournit des exemples et des enseignements tirés de l'expérience de certains États Membres dans la préparation de ce type d'étude.

IAEA Nuclear Energy Series NG-T-3.18 ; ISBN : 978-92-0-104518-8 ; 30,00 euros ; 2018 (en anglais)

[www.iaea.org/publications/12306/feasibility-study](http://www.iaea.org/publications/12306/feasibility-study)

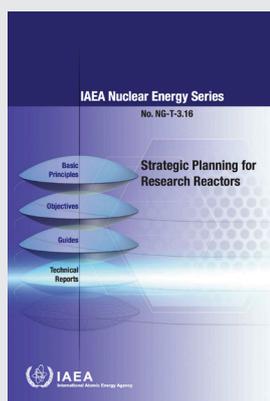


## Les réacteurs de recherche et la mise au point de matières et de combustibles destinés à des systèmes d'énergie nucléaire innovants

La publication intitulée *Research Reactors for the Development of Materials and Fuels for Innovative Nuclear Energy Systems* offre une vue d'ensemble des capacités des réacteurs de recherche en ce qui concerne la mise au point de combustibles et de matières destinés à des réacteurs nucléaires innovants, comme les réacteurs de quatrième génération. Elle donne des informations complètes sur les possibilités de recherche concernant l'essai de matières et de combustibles de 30 réacteurs de recherche en exploitation ou en cours de mise au point. Ces informations incluent les niveaux de puissance, le mode d'exploitation, la situation actuelle, la disponibilité et l'historique de l'utilisation de ces réacteurs. La publication a pour but de faciliter l'accès aux informations relatives aux réacteurs existants dotés de capacités de recherche avancées sur l'essai de matières, et d'assurer ainsi l'utilisation accrue de ces réacteurs dans ce domaine. Elle devrait également permettre d'appuyer la mise en place de réseaux régionaux et internationaux par le biais de groupements de réacteurs de recherche et de centres internationaux désignés par l'AIEA s'appuyant sur des réacteurs de recherche.

IAEA Nuclear Energy Series NP-T-5.8 ; ISBN : 978-92-0-100816-9 ; 32,00 euros ; 2017 (en anglais)

[www.iaea.org/publications/10984/research-reactors-for-the-development-of-materials-and-fuels](http://www.iaea.org/publications/10984/research-reactors-for-the-development-of-materials-and-fuels)



## Planification stratégique pour les réacteurs de recherche

La publication intitulée *Strategic Planning for Research Reactors* est une révision du document technique IAEA-TECDOC-1212, qui portait principalement sur l'amélioration de l'utilisation des réacteurs de recherche existants. Cette version actualisée donne également des orientations sur la façon d'élaborer et de mettre en œuvre un plan stratégique dans le cadre d'un nouveau projet de réacteur de recherche. Elle sera particulièrement intéressante pour les organismes préparant une étude de faisabilité en vue de mettre en place un nouveau réacteur de recherche. Cette publication permettra aux directeurs de déterminer plus précisément les capacités réelles et potentielles d'un réacteur existant, ou la destination et le type d'une nouvelle installation. Ceux-ci seront également en mesure de comparer ces capacités aux besoins des parties prenantes/utilisateurs et d'établir une stratégie pour répondre à ces besoins. En outre, la publication contient plusieurs annexes, notamment des exemples illustrant son contenu pour en faciliter la compréhension et des modèles prêts à l'emploi visant à aider l'équipe à concevoir un plan stratégique.

IAEA Nuclear Energy Series NG-T-3.16 ; ISBN : 978-92-0-101317-0 ; 38,00 euros ; 2017 (en anglais)

[www.iaea.org/publications/10988/strategic-planning-for-research-reactors](http://www.iaea.org/publications/10988/strategic-planning-for-research-reactors)

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 LA SÉCURITÉ NUCLÉAIRE

## Soutenir et intensifier les efforts

10-14 février 2020  
Vienne (Autriche)

Débat ministériel  
10 février 2020

Organisée par



**IAEA**

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

#**ICONS2020**



CN-278

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

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

ou suivez-nous sur

