

# IAEA BULLETIN

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE

La publication phare de l'AIEA | Juin 2019

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



## La gestion du combustible utilisé des réacteurs nucléaires de puissance

Tirer les leçons du passé pour mieux préparer l'avenir

La gestion du combustible utilisé et des déchets radioactifs dans les pays primo-accédants, p. 10

Développement de la toute première installation de stockage définitif sûr du combustible utilisé, p. 14

Intégrer les garanties dans la conception des installations d'entreposage de combustible utilisé, p. 20

Et aussi :  
Infos AIEA





### Le Bulletin de l'IAEA

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

Rédaction : Miklos Gaspar

Conception et production : Ritu Kenn

Le Bulletin de l'IAEA 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'IAEA, l'autorisation de reproduction, sauf à des fins de recension, doit être sollicitée auprès de l'auteur ou de l'organisation d'origine.

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

Photo de couverture :

Vue de l'intérieur de la centrale nucléaire  
d'Olkiluoto 1

(Photo : Hannu Huovila/TVO)

Suivez-nous sur :



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

Créée en 1957 en tant qu'organe autonome, l'IAEA 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'IAEA 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'IAEA 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'IAEA 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'IAEA sont multiples et font intervenir un large éventail de partenaires aux niveaux national, régional et international. Les programmes et les budgets de l'IAEA 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'IAEA 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).

# L'importance d'une gestion du combustible usé sûre, sécurisée et durable

Par Yukiya Amano, Directeur général de l'AIEA

L'énergie d'origine nucléaire peut nous aider à relever deux défis à la fois : assurer un approvisionnement stable en énergie et limiter les émissions de gaz à effet de serre. Les 451 réacteurs nucléaires de puissance en service dans 30 pays assurent actuellement plus de 10 % de la production mondiale d'électricité et un tiers de la production mondiale d'électricité à faibles émissions de carbone. L'électronucléaire continuera de jouer un rôle majeur dans le bouquet énergétique à bas carbone mondial au cours des prochaines décennies.

La gestion sûre, sécurisée et durable du combustible usé des réacteurs nucléaires de puissance est essentielle pour l'avenir de l'énergie nucléaire.

Ce défi concerne aussi bien les décideurs que les ingénieurs. À vrai dire, il existe des solutions techniques pour gérer le combustible usé, lesquelles vont du retraitement et du recyclage au conditionnement du combustible usé en vue du stockage définitif dans des dépôts souterrains profonds. En outre, la recherche a démontré les possibilités d'application de processus avancés, comme la séparation et la transmutation, qui peuvent permettre de réduire encore plus l'impact des déchets nucléaires. La mise en œuvre d'une stratégie choisie peut prendre des décennies, et l'allocation des ressources nécessaires est souvent difficile.

La gestion du combustible usé nécessite un engagement à long terme, et les stratégies nationales doivent être assez souples pour permettre d'intégrer de nouvelles technologies qui renforceront et amélioreront l'efficacité, la sûreté, la sécurité et la durabilité de l'énergie d'origine nucléaire.

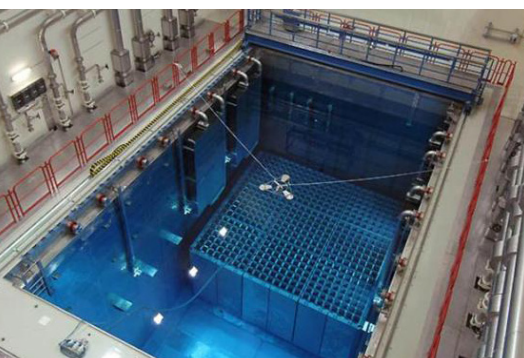
Dans cette édition du Bulletin de l'AIEA, nous examinons des solutions dans le monde entier. Ainsi, en page 6, nous expliquons la stratégie intégrée de la Russie pour gérer, en un seul et même lieu, l'entreposage en piscine et à sec, le retraitement, la fabrication de combustible et, enfin, le stockage définitif des déchets de haute activité. En page 8, des experts français nous disent ce qui fait l'efficacité de leur gestion du combustible usé, et vous trouverez en page 12 un article consacré à la gestion du combustible usé

au Royaume-Uni qui porte principalement sur le transport sûr et sécurisé.

Nous décrivons succinctement en page 14 les travaux de recherche menés conjointement par la Suède et la Finlande pour la création de dépôts souterrains. Nous réfléchissons à la manière dont les considérations relatives aux garanties peuvent jouer un rôle dans la conception d'installations de gestion de combustible usé, en facilitant la tâche de l'exploitant et des inspecteurs des garanties de l'AIEA (lire en page 20). Le regard tourné vers l'avenir, nous nous penchons sur l'approche que les pays primo-accédants pourraient adopter en matière de gestion du combustible usé (lire en page 10), et nous étudions les incidences que l'introduction prévue des petits réacteurs modulaires dans certains pays pourrait avoir sur la gestion du combustible usé (lire en page 11).

Cette année, la Conférence internationale de l'AIEA sur la gestion du combustible usé des réacteurs de puissance a pour thème « Tirer les leçons du passé pour mieux préparer l'avenir » et s'inscrit dans la suite de notre précédente conférence sur le sujet, tenue en 2015. À l'époque, des délégués avaient souligné la nécessité d'une approche plus intégrée concernant le cycle du combustible et d'une plus grande coordination entre les grands acteurs et les décideurs. Cette année, les participants se concentreront, entre autres, sur les incidences des décisions prises concernant la partie initiale du cycle du combustible nucléaire sur la gestion du combustible usé, et échangeront les meilleures pratiques et les enseignements tirés dans ce domaine.

L'AIEA continuera à aider les États Membres dans la gestion du combustible usé, qui est un domaine important, en fournissant des compétences techniques et en servant de cadre d'échange au niveau international.



(Photo : Kernkraftwerk Gösgen-Däniken AG)



(Photo : Energy Solutions)



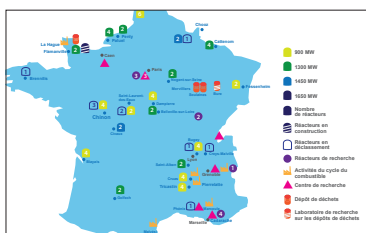
(Photo : Rosatom)

# 1 L'importance d'une gestion du combustible usé sûre, sécurisée et durable

## 4 Le cycle de vie du combustible nucléaire



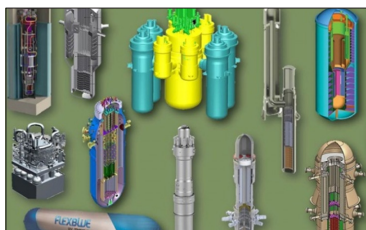
### 6 Une seule structure : la stratégie intégrée de la Russie en matière de gestion du combustible usé



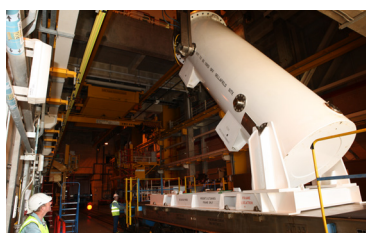
### 8 Le cycle du combustible nucléaire : l'exemple français et comment s'en inspirer



### 10 La gestion du combustible usé et des déchets radioactifs dans les pays primo-accédants



### 11 Les petits réacteurs modulaires : posent-ils un problème pour la gestion du combustible usé ?



### 12 Promouvoir la sûreté et la sécurité du transport du combustible usé au Royaume-Uni



### 14 Développement de la toute première installation de stockage définitif sûr du combustible usé

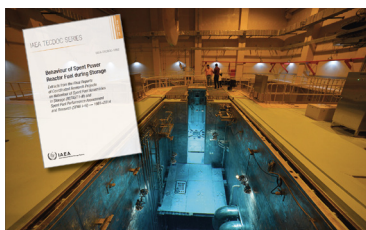


### 16 S'adapter à la croissance : la stratégie de la Chine en matière de gestion du combustible usé





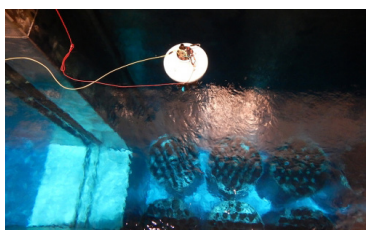
## 17 Nouveau cours en ligne sur la gestion du combustible usé des réacteurs nucléaires de puissance



## 18 La gestion du combustible usé : quarante ans de recherche



## 20 Intégrer les garanties dans la conception des installations d'entreposage de combustible usé



## 22 Un modèle primé au « Robotics Challenge » aide à accélérer la vérification du combustible usé

## 24 Questions-réponses : Simplifier le transport et l'entreposage du combustible usé des réacteurs nucléaires de puissance

Dans le monde

## 26 Mon expérience dans le nucléaire

— Par Susan Y. Pickering

Infos AIEA

## 28 Du laboratoire au champ : des scientifiques indonésiens mettent au point de nouvelles variétés agricoles à l'aide de la science nucléaire

## 29 Des professionnels du nucléaire échangent leurs idées sur la manière de promouvoir une solide culture de sûreté lors de la formation de l'AIEA sur la direction pour la sûreté

## 30 Au Viet Nam, l'irradiation améliore la qualité des aliments

## 31 L'AIEA met au point une nouvelle méthode de détermination de l'origine de la pollution de l'eau

## 32 Publications

# Le cycle de vie du c

Aujourd'hui, la plupart des réacteurs nucléaires de puissance utilisent un combustible à base d'un composé céramique, l'oxyde d'uranium. La conception du combustible et sa teneur en matières fissiles varient selon le type de réacteur. Le combustible des réacteurs à eau ordinaire, comme les réacteurs à eau sous pression, les réacteurs à eau bouillante et les nouveaux réacteurs refroidis par gaz, est enrichi de façon à augmenter jusqu'à 5 % sa teneur en uranium 235, matière fissile. Les réacteurs à eau lourde sous pression et les réacteurs CANDU, quant à eux, utilisent principalement de l'uranium naturel ou légèrement enrichi, dont la teneur en uranium 235 est d'environ 0,7 %.

Le cœur d'un réacteur à eau sous pression d'une puissance électrique de 1 000 mégawatts contient généralement entre 120 et 200 assemblages combustibles. Chaque assemblage combustible contient environ 500 kg d'oxyde d'uranium et peut générer quelque 200 millions de kilowattheures d'électricité au cours de sa durée de vie utile dans le cœur. Un réacteur de cette taille consomme environ 40 assemblages de combustibles par an, ce qui représente un total de 20 tonnes d'oxyde d'uranium.

Un combustible nucléaire est considéré comme utilisé lorsque la réaction de fission ne peut plus y être entretenue, ce qui arrive au bout de trois à sept ans dans un réacteur à eau sous pression, selon la nature du combustible nucléaire et sa disposition dans le cœur du réacteur. Bien qu'il ressemble à un assemblage combustible neuf lorsqu'il est retiré du cœur, le combustible utilisé est hautement radioactif et chaud. Il est transféré dans une piscine d'entreposage, car l'eau permet de le refroidir et d'assurer un bon blindage. Si nécessaire, après une période de refroidissement, il peut être transféré dans une installation d'entreposage à sec.

À l'heure actuelle, après une période d'entreposage appropriée, le combustible utilisé peut :

- être considéré comme un déchet devant être conditionné et stocké définitivement dans un dépôt géologique profond. Il s'agit du « cycle ouvert du combustible » ; ou
- faire l'objet d'un retraitement en vue de récupérer les matières fissiles restantes qui peuvent être réutilisées comme combustible neuf dans des réacteurs nucléaires, ce qui génère des déchets de haute activité qui seront stockés dans des dépôts géologiques profonds. C'est le « cycle fermé du combustible ».

Éta

Recyclage



Déchet de haute activité issu du retraitement





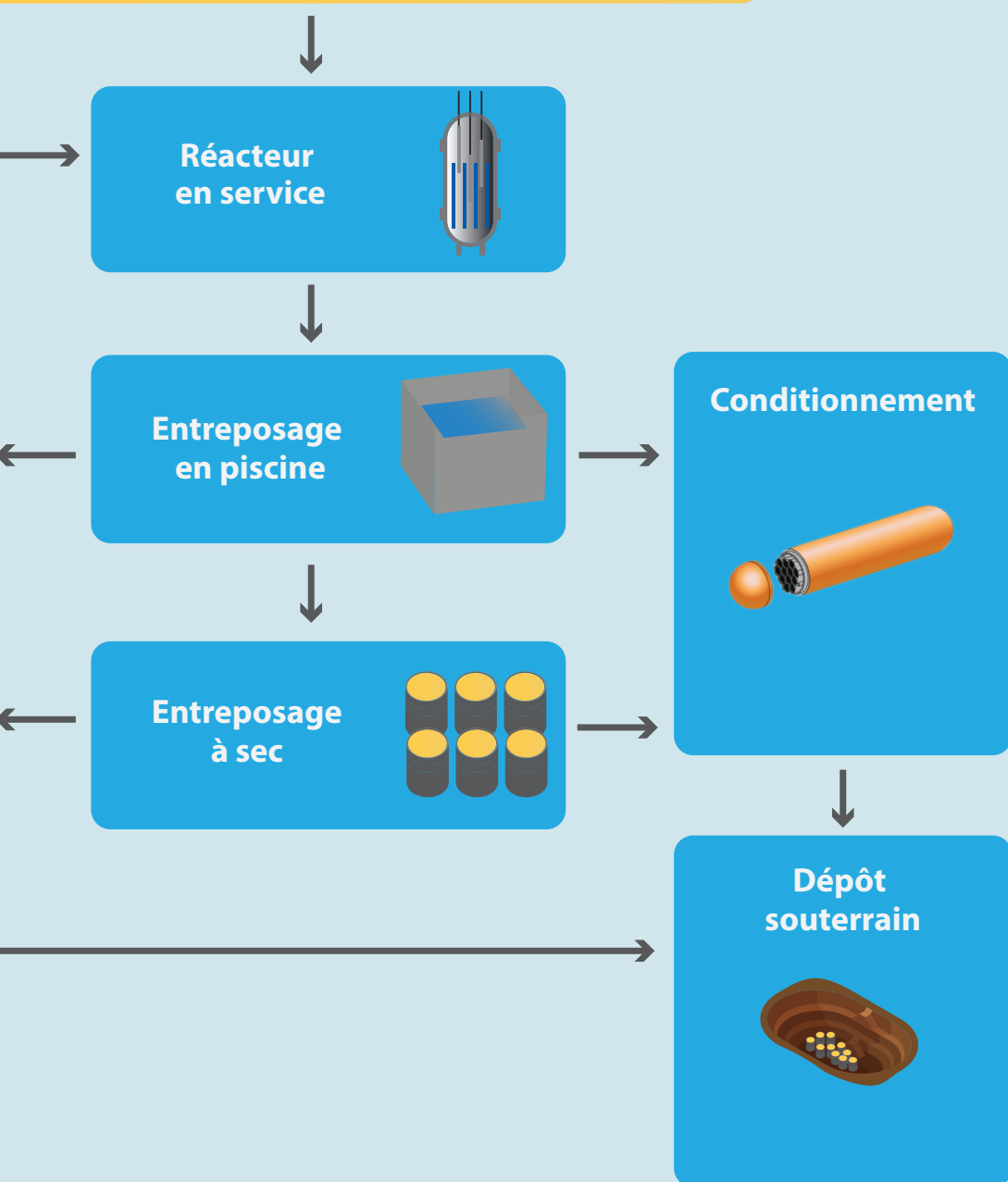
# Combustible nucléaire

## Étapes de la partie initiale du cycle du combustible nucléaire

Prospection et extraction de l'uranium

Enrichissement de l'uranium

Fabrication de combustible



# Une seule structure : la stratégie intégrée de la Russie en matière de gestion du combustible utilisé

Par Nicole Jawerth

Situé près de Krasnoyarsk, en Sibérie, le Combinat minier et chimique de la Russie offre un éventail complet de services pour la gestion du combustible utilisé. Ce combinat a été conçu pour traiter le combustible utilisé à ses différents stades sur un seul et même site. Dans de nombreux pays, les activités liées à la gestion du combustible qui n'est plus utile mais reste très radioactif sont effectuées dans des installations indépendantes, parfois distantes de centaines de kilomètres. En adoptant une approche intégrée, la stratégie de la Russie en matière de gestion du combustible utilisé vise à améliorer l'efficacité, à réduire les coûts et à optimiser la sûreté et la sécurité.

« L'industrie de l'électronucléaire russe ne cesse de se développer et d'augmenter sa contribution au bouquet énergétique global du pays. C'est pourquoi nous devons nous assurer que la gestion du combustible nucléaire utilisé est fiable, durable, sûre et sécurisée », déclare Anzhelika Khaperskaya, cadre supérieure au Bureau de projets de gestion du combustible nucléaire utilisé à la Corporation d'État de l'énergie atomique (Rosatom), qui est l'une des personnes chargées de la conception de l'approche intégrée. « Cette structure intégrée va nous aider à réduire les besoins en matière de transport de matières ou de déchets nucléaires, et nous permettre de centraliser les mesures de sûreté et de sécurité en un même lieu, ce qui présente en outre des avantages d'un point de vue économique. »

Situé à quelque 4 000 kilomètres à l'est de Moscou, en Sibérie centrale, le combinat a entrepris de redéfinir son but en fonction de cette approche intégrée en 2017. Le personnel présent sur le site et les installations existantes ont constitué le cadre nécessaire pour redonner de l'élan à l'intégration.

Précédemment, la Russie entreposait essentiellement son combustible utilisé et le traitait en partie à l'usine RT-1 de la Mayak Production Association, près d'Ekaterinbourg, à environ 1 600 kilomètres à l'est de Moscou, en Sibérie occidentale.

À la différence de l'usine RT-1, dont l'activité principale est le retraitement et qui est dotée d'une petite installation de fabrication pilote, le combinat comprend déjà des installations d'entreposage du combustible utilisé en piscine et à sec, ainsi que des installations de retraitement et de fabrication de combustibles neufs pour réacteurs à eau ordinaire et à neutrons rapides, et se dotera bientôt d'un laboratoire de recherche souterrain pour le stockage définitif des déchets de haute activité. Le combinat devrait devenir pleinement intégré et opérationnel à l'horizon 2035.

## Simplifier le processus

Des mesures de sûreté et de sécurité doivent être prises à chaque étape du processus de gestion pour protéger les personnes et l'environnement et réduire au minimum les risques d'attaques, de vols ou d'utilisation abusive de matières nucléaires.

Par exemple, le combustible utilisé est généralement transporté à plusieurs reprises : depuis le lieu où il a été utilisé (par exemple une centrale nucléaire), puis entre les installations sur différents sites d'entreposage, de retraitement, de fabrication ou de stockage définitif. Le mouvement des matières nucléaires nécessite des mesures de sûreté et de sécurité supplémentaires.

« D'un bout à l'autre de la stratégie intégrée, nous avons pris des mesures pour éliminer les risques pour la sûreté et la sécurité afin de protéger les personnes et l'environnement. Par exemple, nous avons regroupé plusieurs procédés de gestion, notamment l'entreposage en piscine et à sec, le retraitement et la fabrication de combustible neuf sur un seul et même site du combinat afin de réduire au minimum le transport de matières nucléaires », explique Petr Gavrilov, directeur général du Combinat minier et chimique, qui fait partie de Rosatom.

Pour mettre en place la nouvelle approche, il était indispensable de trouver des moyens efficaces de réduire le nombre de processus. Des experts du combinat, les plus grosses entreprises du secteur et l'Académie des sciences de Russie ont collaboré pour sélectionner, tester et parfois même mettre au point des technologies, des méthodes et des équipements nouveaux qui soient conformes aux normes de sûreté et aux orientations sur la sécurité de l'AIEA et qui permettent de résoudre des problèmes scientifiques et techniques complexes.

Le combinat va par exemple retraiter un nouveau type de combustible uranium-plutonium, appelé « REMIX », mis au point dans le cadre de l'approche intégrée visant à limiter au minimum les temps d'entreposage du combustible utilisé et à réduire la quantité de déchets radioactifs destinée au stockage définitif. Contrairement à d'autres types de combustibles nucléaires pour réacteurs à eau ordinaire, le REMIX peut être recyclé jusqu'à sept fois dans les centrales nucléaires actuelles. En d'autres termes, il peut alimenter un réacteur à eau ordinaire d'une centrale nucléaire pendant toute sa durée de vie.





**Intérieur d'un poste d'exploitation du Combinat chimique et minier. Le personnel supervise les assemblages de combustible nucléaire usé rechargés de manière automatique depuis l'installation d'entreposage en piscine vers l'installation d'entreposage à sec.**

(Photo : Combinat minier et chimique)

« Nous sommes en train de mettre au point des technologies de retraitement, de recyclage et de séparation nouvelles et innovantes, ainsi que des infrastructures liées au cycle du combustible nucléaire. D'une manière générale, nous tentons de diminuer l'impact de la gestion du combustible usé et de contribuer au développement durable à l'avenir en recyclant plusieurs fois l'uranium et le plutonium pour ce qui est des réacteurs à neutrons thermiques et des réacteurs à neutrons rapides, et en réduisant la radiotoxicité des déchets radioactifs », indique Anzhelika Khaperskaya.

## Stratégies nationales

En 2018, l'énergie d'origine nucléaire représentait 18,4 % de la production énergétique de la Russie. Chaque année, le pays produit environ 700 tonnes de combustible nucléaire usé provenant de ses centrales nucléaires, de ses réacteurs de recherche et de ses sous-marins. Le pays prévoyant de développer son industrie nucléaire, notamment par la mise en œuvre à grande échelle de réacteurs à neutrons rapides, le système intégré du Combinat minier et chimique devrait aider à réduire au minimum les incidences de ce développement.

« La manipulation sûre du combustible nucléaire usé est une orientation stratégique du développement de l'électronucléaire en Russie. Il est nécessaire d'assurer un entreposage sûr et économique du combustible nucléaire usé, qu'il soit ancien ou récemment produit, pour nos besoins en électronucléaire », souligne Petr Gavrilov. « Le combinat intégré va améliorer l'efficacité et la compétitivité de l'industrie nucléaire russe et rendre l'énergie nucléaire encore plus sûre et respectueuse de l'environnement. »

L'approche intégrée adoptée par la Russie n'est qu'un exemple parmi d'autres de la façon dont un pays peut gérer son combustible nucléaire usé. Tous les pays qui ont un programme électronucléaire se sont dotés de politiques et des stratégies de gestion du combustible usé.

Une stratégie nationale doit être adaptée à l'envergure et aux besoins du programme nucléaire du pays, et s'inscrire dans le plan énergétique global du pays. Si chaque stratégie est différente, la plupart d'entre elles tiennent compte des aspects techniques, politiques et socio-économiques ainsi que des aspects liés à la sûreté et la sécurité des différentes étapes de la gestion du combustible usé, et assurent le respect des normes de sûreté et des orientations sur la sécurité de l'AIEA.

Bien que les pays soient responsables de la gestion sûre et sécurisée de leur combustible nucléaire usé, l'AIEA leur donne des orientations techniques et les aide à échanger des informations afin que les stratégies soient élaborées en connaissance de cause. Elle fournit également des services spécialisés et des supports de formation en vue de la mise en œuvre de ces stratégies. Le combustible nucléaire usé étant un type de matières nucléaires, les garanties de l'AIEA jouent également un rôle essentiel en veillant à ce que ce combustible ne soit pas utilisé de manière abusive ou détournée des utilisations pacifiques.

# Le cycle du combustible nucléaire : l'exemple français et comment s'en inspirer

Par Shant Krikorian

Avec 58 réacteurs nucléaires de puissance produisant près de 72 % de son électricité en 2018, la France est l'un des pays où l'énergie d'origine nucléaire représente la plus grande part dans la production énergétique nationale. Cependant, le parc nucléaire génère aussi une grande quantité de combustible utilisé et de déchets radioactifs.

Qu'est-ce qui fait la force de la politique nationale française en matière de combustible utilisé ? Une législation stricte et un organisme de réglementation fort, mais surtout un parc nucléaire standardisé et une politique tendant à recycler le combustible utilisé, selon les experts français. Tout cela concourt à un approvisionnement efficace et sécurisé, et à une diminution du fardeau que constituent les déchets radioactifs.

En France, toutes les tranches en exploitation sont des réacteurs à eau sous pression de seulement trois types standard, tous conçus par Framatome : 34 réacteurs de 900 MWe à trois boucles, 20 réacteurs de 1 300 MWe à quatre boucles, et quatre réacteurs de 1 450 MWe à quatre boucles. Les réacteurs nucléaires de puissance français sont donc les plus standardisés des pays dotés d'un grand parc nucléaire. Il en résulte une approche standardisée de la partie terminale du cycle du combustible nucléaire, qui concerne la gestion du combustible utilisé et des déchets, le déclassement et la remédiation de l'environnement.

Pour gérer les quelque 1 150 tonnes de combustible utilisé qu'elle génère chaque année, la France, comme plusieurs autres pays, a décidé très tôt de fermer son cycle du

combustible nucléaire national en recyclant ou en retraitant le combustible utilisé. Ainsi, l'industrie nucléaire française peut récupérer et réutiliser l'uranium et le plutonium présents dans le combustible utilisé, réduisant du même coup le volume de déchets de haute activité.

Le processus de recyclage du combustible nucléaire consiste à convertir le plutonium utilisé (sous-produit se formant dans les réacteurs nucléaires de puissance lors de la combustion du combustible d'uranium) et l'uranium en un « mélange d'oxydes » (MOX), qui peut être réutilisé dans les centrales nucléaires pour produire à nouveau de l'électricité.

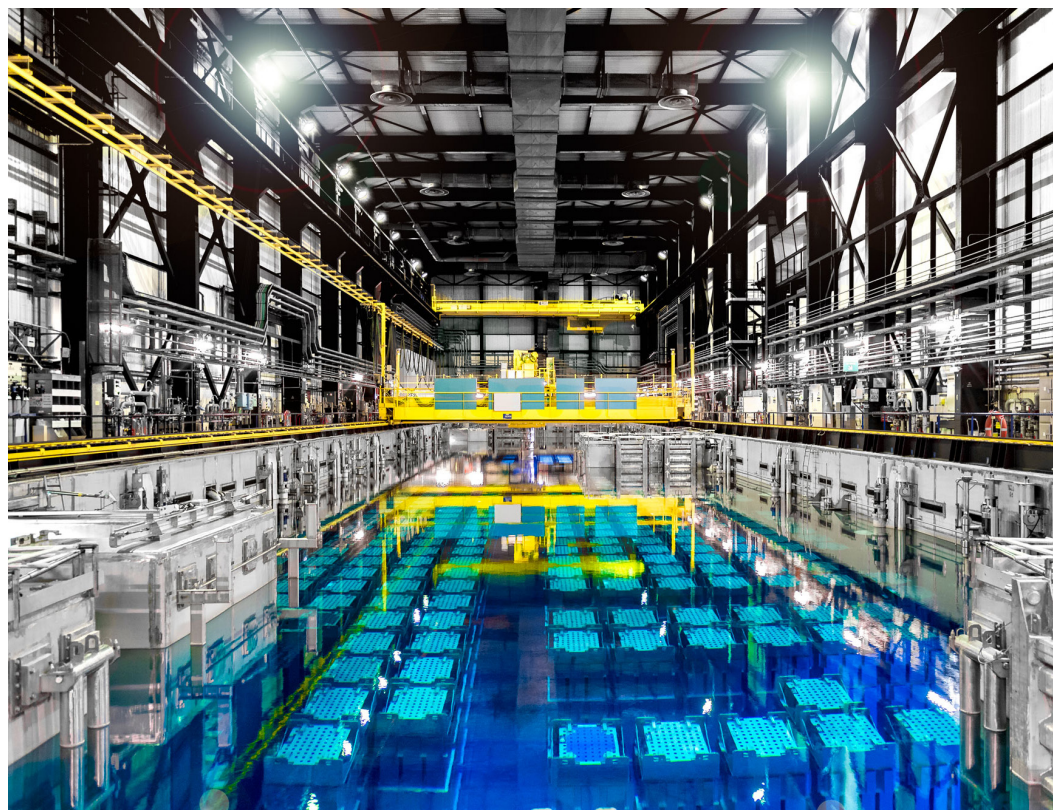
« Le recyclage du combustible utilisé est un élément important de la stratégie du secteur nucléaire français, qui est fort de plus de 30 ans d'expérience », indique Denis Lépée, premier vice-président et chef de la Division combustible nucléaire d'EDF, la compagnie d'électricité française qui exploite les centrales nucléaires du pays.

« On arrive à réduire le volume de matières et les déchets, et à conditionner ces derniers de manière sûre. Cette stratégie est un pilier de la production globale d'électricité nucléaire en France et contribue grandement à notre indépendance énergétique. »

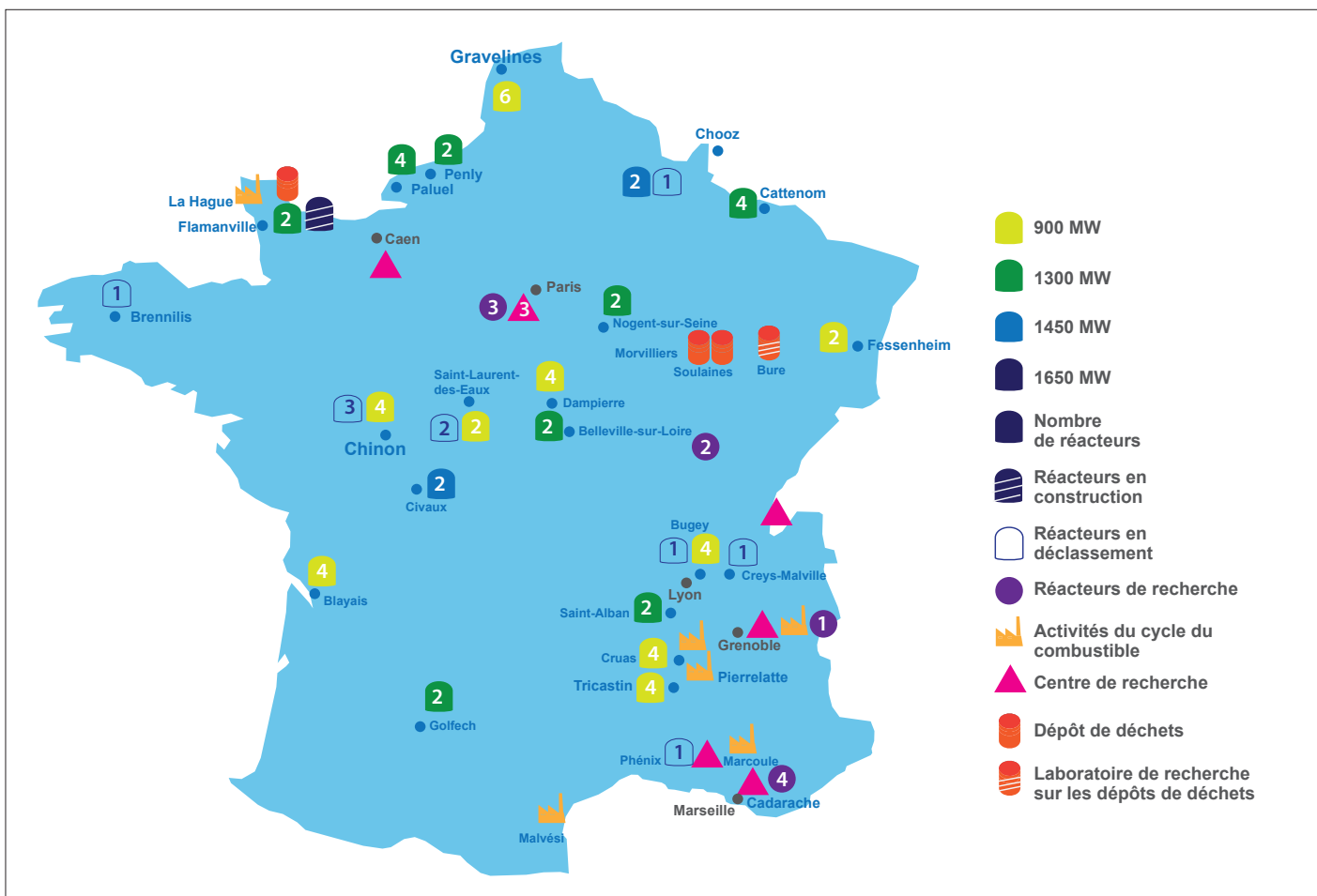
Le recyclage permet de récupérer jusqu'à 96 % des matières réutilisables du combustible utilisé. Dans son sixième rapport national établi au titre de la Convention commune sur

L'usine de retraitement Orano, à La Hague. Plus de 34 000 tonnes de combustible utilisé y ont été traitées depuis la mise en service du site en 1976.

(Photo : Orano)







### Carte des installations nucléaires françaises

(Source : EDF, CEA)

la sûreté de la gestion du combustible utilisé et sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs, la France indique que grâce à sa politique en matière de recyclage du combustible utilisé, l'exploitation de ses centrales requiert 17 % d'uranium naturel de moins que sans recyclage.

La société française Orano, chargée des activités relatives au cycle du combustible nucléaire, fournit le combustible des centrales nucléaires du pays et gère leurs déchets. Sa stratégie consiste à retraiter le combustible utilisé et à optimiser le rendement énergétique du combustible nucléaire. Le retraitement est effectué à l'usine de retraitement de La Hague et à l'usine de fabrication de combustible MOX de Marcoule.

Depuis sa mise en service, au milieu des années 1960, l'usine de La Hague a traité de manière sûre plus de 23 000 tonnes de combustible utilisé, soit assez pour alimenter le parc nucléaire français pendant 14 ans.

Les assemblages de combustible usés de plusieurs centrales nucléaires sont transportés à La Hague, où ils sont conservés dans une piscine d'entreposage. Les composants du combustible usé sont ensuite séparés et les matières recyclables sont récupérées. À l'installation Melox, le plutonium est mélangé avec de l'uranium appauvri pour produire du combustible MOX.

« Cette stratégie de retraitement et de recyclage requiert une coordination étroite et régulière entre les différents acteurs industriels », souligne John Czerwin, premier vice-président chargé de la promotion et de l'assistance commerciale chez Orano. Ces acteurs sont notamment les personnes chargées de la gestion des réacteurs, du combustible et des infrastructures de stockage définitif, qui garantissent la cohérence du système industriel intégré.

« Les avantages de cette stratégie sont confirmés : elle permet tout d'abord de réduire les déchets nucléaires ; mais aussi d'économiser les ressources d'uranium en améliorant la réutilisation des matières ; et enfin, de se préparer à l'avenir afin de renforcer l'indépendance énergétique de la France et de garantir une énergie nucléaire durable », ajoute John Czerwin.

L'Autorité de sûreté nucléaire française évalue régulièrement l'incidence de cette approche sur la sûreté.

# La gestion du combustible utilisé et des déchets radioactifs dans les pays primo-accédants

Par Shant Krikorian

Compte tenu de la demande croissante d'électricité à faible émission de carbone à grande échelle, de nombreux pays envisagent de recourir à l'électronucléaire pour répondre aux besoins accrus en énergie. Alors que neuf réacteurs nucléaires sont en chantier dans quatre pays accédant pour la première fois à l'électronucléaire, il est important que les instruments juridiques internationaux, les normes de sûreté, les orientations relatives à la sécurité et à l'énergie nucléaire et les prescriptions en matière de garanties soient respectés lors de l'élaboration d'un programme électronucléaire, lequel doit aussi couvrir la gestion et le stockage définitif du combustible utilisé et des déchets radioactifs.

D'après Mikhail Chudakov, directeur général adjoint de l'AIEA chargé de l'énergie nucléaire, il est important de se préoccuper de la gestion du combustible utilisé et des déchets radioactifs dès le début d'un programme électronucléaire dans les pays primo-accédants, comme le Bangladesh, le Bélarus, les Émirats arabes unis et la Turquie, car cette question a une incidence sur l'économie de l'électronucléaire et l'acceptation par le public.

L'AIEA appuie les États Membres dans l'élaboration de politiques relatives au combustible nucléaire utilisé dans le cadre de l'aide globale fournie aux pays primo-accédants sous la forme d'orientations, de missions d'examen intégré de l'infrastructure nucléaire (INIR) et d'ateliers régionaux, nationaux et internationaux sur des questions relatives au développement de l'infrastructure.

Le Directeur général de l'AIEA, Yukiya Amano, a invité à plusieurs reprises les pays primo-accédants à adhérer à la Convention commune sur la sûreté de la gestion du combustible utilisé et sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs et à la ratifier, insistant sur le fait que les principes de cette convention devaient être pris en considération dans le développement de l'infrastructure nucléaire nationale tout au long de l'élaboration d'un programme nucléaire.

Les missions INIR constituent des outils importants pour l'évaluation du stade de développement de l'infrastructure nucléaire nationale et permettent la formulation de

recommandations et d'orientations visant à assurer l'élaboration de programmes électronucléaires sûrs, sécurisés et responsables.

« Plusieurs décennies peuvent s'écouler entre la construction d'une centrale nucléaire et le stockage définitif de tous les déchets produits. C'est pourquoi il est important d'établir dès le début une stratégie et des plans techniques viables et de prévoir des méthodes de financement, de manière à assurer à chaque instant, à l'avenir, la sûreté et la sécurité ainsi que les ressources et les compétences nécessaires », souligne Milko Kovachev, chef de la Section du développement de l'infrastructure nucléaire de l'AIEA.

En ce qui concerne les déchets radioactifs, le message envoyé aux pays primo-accédants est qu'il importe de gérer ces déchets de manière à éviter de transmettre un fardeau excessif aux générations futures.

En matière de gestion du combustible utilisé, l'AIEA conseille aux primo-accédants :

- de s'assurer que l'infrastructure de gestion du combustible utilisé et des déchets radioactifs est entièrement développée au moment de la mise en œuvre des programmes électronucléaires. Il est préférable que l'infrastructure soit mise en place conformément à des politiques nationales et à des stratégies connexes en matière de combustible utilisé et de déchets radioactifs ;
- de tenir compte du fait que l'élaboration et la mise en œuvre de politiques nationales requièrent une approche systématique et progressive s'étalant sur plusieurs décennies ; et
- de construire une infrastructure de gestion des déchets radioactifs dès les premières étapes d'élaboration des programmes électronucléaires.



# Les petits réacteurs modulaires : posent-ils un problème pour la gestion du combustible usé ?

Par Irena Chatzis

Depuis de nombreuses années, les petits réacteurs modulaires (PRM) font l'objet de bien des discussions parmi les scientifiques et les chercheurs de l'industrie nucléaire, mais on ne sait pas dans quelle mesure leur mise en service, prévue l'an prochain, posera un problème pour la gestion du combustible usé ? Selon les experts, tout dépendra de la conception du PRM considéré et des pratiques existantes dans le pays en matière de gestion du combustible usé.

Les PRM, d'une capacité électronucléaire maximale de 300 MWe, sont relativement petits et offrent une souplesse d'utilisation : leur production peut varier en fonction de la demande. Cela les rend particulièrement attractifs pour les régions éloignées dotées d'un réseau électrique peu développé, mais ils sont aussi utiles comme compléments aux énergies renouvelables et pour des applications non électriques de l'énergie nucléaire. Après leur fabrication, les PRM peuvent être expédiés et installés sur site, ce qui devrait rendre leur construction plus abordable.

Il existe dans le monde environ 50 modèles et concepts de PRM à différentes étapes de développement. La construction ou la mise en service de trois centrales dont les réacteurs sont des PRM est à un stade avancé en Argentine, en Chine et en Russie. Elles devraient toutes entrer en service entre 2019 et 2022.

Les pays dotés d'un programme électronucléaire bien établi gèrent du combustible usé depuis des décennies, ce qui leur a permis d'acquérir une solide expérience et de disposer d'une infrastructure appropriée. Selon Christophe Xerri, directeur de la division du cycle du combustible nucléaire et de la technologie des déchets à l'AIEA, la gestion du combustible usé provenant des PRM ne devrait pas poser de problème à ces pays s'ils choisissent d'implanter des PRM basés sur les technologies actuelles.

Il explique que comme ce type de petit réacteur modulaire utilisera le même combustible que les grandes centrales nucléaires classiques, le combustible usé pourra être géré de la même façon que celui provenant des grands réacteurs. Même pour les PRM reposant sur de nouvelles technologies, comme les réacteurs à haute température refroidis par gaz, qui utiliseront un combustible emballé dans des blocs prismatiques en

graphite ou des boulets en graphite, les pays dotés de centrales nucléaires auront déjà trouvé des solutions pour entreposer et gérer le combustible usé. « Ils pourront utiliser les infrastructures existantes ou les adapter aux nouveaux flux de déchets radioactifs », indique Christophe Xerri.

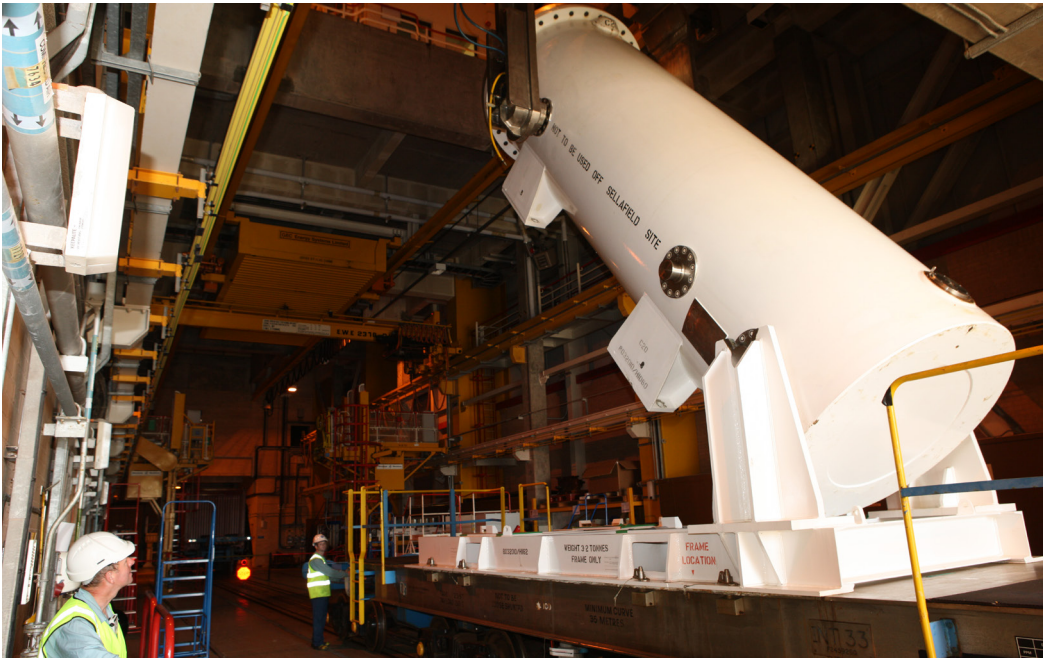
Les pays primo-accédants devraient porter une attention particulière à la gestion du combustible usé et mettre en place une infrastructure adaptée, parallèlement à l'introduction de l'électronucléaire, et ce même s'ils choisissent des centrales nucléaires classiques ou des PRM reposant sur les technologies actuelles. « Ils devront faire face à un plus grand nombre de problèmes s'ils optent pour une technologie inédite ou moins courante, faute d'expérience ou de références pour la gestion du cycle du combustible entier, ajoute Christophe Xerri. Les solutions visant à gérer le combustible usé et des déchets radioactifs des PRM comptent parmi les facteurs les plus importants à prendre en considération dans le choix d'une technologie, de même que la sécurité de l'approvisionnement en combustible ».

Les caractéristiques de certains modèles de PRM pourraient réduire les tâches liées à la gestion du combustible usé. Le combustible des centrales nucléaires de ce type doit être renouvelé tous les trois à sept ans, c'est-à-dire moins fréquemment que dans les centrales traditionnelles, qui nécessitent un rechargement chaque année ou tous les deux ans. Certaines centrales à PRM sont même conçues pour fonctionner jusqu'à 30 ans sans renouvellement du combustible. Néanmoins, même dans de tels cas, il restera du combustible usé qu'il faudra gérer de manière appropriée.

Le travail de recherche-développement sur le cycle du combustible pour certaines technologies de PRM devra être approfondi pour résoudre ces problèmes et soutenir les pays primo-accédants. Christophe Xerri souligne l'occasion unique offerte aux ingénieurs et aux concepteurs de travailler sur des solutions visant à améliorer la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs des PRM au tout début du développement. « Cette approche permettra de tenir compte des incertitudes concernant la partie terminale du cycle du combustible nucléaire, de réduire les coûts et de favoriser l'acceptation de l'électronucléaire par la société ». L'AIEA participe actuellement à plusieurs activités sur les PRM et intensifie ses efforts pour soutenir la recherche-développement des États Membres dans ce domaine.

# Promouvoir la sûreté et la sécurité du transport du combustible utilisé au Royaume-Uni

Par Nathalie Mikhailova



Le combustible utilisé est transporté dans des châssis de transport spécifiquement conçus pour protéger les personnes des matières radioactives qu'ils contiennent et pour résister à de graves accidents de transport sans entraîner de fuites importantes.

(Photo : International Nuclear Services)

**H**autement radioactif, le combustible nucléaire utilisé peut être la cible potentielle d'un vol ou d'un sabotage au cours de son transport. Le transport entre les installations exige donc une planification rigoureuse et la mise en œuvre de nombreuses mesures de sûreté et de sécurité.

Au Royaume-Uni, pays qui possède 15 réacteurs nucléaires de puissance, des entreprises spécialisées transportent le combustible utilisé de manière sûre et sécurisée, tant à l'intérieur du pays que depuis l'étranger, ayant parcouru plus de 19 millions de kilomètres au total au cours des dernières décennies. D'après les acteurs du secteur, le gage de leur réussite est la solidité du cadre réglementaire et l'efficacité de la communication entre les parties prenantes.

Au Royaume-Uni, le combustible utilisé est expédié de manière régulière, des expéditions ayant lieu presque chaque semaine. Le combustible utilisé des réacteurs de puissance est transporté en majeure partie vers l'installation de Sellafield, dans le comté de Cumbria, en Angleterre. Le transport du combustible utilisé est assuré, pour la majeure partie, par l'entreprise ferroviaire britannique Direct Rail Services, qui transporte des matières nucléaires depuis 1995 sans jamais avoir connu d'incident lié à des rejets de rayonnements.

« Nous avons les capacités et l'infrastructure nécessaires pour un transport sûr et sécurisé du combustible utilisé, et surtout, nous avons des décennies d'expérience », déclare

John Mulkern, secrétaire général de l'Institut mondial des transports nucléaires (WNTI), organisation en réseau qui représente les intérêts collectifs du secteur du transport des matières nucléaires. « Cette expérience est particulièrement précieuse dans le contexte marqué par la volonté de pays de se doter de programmes électronucléaires, lesquels souhaitent donc développer les systèmes de transport nécessaires », ajoute-t-il.

## Élaborer et promouvoir un cadre solide pour un transport efficace

L'AIEA aide les pays à élaborer et à mettre en œuvre des stratégies de transport conformes à ses normes de sûreté en la matière. Les prescriptions de sûreté particulières figurant dans la publication intitulée *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material* (IAEA Safety Standards Series No. SSR-6 (Rev. 1)) (version en français à paraître) ont été adoptées par l'Organisation internationale de l'aviation civile pour le transport aérien, par l'Organisation maritime internationale pour l'expédition par voie maritime et par des organismes de réglementation nationaux pour le transport terrestre par voie routière et ferroviaire.

Les prescriptions figurant dans cette publication, parue en anglais en 2018, portent notamment sur l'activité et la classification des matières radioactives, la définition des



types de colis et leurs contenus autorisés, la performance des modèles de colis et les critères d'essais pour chaque type. Pour chaque type de colis, elles définissent les conditions d'approbation des modèles par les organismes de réglementation nationaux, avant l'utilisation puis à des intervalles réguliers ; la documentation, l'étiquetage et le marquage ; les limites de température de surface externe, de rayonnement et de contamination ; les délais d'envoi ; et la formation.

Concernant l'emballage, les prescriptions sont établies en fonction du niveau de risque que présente la matière transportée. Pour ce qui est des matières radioactives à haut risque, comme le combustible usé, l'emballage doit être conforme aux normes applicables aux modèles et à la performance pour pouvoir résister à de graves accidents de transport les exposant à des chocs et à des incendies, sans provoquer de rejet important de son contenu. Les matières sont donc soumises à des tests rigoureux dans différentes situations. Par exemple, l'entreprise British Nuclear Fuels Limited a effectué toute une série de simulations d'accidents ouvertes au public lors desquelles un train percutait un château de transport de combustible usé à des vitesses avoisinant 160 km/h. Le château de transport n'avait subi que très peu de dégâts, ce qui a prouvé sa sûreté (voir l'encadré « En savoir plus »).

« Il est également important de donner aux populations locales l'assurance que les matières qui transitent par leurs villes et leurs villages sont sûres et sécurisées. Lorsque les gens voient des châteaux de transport, ils sont souvent inquiets », déclare John Mulkern. Par exemple, l'entreprise de gestion et de transport du combustible nucléaire International Nuclear Services organise régulièrement des réunions avec les habitants et les parties prenantes à Barrow-in-Furness, ville portuaire du nord de l'Angleterre reliée directement par axe ferroviaire

au site de Sellafield, pour parler des matières qu'elle transporte à travers le comté et dans le monde entier, et des mesures prises pour assurer la sûreté et la sécurité.

Le transport de marchandises dangereuses implique également de prévenir tout acte potentiel de vol ou de sabotage, ce qui exige une protection physique adéquate assurée grâce non seulement au modèle de conteneur, mais aussi à des procédures de sécurité pertinentes. L'AIEA apporte son concours aux pays qui en font la demande pour mettre au point et maintenir des régimes de protection physique, notamment en les aidant à établir des règlements et à réaliser des exercices de sécurité du transport. Ces exercices ont pour but de repérer toute défaillance potentielle dans le régime de sécurité du transport et d'y apporter les améliorations nécessaires.

### Et demain ?

« Au fur et à mesure qu'on avance, il est important d'encourager les jeunes à jouer un rôle direct dans l'industrie nucléaire, en particulier dans le secteur du transport », ajoute John Mulkern. « La construction de centrales nucléaires dans le monde entier nous impose de transmettre comme il convient l'expérience acquise et des connaissances spécialisées. Les gens doivent non seulement être informés, mais aussi savoir comment sont expédiés le combustible usé ou les déchets provenant du déclassement. Ils ont besoin en outre de travailler dans un climat de confiance pour assurer le transport de ces matières de manière appropriée. Nous devons continuer à assurer le transport conformément aux règles établies, à informer sur ce que nous faisons et à expliquer ce qui fait que nos activités sont menées de manière sûre. »

## EN SAVOIR PLUS

### Transporter le combustible nucléaire usé

Les types d'emballages destinés au transport des matières radioactives, et leurs critères de performance, sont définis en fonction du risque que présente leur contenu et les conditions dans lesquelles ils doivent assurer le confinement et le blindage des matières radioactives. Les emballages dits de type B servent à transporter les matières hautement radioactives, comme le combustible usé. Ils sont conçus pour résister non seulement à la chaleur produite par leur contenu radioactif, mais aussi à de graves accidents de transport sans entraîner d'importantes fuites de combustible usé.

Le transport des matières nucléaires implique en outre des prescriptions spécifiques concernant le marquage et l'étiquetage des colis et le placardage des moyens de transport, ainsi que la documentation, les limites de contamination et de rayonnement externes, les contrôles opérationnels, l'assurance de la qualité et la notification, et l'approbation de certaines expéditions et de certains types d'emballage.

# Développement de la toute première installation de stockage définitif sûr du combustible utilisé

Par Nathalie Mikhailova

Après plusieurs décennies pendant lesquelles la Finlande et la Suède se sont attachées à mettre en œuvre des stratégies de stockage définitif et à collaborer en vue de mettre au point une solution de stockage définitif sûr fondée sur un modèle suédois, le tout premier dépôt géologique profond destiné au combustible utilisé est en construction à Olkiluoto (Finlande). La Suède, comme d'autres pays, cherche aussi à construire ce type d'installation.

Une fois retiré d'un réacteur nucléaire, le combustible utilisé continue de dégager une chaleur importante pendant plusieurs décennies. Il est donc placé dans des piscines ou dans des installations d'entreposage à sec afin qu'il refroidisse. Les piscines d'entreposage et les conteneurs permettent d'assurer que le combustible utilisé conserve son intégrité, qu'aucun rayonnement n'est émis et qu'aucune matière radioactive n'est rejetée, de sorte que les personnes et l'environnement soient protégés de toute exposition. Le combustible utilisé reste cependant hautement radioactif pendant plusieurs milliers d'années et doit être isolé pendant plusieurs centaines de milliers d'années.

Quand il est considéré comme un déchet, le combustible utilisé, une fois refroidi, peut par exemple être stocké à plusieurs centaines de mètres de profondeur dans des installations de stockage définitif en formations géologiques profondes, qui sont des installations d'entreposage en structures artificielles. Cette mesure a pour but de contenir la radioactivité en plaçant le combustible utilisé dans de solides conteneurs étanches et de l'isoler en l'enterrant. Ces installations sont constituées d'un système de tunnels ou de chambres construit sur un site géologiquement approprié pour assurer la sûreté à long terme du matériel enterré (voir l'encadré « En savoir plus »).

L'installation en construction en Finlande est basée sur le concept de stockage définitif « KBS-3 » mis au point par la Société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires (SKB) en étroite coopération avec Posiva, la société finlandaise chargée du stockage définitif du combustible nucléaire utilisé. Avec la méthode KBS-3, le combustible utilisé est placé dans des conteneurs en cuivre résistants à la corrosion qui sont ensuite enrobés d'argile gonflante à l'intérieur de tunnels de dépôt situés à une profondeur maximale de 500 mètres.

Selon les propos de Magnus Westerlind, conseiller principal à la SKB, « outre le fait que la Finlande et la Suède aient toutes deux opté pour le stockage définitif direct du combustible utilisé, elles possèdent des réacteurs similaires et ont donc un combustible utilisé similaire. Il était logique pour nos deux pays de renforcer la coopération directe dans le cadre de différentes activités de recherche-développement. Nous avons par exemple fait tout ce que nous pouvions en ce qui concerne

la mise au point des conteneurs en cuivre dans le cadre d'un projet commun ».

Dans les deux pays, les décisions prises par les pouvoirs publics à la fin des années 1970 et au début des années 1980 ont conduit à l'adoption de politiques imposant aux producteurs de déchets nucléaires d'assumer aussi la responsabilité de leur gestion. En Finlande, jusqu'en 1996, le combustible utilisé provenant de la centrale nucléaire de Loviisa était transporté en vue de son retraitement en Union Soviétique, puis en Russie. Lorsque le Gouvernement finlandais a délivré l'autorisation d'exploitation pour la centrale nucléaire d'Olkiluoto en 1978, il a demandé au titulaire de licence d'élaborer un plan de gestion des déchets radioactifs, y compris pour le combustible nucléaire utilisé, qui devait être stocké définitivement en Finlande.

En Suède, les propriétaires de centrales nucléaires se sont regroupés à la fin des années 1970 pour former un organisme commun, la SKB, en vue d'assurer conjointement la gestion du combustible utilisé. Des activités de recherche-développement ont ensuite été mises en œuvre afin de mettre au point un concept de stockage définitif qui avait finalement débouché sur la méthode KBS-3. Ce concept, retenu en 1983 comme moyen approprié de stockage définitif, a encore été affiné depuis lors. Un site a été choisi pour l'appliquer et les plans pour la construction sont en cours d'élaboration.

« Le processus d'examen, qui a lieu tous les trois ans, est un élément important de la mise en œuvre effective de la stratégie de stockage définitif, explique Magnus Westerlind. Lors de ce processus, de nombreuses parties, par exemple des universités, des organismes publics, des organisations non gouvernementales et des municipalités, sont invitées à formuler des observations sur notre stratégie. Ces observations ont non seulement largement contribué à l'examen technique de notre programme mais nous ont aussi permis de nous assurer que le programme était conforme aux politiques suédoises. On s'est efforcé et on s'efforce toujours activement de faire accepter au public le choix du site et de la construction d'une installation de stockage définitif du combustible utilisé, et de s'assurer de son appui. »

## Construction de la première installation de stockage définitif en Finlande

Avant le début de la construction d'une installation de stockage définitif, l'entreprise chargée de l'application du concept doit obtenir un permis de construire. En Finlande, le permis a été délivré en 2015. C'était la toute première fois qu'un permis de construire était délivré pour une installation de stockage géologique.



Le site a été choisi après plusieurs années de sélection et d'élimination de plusieurs sites potentiels. Après avoir étudié la masse terrestre du pays en se basant sur des données géologiques, Posiva a poursuivi la caractérisation de sites précis dans le cadre d'études propres au site, portant notamment sur le forage, de façon à trouver un environnement géologiquement approprié. Au cours de ce processus, Posiva a entamé des discussions avec plusieurs municipalités sur la construction d'une installation.

« L'acceptation par la société et les facteurs sociaux jouent un rôle décisif dans la sélection de sites », indique Jussi Heinonen, directeur du Département de la réglementation et des garanties en matière de déchets nucléaires de l'Autorité finlandaise de sûreté radiologique et nucléaire (STUK). « L'acceptation par la société repose sur la confiance accordée à l'organisme chargé de la mise en œuvre, à l'organisme de réglementation et aux décideurs. Il est nécessaire d'inspirer et de maintenir cette confiance », poursuit-il.

Posiva construit actuellement l'installation de stockage définitif Onkalo à plus de 400 mètres de profondeur et va bientôt commencer les travaux d'excavation des tunnels de stockage définitif. Le processus de stockage définitif doit démarrer en 2024.

### Avancées dans d'autres pays

En 2011, la SKB a présenté une demande d'autorisation pour la construction d'une installation de stockage définitif à Forsmark, à 150 kilomètres au nord de Stockholm, laquelle a été examinée par l'Autorité suédoise de sûreté radiologique (SSM) et par le tribunal des sols et de l'environnement. Ces autorités ont depuis lors soumis leurs



**L'installation de stockage définitif du combustible usé en construction à Olkiluoto (Finlande) est constituée d'un système sophistiqué de tunnels. Onkalo sert également à caractériser la roche hôte, l'objectif étant d'aider à l'élaboration de l'argumentaire de sûreté.**

(Photo : Posiva Oy)

observations au gouvernement, qui rendra une décision finale concernant l'autorisation.

La Finlande et la Suède ne sont pas les seuls pays à avoir progressé dans ce domaine. En France, l'agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, Andra, élabore actuellement une demande d'autorisation. Au Canada et en Suisse, l'organisme national chargé de la gestion des déchets radioactifs recherche des sites appropriés au moyen de la caractérisation des sites.

## EN SAVOIR PLUS

### Installations de stockage définitif en formations géologiques profondes

Des travaux de recherche approfondis ont permis de déterminer la capacité de divers types de roches à accueillir des installations de stockage définitif en formations géologiques profondes afin d'isoler les déchets radioactifs. Ces installations de stockage définitif sont construites dans des formations géologiques stables, à une profondeur de plusieurs centaines de mètres, et conçues pour contenir des déchets de haute activité pendant des centaines de milliers d'années.

L'intégration de dispositifs de sûreté passive est l'une des caractéristiques majeures des installations de stockage définitif dans des formations géologiques profondes, c'est-à-dire qu'après la fermeture de l'installation, aucune intervention humaine n'est requise.

La construction de ces installations de stockage définitif à plusieurs centaines de mètres de profondeur, permettant d'isoler efficacement et pendant des centaines de milliers d'années les déchets radioactifs de perturbations qui pourraient se produire à la surface, suppose de placer les déchets dans un environnement géologique non dynamique et non dans un environnement proche de la surface, où les conditions sont généralement moins stables.

# S'adapter à la croissance : la stratégie de la Chine en matière de gestion du combustible utilisé

En raison de la forte expansion économique qui a commencé au début des années 1990, les autorités chinoises considèrent l'énergie nucléaire comme un élément clé pour la sécurité de l'approvisionnement énergétique du pays et la réduction de son empreinte carbone. La Chine a lancé un ambitieux programme électronucléaire, qui s'est développé au fil des ans.

La Chine exploite actuellement 46 réacteurs nucléaires d'une capacité énergétique totale de 45 GWe, qui produisent environ 4 % de l'électricité du pays. Avec 11 nouveaux réacteurs en chantier ou en projet, la Chine a sur son territoire 20 % des réacteurs nucléaires en construction dans le monde. Selon les estimations de l'Académie d'ingénierie de Chine, la capacité nucléaire du pays devrait atteindre 150 GWe d'ici 2035 et 300 GWe d'ici 2050.

Si ces prévisions se réalisent, la quantité de combustible utilisé à gérer augmentera proportionnellement. Par conséquent, la Chine développe sa stratégie relative au cycle du combustible nucléaire, étendant son infrastructure de gestion du combustible utilisé et des déchets radioactifs.

La Chine a opté pour une politique en faveur d'un cycle fermé du combustible nucléaire, qui comprend notamment l'entreposage du combustible utilisé dans des installations situées sur le site du réacteur ou hors de celui-ci, puis le transport du combustible utilisé en vue de son recyclage et de sa réutilisation dans des réacteurs à neutrons rapides. Son premier prototype, le réacteur rapide expérimental chinois (CEFR) de 65 MWe,

a été couplé au réseau en 2011 et a servi de référence pour l'élaboration d'un réacteur à neutrons rapides de démonstration de 600 MWe, lequel est en construction et devrait être mis en service d'ici 2023. La première tranche commerciale, d'une capacité comprise entre 1 000 et 1 200 MWe, pourrait être mise en chantier en décembre 2028 et mise en exploitation vers 2034. D'après la stratégie électronucléaire officielle de la Chine, la technologie des réacteurs à neutrons rapides devrait prendre une place prépondérante d'ici le milieu du siècle.

Dans l'intervalle, la stratégie consiste à retraiter le combustible utilisé des réacteurs à eau sous pression (REP) existants et à le recycler sous forme de combustible à mélange d'oxydes (MOX) pour alimenter des REP. La Chine, qui exploite déjà, dans la province du Gansu, une usine de retraitement pilote d'une capacité de 200 tonnes d'uranium par an (tU/an), a signé en janvier 2018 un accord avec la France pour la construction d'une usine de retraitement et de recyclage en vue de produire du combustible MOX destiné aux REP. En juin 2018, Orano et la Compagnie nucléaire nationale chinoise ont lancé les travaux préparatoires relatifs à l'usine de retraitement du combustible utilisé, qui aura une capacité de 800 tU/an.

Un dépôt géologique destiné au stockage définitif de déchets hautement radioactifs devrait être achevé d'ici 2050. Le site devant accueillir un laboratoire souterrain a été choisi, et la construction devrait être terminée d'ici 2026.

**Entreposage du combustible utilisé à la centrale nucléaire de Qinshan (Chine). Le combustible utilisé doit être entreposé sur le site dans des conteneurs protégés et ventilés en attendant l'achèvement de l'installation de recyclage et de retraitement du combustible utilisé de la Chine.** (Photo : M. Gaspar/AIEA)





# Nouveau cours en ligne sur la gestion du combustible usé des réacteurs nucléaires de puissance

Par Natalia Ivanova

L'AIEA a conçu un cours en ligne donnant une vue d'ensemble des différentes stratégies de gestion du combustible usé appliquées dans le monde. Ce cours s'inscrit dans le programme relatif à la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs, au déclassement et à la remédiation de l'environnement, lequel comprend plusieurs autres modules.

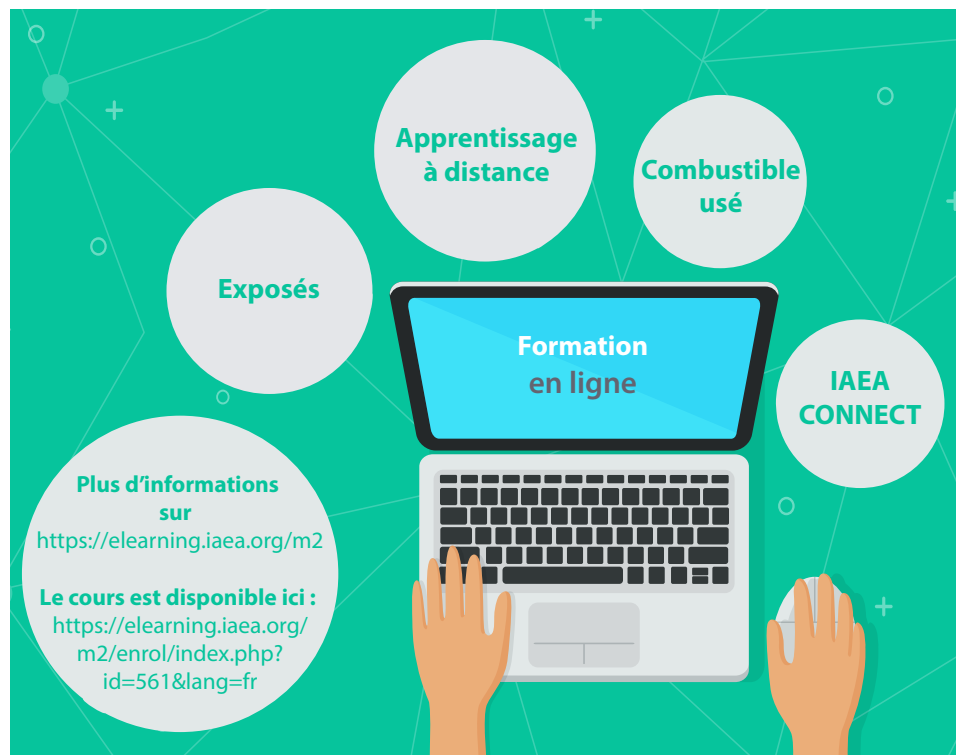
Destiné tant aux professionnels du nucléaire qu'aux débutants dans le domaine en question et aux étudiants en ingénierie et en sciences, il expose différentes manières de gérer le combustible usé et les facteurs qui peuvent entrer en compte dans le choix d'une stratégie par un pays. C'est le cours le plus détaillé élaboré par l'AIEA sur le sujet à ce jour.

Actuellement, quatre des 13 exposés sont disponibles sur la Cyberplateforme d'apprentissage pour la formation théorique et pratique en réseau de l'AIEA, ainsi que sur la plateforme IAEA CONNECT. Les autres seront mis en ligne d'ici début 2020. Ils seront disponibles en français, ainsi qu'en anglais, en espagnol, en japonais et en russe.

## Contenu du cours

Les deux premiers exposés présentent la gestion du combustible usé et en couvrent tous les aspects, du retrait du cœur du réacteur nucléaire au stockage définitif en dépôt géologique profond, une fois le combustible usé considéré comme déchet. Ils donnent un aperçu des différentes options en matière de gestion du combustible usé, des facteurs qui influent sur le choix d'une stratégie et des possibilités qui s'offrent ensuite pour chaque option choisie. Les exposés 3 et 4 portent sur les possibilités et les technologies d'entreposage du combustible usé, en piscine et à sec, ainsi que sur les considérations générales de sûreté en la matière visant à atteindre l'objectif fondamental de protéger les personnes et l'environnement des effets nocifs des rayonnements ionisants.

« Les autres exposés couvriront les caractéristiques du combustible usé et le transport, ainsi que les technologies de recyclage et les cycles du combustible innovants pour les réacteurs de quatrième génération », indique Amparo González Espartero, responsable technique de la gestion du combustible usé à l'AIEA.



« Le contenu technique de ces exposés a été élaboré par un groupe d'experts de pays ayant des vues et des stratégies différentes en matière de gestion du combustible usé. Il est donc très équilibré et s'appuie sur des faits et des chiffres », précise-t-elle.

Les exposés commencent avec une liste et un bref résumé des objectifs d'apprentissage en ligne, suivis d'explications plus détaillées. Chaque exposé comprend plusieurs chapitres, pour une présentation progressive du sujet, et se termine par un court questionnaire visant à tester les connaissances des utilisateurs, ainsi que par des résumés audio revenant sur les points clés. La structure modulaire permet aux utilisateurs d'étudier les différents sujets à leur rythme. Afin que les informations soient présentées de manière attrayante et rendues plus accessibles, les modules comportent différents formats média, comme des vidéos et des exercices interactifs. Le texte des exposés ainsi que des documents supplémentaires et un glossaire sont également mis à disposition pour faciliter la compréhension.

# La gestion du combustible utilisé : quarante ans de recherche

Par Laura Gil

L'essor de la construction de centrales nucléaires dans les années 1960 et 1970 laissait présager une nouvelle ère de l'énergie, mais aussi un nouveau défi : la gestion du combustible utilisé retiré des centrales. Ce combustible était-il recyclable ? Pouvait-il être stocké définitivement ? Pouvait-il être entreposé, et si oui, combien de temps et dans quelles conditions ?

Au fil des ans, les experts ont répondu à ces questions. Les résultats de près de quatre décennies de recherche coordonnée par l'AIEA consacrée à la gestion du combustible nucléaire utilisé sont maintenant présentés dans une nouvelle publication. Le document technique de l'AIEA intitulé *Behaviour of Spent Power Reactor Fuel during Storage* (IAEA-TECDOC-1862) rassemble des données, des observations et des recommandations sur le comportement du combustible utilisé des réacteurs de puissance pendant l'entreposage, recueillies par des experts du domaine depuis 1981.

« Lorsque nous avons commencé nos travaux de recherche avec l'AIEA, au début des années 1980, nous savions que l'entreposage du combustible utilisé, hautement radioactif, soulevait de nombreuses questions techniques et scientifiques », se souvient Ferenc Takáts, directeur exécutif de la société hongroise de conseil en ingénierie TS Enercon. « Nous cherchions des informations de base sur le sujet en vue de créer une base de données générales de pays expérimentés, car à l'époque, il n'en existait pas. »

Lorsque l'énergie d'origine nucléaire était à ses débuts, de nombreux pays avaient prévu de recycler leur combustible utilisé, optimisant ainsi l'utilisation de l'uranium. La première étape du recyclage est le retraitement : lors de ce procédé chimique, le plutonium et l'uranium non utilisés ainsi que les autres matières fissiles présents dans le combustible sont séparés afin d'être réutilisés dans de nouveaux combustibles à mélange d'oxydes (MOX). La France, la Russie et le Royaume-Uni possèdent actuellement des usines de retraitement à l'échelle industrielle.

Plusieurs autres pays, dont le Canada, les États-Unis, la Finlande et la Suède, ont opté pour le stockage définitif de leur combustible utilisé plutôt que pour le recyclage. Le stockage définitif consiste à enfouir le combustible utilisé profondément sous terre, de manière sûre, dans des conditions ne permettant pas de le récupérer.

Initialement, tous les pays avaient prévu de retraiter leur combustible utilisé, dans leurs propres installations ou bien à l'étranger. Cependant, dans les années 1980 et 1990, le stockage définitif direct a été privilégié par la majorité des pays, en raison du faible prix de l'uranium d'alors et des préoccupations environnementales suscitées par le retraitement. Au début des années 2000, le retraitement a connu un regain d'intérêt, en raison d'un besoin en électricité bon marché à faible émission de carbone et des préoccupations concernant la disponibilité à long terme de l'uranium.

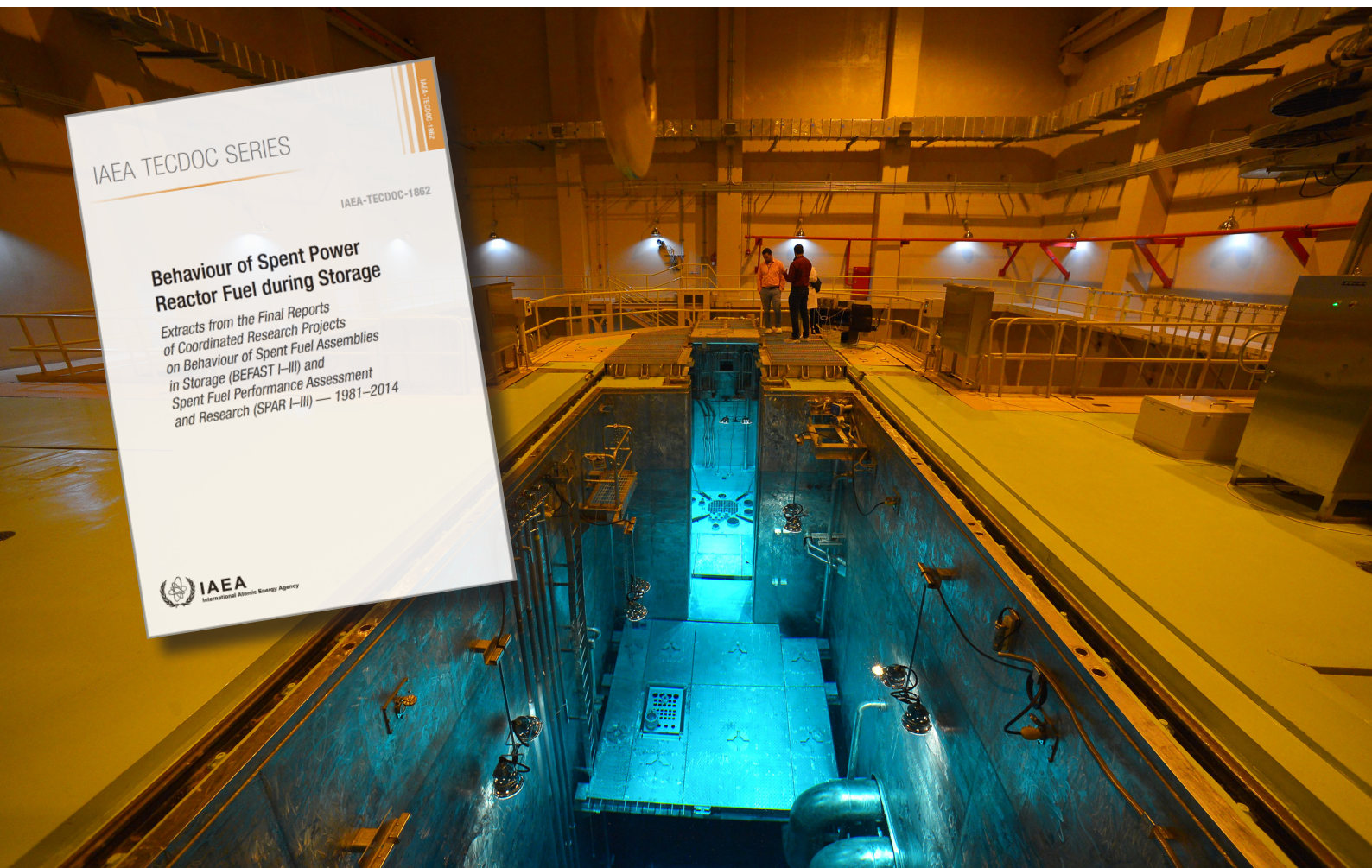
Bien que le sujet ait été largement discuté et que les mentalités aient changé, les autorités ont plusieurs fois retardé leur décision, et l'entreposage temporaire du combustible utilisé a finalement duré plus longtemps que prévu.

## Projet de recherche de l'AIEA

Afin de proposer une option autre que l'entreposage provisoire, l'AIEA a lancé une série de projets de recherche coordonnée (PRC) en 1981. Des experts de dix pays ont commencé à étudier le comportement du combustible utilisé pendant l'entreposage (projet BEFAST), couvrant toutes les activités liées à l'entreposage du combustible avant son retraitement ou son stockage définitif. Les pays participants ont communiqué les résultats de leurs travaux de recherche-développement concernant les questions fondamentales relatives à l'entreposage, et ont commencé à élaborer une base de données pour aider à évaluer les technologies d'entreposage du combustible utilisé en vue d'un entreposage pendant de très longues périodes. Une nouvelle série de PRC a été lancée en 1997 et était axée cette fois sur l'évaluation de la performance du combustible utilisé et la recherche dans ce domaine (SPAR).

Trente organisations de 21 pays et la Commission européenne ont mené des travaux de recherche dans le cadre des projets BEFAST et SPAR, qui ont permis l'échange d'informations utiles aux exploitants d'installations du cycle du combustible, aux concepteurs de centrales nucléaires, aux responsables de la réglementation, aux fabricants, et en particulier aux responsables de l'élaboration des évaluations de la sûreté. « Chacun peut apporter un point de vue différent quand il s'agit de résoudre un problème commun », fait remarquer Ferenc Takáts.





Lorsque Ferenc Takáts travaillait pour un cabinet de conseil hongrois en 1997, le programme électronucléaire de la Hongrie était en place depuis plus de dix ans. Comme le combustible usé ne pouvait pas être exporté, une installation d'entreposage à sec supplémentaire a dû être construite à côté de la centrale, non sans difficultés, car certains responsables de la réglementation s'inquiétaient de ce que le combustible usé, qui était toujours radioactif et émettait beaucoup de chaleur au début, serait trop chaud pour être entreposé.

« En raison de ces incertitudes, la limite de température d'entreposage avait été fixée à 350 degrés Celsius, ce qui compliquait inutilement la tâche du concepteur », explique Ferenc Takáts, ajoutant que les résultats du projet de l'AIEA ont beaucoup aidé à informer les responsables de la réglementation. « Heureusement, je participais au PRC BEFAST et j'ai pu consulter un expert d'Allemagne, pays où le comportement des gaines de combustible nucléaire en entreposage à sec à hautes températures est bien mieux connu. Grâce à ces données de l'étranger, nous avons pu montrer que notre réglementation était trop stricte et que nous devons

la modifier en nous appuyant sur la recherche collective », poursuit-il.

Une étude s'appuyant sur les conclusions du PRC a été soumise à la personne responsable de la réglementation, qui en a accepté les conclusions et a augmenté la température limite d'entreposage. Ce n'est là qu'un des nombreux exemples illustrant le bénéfice que les exploitants ont pu tirer des travaux de recherche menés par des experts sous la coordination de l'AIEA.

« Tous ces travaux de recherche nous aident à assurer une veille technologique constante sur la performance du combustible usé », déclare Laura McManniman, spécialiste de la gestion du combustible usé à l'AIEA. « Ces projets sont un bon moyen de collaborer et de mener des travaux de recherche, car ils offrent aux experts un cadre permettant d'échanger librement des informations. »

Les données saillantes des travaux de recherche, consignées dans le document IAEA-TECDOC-1862, sont disponibles en ligne, et en version papier sur demande



# Intégrer les garanties dans la conception des installations d'entreposage de combustible utilisé

Par Adem Mutluer

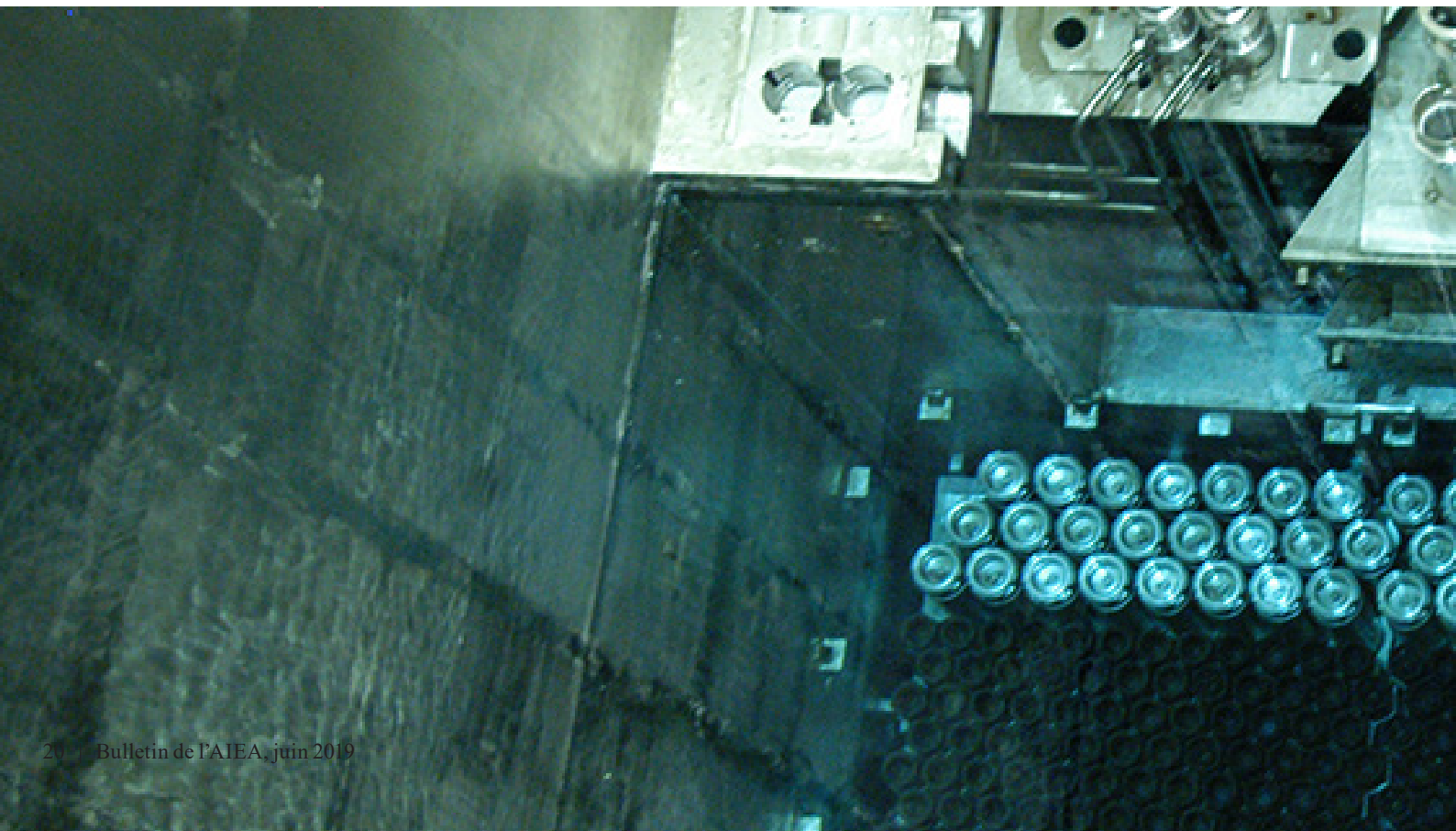
L'AIEA s'emploie à renforcer la contribution de la technologie nucléaire à la paix et à la prospérité dans le monde, tout en veillant à ce que les matières nucléaires ne soient pas détournées de leurs utilisations pacifiques. Les garanties de l'AIEA, qui occupent une place importante dans le régime mondial de non-prolifération nucléaire, permettent de vérifier de manière indépendante que les États respectent les obligations juridiques internationales qui leur incombent. À cette fin, l'AIEA fournit des orientations, dans ses publications de la collection consacrée à l'intégration des garanties dans la conception, dans le but d'aider les concepteurs et les exploitants d'installations nucléaires à considérer dès le début de la conception les activités de garanties applicables aux installations nucléaires, notamment aux installations d'entreposage de combustible utilisé.

Il n'est pas obligatoire de prendre en considération les prescriptions en matière de garanties en amont de la construction ou de la modification d'une installation. Toutefois, cette pratique, appelée « intégration des garanties dans la conception », facilite et améliore la mise en œuvre de ces prescriptions. Si elle est appliquée, les inspections effectuées au titre des garanties seront menées de manière plus efficace et plus efficiente, ce qui réduira la contrainte qu'elles représentent pour l'exploitant de l'installation.

« L'objectif est de construire de nouvelles installations du combustible utilisé dans lesquelles l'application des garanties est facilitée », explique Jeremy Whitlock, chef de la Section des concepts et méthodes, au Département des garanties de l'AIEA. « Prendre des dispositions en ce sens dès la conception et la construction de ces installations permet d'effectuer les activités de garanties en perturbant le moins possible l'exploitation de l'installation inspectée. »

La prise en compte des garanties aux premières étapes du processus de conception et de construction facilite un dialogue ouvert entre les parties prenantes concernant l'exploitation de l'installation, les prescriptions en matière de garanties et d'autres sujets connexes. Cela permet d'élaborer des méthodes de vérification qui réduisent au minimum les implications de l'application des garanties pour l'exploitant, sans réduire l'efficacité des activités de garanties. En outre, ces méthodes rendront les garanties plus efficaces, en aidant l'AIEA à effectuer ses activités de vérification de manière optimale.

Par ailleurs, un concepteur qui comprend les activités de garanties pourra mieux anticiper les besoins liés aux activités de vérification. Il s'agira, par exemple, de réduire le plus possible l'exposition des inspecteurs aux rayonnements, de faciliter l'accès au matériel des garanties dans le cadre d'une maintenance, de prévoir des moyens de télétransmission



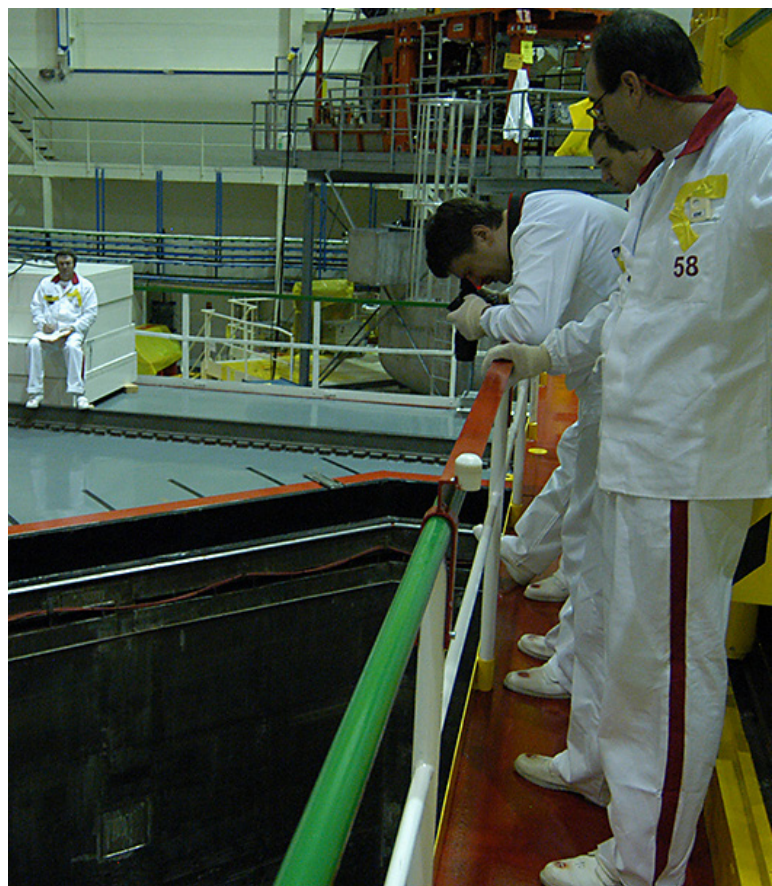
des données collectées sur site et d'atténuer les effets des événements susceptibles de perturber la vérification.

Les installations d'entreposage de combustible usé correspondent à une étape essentielle du cycle du combustible nucléaire, et les garanties de l'AIEA continueront à évoluer pour répondre aux difficultés que pose la vérification de ces installations. L'application des garanties aux installations d'entreposage de combustible usé représente une partie importante du travail de vérification de l'AIEA. En 2018, les garanties ont été appliquées à 82 de ces installations, dans plus de 25 États dans le monde. Ces installations abritent près de 57 000 quantités significatives de matières nucléaires.

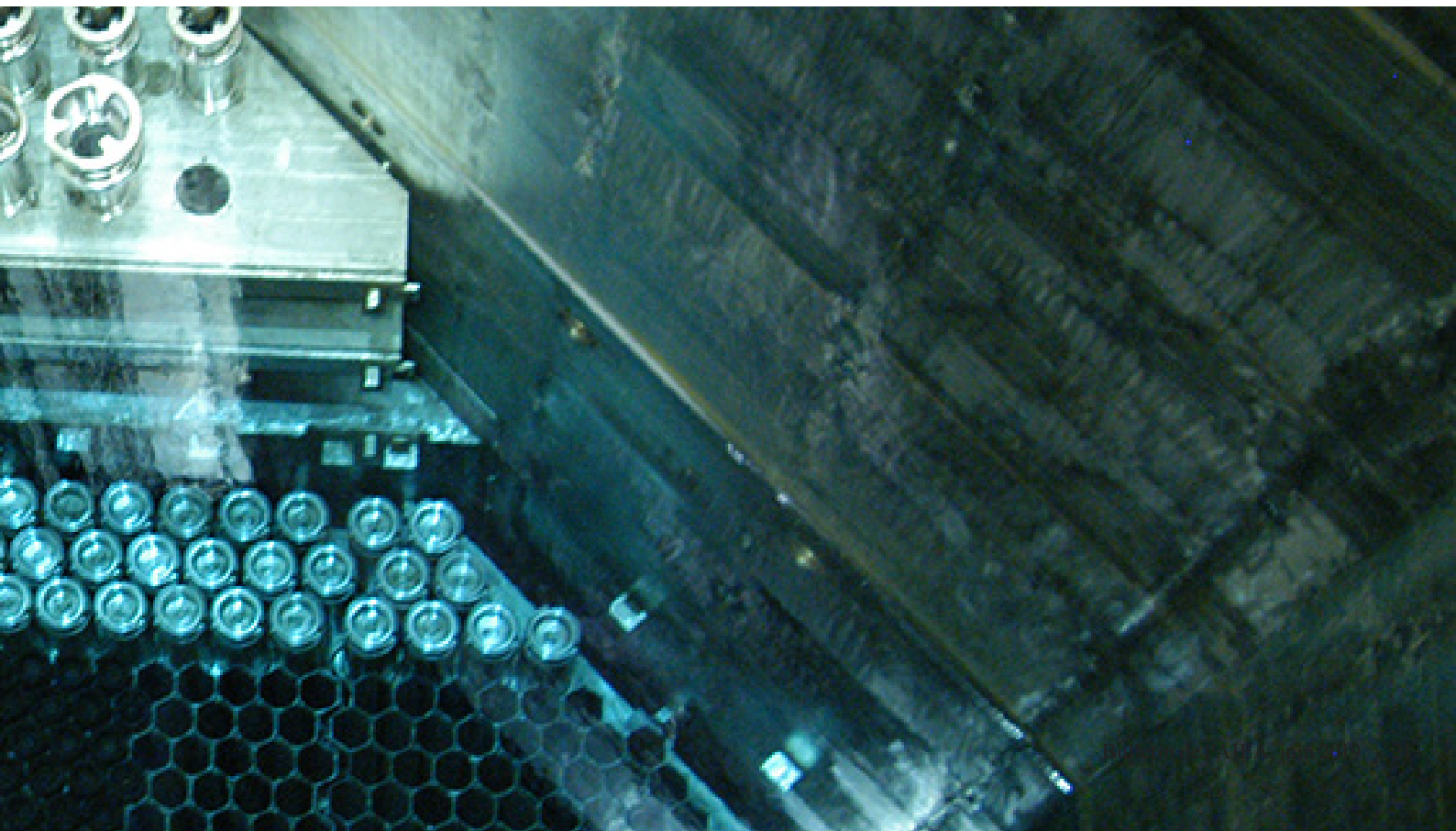
Il est particulièrement important que les concepteurs tiennent compte de la durée de vie utile du combustible usé lors de l'élaboration d'un projet d'installation d'entreposage de combustible usé. Il est parfois nécessaire que les matières entreposées dans les installations du combustible usé puissent être récupérées durant une longue période, par exemple pendant 100 ans.

« Il est utile de comprendre dès la conception d'une installation du combustible usé toutes les activités de garanties possibles ainsi que leur incidence sur la conception, et ce avant que les choix relatifs à la conception soient arrêtés », déclare Jeremy Whitlock. « Une planification précoce permet une plus grande souplesse de l'infrastructure de l'installation, de sorte que celle-ci puisse s'adapter aux innovations technologiques futures, qui pourraient être utiles tant à l'exploitant qu'à la mise en œuvre des garanties. »

Les documents de la collection consacrée à l'intégration des garanties dans la conception sont disponibles sur le site de l'AIEA.



**Formation d'inspecteurs à l'installation d'entreposage de combustible usé de la centrale nucléaire de Mohovce (Slovaquie).** (Photo : D. Calma/AIEA)



# Un modèle primé au « Robotics Challenge » aide à accélérer la vérification du combustible utilisé

Par Adem Mutluer

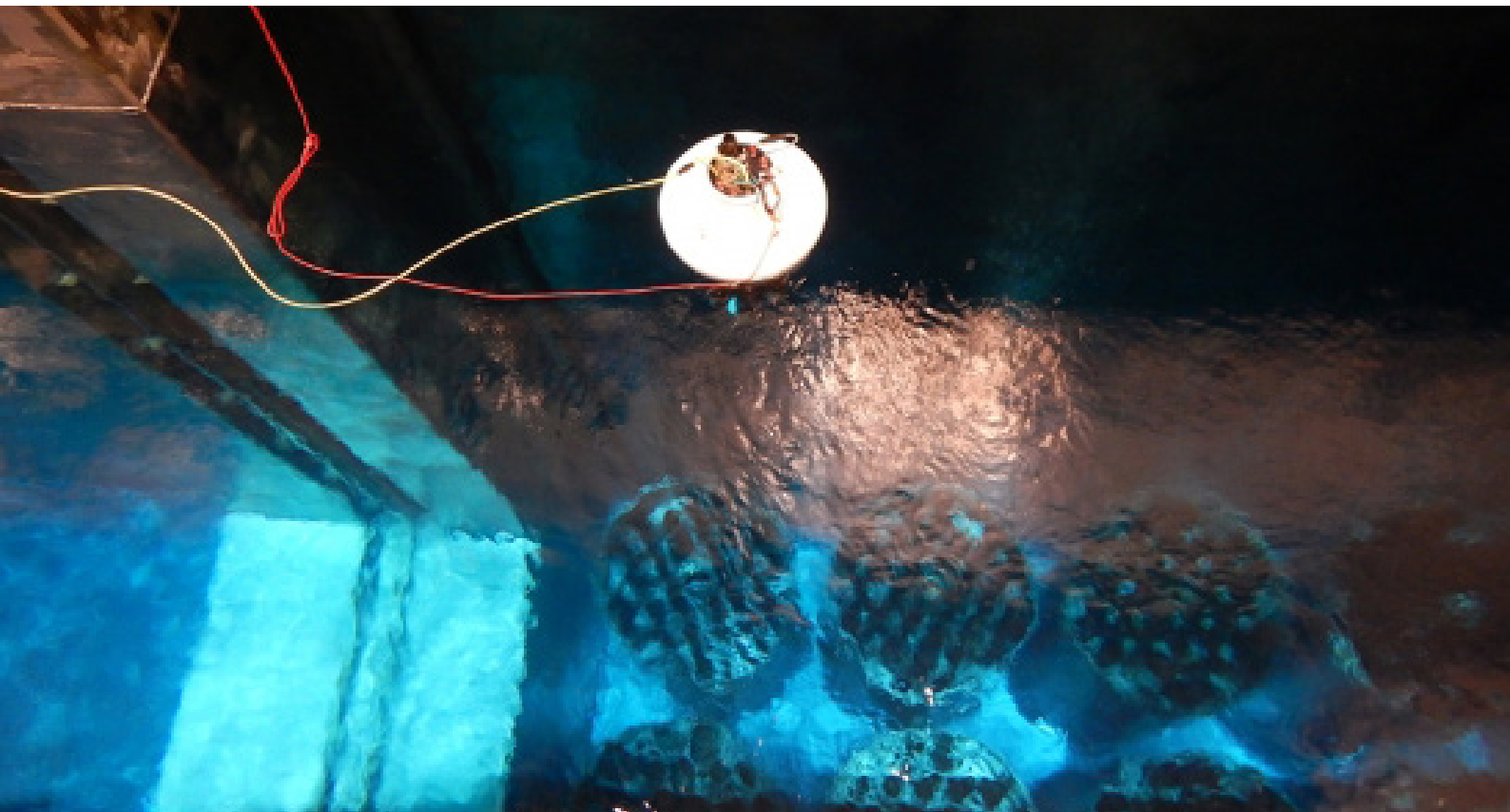
Si les réactions atomiques en chaîne permettant de produire de l'électricité ne sont plus entretenues dans le combustible utilisé, celui-ci contient encore des matières nucléaires qui pourraient être utilisées dans des armes. C'est pourquoi la vérification du combustible utilisé est une composante centrale des travaux menés au titre des garanties nucléaires de l'AIEA.

Afin qu'il refroidisse, le combustible utilisé est habituellement entreposé sous l'eau. Cela rend parfois sa vérification longue et difficile. Les inspecteurs de l'AIEA doivent aller au-dessus des piscines d'entreposage pour photographier les différents assemblages de combustible utilisé, qui se comptent parfois par centaines. Percevant le fort potentiel d'une application de la robotique dans la réalisation de ce processus, l'AIEA a lancé en 2017 un défi de production participative pour trouver des idées et des solutions visant à améliorer l'efficacité et l'efficacité de la vérification du combustible utilisé.

Lors des activités d'inspection qu'ils mènent dans des installations nucléaires du monde entier, les inspecteurs des garanties utilisent souvent un petit instrument optique portable, appelé « dispositif amélioré d'observation de l'effet Tcherenkov » (ICVD). Ce dispositif permet de confirmer la présence de combustible nucléaire utilisé dans la piscine, où ce dernier est généralement placé en vue de son refroidissement après avoir été retiré du cœur du réacteur. Les inspecteurs sont chargés de vérifier que la quantité de combustible entreposé est bien celle qui a été déclarée par les autorités nationales, et qu'aucune part de celui-ci n'a été retirée et potentiellement détournée de ses utilisations pacifiques.

Actuellement, les inspecteurs des garanties doivent manœuvrer l'ICVD à partir d'un support mobile suspendu au-dessus d'une piscine d'entreposage et regarder chaque assemblage combustible à travers une lentille. Dans le cadre du « Robotics Challenge », l'AIEA recherchait des modèles pouvant être couplés aux dispositifs d'observation de l'effet Tcherenkov de la prochaine génération (XCVD), récemment conçus

**Le modèle primé de véhicule de surface sans pilote fait l'objet d'un test en conditions réelles à la centrale nucléaire de Loviisa (Finlande).** (Photo: AIEA)





et permettant d'obtenir des images numériques, dans une petite plateforme flottante robotisée qui se propulserait de façon autonome à la surface de la piscine d'entreposage du combustible usé. Si le XCVD est immobilisé en position verticale, le véhicule de surface sans pilote (USV) permet de produire des images plus claires en un temps plus court.

Plus de 300 propositions ont été soumises dans le cadre du « Robotics Challenge ». Sur les 12 propositions sélectionnées pour faire l'objet d'une démonstration, trois modèles ont été testés en conditions réelles. Début 2019, un USV conçu par une équipe d'ingénieurs hongrois a remporté le « Robotics Challenge » de l'AIEA, à l'issue d'un examen minutieux du modèle et de ses performances effectué par des experts de l'AIEA. « Lors de la dernière étape du “Robotics Challenge” en novembre 2018, les modèles ont été testés en conditions réelles dans une piscine d'entreposage, dans une centrale nucléaire en Finlande, explique Dimitri Finker, spécialiste de la veille technologique au Département des garanties de l'AIEA. Les experts de l'AIEA ont ainsi pu évaluer les avantages de chaque modèle et repérer ceux qui satisfaisaient les besoins des opérations de contrôle, intégraient des considérations de sûreté et offraient la meilleure qualité d'image pour la vérification ». L'AIEA va maintenant travailler avec ses États Membres, les exploitants d'installations nucléaires et les concepteurs de l'USV primé à la mise au point de la version définitive du modèle, qui sera conforme à tous les règlements et prescriptions applicables. En attendant, l'AIEA demandera aux États Membres l'autorisation d'utiliser l'USV sur le terrain.

Peter Kopias, propriétaire et président-directeur général de la société gagnante Datastart, déclare : « Nous sommes très heureux que notre modèle ait été choisi. La compétition était si rude ! C'est vraiment enthousiasmant d'apporter notre pierre à l'édifice de la non-prolifération nucléaire et de contribuer au travail important de vérification mené par l'AIEA. Il fallait présenter au « Robotics Challenge » une solution technique créative. Je suis ravi que notre modèle, unique en son genre, réponde aux besoins des utilisateurs ».

Le « Robotics Challenge » n'est pas le seul défi technologique organisé par l'AIEA pour orienter et appuyer la mise au point de technologies prometteuses susceptibles de l'aider dans ses travaux. « En général, dans le cadre d'appels d'offres, on ne s'adresse qu'à quelques établissements hautement spécialisés pour recevoir des propositions d'équipements techniques pouvant être utilisés lors des opérations effectuées au titre des garanties. Avec les défis technologiques de l'AIEA, ce sont des centaines d'acteurs qui cherchent à concevoir des solutions scientifiques », explique Dimitri Finker. Le dernier défi de l'AIEA en date, qui porte sur la reconstruction et l'analyse en tomographie, a pour objectif d'améliorer le processus de vérification du combustible nucléaire usé grâce à la mise au point de techniques de pointe pour l'analyse des images prises par les ICVD, et éventuellement les XCVD.

### Des experts de l'AIEA testent le modèle de véhicule de surface sans pilote primé.

(Photo : AIEA)



# Simplifier le transport et l'entreposage du combustible usé des réacteurs nucléaires de puissance

Par Nicole Jawerth

Des précautions et des mesures de sûreté et de sécurité rigoureuses doivent être prises pour entreposer et transporter le combustible nucléaire usé hautement radioactif. Jusqu'à présent, on utilisait généralement des conteneurs, ou « châteaux », distincts pour entreposer et transporter le combustible usé depuis les centrales jusqu'au lieu de dépôt, puis jusqu'au lieu de stockage définitif ou de recyclage. L'utilisation de châteaux à double usage, qui conviennent à la fois à l'entreposage et au transport, simplifie le processus et, partant, le rend plus abordable et plus sûr.



Pour en savoir plus sur ces châteaux exceptionnels et leur rôle dans la gestion sûre du combustible nucléaire usé, la directrice de la rédaction du Bulletin de l'AIEA, Nicole Jawerth, a rencontré Bernd Roith, de la Section du transport et du traitement des déchets de l'Inspection fédérale suisse de la sécurité nucléaire (IFSN). Bernd Roith travaille depuis huit ans dans le domaine du transport et de l'entreposage du combustible nucléaire usé, et il participe régulièrement, en qualité d'expert, aux projets de l'AIEA relatifs au renforcement de la gestion sûre du combustible usé.

**Q : Le combustible nucléaire usé étant composé d'éléments radioactifs, comme l'uranium et le plutonium, il est primordial de le manipuler de manière sûre et sécurisée. Qu'est-ce qu'un château à double usage, exactement, et quel rôle joue-t-il dans la gestion sûre et sécurisée du combustible usé ?**

**R :** Il n'existe pas de solution « passe-partout » pour gérer le combustible usé ; chaque pays a sa propre méthode et sa propre stratégie. Certains entreposent le combustible usé dans des piscines, d'autres l'entreposent à sec dans des conteneurs ou des bâtiments spéciaux, et d'autres encore choisissent de le retraiter.

Les châteaux à double usage sont l'une des options disponibles pour le transport et l'entreposage à sec. Ils sont conçus pour empêcher tout rejet de matière radioactive,

tant pendant l'entreposage que pendant le transport. Leurs propriétés particulières dépendent des besoins des pays en matière de gestion du combustible usé, mais, en règle générale, il s'agit de grands conteneurs cylindriques en acier ou en fonte, relativement étroits, pouvant contenir du combustible nucléaire usé ou des déchets hautement radioactifs pendant le transport et l'entreposage provisoire de ces matières. Ils sont munis d'un système de double couvercle boulonné étanche, qui permet toutefois de récupérer le combustible facilement et en toute sûreté si nécessaire.

Les châteaux à double usage doivent répondre à des normes de sûreté strictes et satisfaire à quatre grands critères : l'intégrité mécanique, l'évacuation de la chaleur, le blindage et le contrôle de la criticité. Du fait qu'ils doivent à la fois comporter toutes ces caractéristiques et respecter les prescriptions en matière de transport international et d'entreposage national, ils sont très difficiles à mettre au point et à utiliser. Cependant, une fois en place, ils simplifient les autres étapes du processus de gestion.

**Q : Quels avantages les châteaux à double usage présentent-ils par rapport aux autres méthodes d'entreposage ?**

**R :** Ils réduisent le besoin de manipulation du combustible usé. Avec de nombreuses autres méthodes, des conteneurs ou des installations d'entreposage différents sont utilisés à chaque étape. Le combustible doit donc être transféré à plusieurs reprises, souvent dans des conteneurs qui ne sont pas adaptés au transport sur la voie publique. Les châteaux à double usage, en revanche, peuvent être remplis, transportés et entreposés provisoirement, puis transportés à nouveau jusqu'au lieu de stockage définitif ou jusqu'à l'installation de retraitement, sans que le combustible doive être manipulé ou transféré plusieurs fois. Ils constituent, par conséquent, l'une des solutions les plus prisées dans les pays où le combustible usé est transporté sur des voies publiques.



## Q : Comment l'AIEA contribue-t-elle à la mise au point et à l'utilisation des châteaux à double usage ?

**R :** La conception des châteaux à double usage varie en fonction du type d'installation d'entreposage auquel ils sont destinés et du lieu de cette installation. Il est donc difficile de définir des prescriptions précises qui puissent s'appliquer à tous les châteaux, partout dans le monde, sans tenir compte de ces différences. L'AIEA a établi des prescriptions de sûreté concernant le transport des châteaux à double usage et est en mesure d'harmoniser les prescriptions des différents pays relatives à l'entreposage de ces conteneurs. Ainsi, les pays qui se lancent dans l'électronucléaire peuvent consulter les documents de référence de l'AIEA pour déterminer si les châteaux à double usage conviendraient dans leur cas et décider de la manière de les concevoir et de les utiliser pour gérer le combustible utilisé.

L'AIEA coordonne également les travaux de recherche menés en vue d'optimiser le modèle et l'utilisation des châteaux à double usage. La question du vieillissement du combustible entreposé à sec, par exemple, a été soulevée lors des réunions de l'AIEA. Les châteaux à double usage ont généralement une durée d'utilisation d'au moins 40 ou 50 ans, mais on envisage de plus en plus de les utiliser pendant au moins 100 ans. Dans ce cas, il pourrait être nécessaire de modifier les modèles actuels ou d'en concevoir de nouveaux afin de réduire les effets éventuels de l'entreposage à long terme sur les châteaux et de garantir que ceux-ci continuent de répondre à des normes de sûreté rigoureuses, tant pendant le transport et que pendant l'entreposage.

## Q : Selon vous, quel est l'avenir des châteaux à double usage ?

**R :** Les concepteurs de châteaux à double usage cherchent constamment à améliorer leurs modèles pour s'adapter à l'évolution des centrales nucléaires. Celles-ci restant en exploitation plus longtemps, elles génèrent plus de combustible utilisé, et les concepteurs s'efforcent donc d'optimiser les modèles pour maximiser la contenance des châteaux. Ils envisagent également d'utiliser de nouveaux matériaux permettant un entreposage de plus longue durée et résistant à de plus grandes charges thermiques, car les centrales utilisent du combustible enrichi à des taux plus élevés qu'auparavant. De plus, les nouveaux modèles devraient être plus simples, et donc plus faciles et moins chers à fabriquer, tout en restant conformes à l'ensemble des prescriptions en matière de transport et d'entreposage.

Certains pays arrêtent petit à petit la production d'énergie nucléaire et, tôt ou tard, la génération d'experts actuelle partira à la retraite. Il est aussi possible que l'intérêt pour le nucléaire diminue chez les jeunes, mais il est certain que nous aurons besoin de spécialistes. C'est dans ce domaine que l'AIEA peut vraiment apporter une assistance, en organisant des cours en ligne et en dispensant des formations pour améliorer les connaissances.

### Châteaux à double usage à l'installation d'entreposage ZWILAG (Suisse).

(Photo : ZWILAG)





# Mon expérience dans le nucléaire

## Ce que j'ai appris sur les systèmes, la gestion des connaissances et l'exploitation des installations nucléaires en plus de 28 ans d'expérience dans le domaine du cycle du combustible nucléaire

Par Susan Y. Pickering

En 2019, la Conférence internationale de l'AIEA sur la gestion du combustible utilisé des réacteurs nucléaires de puissance a pour thème « Tirer les leçons du passé pour mieux préparer l'avenir ». Il y a des enseignements importants à tirer de l'expérience collective acquise en travaillant dans le domaine de l'énergie nucléaire, que ce soit dans le cadre de programmes électronucléaires bien établis ou récents, et la conférence fournit une occasion idéale de les partager.

Les programmes électronucléaires requièrent beaucoup de temps et des ressources pour porter leurs fruits. Ils posent de nombreuses difficultés, d'ordre technique ou autre. Ayant travaillé dans le domaine du cycle du combustible nucléaire pendant plus de 28 ans, j'ai dû faire face à bon nombre de difficultés et j'en ai tiré de très nombreux enseignements. J'aimerais partager avec vous quelques-unes de mes observations et de mes réflexions.

Les systèmes d'énergie nucléaire sont complexes et intégrés. Par exemple, les installations de stockage définitif comportent plusieurs enveloppes de confinement, à savoir la forme du déchet, le conteneur, le matériau de remplissage et la roche hôte, la performance de chacune affectant celle de l'ensemble. Quelles conséquences auront les décisions prises en matière d'entreposage aujourd'hui sur les solutions de stockage définitif de demain ? Est-ce qu'un conteneur de combustible utilisé particulier pourrait exclure l'utilisation d'un certain mode de transport ou d'un certain concept ou site de stockage définitif ? Nous devons analyser ces systèmes en adoptant une approche de bout en bout du cycle du combustible.

La durée de vie des installations nucléaires peut s'étendre sur de nombreuses décennies. Au cours de la durée de vie utile d'une installation nucléaire, certaines questions devront être tranchées par des personnes qui n'ont pas participé à l'élaboration du projet initial, voire qui n'étaient même pas nées à l'époque ! Il convient donc de lancer le plus tôt possible un programme d'assurance de la qualité (AQ) et de gestion des connaissances.

Les problèmes survenant au sein des installations nucléaires sont souvent les conséquences de lacunes liées aux personnes, aux pièces ou aux procédures, appelées les « trois P ». Les personnes occupant des postes de décision ont beaucoup d'influence sur les « trois P ». Un programme d'AQ et de gestion des connaissances solide permettra la mise en œuvre de contrôles qui renforceront les « trois P ». Un tel programme permettra : 1) de fournir la preuve objective des qualifications

professionnelles du personnel, 2) de disposer d'un processus de décision en cas d'avis professionnels divergents, 3) d'assurer que l'équipement et les pièces sont adaptés à l'utilisation prévue, 4) de favoriser la cohérence en définissant des procédures de travail, 5) de rendre le travail technique plus crédible et plus défendable, 6) d'assurer une gestion des connaissances tout au long de la durée de vie du projet et 7) d'obtenir des indications sur les problèmes pouvant être rencontrés au cours du projet et les réponses à apporter. Un programme d'AQ et de gestion des connaissances bien conçu et bien mis en œuvre est un facteur de réussite essentiel.

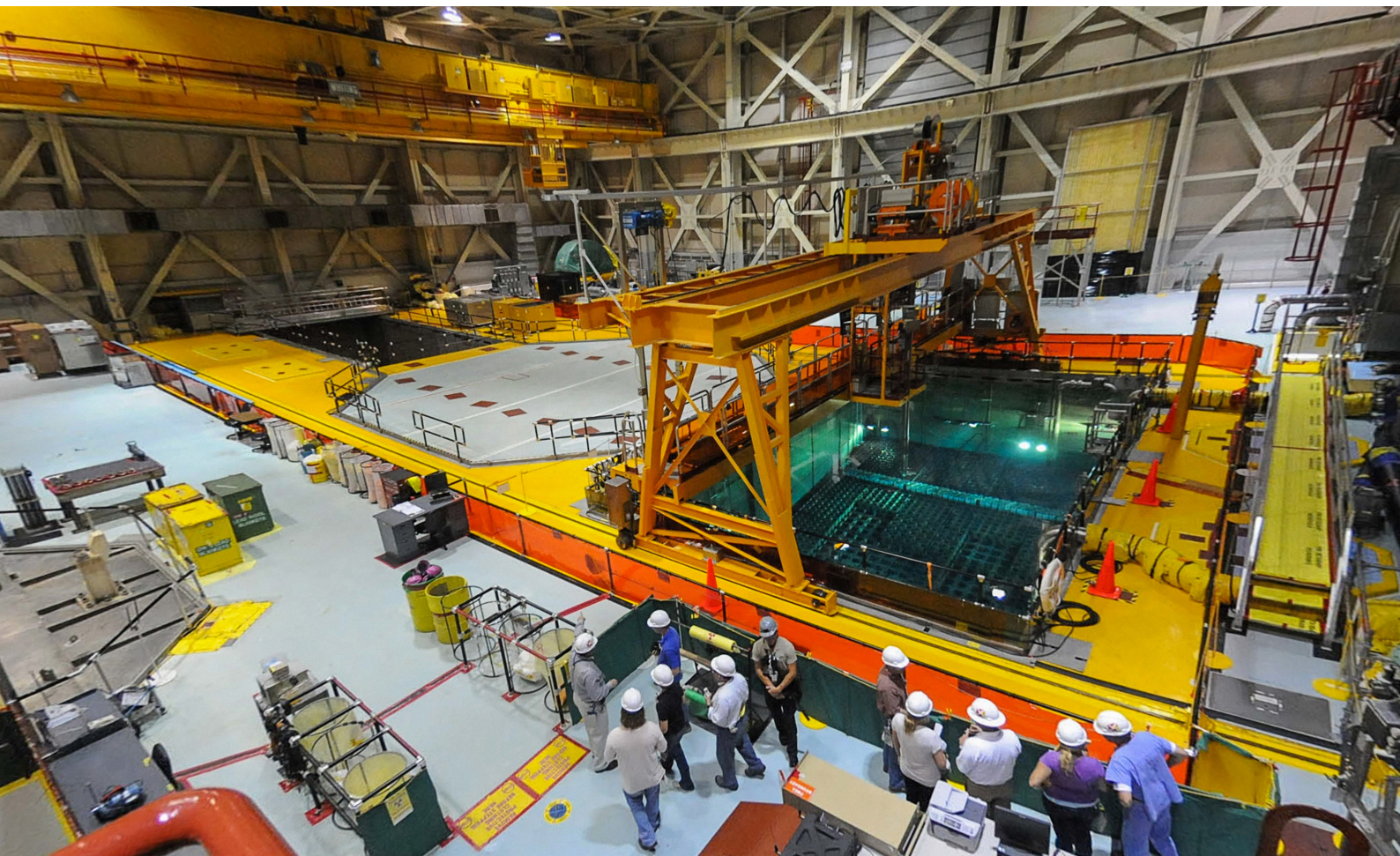


Susan Y. Pickering, directrice émérite des Laboratoires nationaux Sandia (États-Unis), a plus de 28 ans d'expérience dans la recherche-développement dans le domaine du nucléaire au sein des Laboratoires nationaux Sandia.

À mon avis, il y a deux grandes catégories d'informations à conserver au titre d'un programme d'AQ et de gestion des connaissances : les informations définies par les normes traditionnelles, par exemple les dossiers d'AQ, et des informations non définies par ces normes, par exemple le raisonnement qui sous-tend les décisions clés. Cette seconde catégorie d'informations est souvent négligée, bien qu'elle soit essentielle pour défendre une installation nucléaire lorsque des problèmes se posent. On doit se demander, par exemple, si l'installation nucléaire garde trace de la manière dont les résultats et les conclusions des activités les plus importantes ont été obtenus ? Peut-on arriver à nouveau à de tels résultats ou conclusions ?

Les systèmes nucléaires font souvent débat : les nombreuses parties prenantes ont souvent des points de vue divergents, ce qui peut être source de conflits. L'influence qu'exercent les parties prenantes, notamment sur les décideurs ou les responsables, ne doit pas être minimisée. En général, les parties prenantes souhaitent une participation régulière, une transparence et une influence. La relation entre l'installation nucléaire et les parties prenantes est importante,





### Piscine d'entreposage du combustible utilisé de la tranche 2 de la centrale nucléaire de Brunswick (États-Unis).

(Photo : Commission de la réglementation nucléaire, États-Unis)

et des ressources suffisantes doivent y être consacrées. La collaboration avec le public, les parties prenantes et les gouvernements locaux augmente les chances de succès.

Il est difficile de maintenir un excellent niveau d'exploitation pendant toute la longue durée de vie d'une installation nucléaire. En effet, la pression en faveur d'une réduction des coûts peut aboutir à la prise de décisions imprudentes. La rotation du personnel ou un changement d'organisation peut entraîner une perte des connaissances. Au fil du temps, on risque de devenir moins vigilant. Quant aux installations, elles vieillissent et deviennent moins fiables. Par ailleurs, de nouvelles vulnérabilités inattendues pourraient apparaître dans les années à venir, par exemple en matière de cybersécurité.

Il est essentiel de comprendre les risques pour pouvoir gérer un programme nucléaire de manière appropriée. Habituellement, on classe un accident pouvant survenir dans une installation nucléaire dans la catégorie des « événements aux conséquences sérieuses mais de faible probabilité » : on estime que le risque qu'un accident se produise est très faible, mais les conséquences peuvent être importantes, coûteuses et durables. Les systèmes permettant d'assurer une bonne gestion des risques sont complexes et nécessitent une base scientifique fiable ainsi que des techniques de pointe. Le fait d'avoir des responsables disposant de compétences techniques au sein du gouvernement bailleur

de fond, de l'agence de réglementation et de l'équipe de mise en œuvre augmente fortement les chances de succès.

Un examen indépendant est important pour les responsables. Il peut consister en un examen par des pairs ou en une évaluation indépendante. L'AIEA propose de nombreux types d'examens, qui sont effectués par des agents qualifiés non impliqués dans le travail à analyser. Nous faisons tous des erreurs. Des responsables avisés s'appuient sur un examen indépendant réalisé aux étapes et aux points critiques de manière à repérer les problèmes avant que les répercussions soient lourdes et les solutions trop coûteuses à mettre en œuvre.

À tous les niveaux d'une organisation, les responsables doivent agir en vue de favoriser une culture de sûreté nucléaire solide. Tous les jours, dans toutes les situations, ils doivent démontrer leur engagement en faveur de la sûreté nucléaire, récompenser les comportements positifs et punir les comportements négatifs. Ils doivent accepter l'imprévu, se préparer à des événements normaux et anormaux, et comprendre les incertitudes, les risques, les marges, la défense en profondeur et la résilience. Un personnel compétent est le meilleur facteur de succès d'une solide culture de sûreté. Comme le disait l'Amiral H.G. Rickover, le père de la sûreté nucléaire aux États-Unis, « les règles ne remplacent pas la pensée rationnelle ».



## Du laboratoire au champ : des scientifiques indonésiens mettent au point de nouvelles variétés agricoles à l'aide de la science nucléaire



**Chercheurs de la BATAN célébrant l'obtention de nouvelles variétés de riz par irradiation.** [Photo: Agence nationale de l'énergie nucléaire (BATAN)]

Ces dernières années, les agriculteurs indonésiens ont produit assez de riz pour nourrir plus de 20 millions de personnes grâce aux plantes issues du programme national de sélection végétale par mutation. Le programme est né en 1997 de la collaboration entre l'AIEA et l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) ; il s'est depuis développé et constitue aujourd'hui un réseau de partenariat global qui permet d'appliquer dans les champs des agriculteurs les résultats de la recherche scientifique menée à partir de techniques nucléaires.

« En Indonésie, la technologie nucléaire est utilisée dans différents domaines, notamment l'agriculture », indique M. Suryantoro, Vice-président de l'Agence nationale indonésienne de l'énergie nucléaire (BATAN). « Grâce à la recherche sur les techniques de mutation radio-induite, la BATAN a amélioré la qualité des variétés agricoles locales afin de répandre l'utilisation de nouvelles semences améliorées au sein de la communauté ».

Lorsque le premier projet de coopération sur la sélection végétale a commencé, en 1997, avec la Division mixte FAO/AIEA des techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture, les scientifiques des instituts de recherche de la BATAN ont reçu du matériel de pointe, une formation approfondie en technologies nucléaires et le soutien d'experts dans le cadre de projets de recherche coordonnée et de projets de coopération technique de l'AIEA. Ces activités ont jeté les bases du programme de sélection des plantes par mutation en Indonésie.

Plus de 35 nouvelles variétés agricoles, dont des fèves de soja et du riz, ont été mises au point. Les nouvelles variétés sont obtenues par irradiation et sélectionnées, après comparaison avec d'autres variétés locales, pour leurs caractéristiques améliorées, par exemple un meilleur rendement, un temps de culture plus court et une résistance aux maladies et aux facteurs de stress liés aux changements climatiques (voir Sélection des plantes par mutation). Une fois prêtes, les semences sont multipliées et mises à la disposition des agriculteurs.

A. Sidik Tanoyo, haut fonctionnaire du Ministère de l'agriculture à Java oriental, explique : « Il est important de produire plus de semences pour accroître la surface cultivée, car cela contribuera à faire augmenter la productivité et les revenus des agriculteurs ».

Le programme, qui soutient l'utilisation généralisée de ces nouvelles variétés, a pris de l'ampleur et constitue aujourd'hui un réseau de partenariat global qui rend possible leur culture à grande échelle. Il repose sur une collaboration entre des instituts de recherche, des ministères, des administrations gouvernementales, des entreprises de sélection des semences, des coopératives agricoles, des parties prenantes du marché et des groupes d'export. Les partenariats couvrent toute la chaîne d'approvisionnement, depuis le développement et la multiplication des semences jusqu'à la distribution et la culture en champs.

« Le programme, qui fait intervenir de nombreux ministères et institutions nationaux et trois institutions

internationales, est prévu pour fonctionner de l'amont vers l'aval », explique Totti Tjiptosumirat, chef du Centre d'application de la technologie des isotopes et des rayonnements de la BATAN. « En amont, la BATAN développe des semences de qualité supérieure ; le Ministère de l'agriculture les distribue ensuite aux semenciers et le Ministère de l'industrie transfère l'innovation en aval aux petites et moyennes entreprises et aux start-up. »

### Accroître la production de riz dans le pays

Trois des 23 nouvelles variétés de riz de la BATAN sont largement cultivées aujourd'hui dans différentes régions du pays. Connues sous les noms de Bestari, Inpari Sidenuk et Mustaban, ces variétés ont été sélectionnées pour leur rendement en moyenne plus de 150 % plus élevé que d'autres variétés locales, sur une période plus courte. Elles sont aussi plus résistantes aux changements climatiques, aux maladies et aux insectes.

Hamid, un semencier de Serang, dans la province de Banten, raconte : « Dans ma région, la cicadelle brune est partout. Quand j'ai vu ces plants de Mustaban sains, j'ai remercié Dieu car cet insecte ne les menace pas ». Non loin de là, Tatang, un autre semencier du village de Kaseman, ajoute : « Nous n'avons pas eu besoin de recourir aux insecticides. Après la floraison, il n'y avait aucune punaise de riz sur nos plants de Mustaban ».

Les experts de la BATAN prévoient de poursuivre la recherche-développement afin d'obtenir davantage de nouvelles variétés végétales et entendent ajuster et améliorer les performances de ces plantes compte tenu des retours d'expérience des agriculteurs. La recherche s'intéressera aussi à l'optimisation de la croissance des végétaux au moyen de pratiques agricoles locales, comme les systèmes d'engrais, et dans des conditions environnementales différentes (sols locaux, pluies et vents forts).

— Par Driss Haboudane



## Des professionnels du nucléaire échangent leurs idées sur la manière de promouvoir une solide culture de sûreté lors de la formation de l'AIEA sur la direction pour la sûreté



**Des professionnels en début et en milieu de carrière se familiarisent avec les capacités de direction pour la sûreté en prenant part à des exercices en groupe lors de la formation de l'AIEA sur la direction pour la sûreté.** (Photo : J. Gil Martin/AIEA)

Une direction pour la sûreté nucléaire et l'instauration d'une solide culture de sûreté au sein des organisations ne peuvent exister sans un espace de dialogue ouvert et constructif entre les professionnels du nucléaire de différents horizons, c'est ce qu'ont déclaré les participants à la formation à la direction pour la sûreté nucléaire et radiologique, organisée à Ankara (Turquie) du 22 avril au 3 mai 2019.

La direction pour la sûreté revêt une importance particulière dans le milieu de travail nucléaire et radiologique, aussi bien dans les situations ordinaires que dans les situations d'urgence, en raison de leur complexité inhérente. La formation de l'AIEA sur la direction pour la sûreté aide les professionnels dans les domaines nucléaire et radiologique en début ou en milieu de carrière à développer les compétences nécessaires en matière d'encadrement pour assurer la sûreté tout au long de leur parcours professionnel.

Au total, 29 professionnels de 14 pays travaillant dans des organismes de réglementation, chez des exploitants de centrales nucléaires ou dans des organisations techniques ont participé à la formation. Ils ont analysé des études de cas, pris part à des exercices, participé à des discussions et assisté à des présentations d'experts sur la sûreté nucléaire et radiologique, y compris la préparation des interventions d'urgence. La formation a eu lieu dans le cadre d'un projet de coopération technique de l'AIEA portant sur l'amélioration des

activités de création de capacités dans les organisations européennes de sûreté nucléaire et radiologique aux fins de l'exploitation sûre des installations.

Selon les participants, la formation a servi de cadre de discussion sur le renforcement de la capacité de direction pour la sûreté, a été une source d'inspiration et leur a permis de se voir proposer des stratégies de mise en œuvre au sein de leurs organismes respectifs.

### De nouvelles manières de communiquer au sein d'une équipe

Milijana Steljic, chef de l'Unité de coopération internationale et de gestion de projets à la Direction serbe de la sûreté et de la sécurité nucléaires et radiologiques, a participé à la formation. Elle a souligné l'importance du comportement individuel et du recours à certains outils pour créer des équipes solides en vue de promouvoir la sûreté.

« Cette formation m'a encouragée à reconsidérer ma façon de voir les choses, notamment mon rôle de dirigeante et ma manière de concilier productivité et capacité à galvaniser mon équipe à travers mes propres agissements. Associant des exposés et des conférences à des études de cas, des travaux en groupe, des jeux et des visites techniques, cette formation a permis de mettre en lumière notre comportement en matière de direction et nous a fait découvrir un ensemble d'outils que les dirigeants peuvent utiliser au quotidien », déclare-t-elle.

« Je souhaite mettre en place des exercices de renforcement de l'esprit d'équipe, organiser régulièrement des débats dans le cadre d'études de cas au sein de mon équipe, et utiliser ces nouveaux outils d'encadrement pour évaluer nos performances. Idéalement, j'aimerais présenter cette idée à l'ensemble de mon organisation, car je souhaiterais que nous communiquions tous de manière plus ouverte afin de mettre en place une solide culture de sûreté au sein de notre organisation », poursuit-elle.

### Promouvoir la volonté de jouer un rôle de chef de file chez tous les membres de l'équipe

Une autre participante, Aysel Hasanova, conseillère principale au Département de la législation technique et des normes à l'Agence azerbaïdjanaise de réglementation des activités nucléaires et radiologiques, souligne que des programmes adéquats peuvent être une source d'inspiration pour les professionnels de la sûreté nucléaire et relève que la capacité de direction pour la sûreté est l'affaire de tous les membres d'une équipe, pas seulement des responsables.

« Le comportement des dirigeants a une forte incidence sur la sûreté. S'impliquer dans la direction pour la sûreté, c'est vouloir évoluer continuellement et être un modèle pour tous les membres de l'équipe, que l'on soit chef ou non », explique-t-elle. « Je m'emploie à promouvoir une solide culture de sûreté et le transfert des connaissances de professionnels expérimentés, en collaborant avec des jeunes et des femmes. Je m'attache aussi à mettre en place de nouveaux outils de mise en valeur des ressources humaines dans tout le pays. C'est pour cela que j'ai voulu participer à cette formation. »

« Avant, je croyais qu'il fallait avoir l'étoffe d'un chef. Mais maintenant, je pense que tout le monde peut découvrir et renforcer ses capacités de direction », confie-t-elle. « Rien ne se fait en un jour, mais il faut commencer avec des objectifs précis et avoir la volonté de les atteindre. »

— Par *Nathalie Mikhailova*

## Au Viet Nam, l'irradiation améliore la qualité des aliments



Des produits alimentaires sont irradiés à VINAGAMMA au moyen de l'irradiateur à faisceaux d'électrons (photo ci-dessus) et d'un irradiateur gamma.

(Photo : E. Marais/AIEA)

Chaque matin, des centaines de caisses de produits de la mer surgelés, de fruits et légumes secs, de médicaments orientaux traditionnels et d'aliments santé s'accumulent dans un entrepôt de Ho Chi Minh Ville (Viet Nam). Elles subiront un traitement similaire à un contrôle de sécurité d'aéroport mais avec des faisceaux de photons ou d'électrons de plus haute intensité, dans le cadre d'un programme d'irradiation des aliments mis en place au cours des vingt dernières années avec l'appui de l'AIEA.

Selon la dose, l'irradiation des aliments permet d'empêcher les légumes-racines et les fruits de germer et de mûrir prématurément, de tuer les parasites et décontaminer les épices, de détruire les salmonelles et d'éliminer les champignons qui pourraient gâter la viande, la volaille et les produits de la mer.

Le processus d'irradiation des aliments a été introduit au Viet Nam en 1999 avec l'aide de l'AIEA et de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Depuis lors, un marché important s'est ouvert aux produits irradiés, augmentant sensiblement la capacité des entreprises à exporter leurs produits alimentaires. L'irradiation des aliments est devenue un pilier de l'industrie alimentaire du pays et contribue grandement à sa compétitivité agricole.

« En 1999, on irradiait 259 tonnes d'aliments par an ; en 2017, 14 000 tonnes », raconte Cao Van Chung, chef du Département des faisceaux d'électrons à VINAGAMMA, le Centre de recherche et de développement pour la technologie des rayonnements de l'Institut vietnamien de l'énergie atomique. « On voit donc à quel point nous sommes maintenant sollicités. Aujourd'hui, nous sommes l'une des premières installations du pays dans le domaine de la technologie des rayonnements, et pionniers de l'irradiation des aliments. »

### Introduction de l'irradiation gamma et de l'irradiation par faisceaux d'électrons

Cette croissance remarquable a été rendue possible par l'introduction de deux méthodes d'irradiation : celle reposant sur un irradiateur gamma, introduite en 1999, qui recourt à l'énergie ionisante d'une source de rayonnements maintenue dans une chambre de béton, et celle faisant appel à un irradiateur à faisceaux d'électrons, utilisée depuis 2013. Les irradiateurs à faisceaux d'électrons n'utilisent pas de source radioactive mais des flux d'électrons hautement chargés produits par un appareil spécialisé, comme un accélérateur linéaire d'électrons. Les aliments ne sont jamais en contact avec la matière radioactive et l'irradiation permet à la fois de maintenir

la qualité des aliments et de renforcer leur sécurité sanitaire, sans radioactivité résiduelle.

« Le processus d'irradiation est le même avec les deux méthodes, mais chacune présente des avantages distincts et complémentaires », explique Cao Van Chung. Avec l'irradiateur gamma, de hautes boîtes d'aluminium pouvant accueillir des produits de toutes tailles sont suspendues à un monorail et déplacées dans la chambre d'irradiation autour de la source radioactive. Il faut deux séances d'irradiation pour que toute la surface des produits emballés soit correctement traitée.

L'irradiateur à faisceaux d'électrons, quant à lui, génère des faisceaux des deux côtés, ce qui rend le processus trois fois plus rapide qu'avec un irradiateur gamma, car tout le produit est irradié en une fois. Cependant, on ne peut y introduire que des caisses de 60x30x50 cm et de 15 kg maximum. Pour les produits plus gros et plus lourds, il faut donc utiliser l'irradiation gamma. Les appareils fonctionnent côte à côte, 24 heures sur 24 et sept jours sur sept, sauf au Nouvel an vietnamien.

Avant l'introduction de l'irradiateur gamma et de l'irradiateur à faisceaux d'électrons, on luttait contre la détérioration de denrées alimentaires telles que les produits de la mer, les fruits et les légumes avec des méthodes traditionnelles, notamment la mise en conserve, la réfrigération, la congélation et les conservateurs chimiques, moins efficaces. La capacité d'exportation des producteurs en restait limitée.

Les appareils d'irradiation ont été acquis avec l'appui du programme de coopération technique de l'AIEA, qui a aussi fourni des formations et des avis d'experts au personnel. Le Viet Nam est l'un des 40 pays bénéficiant de l'appui de l'AIEA dans ce domaine.

### Utilisation croissante de la technologie des rayonnements

Le nombre d'employés de VINAGAMMA est passé de 20, à sa création en 1999, à 79 aujourd'hui. Outre l'irradiation des aliments, VINAGAMMA offre des services de



radiostérilisation de produits médicaux et de pasteurisation des aliments, et commercialise ses produits de recherche-développement, notamment des protections pour plantes utilisées

en agriculture et des nanogels à l'or et à l'argent utilisés en médecine.

VINAGAMMA mène également des travaux de recherche-développement et propose des formations en technologie

des rayonnements. Il collabore avec des partenaires internationaux pour trouver des moyens d'améliorer la technologie de l'irradiation.

— Par Estelle Marais

## L'AIEA met au point une nouvelle méthode de détermination de l'origine de la pollution de l'eau



**Une concentration excessive de nitrate dans les lacs, les mers et les rivières peut stimuler la croissance des algues, ce qui peut entraîner des efflorescences toxiques bleu-vert. En collaboration avec l'Université du Massachusetts, à Dartmouth, l'AIEA a mis au point une méthode innovatrice de détermination de l'origine de la pollution à l'azote dans l'eau.** (Photo: L. Wassenaar, AIEA)

En collaboration avec l'Université du Massachusetts, l'AIEA a mis au point une méthode innovatrice de détermination de l'origine de la pollution à l'azote dans les lacs, les mers et les rivières. Cette technique d'analyse dérivée du nucléaire permet d'établir plus sûrement, plus rapidement et à un moindre coût, si les éléments d'azote en excès dans l'eau proviennent de l'agriculture, des systèmes d'évacuation des eaux usées ou de l'industrie, appuyant ainsi les efforts de prévention et d'assainissement. L'azote, élément essentiel présent en grande quantité sur la planète, est largement utilisé comme engrais dans l'agriculture depuis la moitié du XXe siècle. « Un des principaux problèmes mondiaux concernant la qualité de l'eau résulte du fait que nous avons fertilisé les sols de manière excessive pendant plusieurs décennies, que ce soit avec du fumier ou des engrais synthétiques, explique Leonard Wassenaar, chef de la Section de l'hydrologie isotopique de l'AIEA. Tous ces nutriments, en particulier les formes d'azote comme les nitrates, s'infiltrent dans les eaux souterraines et finissent dans les rivières, les lacs et les sources. »

Une concentration excessive de nitrate stimule la croissance des algues, pouvant entraîner des efflorescences toxiques à la surface des lacs. Les algues peuvent

aussi tomber au fond des lacs et alimenter les bactéries, créant ce qu'on appelle des « zones mortes ». « Le phénomène de mortalité de poissons se produit plus qu'auparavant, affirme Leonard Wassenaar. Des milliers de poissons flottent à la surface des lacs parce que la quantité d'oxygène au fond, où ils vivent habituellement, a diminué à cause de ces pluies de matières organiques ».

Étant donné qu'il est très difficile et coûteux d'éliminer les nitrates de l'eau, nous avons besoin d'outils pour comprendre l'origine et le parcours de l'azote de façon à mieux orienter les activités en matière de protection et d'assainissement de l'eau.

La nouvelle méthode, publiée dans la revue *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, consiste à mesurer la quantité et la proportion d'isotopes stables du nitrate dans l'eau. L'azote a deux isotopes (variations d'atome) stables de poids différents. Étant donné que le rapport de poids entre ces isotopes n'est pas le même dans les déchets générés par l'homme et dans les engrais, par exemple, les isotopes peuvent être utilisés pour déterminer l'origine de l'azote.

« Les outils isotopiques sont très efficaces pour mesurer la concentration des nutriments dans l'eau, indique Leonard

Wassenaar, mais il a toujours été très difficile de les utiliser en raison de leur coût et d'une mauvaise accessibilité. La nouvelle méthode permet aux scientifiques d'analyser davantage d'échantillons à un coût beaucoup plus faible pour mener des études à grande échelle. Selon moi, cela va changer la donne. »

Dans la nouvelle méthode, une forme de chlorure de titane (un sel) est utilisée pour transformer le nitrate présent dans des échantillons d'eau en protoxyde d'azote (un gaz). Les isotopes présents dans ce gaz peuvent ensuite être analysés à l'aide d'instruments tels qu'un spectromètre de masse ou un laser. Dans les méthodes actuelles, ce sont des bactéries génétiquement modifiées ou du cadmium (un métal très toxique) qui sont utilisés pour la transformation en protoxyde d'azote ; cela rend ces méthodes très laborieuses et coûteuses, et restreint leur utilisation à quelques rares laboratoires spécialisés.

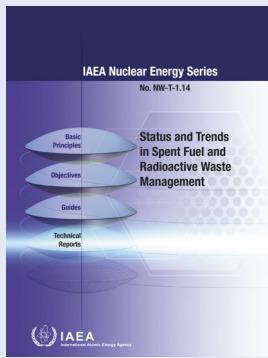
« La nouvelle méthode simplifie grandement un processus jusqu'alors très complexe et coûteux », déclare Mark Altabet, collaborateur et professeur d'océanographie et de sciences estuariennes à la Faculté de sciences et de technologies marines de l'Université du Massachusetts, à Dartmouth. L'analyse des échantillons est cinq à dix fois moins chère qu'auparavant, et il ne faut que quelques minutes pour les préparer.

Mark Altabet prévoit d'utiliser la nouvelle méthode pour étudier l'effet des mesures de contrôle de la pollution à Long Island Sound, estuaire situé sur la côte est des États-Unis qui a été fortement touché par un excès de nitrate.

L'AIEA promeut l'utilisation des techniques nucléaires et isotopiques aux fins de l'évaluation de l'origine, de l'âge, de la qualité et de la viabilité des eaux afin d'aider les pays à mieux gérer cette ressource vitale.

— Par Luciana Viegas



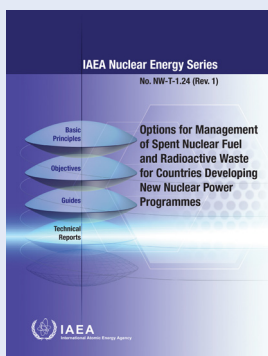


## Situation et tendances en matière de gestion du combustible utilisé et des déchets radioactifs

La publication intitulée *Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management* fournit un aperçu général de la situation en matière de gestion des déchets radioactifs et du combustible utilisé concernant les stocks, les programmes, les pratiques actuelles, les technologies et les tendances. Elle présente une analyse des dispositions nationales et des programmes de gestion des déchets radioactifs et du combustible utilisé, et donne un aperçu des stocks actuels de déchets radioactifs et de combustible utilisé ainsi que des estimations des stocks futurs. Les tendances internationales et nationales dans ces domaines sont également abordées.

N° NW-T-1.14 de la collection Énergie nucléaire de l'AIEA, ISBN : 978-92-0-108417-0 ; 39,00 euros ; 2018 (en anglais)

<https://www.iaea.org/fr/publications/11173/status-and-trends>

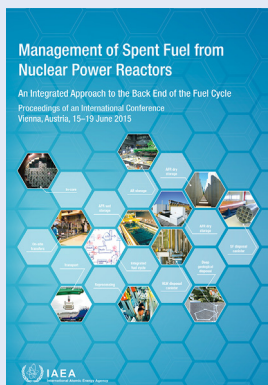


## Options en matière de gestion du combustible utilisé et des déchets radioactifs pour les pays élaborant un nouveau programme électronucléaire

La publication intitulée *Options for Management of Spent Nuclear Fuel and Radioactive Waste for Countries Developing New Nuclear Power Programmes* contient un résumé succinct des principales questions liées à la mise en place d'un solide système de gestion des déchets radioactifs et du combustible nucléaire utilisé. Elle a pour objectif d'informer les pays ayant un programme électronucléaire de petite envergure ou récemment élaboré des difficultés que pose la gestion des déchets de réacteur et du combustible utilisé générés lors de l'exploitation et du déclassement des centrales nucléaires, ainsi que de présenter les options disponibles ou possibles en la matière.

N° NW-T-1.24 (Rév. 1) de la collection Énergie nucléaire de l'AIEA, ISBN : 978-92-0-103118-1 ; 32,00 euros ; 2018 (en anglais)

<https://www.iaea.org/fr/publications/12255/options-for-management>

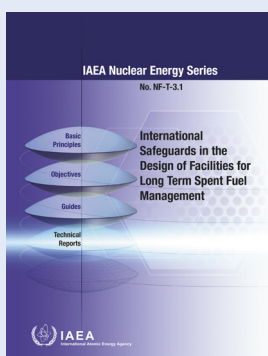


## Gestion du combustible utilisé des réacteurs nucléaires de puissance : une approche intégrée de la partie terminale du cycle du combustible

La publication intitulée *Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors : An Integrated Approach to the Back End of the Fuel Cycle* présente les résultats de la Conférence internationale de l'AIEA sur la gestion du combustible utilisé des réacteurs nucléaires de puissance de 2015, au cours de laquelle les participants ont mis en commun et examiné les réalisations et les enseignements tirés en lien avec la partie terminale du cycle du combustible nucléaire, ainsi que les difficultés y relatives. Les principaux objectifs de la conférence étaient de mieux faire connaître l'incidence des avancées en matière de production d'électricité et de disponibilité du stockage définitif sur la gestion du combustible utilisé, de faire le point sur les progrès réalisés dans la gestion du combustible utilisé des réacteurs de puissance depuis le lancement des conférences de l'AIEA sur ce sujet, et de recenser des questions en suspens et d'anticiper les difficultés futures.

Collection des comptes rendus ; ISBN : 978-92-0-101819-9 ; 28,00 euros ; 2019 (en anglais)

<https://www.iaea.org/fr/publications/13488/management-of-spent-fuel>



## Garanties internationales en matière de conception d'installations de gestion à long terme du combustible utilisé

La publication intitulée *International Safeguards in the Design of Facilities for Long Term Spent Fuel Management* s'adresse aux concepteurs et aux exploitants d'installations de gestion à long terme du combustible utilisé. Elle peut aussi être utile aux vendeurs, aux autorités nationales et aux partenaires financiers. Elle complète les considérations générales figurant dans la publication intitulée *International Safeguards in Nuclear Facility Design and Construction* (IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-2.8).

N° NF-T-3.1 de la collection Énergie nucléaire de l'AIEA, ISBN : 978-92-0-100717-9 ; 36,00 euros ; 2018 (en anglais)

<https://www.iaea.org/fr/publications/10806/international-safeguards>

**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)

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





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

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

Organisée par



**IAEA**

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

**#Atoms4Climate**

CN-275