

# IAEA BULLETIN

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE ATOMIQUE

La publication phare de l'AIEA | Avril 2023 | [www.iaea.org/fr/bulletin](http://www.iaea.org/fr/bulletin)

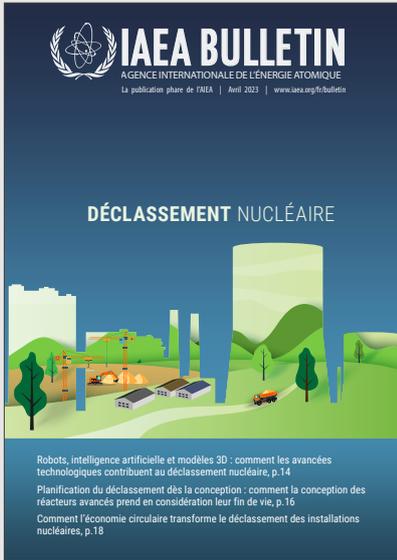
## DÉCLASSEMENT NUCLÉAIRE



Robots, intelligence artificielle et modèles 3D : comment les avancées technologiques contribuent au démantèlement nucléaire, p.14

Planification du démantèlement dès la conception : comment la conception des réacteurs avancés prend en considération leur fin de vie, p.16

Comment l'économie circulaire transforme le démantèlement des installations nucléaires, p.18



### 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

iaeabulletin@iaea.org

Rédaction : Estelle Marais

Direction de la rédaction : Emma Midgley

Maquette : Ritu Kenn

Infographie : Adriana Vargas Terrones

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 cette dernière décline toute responsabilité à cet égard.

Couverture : AIEA

Suivez-nous sur :



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

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

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

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

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

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

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

# Relever les défis du déclasserement

Par Rafael Mariano Grossi, Directeur général de l'AIEA

**A**lors que de plus en plus de pays adoptent l'énergie d'origine nucléaire pour renforcer leur sécurité énergétique et atténuer le changement climatique, le défi que représente le déclasserement réussi des installations nucléaires devrait prendre de l'ampleur. Il est essentiel, pour relever ce défi, de s'y attaquer en amont.

Actuellement, 56 réacteurs sont en construction dans le monde, et de nombreux pays planifient l'expansion de leur parc nucléaire ou la mise en place de leur premier programme électronucléaire.

Pour ce qui est de la fin de vie d'un réacteur nucléaire, il est essentiel de miser dès aujourd'hui sur l'anticipation et l'innovation. Les nouvelles centrales nucléaires, y compris celles équipées de réacteurs de faible ou moyenne puissance ou petits réacteurs modulaires (RFMP), sont conçues dans la perspective de leur déclasserement. En d'autres termes, les concepteurs planifient le démantèlement de leurs réacteurs nucléaires de puissance avant même le début de la construction.

L'AIEA joue un rôle tout particulier dans ce domaine au niveau mondial : elle facilite l'adoption des nouvelles technologies nucléaires, tout en favorisant une meilleure harmonisation des réglementations afin de permettre, le moment venu, un déclasserement sûr et efficace.

Près de la moitié des 423 réacteurs nucléaires de puissance actuellement en service dans le monde devraient entrer en phase de déclasserement d'ici à 2050. Il faudra jusqu'à 20 ans, voire plus, pour assurer le déclasserement complet de chacun de ces réacteurs.

L'AIEA aide les pays à garantir que les travaux de déclasserement sont réalisés conformément aux prescriptions techniques et réglementaires applicables, en préconisant des normes de sûreté et de bonnes pratiques internationales au moyen d'ateliers, de forums, de missions et de publications.

Le déclasserement traduit une responsabilité et un engagement en faveur d'un cycle industriel et nucléaire circulaire. Davantage de matériaux sont recyclés, des économies sont réalisées et les délais sont raccourcis. Dans le même temps, les nouvelles technologies telles que la science des données, l'intelligence artificielle, la robotique et les drones permettent de gagner en efficacité et en sécurité dans les activités de déclasserement.

L'AIEA veille à ce que les enseignements et les innovations issus des projets de déclasserement réussis soient diffusés, notamment dans le cadre de son Réseau international sur le déclasserement. L'Agence joue également un rôle essentiel en garantissant la sûreté, même dans des circonstances difficiles. Après l'accident nucléaire de Fukushima Daiichi en 2011, il a fallu innover, notamment en utilisant la muographie pour localiser le combustible endommagé et en construisant un mur souterrain gelé pour empêcher l'infiltration des eaux souterraines dans l'eau contaminée à l'intérieur des bâtiments des réacteurs, ainsi qu'en s'appuyant sur la robotique pour effectuer des travaux dans les zones d'accès difficile. Ces innovations ont permis d'accroître l'efficacité et l'efficience tout en réduisant au maximum les risques auxquels les travailleurs, le grand public et l'environnement étaient exposés.

La sûreté est essentielle, mais elle n'est pas la seule considération en jeu. Les garanties constituent elles aussi des aspects cruciaux du processus de déclasserement. Les inspecteurs de l'AIEA sont présents lors du déplacement ou du stockage du combustible usé afin de vérifier que les matières utilisées dans les centrales nucléaires ne sont pas détournées de leurs utilisations pacifiques.

La coopération internationale et le partage des connaissances sous l'égide de l'AIEA revêtent une importance capitale si l'on veut répondre à la demande croissante en matière de déclasserement des installations nucléaires à l'échelle mondiale. Il importe d'assurer une bonne gestion de la partie terminale du cycle du combustible nucléaire afin que le nucléaire contribue pleinement et durablement au règlement des problèmes les plus pressants à l'échelle mondiale, qu'il s'agisse d'atténuer le changement climatique et la pollution de l'air ou d'assurer la sécurité énergétique et de favoriser l'utilisation des outils de la médecine nucléaire nécessaires pour lutter contre le cancer et les maladies cardiaques.



(Photos : AIEA)



## 1 Relever les défis du déclasserement



## 4 Le déclasserement nucléaire Gérer le passé et prévoir l'avenir



## 8 Déclasserement d'une centrale nucléaire



## 10 Déclasserement des centrales nucléaires : la Slovaquie donne l'exemple



## 12 Des outils de nouvelle génération favorisent un déclasserement plus rapide et plus efficace des réacteurs nucléaires ayant subi de graves accidents



## 14 Robots, intelligence artificielle et modèles 3D Comment les avancées technologiques contribuent au déclasserement nucléaire



## 16 Planification du déclasserement dès la conception Comment la conception des réacteurs avancés prend en considération leur fin de vie



## 18 Comment l'économie circulaire transforme le déclasserement des installations nucléaires



## 20 Gestion des déchets radioactifs issus du déclassé



## 24 Le marché du déclassé nucléaire est promis à un bel essor



## 26 Application des garanties nucléaires pendant le déclassé



## 28 Se préparer 60 années à l'avance

Se préparer 60 années à l'avance



## 30 Encourager la prochaine génération à faire carrière dans le déclassé

### QUESTIONS-RÉPONSES

---

## 32 Avis d'expert sur le déclassé de l'usine de retraitement du combustible usé de La Hague

### DANS LE MONDE

---

## 34 Un nouveau modèle économique pour le déclassé des centrales nucléaires

### INFOS AIEA

---

## 36 Actualités de l'AIEA

## 40 Publications

# Déclassement nucléaire

## Gérer le passé et prévoir l'avenir

Par Patrick O'Sullivan

Le nombre d'installations nucléaires qui devront être déclassées devrait augmenter de manière significative au cours des 10 à 20 prochaines années. Il n'existe pas de relation simple entre l'âge d'une installation et le moment de sa mise à l'arrêt définitive, car de multiples facteurs, notamment politiques et économiques, peuvent influencer sur cette décision. Le moment choisi pour le déclasser peut également dépendre de la maintenance, des coûts de rénovation et de l'évolution du marché de l'électricité, entre autres choses (voir pages 8 et 9). Toutefois, les politiques gouvernementales encouragent de plus en plus les stratégies de déclasser immédiat, conformément aux principes de durabilité, afin que les charges liées au déclasser, comme la gestion des déchets, ne soient pas transférées aux générations futures. La possibilité de réutiliser un site pour la construction de nouvelles installations nucléaires ou à d'autres fins est également un élément important à prendre en compte.

### Durée et budget

Le déclasser d'une grande installation nucléaire est une entreprise complexe qui nécessite généralement beaucoup de temps et un budget conséquent. Par exemple, le coût du déclasser d'un réacteur nucléaire de puissance, en incluant les coûts liés à la gestion des déchets associés, varie généralement entre 500 millions et 2 milliards de dollars, sachant que le déclasser des réacteurs refroidis par gaz et modérés au graphite est nettement plus coûteux que celui des réacteurs à eau pressurisée ou bouillante, du fait de la taille et de la complexité beaucoup plus importantes de ces réacteurs. Le processus de déclasser dure généralement de 15 à 20 ans, bien que cette durée soit variable. Le coût du déclasser d'une grande installation du cycle du combustible, par exemple une installation de retraitement du combustible usé, s'établit généralement aux alentours de 4 milliards de dollars, et cette opération peut prendre plus de 30 ans. Le déclasser d'un réacteur de recherche d'une puissance thermique de 10 mégawatts peut coûter plus de



20 millions de dollars et prendre de 5 à 10 ans, bien que le coût dépende de la taille du réacteur, de son objectif et de ses antécédents d'exploitation. Toutefois, certains exemples de réussite suggèrent qu'il est possible de réduire la durée et le coût du processus de déclassement.

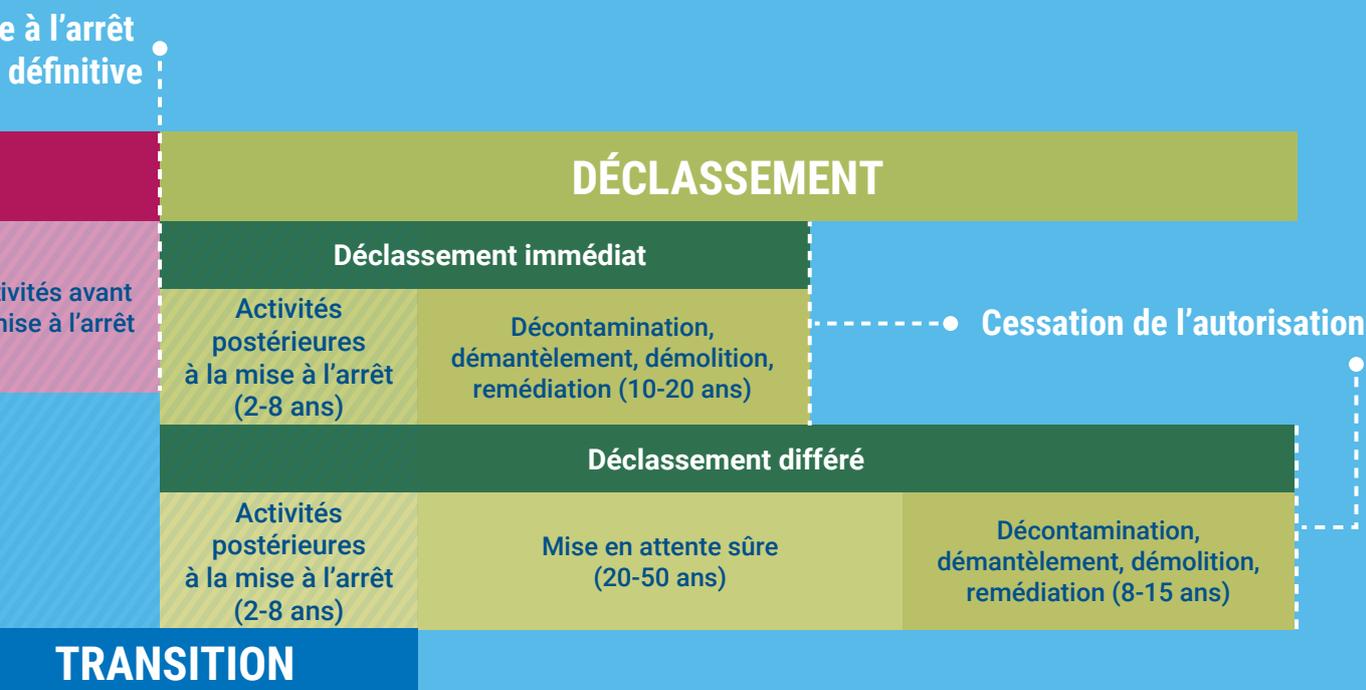
### Des défis de taille pour le secteur du déclassement

L'augmentation prévue du nombre d'installations nucléaires qui seront définitivement mises à l'arrêt d'ici à 2050 signifie que d'importantes ressources – tant humaines que financières – seront nécessaires pour mettre en œuvre les programmes de déclassement requis, dont certains s'étendront jusqu'à la fin de ce siècle. En ce qui concerne les installations commerciales, des fonds ont généralement été mis de côté durant l'exploitation pour couvrir les coûts de déclassement. En revanche, le déclassement d'un nombre important d'installations est financé, directement ou indirectement, par des ressources publiques. Dans ce cas, le processus peut être

retardé si des financements suffisants ne sont pas disponibles. Il sera également nécessaire de disposer d'une main-d'œuvre importante et hautement qualifiée pour mettre en œuvre les futurs programmes de déclassement. Inciter les jeunes à opter pour une carrière dans le déclassement et la gestion des déchets radioactifs est l'un des défis les plus importants pour le secteur actuellement (voir page 30).

### Recycler et réutiliser les déchets

Le déclassement entraîne la production de grandes quantités de matériaux et de déchets, dont la plupart n'ont pas été contaminés par des substances radioactives. Des efforts sont faits pour qu'une grande partie de ces déchets non contaminés, notamment les métaux, les débris de béton et la terre, soit recyclée ou réutilisée, conformément aux principes de l'économie circulaire (voir page 28). Dans certains cas, les gravats issus de la démolition peuvent être utilisés pour combler les espaces créés par l'enlèvement des structures souterraines. On envisage également d'accroître le recyclage



des métaux, notamment en vue de leur réutilisation dans l'industrie nucléaire.

Pour une grande partie des matériaux ayant subi une contamination radioactive – qui représentent généralement environ cinq pour cent du volume total de matériaux issus du déclassement – le niveau de radioactivité n'est que très faible et ces matériaux peuvent être stockés définitivement dans des dépôts en surface ou à faible profondeur. Pour une petite partie des matériaux ayant subi une contamination radioactive (moins de cinq pour cent du volume total de matériaux issus du déclassement), la levée du contrôle réglementaire ou le stockage définitif en surface ou à faible profondeur ne sont pas envisageables en raison de leur activité élevée et de la présence de radionucléides hautement actifs ou à longue période ; ces matériaux seront à terme stockés de manière sûre dans des installations de stockage souterraines (voir pages 20 à 23).

### Faire face aux besoins futurs

Compte tenu de l'ampleur des besoins futurs en matière de déclassement et des gains d'efficacité que pourraient permettre les nouvelles technologies, il est probable que les stratégies de mise en œuvre des projets évolueront grandement dans un futur proche, une fois que ces technologies auront été largement adoptées et que leur intérêt en termes de

coût aura été démontré. Parmi ces évolutions, on peut citer l'application de techniques numériques pour faciliter la planification et optimiser la mise en œuvre des projets, l'utilisation accrue d'outils télécommandés, y compris les drones et la robotique, pour la segmentation des composants des centrales, la manipulation des matériaux, les mesures et la décontamination, l'automatisation accrue des activités de gestion des déchets et l'utilisation de l'intelligence artificielle (voir page 12).

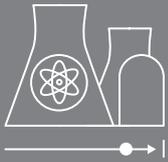
La chaîne d'approvisionnement a une importance cruciale, car elle permet de garantir l'optimisation de la mise en œuvre des futurs projets, en termes d'efficacité et d'efficience. Il apparaît déjà de façon évidente que les acteurs de la chaîne d'approvisionnement consolident leur expertise pour pouvoir proposer une gamme plus large de services de déclassement dans des domaines tels que la recherche-développement concernant les nouvelles technologies, l'ingénierie, le démantèlement et la gestion des déchets radioactifs. Une évolution récente spécifique au domaine du déclassement de centrales nucléaires a été l'apparition de consortiums spécialisés dans le déclassement qui rassemblent des entreprises spécialisées pour mener du début à la fin des projets de déclassement dans les limites d'un budget donné, en appliquant des approches standardisées et en assumant tous les risques associés au projet (voir page 24).

## Qu'est-ce que le déclassement nucléaire ?

Dans le secteur de l'énergie nucléaire, le « déclassement » est un terme générique que l'on emploie pour désigner toutes les activités qui permettent la mise à l'arrêt définitive, la décontamination et le démantèlement des installations nucléaires ainsi que la levée du contrôle réglementaire auquel celles-ci sont soumises. Le déclassement n'est pas terminé tant que les matières radioactives et autres matières dangereuses n'ont pas été retirées du site, et que les bâtiments et les terrains utilisés jusqu'ici comme installations nucléaires n'ont pas été préparés aux fins d'autres usages. Dans l'étape finale (du processus de déclassement), des études approfondies sont menées pour confirmer l'absence de toute radioactivité significative sur le site, ce qui permet de lever le contrôle réglementaire sur ce site.



## Le déclassement dans le monde, en chiffres



Plus de  
**420**  
réacteurs nucléaires de  
puissance en service  
dans le monde

Actuellement, environ 420 réacteurs nucléaires de puissance sont exploités dans le monde, et la majorité d'entre eux approchent de la fin de leur durée de vie nominale initialement prévue.



**50%**  
seront mis  
à l'arrêt d'ici 2050

Jusqu'à la moitié des réacteurs actuels pourraient être définitivement mis à l'arrêt d'ici 2050 et devraient donc être déclassés.



Environ  
**200**  
ont été retirés  
du service

Plus de 200 réacteurs nucléaires de puissance ont déjà été retirés du service et 21 d'entre eux ont été entièrement déclassés.

**222**

réacteurs de recherche  
dans 53 pays

**353**

installations du cycle du  
combustible dans 40 pays

seront probablement mis définitivement à l'arrêt

Une part importante des réacteurs de recherche actuellement en service (222 dans 53 pays) et des installations du cycle du combustible (353 dans 40 pays) est également susceptible d'être mise définitivement à l'arrêt au cours de cette période.

Environ  
**450**

réacteurs de  
recherche

et

plus de  
**150**

installations du cycle du  
combustible nucléaire

ont été entièrement déclassés

Environ 450 réacteurs de recherche ont déjà été entièrement déclassés, de même que plus de 150 installations du cycle du combustible.

Une expérience significative en matière de déclassement a déjà été acquise depuis le début du siècle, en particulier dans les pays qui ont mis en place leurs programmes nucléaires au milieu du XX<sup>e</sup> siècle, comme l'Allemagne, les États-Unis, la Fédération de Russie, la France, l'Italie, le Japon et le Royaume-Uni. D'autres pays, dont la Bulgarie, le Canada, l'Espagne, la Lituanie, la Slovaquie et l'Ukraine, disposent également d'une expertise dans ce domaine, et par ailleurs d'importants programmes devraient être menés au cours des 30 prochaines années en Belgique, en Chine, en Corée, en Inde, au Pakistan et en Suède.

# Déclassement d'une centrale nucléaire

Par Joanne Liou

Le déclassement est la dernière étape du cycle de vie d'une centrale nucléaire. La planification du déclassement, dès la phase de conception de la centrale, vise à ce que le démantèlement et la gestion des déchets qui en découle puissent se faire de manière sûre et efficace sans effets négatifs sur l'environnement. Lorsqu'une centrale nucléaire est définitivement mise à l'arrêt, ses procédures opérationnelles de production d'électricité laissent place aux activités de préparation et de mise en œuvre du déclassement, ce qui entraîne des modifications de l'organisation et des systèmes de sûreté de la centrale. Lorsque le démantèlement est différé, l'installation est placée dans un état stable jusqu'à ce qu'il ait lieu, tandis que les niveaux de

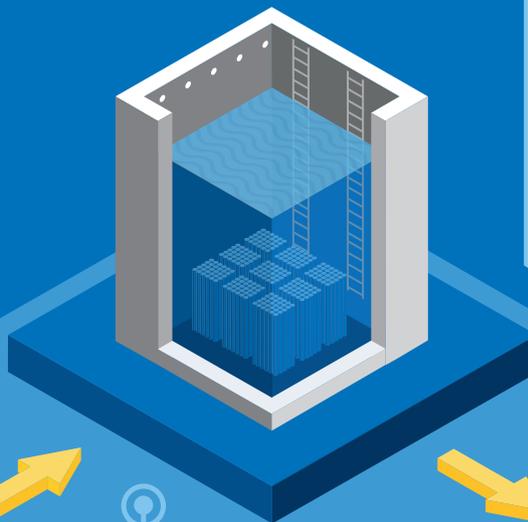
## 1 PRÉPARATION

La clé d'un déclassement réussi est de soigneusement **planifier et prendre en compte tous les aspects du projet**, dès le stade de la conception, notamment le financement, la transformation organisationnelle et les agréments réglementaires.



## 2 MISE À L'ARRÊT

Le combustible nucléaire est retiré du cœur du réacteur et transféré dans une installation d'entreposage de combustible usé. **Les systèmes de sécurité et de gestion des déchets de l'installation sont adaptés.** Les caractéristiques de l'installation aux fins du déclassement et les niveaux de rayonnements prévus sont déterminés.



## 3 DÉCONTAMINATION ET DÉMANTÈLEMENT

**Les composants radioactifs de l'installation sont décontaminés,** découpés et placés dans des colis de déchets ou retirés de l'installation en vue de leur transformation future.



radioactivité décroissent naturellement. Le temps écoulé entre la mise à l'arrêt définitif d'une centrale nucléaire et l'achèvement du démantèlement, qui peut aller d'une dizaine d'années à 70 ans ou plus, varie d'un pays à l'autre.

Après le déclassement, le site est disponible pour d'autres objectifs sociaux ou économiques. Le processus de déclassement comprend les principales étapes suivantes :

## 5 ASSAINISSEMENT ET PRÉPARATION À LA RÉUTILISATION

Le site est préparé pour une réutilisation éventuelle par extraction des couches du sol et des matières contaminées en vue de leur stockage définitif. Les trous laissés dans le sol par l'enlèvement des structures sont comblés.



## 4 DÉMOLITION

Tous les bâtiments, structures et composants non radioactifs sont réduits en pièces, organisés et recyclés autant que possible. **Les déchets radioactifs sont traités séparément et entreposés ou stockés définitivement.**

## 6 INSPECTION FINALE ET LEVÉE DU CONTRÔLE RÉGLEMENTAIRE

Une étude détaillée du site garantit à l'organisme de réglementation que le **niveau d'assainissement attendu a été atteint**, ce qui permet de lever le contrôle réglementaire sur le site et de **le réutiliser à d'autres fins.**

# Déclassement des centrales nucléaires : la Slovaquie donne l'exemple

Par Michael Amdi Madsen

L'entrée de la Slovaquie dans l'Union européenne (UE) en 2004 était assortie d'une condition essentielle en matière de sûreté nucléaire : le pays devrait fermer et déclasser les réacteurs V1 de la centrale nucléaire de Bohunice. Ces réacteurs de l'ère soviétique n'étaient plus considérés conformes aux normes de sûreté nucléaire d'alors. Le Gouvernement slovaque s'est donc engagé à déclasser les réacteurs et il a ainsi donné l'exemple d'un déclasserment sûr, efficace et efficace. Avec l'appui de l'AIEA et de la Commission européenne, la Slovaquie fait aujourd'hui profiter d'autres pays des enseignements qu'elle en a tirés.

Le pays tire un peu plus de la moitié de son électricité de l'énergie nucléaire. Les quatre réacteurs du site de Bohunice y étaient pour une bonne part. Avec la première tranche de Bohunice V1, mise en service en 1978, le site a disposé pour la première fois d'un réacteur à eau sous pression refroidi et modéré par eau (VVER) de type 440 V230. C'était l'une des premières versions des réacteurs de puissance refroidis et modérés par eau développés par l'Union soviétique. Cependant, la conception du bâtiment de confinement a posé problème, car elle présentait un plus grand risque de grosse brèche de tuyauterie que les bâtiments construits plus tard sur la base de conceptions améliorées.

Olena Mykolaichuk, directrice de la Division du cycle du combustible nucléaire et de la technologie des déchets à l'AIEA, a travaillé en étroite collaboration avec des experts de la Société slovaque de l'énergie nucléaire et du déclasserment JAVYS tout au long du projet de déclasserment de Bohunice V1. « Tout au long du déclasserment, JAVYS a recouru à des outils numériques innovants pour garantir la

sûreté et l'efficacité du processus. Ces outils sont maintenant adoptés dans des projets de déclasserment partout dans le monde », a déclaré M<sup>me</sup> Mykolaichuk.

JAVYS a utilisé des outils de modélisation et de simulation virtuelles. Par simulation, les ingénieurs ont mis au point des procédures permettant d'extraire la cuve du réacteur qui était incrustée dans le puits en béton du réacteur, puis de la déplacer et de la descendre dans des piscines d'eau où elle a pu être découpée en toute sûreté à l'aide de scies afin d'être emballée pour être stockée de façon sûre.

Pour Eva Hrasnova, chef de projet à JAVYS, le projet a montré que des outils de coupe mécaniques tels que les scies à ruban et les scies circulaires, utilisés sous l'eau, permettaient de découper de manière sûre et efficace les composants radioactifs du circuit primaire des réacteurs VVER-440. Le projet a également montré qu'il était crucial d'utiliser une combinaison de méthodes de décontamination – des méthodes chimiques, électrochimiques, ultrasoniques et mécaniques telles que le sablage et le broyage par exemple, pour assurer l'efficacité de la gestion des déchets ultérieure.

« Le déclasserment de Bohunice V1 a fourni une multitude d'enseignements pratiques aux agents de déclasserment », a déclaré M<sup>me</sup> Mykolaichuk. « Qu'il s'agisse de trouver comment économiser l'espace et l'argent en réutilisant des bâtiments pour l'entreposage ou de recycler une grande partie de l'acier, des métaux et du béton à l'appui de l'économie circulaire. »



Le déclassement de Bohunice V1 est en cours et devrait se poursuivre jusqu'en 2027. Soutenu financièrement par l'Union européenne et la Banque européenne pour la reconstruction et le développement, le projet devrait coûter en tout 1,239 milliards d'euros.

En reconnaissance des accomplissements de JAVYS dans le déclassement de Bohunice V1 et afin de renforcer la mise en œuvre de projets similaires dans le monde, la société a été désignée centre collaborateur de l'AIEA en mars 2021. En tant que centre collaborateur pour le déclassement des installations nucléaires et la gestion des déchets radioactifs, JAVYS a ainsi pu partager son expérience en coordination avec l'AIEA.

« À Bohunice, nous pouvons démontrer efficacement les progrès techniques et la sûreté en matière de caractérisation physique et radiologique, de décontamination, de démantèlement, de démolition et de gestion des déchets associés », a affirmé Pavol Štuller, directeur général de JAVYS, lors de la cérémonie de signature du centre collaborateur qui s'est tenue à Vienne (Autriche). « Notre coopération avec l'AIEA, centrée sur les travaux exécutés et planifiés, se renforcera à mesure des progrès du centre collaborateur ces prochaines années. »

Le partenariat entre l'AIEA et JAVYS porte déjà ses fruits, et l'AIEA a organisé l'atelier international sur les enseignements tirés de la mise en œuvre de projets de déclassement de réacteurs de puissance refroidis et modérés par eau à Trnava (Slovaquie) en mai 2022. Lors de cet atelier, des experts de

JAVYS ont partagé les connaissances de la société en matière de déclassement avec des experts d'Arménie, de Belgique, de Bulgarie, de Chine, de Finlande, de Hongrie, d'Italie, de Norvège, d'Ouzbékistan, de la République tchèque et de Türkiye, ainsi qu'avec des représentants de la BERD et de la CE.

« Certains de ces pays exploitent actuellement des réacteurs VVER et préparent leur déclassement, tandis que d'autres se lancent dans des programmes électronucléaires ou construisent des installations nucléaires et envisagent déjà les prescriptions du déclassement à long terme », a expliqué M<sup>me</sup> Mykolaichuk. « Nous assistons à l'émergence d'activités nucléaires plus responsables et tournées vers l'avenir, dans lesquelles le démantèlement et ses défis sont pris en compte d'emblée. Ces activités sont renforcées par les enseignements tirés de l'expérience de JAVYS avec Bohunice V1. »

**Visite scientifique collective à Trnava et à la centrale nucléaire de Bohunice en Slovaquie, à laquelle ont participé des experts venus de Géorgie, de Grèce, de Hongrie, de Lituanie, de Russie, de Slovénie et d'Ukraine, 11-14 octobre 2011.**

(Photo : D. Calma/AIEA)



# Des outils de nouvelle génération favorisent un déclasséement plus rapide et plus efficace des réacteurs nucléaires ayant subi de graves accidents

Par Nayana Jayarajan

Quelques jours après le tremblement de terre le plus puissant jamais enregistré au Japon, il ne faisait aucun doute que les tranches 1 à 4 de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi seraient définitivement mises à l'arrêt. Le 11 mars 2011, un tsunami gigantesque provoqué par le tremblement de terre a balayé les protections côtières du Japon et les murs d'enceinte de la centrale nucléaire, causant des dommages considérables. Les inondations ont endommagé les générateurs de secours, entraînant la surchauffe du combustible nucléaire dans trois tranches de réacteurs puis la fusion partielle des cœurs. La centrale nucléaire a également connu plusieurs explosions d'hydrogène qui ont endommagé des bâtiments et provoqué le rejet de matières radioactives. Plus de 150 000 personnes ont été évacuées de la préfecture de Fukushima et les autorités ont mis en place une zone d'exclusion. Cependant, une fois largement maîtrisée la catastrophe immédiate découlant du tsunami, les problèmes de déclasséement de l'installation, lourdement endommagée, n'ont fait que commencer.

Le déclasséement d'une installation nucléaire après un accident grave est une entreprise complexe qui, par rapport à un déclasséement intervenant après un arrêt programmé, nécessite souvent des stratégies, des techniques et des pratiques particulières. De ce fait, garantir la sûreté radiologique pendant l'exécution de toutes les activités constitue un défi majeur. Par exemple, l'une des tâches les plus délicates du déclasséement d'un réacteur accidenté est le retrait du combustible usé et endommagé.

Dans le cas de l'accident de Fukushima Daiichi, une partie du combustible nucléaire avait fondu et était tombée dans la partie inférieure des enceintes de confinement des tranches de réacteurs 1, 2 et 3. Les niveaux élevés de rayonnements à l'intérieur des bâtiments de confinement ont restreint l'accès des travailleurs à la zone proche du réacteur. Les exploitants ont été confrontés à un problème majeur : comment retirer le combustible endommagé si l'on n'en connaît pas l'emplacement exact ?

C'est là qu'intervient la muographie, technique d'imagerie des muons issus du rayonnement cosmique élaborée il y a plus de soixante ans et employée depuis lors dans différents domaines, aussi bien à l'intérieur des volcans et des pyramides de l'Égypte ancienne que pour la détection de matières nucléaires dans des conteneurs d'expédition. Les détecteurs de muons révèlent la présence des particules subatomiques

naturelles de haute énergie et en suivent la trajectoire accidentée lorsqu'elles traversent les matériaux, dont on peut ainsi déterminer la densité. Les matières nucléaires telles que l'uranium et le plutonium sont très denses donc relativement faciles à identifier par cette technique.

La muographie a été employée à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi pour localiser les débris de combustible dans les cœurs des réacteurs et évaluer leur état. En 2015, au Japon, des experts ont élaboré une technique modifiée afin de repérer des débris pouvant mesurer jusqu'à 30 centimètres au minimum. Cette technique a servi à déterminer l'état du combustible endommagé dans le réacteur de la tranche 1 de Fukushima Daiichi, préalable essentiel aux opérations de déclasséement.

Cet exemple n'en est qu'un parmi tant d'autres où l'innovation technologique a permis de résoudre des problèmes inédits et imprévus de déclasséement et de relèvement après un accident.

« Les conséquences d'un accident sont toujours imprévisibles et l'infrastructure organisationnelle et technique existante et les technologies disponibles peuvent ne pas être adaptées ou suffisantes pour répondre aux besoins après l'accident. Souvent, lors du déclasséement d'installations nucléaires endommagées, les approches technologiques et le matériel nécessaire sont mis au point au cas par cas », explique Vladimir Michal, expert en déclasséement à l'AIEA, qui a codirigé un projet visant à documenter et à analyser le déclasséement et la remise en état d'installations nucléaires endommagées, le Projet international sur la gestion du déclasséement et de la remédiation des installations nucléaires endommagées (DAROD). « Dans de nombreux cas, comme dans celui de la muographie, ces technologies ont trouvé une application plus large dans le cadre du déclasséement, voire dans d'autres domaines. »

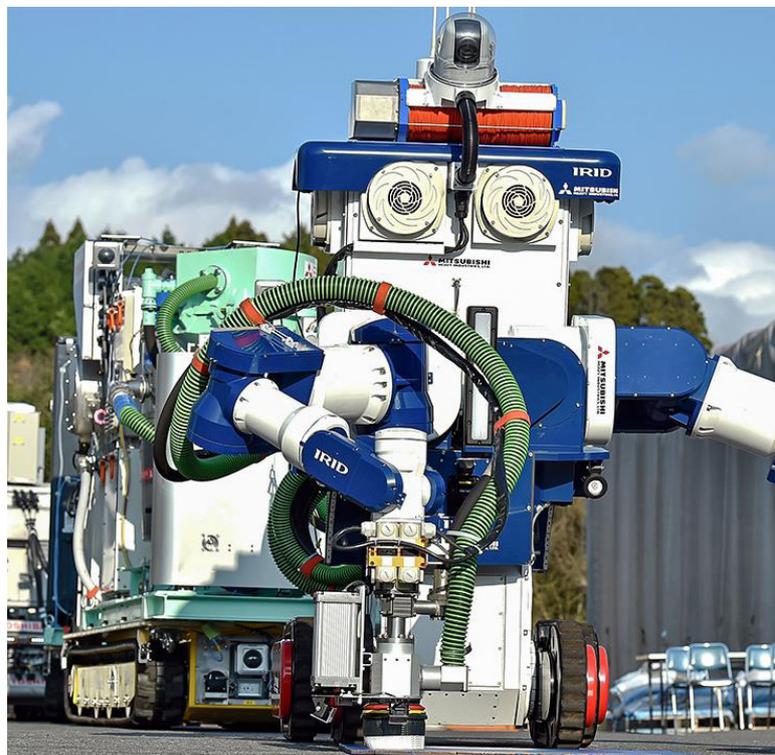
Un autre exemple notable est la construction d'une nouvelle enveloppe de confinement sûr au-dessus du bâtiment du réacteur de la tranche 4 de la centrale nucléaire de Tchernobyl, en Ukraine, entre 2016 et 2019. Destiné à remplacer l'abri temporaire construit après la catastrophe de 1986, il s'agit de la plus grande structure terrestre mobile au monde. Il est conçu pour durer cent ans et pour résister à de violentes intempéries. Cette nouvelle structure de confinement a été bâtie à environ 180 mètres à l'ouest de la tranche 4 endommagée. Sa construction et son positionnement ont nécessité de recourir à des techniques de génie civil très avancées.

« La nouvelle enveloppe de confinement sûr n'empêche pas seulement le rejet de matières radioactives, mais facilite aussi le déclassement futur », a déclaré Valeriy Seyda, directeur général par intérim de l'entreprise spécialisée d'État de la centrale nucléaire de Tchernobyl. La structure de confinement sûr est conçue pour empêcher le rejet de contaminants radioactifs, protéger les structures internes du réacteur et faciliter le déclassement. Aux fins du déclassement, elle comprend deux grues télécommandées de pointe. Celles-ci sont installées juste sous le toit et sont conçues de sorte à permettre le déclassement ultime de la tranche 4 tout en protégeant les travailleurs et l'environnement.

À la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, la technique d'ingénierie bien établie consistant à construire un mur souterrain en sol gelé a été utilisée pour empêcher les eaux souterraines de s'écouler sur le site et de se mélanger à l'eau déjà contaminée à l'intérieur des bâtiments du réacteur. Le mur de 1 500 mètres a été construit en gelant le sol de manière à le rendre imperméable aux eaux souterraines, réduisant ainsi la quantité totale d'eau contaminée à traiter.

Les technologies robotiques télécommandées avancées permettent maintenant de mener des travaux de déclassement dans des zones à intensité de rayonnement élevée. Ainsi, à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, des robots sont utilisés pour la surveillance et les mesures, la conduite d'études, la décontamination et les préparatifs de l'enlèvement des débris de combustible.

« Les robots télécommandés qui transportent des outils de mesure et de visualisation des rayonnements sont une priorité des travaux de recherche-développement visant à réduire le plus possible la radioexposition des travailleurs sur le site et à faire constamment progresser le déclassement de la centrale de Fukushima Daiichi », a déclaré Kentaro Funaki, directeur exécutif de l'Agence japonaise de l'énergie atomique. M. Funaki a souligné que les projets internationaux menés conjointement constituaient l'un des éléments clés du large éventail de projets de recherche-développement financés par le Gouvernement. « Des efforts considérables sont actuellement déployés pour visualiser en trois dimensions les points chauds radioactifs près des tranches 1 et 2 de la centrale de Fukushima Daiichi. La fusion des résultats des recherches menées conjointement aux niveaux national et international s'est révélée très fructueuse et ces activités se poursuivront à l'avenir », a-t-il ajouté.



**Un robot de décontamination déployé à Fukushima Daiichi pour soutenir les activités de démantèlement.**

(Photo : Institut international de recherche pour le déclassement des centrales nucléaires, Japon)

L'utilisation de technologies non nucléaires dans des environnements nucléaires pose de nombreux problèmes, parmi lesquels le poids des coûts de développement, du fait notamment de la présence de rayonnements et de l'incertitude quant aux conditions précises dans lesquelles le matériel sera utilisé. Toutefois, les progrès accomplis pour ce qui est du câblage et d'autres composants essentiels ainsi que la mise au point d'équipements résistant aux rayonnements permettent d'utiliser les technologies robotiques de manière sûre et efficace dans ces environnements hostiles. De plus, les technologies laser permettent de scanner l'intérieur de ces environnements, souvent inaccessibles à l'homme, tout en protégeant la santé et la sûreté des travailleurs. « Ces progrès accroissent considérablement les possibilités de démantèlement sûr et efficace, même dans des situations très difficiles faisant suite à un grave accident nucléaire dans une installation », a déclaré M. Michal.

# Robots, intelligence artificielle et modèles 3D

## Comment les avancées technologiques contribuent au déclassement nucléaire

Par Jeffrey Donovan

Les robots, les drones, l'intelligence artificielle et d'autres nouvelles technologies numériques, qui favorisent déjà la mise en œuvre rapide des projets de déclassement nucléaire dans le monde entier, sont appelés à y jouer un rôle de plus en plus important, car un nombre croissant de pays optent pour le déclassement immédiat de leurs installations nucléaires désaffectées.

Pour rendre le travail plus efficace et réduire les risques, notamment financiers et radiologiques, les pays utilisent des outils de haute technologie tels que la réalité virtuelle et la simulation 3D – une tendance vouée à prendre de l'ampleur dans les années à venir, alors que plusieurs centrales nucléaires vieillissantes et d'autres installations nucléaires seront progressivement mises hors service.

« Qu'il s'agisse de robots à l'épreuve des rayonnements utilisés sur les sites d'accidents tels que Fukushima Daiichi au Japon ou de la modélisation 3D utilisée pour mieux planifier le démantèlement des centrales désaffectées, l'industrie du déclassement nucléaire se trouve de plus en plus à la pointe de l'innovation technologique », a déclaré Mikhail Chudakov, Directeur général adjoint et Chef du Département de l'énergie nucléaire de l'AIEA. « Ces technologies fournissent des indications cruciales pour la planification et l'exécution de projets, en particulier dans des situations qui pourraient présenter des risques pour les personnes, contribuant ainsi à ce que ces tâches soient réalisées en toute sûreté et efficacité. »

De l'Europe à l'Asie en passant par les Amériques, les exemples de technologies de pointe utilisées pour surmonter des obstacles inhabituels et faire avancer les projets de déclassement sont légion. Une des institutions à l'avant-garde de cette tendance est l'Institut norvégien des technologies de l'énergie (IFE) qui, en 2019, est devenu un centre collaborateur de l'AIEA spécialisé dans l'appui aux activités de l'AIEA et des États Membres sur la numérisation de la gestion des connaissances pour le déclassement nucléaire. L'IFE a été le premier à utiliser des systèmes de réalité virtuelle à des fins de maintenance et de déclassement dans des milieux nucléaires.

« Ces technologies sont utilisées pour former les travailleurs, notamment à la visualisation des rayonnements, afin qu'ils comprennent les conditions radiologiques », explique István Szőke, directeur de recherche à l'IFE. « L'IFE est spécialisé dans l'intégration en temps réel de modèles numériques 3D d'actifs nucléaires avec des modèles de physique et d'intelligence artificielle, dont des modèles de physique des

rayonnements. La visualisation des rayonnements repose donc sur des données physiques réelles et les modèles de transport des rayonnements permettent de calculer par exemple l'intensité de rayonnements autour des installations à déclasser, et de la visualiser à des fins de planification et de formation. » Cette technique est de plus en plus courante dans les programmes de déclassement, notamment pour les réacteurs de puissance et les réacteurs de recherche, ainsi que pour le démantèlement des installations du cycle du combustible nucléaire.

Plus récemment, l'IFE a appuyé une collaboration internationale visant à établir des systèmes modulaires et intégrés de gestion de l'information à utiliser tout au long du processus de déclassement. Il s'agit notamment de construire un système intégré fondé sur la numérisation 3D et la conception assistée par ordinateur (CAO) ou de produire des maquettes numériques du bâtiment (MNB) intégrant des données radiologiques en 3D et d'autres données. Ces méthodes permettent de gérer toutes les informations, sont intégrées aux modèles de physique radiologique et à d'autres systèmes, et les rassemblent dans un système appuyant le principe de réduction du risque radiologique au niveau « aussi bas que raisonnablement possible ».

Les simulations numériques et la modélisation 3D ont également été utilisées avec succès dans des projets de déclassement en Italie et en Slovaquie. Sogin, l'entreprise publique italienne de déclassement et de gestion des déchets radioactifs, a utilisé des modèles et des simulations 3D pour mieux planifier le démantèlement des réacteurs et la gestion des flux de déchets générés. La société slovaque de l'énergie nucléaire et du déclassement (JAVYS) a utilisé des modèles et des simulations 3D pour démanteler des composants des réacteurs de puissance des centrales nucléaires Bohunice A1 et V1. Comme l'IFE, Sogin et JAVYS partagent leurs connaissances et leur expérience avec la communauté nucléaire mondiale en tant que centres collaborateurs de l'AIEA pour le déclassement et la gestion des déchets radioactifs.

Une autre tendance actuelle qui va dans le même sens est l'utilisation accrue de la robotique. Celle-ci peut réduire les risques pour le personnel en lui permettant d'utiliser à distance les outils servant à manipuler les composants, tout en améliorant l'efficacité, car les robots autonomes et télécommandés sont mieux à même de pénétrer dans les zones difficiles d'accès et d'y travailler. Les robots mobiles munis de capteurs et de systèmes 3D sont de plus en plus

utilisés pour analyser les installations et collecter des données pouvant servir à construire des modèles 3D du site. « L'un des objectifs les plus urgents pour l'industrie est de comprendre comment utiliser l'intelligence artificielle pour transformer les numérisations 3D, maintenant très faciles à produire, en maquettes numériques intelligentes du bâtiment », explique M. Szóke. « On élabore également des "jumeaux numériques" des installations, qui peuvent être utilisés pour faciliter le déclassement de systèmes complexes mais également pour structurer les connaissances relatives aux installations tout au long de leur cycle de vie. »

En 2022, l'AIEA a lancé une initiative mondiale visant à promouvoir le rôle des technologies nouvelles et émergentes dans le déclassement des installations nucléaires. L'initiative, projet de collaboration entre les organismes intervenant dans la planification ou la mise en œuvre du déclassement et des activités de recherche connexes, vise à fournir des

informations sur les outils et technologies numériques nouveaux et émergents utilisés dans la gestion des données, la planification, l'octroi d'autorisations et la mise en œuvre du déclassement.

« L'objectif du projet est de tirer parti de l'expertise de divers organismes intervenant dans le déclassement afin de réaliser pleinement le potentiel des technologies nouvelles et émergentes », dit Olena Mykolaichuk, Chef de la Division du cycle du combustible nucléaire et de la technologie des déchets de l'AIEA. L'AIEA publiera les résultats du projet dans un rapport en 2025, et notamment des informations sur les expériences de plusieurs pays, afin de continuer d'appuyer la réussite de projets de déclassement dans le monde entier.

**« Chien-robot » : un robot autonome possédant des jambes établit une carte des rayonnements autour de la tranche 4 de Tchernobyl.**

(Photo : Boston Dynamics, États-Unis d'Amérique)



# Planification du déclassement dès la conception

## Comment la conception des réacteurs avancés prend en considération leur fin de vie

Par Joanne Liou

L'idée de prévoir la fin de vie dès la conception pourrait paraître secondaire ou particulièrement peu séduisante. Cependant, lorsqu'il s'agit d'une installation nucléaire, l'intérêt de prévoir les opérations à exécuter à la fin de son cycle de vie est tel que les concepteurs, les fournisseurs et les organismes de réglementation se penchent sur la question très en amont. Cette approche proactive, dite planification du déclassement dès la conception, s'appuie sur les meilleures pratiques et les enseignements tirés du passé. Elle répond au principe d'« intégration dans la conception » qui s'étend également à la sûreté, à la sécurité et aux garanties nucléaires. Lorsque le déclassement est intégré à la conception dès le départ, les concepteurs des installations peuvent faire des choix qui le rendront plus sûr, plus efficace et moins coûteux.

« En le prenant en considération au stade de la conception d'une installation nucléaire, il est possible d'optimiser le déclassement de cette dernière, soit l'étape ultime, qui est obligatoire dans le cycle de vie d'un réacteur », a déclaré Helena Mrazova, spécialiste des technologies du déclassement à l'AIEA. Les premières générations de centrales nucléaires ont été conçues dans l'optique de performances d'exploitation à court terme, et le déclassement n'était envisagé qu'après coup. C'est le cas de certains réacteurs au graphite refroidis au gaz, construits en France dans les années 1970. Leur conception sans prévisions de démantèlement rend aujourd'hui ce dernier délicat à mettre en œuvre.

« Nous avons des installations de plus de 60 mètres de haut, de 30 mètres de diamètre et des murs épais de plus de 5 mètres de béton, qui abritent des tonnes de graphite dans le cœur du réacteur. Le démantèlement de ces réacteurs pose un véritable défi, car ils n'ont tout simplement pas été conçus pour être déclassés. La compagnie française Électricité de France (EDF) a récemment construit un démonstrateur pour le démantèlement de réacteurs au graphite (devenu également un centre collaborateur de l'AIEA) pour tester, améliorer et optimiser des outils innovants et des technologies de télémanipulation sur des maquettes grandeur nature et des modèles numériques en 3D. Il s'agit de vérifier la faisabilité des scénarios de déclassement et d'en optimiser les opérations », a déclaré M<sup>me</sup> Mrazova.

### Des attentes et des opportunités considérables

La planification du déclassement dès la conception vise à mieux organiser la séquence des activités de déclassement, à réduire l'exposition potentielle des travailleurs aux rayonnements et à diminuer la quantité de déchets radioactifs. Elle permet ainsi d'alléger la charge qui pèse sur les installations d'entreposage des déchets et sur les générations futures. « La planification du déclassement dès la conception ne concerne pas seulement les caractéristiques physiques de la conception, mais aussi la manière dont les entreprises se structurent pour planifier et mener les activités de déclassement », a déclaré Marcel de Vos, directeur des affaires réglementaires chez Prodigy Clean Energy, qui conçoit des centrales nucléaires transportables en mer et sur terre. M. de Vos a précédemment géré le programme Examen de la conception de fournisseurs (ECF) à la Commission canadienne de sûreté nucléaire (CCSN). « Il est essentiel de déterminer les mécanismes de financement et de définir les responsabilités en matière de déclassement pour que le processus de fin de vie soit mené à bien », a-t-il déclaré.

Si la planification du déclassement dès la conception n'est pas adoptée partout, le Canada, lui, a pris des mesures en faveur de cette pratique prospective. L'examen auquel la CCSN soumet les fournisseurs de réacteurs englobe la planification du déclassement dès la conception, qui repose sur les enseignements tirés des expériences documentées par l'AIEA et l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'Organisation de coopération et de développement économiques. « Les futurs propriétaires et exploitants canadiens attendent de plus en plus des fournisseurs qu'ils mènent à bien le processus d'ECF et qu'ils aient un plan clair pour remédier aux insuffisances qui auront été relevées. Le secteur industriel reconnaît que les considérations relatives à la fin de vie constituent une priorité dans les processus d'autorisation et d'évaluation de l'impact environnemental », a ajouté M. de Vos.

Les petits réacteurs modulaires (PRM), réacteurs nucléaires avancés dont la capacité de production d'énergie est limitée – généralement pas plus de 300 MWe chacun – suscitent de plus

en plus d'intérêt. Selon M. de Vos, au stade de la conception et du déploiement, les concepteurs de la prochaine génération de centrales nucléaires, y compris des PRM, ont une formidable occasion de répondre aux problématiques sociales associées à la fin de vie des installations nucléaires, d'accélérer le déclassement et de réduire la charge que représentent les déchets pour les générations futures.

## Déclassement des PRM

À travers le monde, on compte plus de 80 modèles et concepts de PRM à différents stades de développement. Comme ces réacteurs avancés diffèrent par leur taille, leurs matériaux et leur technologie, les méthodes de déclassement qui leur seront appliquées vont varier. Comme l'a expliqué M<sup>me</sup> Mrazova, le processus de déclassement dépendra de la conception de l'installation, de son accessibilité et de sa compacité, ainsi que des plans et pratiques de gestion du combustible usé et des déchets radioactifs du pays concerné.

La modularité des PRM et les différents modèles retenus pour leur déploiement pourraient conduire à une redéfinition des pratiques traditionnelles de déclassement. Certains, plus petits, communément appelés microréacteurs, sont conçus pour être assemblés en usine et transportés en un seul bloc vers leur site d'implantation. En fin de vie, le module serait renvoyé à l'usine d'origine pour être rechargé en combustible ou expédié vers une installation de déclassement. « Cette approche pourrait permettre de réduire les coûts et la portée des activités qui se déroulent à proximité de la centrale, d'accroître la sûreté nucléaire et radiologique et de mieux faire accepter le déploiement des PRM », a déclaré M<sup>me</sup> Mrazova. « Il est aussi possible de normaliser certaines activités de déclassement, telles que la décontamination ou le démantèlement des dispositifs du circuit primaire. » Toutefois, cette approche ne règle pas le problème de certaines tâches, comme la conception d'outils de démantèlement spécialisés et de matériel de télémanipulation.

La connaissance des matériaux utilisés, comme le type d'acier, et des normes que devront suivre les producteurs d'acier, dont



**De nombreux PRM de ce type sont suffisamment petits pour pouvoir être transportés par camion ou dans des conteneurs d'expédition.**

(Photo : Laboratoire national d'Oak Ridge, Ministère de l'énergie des États-Unis d'Amérique)

la nécessité de respecter des niveaux d'impuretés infimes afin de réduire le plus possible l'activation, aura un impact positif sur la gestion des déchets issus du déclassement. En planifiant le déclassement dès la conception, et si la composition des matériaux fait au préalable l'objet d'un examen attentif, il serait possible de réduire les niveaux d'impuretés et les répercussions associées sur les coûts du déclassement en fin de vie.

« La règle générale en matière de déclassement des installations nucléaires, y compris les PRM, est d'avoir une conception conciliable avec le déclassement, ce qui souligne l'importance de l'anticipation », a déclaré M<sup>me</sup> Mrazova. « Les caractéristiques distinctives des PRM, telles que leur modularité et la sélection de leurs matériaux, devraient rendre le déclassement plus efficace, moins coûteux et réduire le débit de dose quotidien des travailleurs affectés à cette tâche. »

L'AIEA élabore actuellement une publication sur les aspects de la conception des PRM intégrant leur déclassement, qui devrait paraître en 2024.

# Comment l'économie circulaire transforme le déclassement des installations nucléaires

Par Artem Vlasov

Le modèle économique linéaire traditionnel (extraction des matériaux, transformation en produits manufacturés, élimination après consommation) est souvent l'objet de critiques en raison de la quantité considérable de déchets et de pollution qu'il génère, et de sa contribution au changement climatique et à l'appauvrissement de la biodiversité.

Selon le groupe international d'experts sur les ressources du Programme des Nations Unies pour l'environnement, l'extraction et la transformation des ressources naturelles sont responsables d'environ la moitié des émissions mondiales de gaz à effet de serre.

L'économie circulaire, qui s'écarte de ce modèle, permet de réduire les déchets et la pollution qui leur est associée. Il s'agit d'un modèle de production et de consommation qui vise à prolonger au maximum l'utilisation des ressources par des procédés d'économie, de réutilisation et de recyclage.

L'adoption des principes de l'économie circulaire pour le déclassement des installations nucléaires peut présenter de nombreux avantages. Le déclassement est un processus multidisciplinaire, s'étendant sur au moins dix ans en général, qui comporte des opérations de décontamination, de démantèlement et de démolition d'installations nucléaires en vue de la levée du contrôle réglementaire sur leur site et de sa réutilisation. Recycler les matériaux au cours de ce processus permet de réduire la production de déchets, ainsi que le coût du déclassement et le risque de retards.

« En appliquant les principes de l'économie circulaire au déclassement, nous pouvons réduire la quantité de déchets

**La ville de Grenoble comptait six installations nucléaires. Après leur déclassement, leur site abrite aujourd'hui un centre de recherche-développement dans le domaine des énergies renouvelables.**

(Photo : Unsplash)

radioactifs et non radioactifs à stocker et, en même temps, la quantité de matières premières extraites du sol », a déclaré Arne Larsson, responsable de la technologie des déchets radioactifs et du déclassement chez Cyclife Sweden. « Nous pouvons réutiliser les matériaux et les équipements des installations, structures et bâtiments existants et favoriser la remise à disposition du site à d'autres fins. »

Plus de 200 réacteurs nucléaires dans le monde ont été mis à l'arrêt pour déclassement, et il en sera de même dans les décennies à venir pour des centaines de réacteurs encore en service. De nos jours, des plans de déclassement et de gestion des déchets sont établis au stade de la conception d'une installation nucléaire avant même le début du chantier. En revanche, les modèles de réacteurs construits dans les années 1960 et 1970 ne tenaient pas compte des principes de circularité.

Cependant, même les installations anciennes peuvent être déclassées efficacement grâce à ces principes : jusqu'à 90 % des matériaux non radioactifs d'une centrale nucléaire, tels que les métaux, le béton et même les vêtements de travail, sont réutilisables ou recyclables. Seuls environ 3 % des matériaux sont hautement radioactifs. Il s'agit principalement de combustible usé, et même dans ce cas, plus de 95 % peut être retraité aux fins de la fabrication de nouveaux combustibles et de sous-produits.

« L'adoption des principes de l'économie circulaire peut fournir des lignes directrices pour la réduction du volume des déchets et l'amélioration de l'efficacité et de la durabilité », a déclaré Vladimir Michal, chef par intérim de la Section du déclassement et de la remédiation de l'environnement de l'AIEA.



« Le déclassement des installations nucléaires génère des quantités considérables de matériaux qui peuvent être recyclés et réutilisés à d'autres fins. »

## De six installations nucléaires à un centre d'énergies renouvelables

Le recyclage est déjà largement répandu dans les travaux de déclassement. Après le démantèlement, les grands composants métalliques peuvent être fondus et transformés en métal « neuf » et réintégrés au circuit économique. Il est également possible de réutiliser des pièces d'équipement pour d'autres installations nucléaires en activité ; et les matériaux provenant des bâtiments démolis, tels que le béton, peuvent servir au remblaiement lors de la réhabilitation du site, ou pour d'autres projets de construction, comme des maisons et des routes. Par exemple, lors du déclassement du réacteur de recherche australien MOATA, situé à Sydney, en 2009, plus de 85 % des matériaux ont été réutilisés ou recyclés.

Les matériaux issus du déclassement qui ne peuvent pas être décontaminés et nettoyés pour être réutilisés ou recyclés sont stockés dans des dépôts pour déchets radioactifs de différents types, jusqu'à ce qu'ils ne présentent plus de danger pour l'homme ou l'environnement (voir page 22).

Il existe plusieurs exemples de sites nucléaires qui ont été réaffectés à des fins médicales ou industrielles, y compris des centrales, des réacteurs de recherche et d'autres installations. Les sites des centrales nucléaires peuvent être transformés en installations de traitement et d'entreposage des déchets ou en centres de recherche pour la formation du personnel d'exploitation. Ils peuvent aussi devenir des parcs industriels, et les bâtiments peuvent être réaffectés à d'autres industries

traditionnelles, ce qui permet d'attirer des entreprises et de créer de nouveaux emplois.

Dans la ville de Grenoble, six installations nucléaires – trois réacteurs de recherche, un laboratoire et deux installations d'entreposage de déchets radioactifs – ont été décontaminées et démantelées en 2012. Leur site abrite aujourd'hui un centre de recherche-développement consacré aux technologies de l'énergie verte et aux sources d'énergies renouvelables, notamment les véhicules électriques, les batteries et l'hydrogène.

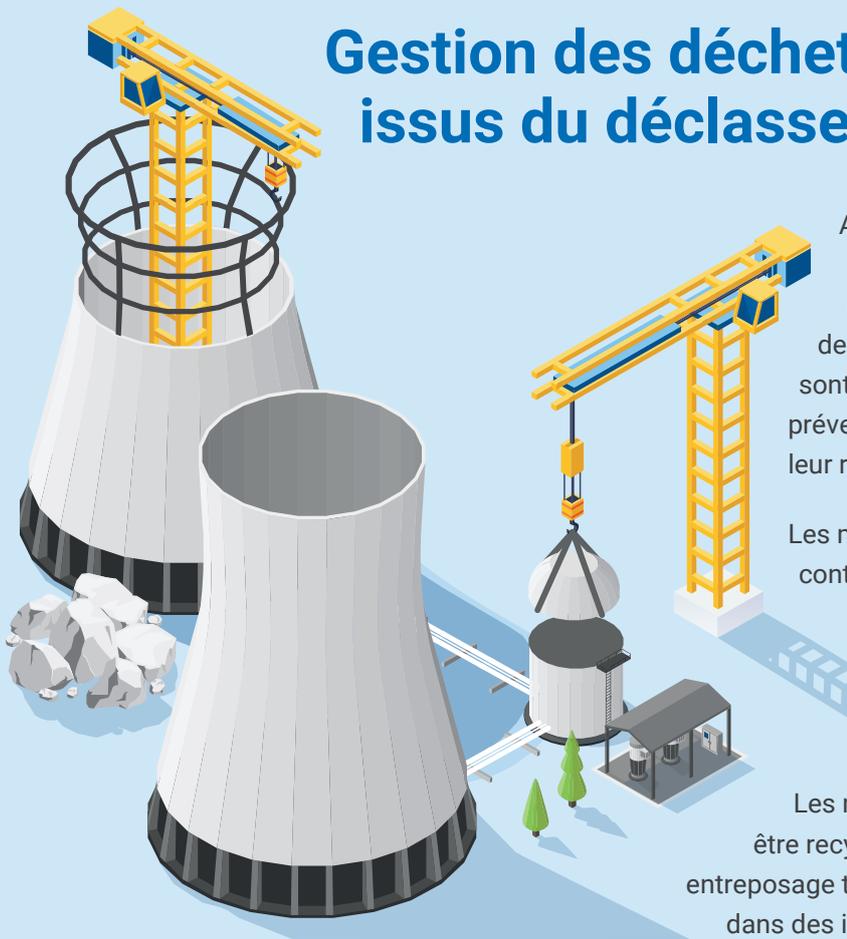
L'AIEA offre aux pays, aux organisations et aux particuliers un espace de coopération et de partage des connaissances et des technologies dans le domaine du déclassement. Sa plateforme d'apprentissage en ligne propose des cours sur le déclassement, la remédiation de l'environnement, et la gestion des déchets radioactifs et du combustible usé.

L'AIEA a créé en 2007 le Réseau international sur le déclassement (IDN) pour permettre aux spécialistes du déclassement de collaborer et de se concerter. En outre, elle soutient le renforcement des capacités dans les États Membres et favorise les missions d'experts, les services d'examen par des pairs et les services consultatifs pour les programmes de déclassement et d'autres activités connexes, telles que la gestion des déchets radioactifs et du combustible usé.

« L'économie circulaire propose une doctrine prometteuse pour adapter l'industrie aux principes de durabilité et de circularité, en réduisant l'impact sur l'environnement et en préservant les ressources pour les générations futures », a conclu M. Michal.



# Gestion des déchets radioactifs issus du déclassement



Au cours du déclassement, les matières radioactives et les objets qu'elles ont contaminés (qu'il s'agisse de vêtements de protection ou de pièces d'un réacteur) sont caractérisés et triés aux fins de la prévention et la minimisation des déchets, de leur réutilisation et de leur recyclage.

Les matières radioactives et les objets contaminés sont soumis à un contrôle réglementaire mais la plupart des matières issues du déclassement en sont libérées, du fait de leur très faible niveau de radioactivité.

Les matières radioactives qui ne peuvent être recyclées sont triées et emballées pour entreposage temporaire avant leur stockage définitif dans des installations spécialement conçues à cet effet, dernière étape de la gestion des déchets radioactifs.

## Hierarchie des déchets



Potentiel plus élevé

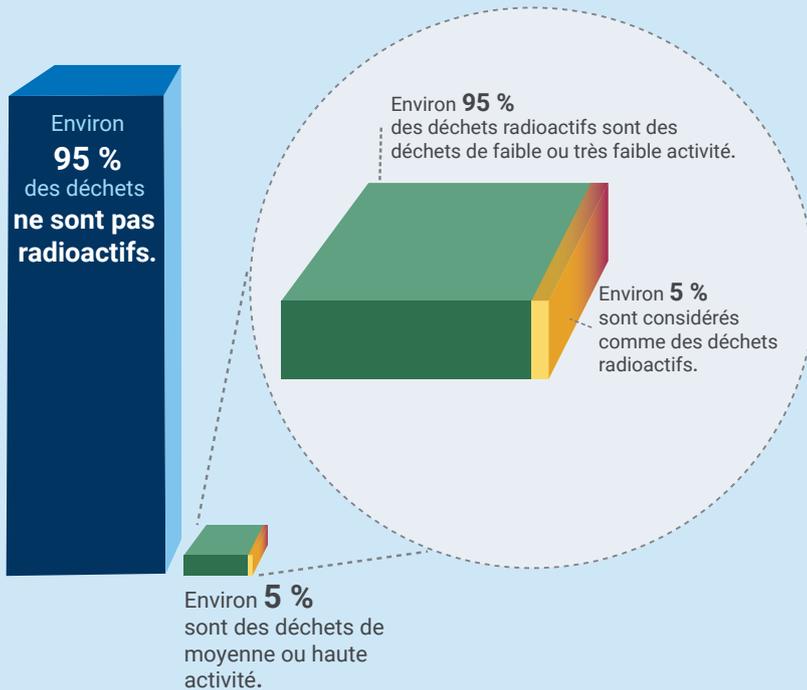
Potentiel moins élevé

- 1 Prévention des déchets
- 2 Minimisation des déchets
- 3 Réutilisation
- 4 Recyclage
- 5 Stockage définitif

La hiérarchie des déchets, élément clé d'un déclassement et d'une gestion durables, définit les priorités de gestion des déchets. La prise en compte du déclassement dès la phase de conception d'une installation nucléaire permet d'éviter et de réduire la production de déchets.

Une des priorités est de réduire au minimum la production de déchets radioactifs.

## Quantités de déchets résultant du déclassement



La quantité générée et le niveau de radioactivité varient considérablement d'une catégorie de déchets à l'autre. Environ 5 % des matières issues du déclassement d'une centrale nucléaire présentent un niveau de radioactivité tel qu'il faut les gérer comme des déchets radioactifs (voir clarification ci-dessous).

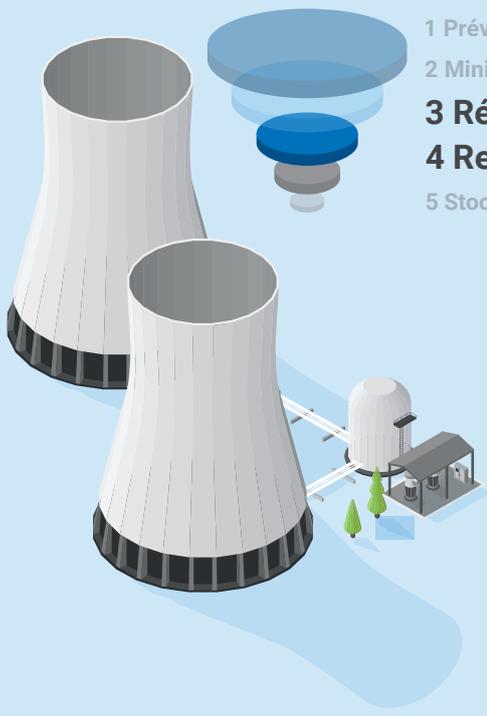


## Catégories et types de déchets radioactifs

DTFA	DFA	DMA	DHA
<p><b>Déchets de très faible activité</b> Béton, terre, gravats...</p>	<p><b>Déchets de faible activité</b> Équipements de protection individuelle, lingettes, systèmes auxiliaires de décontamination et de démantèlement des structures...</p>	<p><b>Déchets de moyenne activité</b> Composants du circuit primaire du réacteur, métaux fortement contaminés...</p>	<p><b>Déchets de haute activité</b> Combustible usé, coques de dégainage du combustible usé, déchets vitrifiés issus du retraitement...</p>
<p>Peuvent être stockés définitivement dans des décharges à faible profondeur.</p>	<p>Peuvent être stockés définitivement dans des installations à faible profondeur ; doivent être isolés et confinés jusqu'à plusieurs centaines d'années.</p>	<p>Peuvent être stockés définitivement à plus grande profondeur dans des dépôts géologiques ; doivent être isolés et confinés pendant plusieurs milliers d'années.</p>	<p>Peuvent être stockés définitivement dans des formations géologiques profondes à plusieurs centaines de mètres sous la surface ; doivent être isolés et confinés pendant plusieurs milliers d'années.</p>

Dans les installations de stockage définitif, des barrières multiples et fonctions de sécurité garantissent l'isolement et le confinement des déchets radioactifs.

## Réutilisation et recyclage des matières libérées de tout contrôle réglementaire



- 1 Prévention des déchets
- 2 Minimisation des déchets
- 3 Réutilisation**
- 4 Recyclage**
- 5 Stockage définitif

Une grande partie des matières sont réutilisées ou recyclées une fois décontaminées ou fondues.

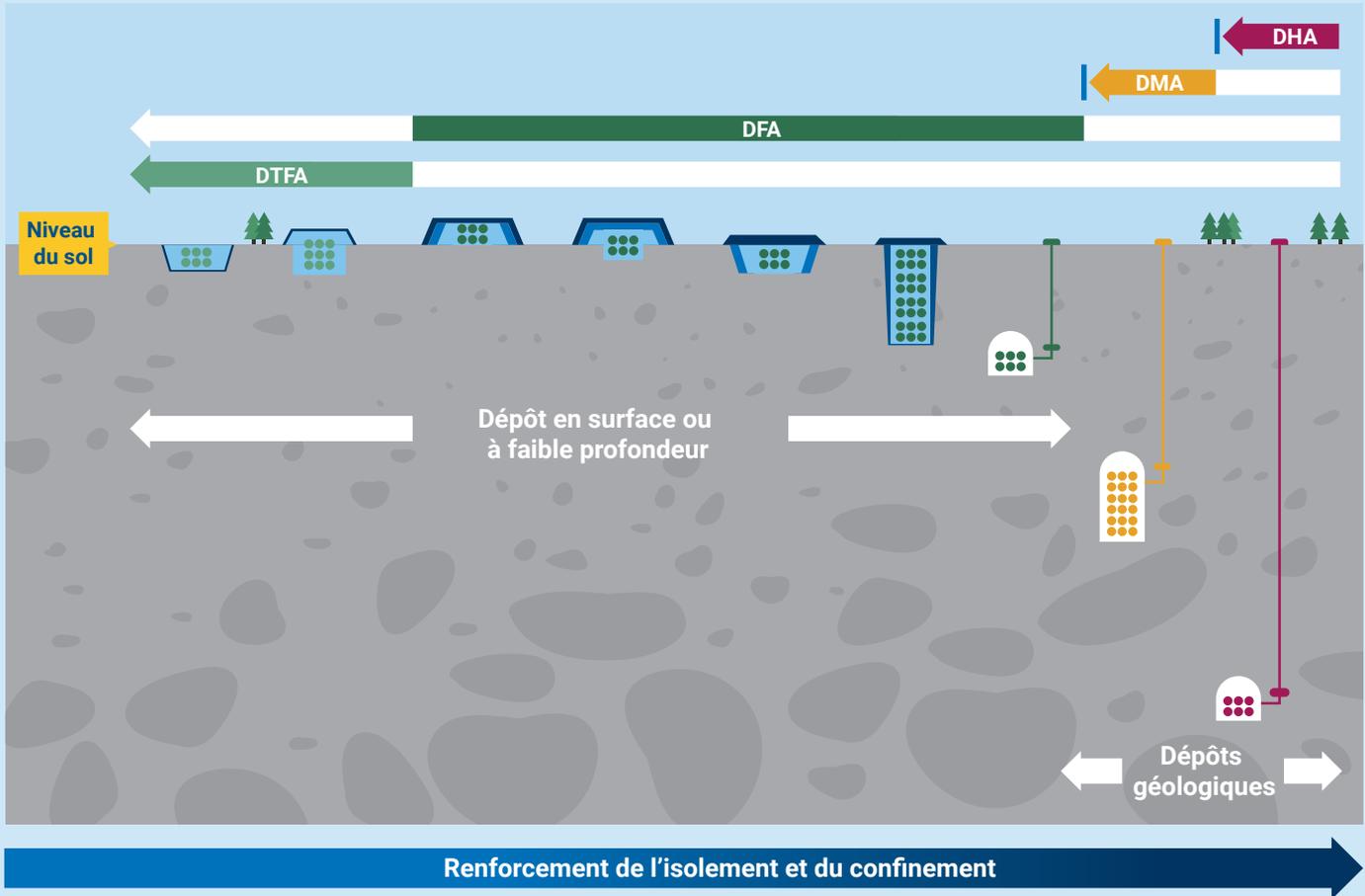


Le métal peut être décontaminé et recyclé, par exemple pour la production d'acier.



Les débris de béton et les gravats peuvent être réutilisés, par exemple pour la construction de routes.

## Options de stockage définitif en fonction de la catégorie de déchets radioactifs



## Comment gérer les déchets radioactifs en toute sûreté ?



Les populations et l'environnement sont protégés à plusieurs niveaux contre les dangers et les risques découlant de l'utilisation des rayonnements ionisants, notamment des déchets radioactifs.



L'accès aux sites de gestion des déchets radioactifs est strictement contrôlé.



La sûreté de la gestion des déchets radioactifs, qui incombe avant tout à l'exploitant, est contrôlée par des organismes de réglementation indépendants selon des procédures strictes.



Les déchets radioactifs sont gérés par du personnel qualifié et expérimenté.



L'autorisation réglementaire concernant une installation ou activité de gestion des déchets se fonde sur un argumentaire de sûreté et des évaluations détaillées de la sûreté.

La sûreté du stockage définitif des déchets radioactifs repose sur plusieurs décennies de recherche, de développement et de démonstration.



## Comment la gestion sûre des déchets radioactifs contribue-t-elle aux objectifs de développement durable (ODD) des Nations Unies ?



- ▲ La gestion sûre des déchets radioactifs, des rejets dans l'environnement, du déclassement et de la remédiation protège la vie terrestre et la vie aquatique.
- ▲ La gestion sûre des déchets radioactifs, des rejets dans l'environnement, du déclassement et de la remédiation contribue au recyclage et à la réutilisation des matières, des objets et des sites.
- ▲ Les technologies nucléaires sont durables lorsque la sûreté est assurée tout au long de leur durée de vie, notamment en ce qui concerne la gestion des déchets radioactifs, les rejets dans l'environnement et le déclassement.
- ▲ L'utilisation durable des technologies nucléaires contribue directement à neuf ODD.

# Le marché du déclassément nucléaire est promis à un bel essor

Par Joanne Burge et Emma Midgley

De nombreuses centrales nucléaires dans le monde approchant de la fin de leur cycle de vie, on assiste à l'émergence d'un nouveau secteur, celui du déclassément des installations nucléaires. Outre les centrales nucléaires, de nombreuses autres installations du cycle du combustible nucléaire, telles que les centres de recherche, les usines de retraitement du combustible usé et les installations de traitement des déchets, devront être déclassées une fois qu'elles auront atteint leur fin de vie. On estime que plusieurs centaines de milliards de dollars seront dépensés pour le déclassément dans le monde d'ici à 2050, et les entreprises et les investisseurs prennent déjà leurs dispositions.

Il y a actuellement environ 420 réacteurs nucléaires en service dans le monde. Le processus de déclassément de quelque 200 réacteurs nucléaires devrait commencer d'ici à 2050. Il faut des compétences spécialisées pour les travaux de déclassément des réacteurs (projets qui peuvent durer 20 ans ou plus du début à la fin) mais également pour la conception de nouvelles installations nucléaires. Une cinquantaine de réacteurs sont actuellement en construction dans le monde. Avant leur construction, un plan de déclassément a dû être établi pour chacun d'eux. Le secteur du déclassément semble donc avoir de belles perspectives à long terme.

Les entreprises de génie nucléaire, de construction, de démolition et de gestion des déchets devraient être les principaux fournisseurs de services au secteur. Leur rôle sera de décontaminer et de démanteler les installations nucléaires, et de réhabiliter les sites pour qu'ils soient sûrs et utilisables, en tenant compte des facteurs socio-économiques et de durabilité. Les installations nucléaires doivent également être démantelées et rendues sûres en tenant compte des incidences sur l'environnement, conformément aux principes de l'économie circulaire, notamment en recyclant les métaux, les câbles et les fils récupérés et en séparant le béton uniforme du béton armé. Pour accomplir cette tâche complexe, il faut également une main-d'œuvre spécialisée et très qualifiée dans le domaine nucléaire, qu'il faut maintenant renforcer pour éviter une pénurie de compétences à l'avenir.

Pour conserver les connaissances et faire progresser l'industrie, le Réseau international sur le déclassément de l'AIEA fournit un cadre permettant aux organisations et aux personnes intervenant dans le déclassément et le démantèlement d'installations nucléaires de mettre en commun l'expérience acquise et les enseignements tirés. L'AIEA aide les pays à planifier et à mettre en œuvre le déclassément en leur fournissant des conseils sur la sûreté et les aspects juridiques et techniques, et en favorisant le partage de connaissances dans le cadre de cours et d'ateliers. Elle joue un rôle important en facilitant

une large collaboration internationale et en procédant à des examens techniques pour établir des bonnes pratiques et veiller à ce que des enseignements soient tirés de l'expérience.

« Le Réseau rassemble des organisations et des personnes intervenant dans le déclassément et le démantèlement d'installations nucléaires », indique Tetiana Kilochytska, spécialiste du déclassément à l'AIEA. « Il contribue à la diffusion d'informations relatives au processus de déclassément par la mise en commun des meilleures pratiques et des innovations, afin d'améliorer la coopération et la coordination dans le secteur du déclassément à l'échelle mondiale. »

Une des organisations qui mettent leur expertise à la disposition des autres est celle qui est responsable du site de Sellafield au Royaume-Uni. Diverses installations nucléaires ont été implantées sur ce site, notamment des réacteurs de puissance, des installations de retraitement du combustible et des usines de traitement des déchets. À son ouverture dans les années 1950, Calder Hall, sur le site de Sellafield, était la première centrale nucléaire commerciale au monde. Ayant à gérer un grand nombre d'installations nucléaires âgées sur une surface réduite, les professionnels du déclassément travaillant sur le site ont dû concevoir des solutions innovantes et inédites pendant le déclassément, en s'appuyant notamment sur la numérisation et la robotique.

« Il s'agit d'un défi très complexe en matière de déclassément nucléaire », reconnaît Mike Guy, de Sellafield Limited.

« La difficulté tient au grand nombre et à la diversité des installations très proches les unes des autres sur un site encombré. Les difficultés de gestion des déchets sont nombreuses, notamment les déchets stockés dans des piscines sous-marines et l'enlèvement des déchets de cellules particulièrement vastes et complexes. »

Le déclassément du site de Sellafield a commencé dans les années 1980 et devrait se poursuivre tout au long de ce siècle, voire au-delà. Les responsables du site de Sellafield sont donc idéalement placés pour faire profiter la communauté internationale du déclassément de leur expertise unique et de leur riche expérience. Ils ont déjà mis en œuvre de nouveaux processus pour simplifier et accélérer le traitement des déchets radioactifs sur les anciens sites et partagé leur connaissance du démantèlement des structures pour aider les ingénieurs à concevoir des installations plus faciles à démonter.

En outre, l'investissement dans les chaînes d'approvisionnement qui travaillent avec Sellafield Limited montre que les entreprises qui se lancent dans l'industrie nucléaire peuvent escompter des avantages financiers. En 2021, l'Autorité du déclassément

nucléaire du Royaume-Uni, l'organisme public qui supervise le déclassement du site de Sellafield, a dépensé environ 55 % de son budget annuel de 4 milliards de dollars É.-U. pour des services fournis par des entreprises partenaires.

## Déclassement accéléré

L'expérience tirée de la mise en œuvre de programmes de déclassement sur plusieurs années est de plus en plus mise à profit pour raccourcir les délais d'exécution des projets de déclassement. La réduction du nombre d'années consacrées à divers projets peut générer d'importantes économies budgétaires, car les charges salariales représentent une grande partie du coût d'un projet. Les projets de déclassement de réacteurs commerciaux qui ont débuté récemment aux États-Unis visent à réduire la durée de la phase principale du démantèlement (hormis les activités liées à l'expiration de la licence) à une période de cinq à sept ans, soit environ la moitié de la durée moyenne actuelle de cette phase d'activité à l'échelle mondiale.

En optimisant l'interaction entre les principales activités des projets et le démantèlement et la gestion des déchets, il est possible de réduire leur délai d'achèvement. Une gestion judicieuse du projet et de bonnes relations entre le propriétaire de l'installation et les intervenants de

la chaîne d'approvisionnement sont essentielles. Les grands programmes tels que celui de Sellafield cherchent généralement à mettre en place des partenariats à long terme avec les acteurs de la chaîne d'approvisionnement, sur la base de contrats pouvant atteindre dix ans.

L'obtention rapide d'une autorisation de déclassement contribue également à réduire le délai de levée du contrôle réglementaire de l'installation. En Allemagne, les programmes récents visent à obtenir les autorisations de déclassement à peu près au moment de la mise à l'arrêt définitive de l'installation. Pour ce faire, il faut procéder à des activités de planification détaillées et aux évaluations de la sûreté associées avant la mise à l'arrêt définitive de l'installation.

Les projets de déclassement génèrent de très grandes quantités de matières qui doivent être gérées efficacement. Il faut pouvoir recycler ou réutiliser une grande partie de ces matières et éliminer rapidement celles à gérer comme des déchets pour réduire les coûts globaux et accélérer les projets de déclassement à l'avenir.

### Le déclassement du site de Sellafield (Royaume-Uni) devrait durer de nombreuses décennies.

(Photo : Sellafield Ltd.)



# Application des garanties nucléaires pendant le déclassement

Par Jennifer Wagman

L'AIEA contribue à décourager la prolifération des armes nucléaires au moyen d'un ensemble de mesures techniques connues sous le nom de garanties, qui consistent à vérifier que les pays respectent leurs obligations juridiques internationales de ne pas faire une utilisation abusive des matières et technologies nucléaires. Ces obligations s'étendent aux projets de déclassement. Fin mars 2023, plus de 200 installations nucléaires avaient cessé définitivement toute activité, soit parce qu'elles étaient arrivées à la fin de leur cycle de vie naturel, soit en raison de décisions politiques nationales. Les pays restent juridiquement liés par les accords de garanties tout au long du processus de déclassement et, dans certains cas, après celui-ci.

Le déclassement étant un processus variable et long, l'AIEA a formulé des lignes directrices afin que les garanties s'appliquent jusqu'à ce qu'il soit établi que l'installation concernée est déclassée aux fins des garanties.

Ces lignes directrices de l'AIEA visent deux obligations principales en matière de garanties : vérifier que toutes les matières nucléaires ont été retirées de l'installation et entreposées à un emplacement connu, et que tout le matériel essentiel a été retiré de l'installation ou rendu inutilisable.

Pendant le déclassement, les pays sont encouragés à collaborer avec l'AIEA en lui soumettant périodiquement des plans relatifs aux activités pertinentes et en actualisant les renseignements descriptifs afin de rendre compte des changements intervenus dans l'installation. À mesure que les matières nucléaires et le matériel essentiel sont retirés, l'AIEA réévalue les mesures de contrôle et les activités mises en œuvre dans l'installation, et les révisé si nécessaire en concertation avec le pays concerné. Le dialogue avec les pays aux premiers stades du processus s'appelle « intégration des garanties dans la conception ».

« L'intégration des garanties dans la conception est un processus de collaboration efficient par lequel nous vérifions en temps utile que toutes les parties prenantes comprennent pleinement et bien à l'avance les obligations en matière de garanties », explique Jeremy Whitlock, conseiller technique principal au Département des garanties de l'AIEA. M. Whitlock travaille avec les professionnels du secteur, les organismes de réglementation et d'autres parties prenantes afin d'intégrer les garanties dans la phase de conception des installations nucléaires nouvelles ou modifiées, y compris celles en cours de déclassement. « Pour aider les pays à déclasser une installation nucléaire, nous avons élaboré des lignes directrices décrivant les prescriptions et les activités en matière de garanties. Celles-ci aident les pays et les exploitants d'installations à comprendre les étapes nécessaires et à collaborer avec l'AIEA afin que le déclassement progresse conformément au calendrier souhaité. »

Dans le cadre du déclassement d'un réacteur nucléaire, les garanties de l'AIEA doivent être respectées tout au long de la « campagne » consistant à transférer le combustible utilisé vers une installation d'entreposage ou de stockage définitif. Cette campagne nécessite généralement la mise en place de matériel supplémentaire de surveillance ou de contrôle des garanties et l'examen régulier des données enregistrées.

« En vérifiant le mouvement des matières nucléaires vers un lieu d'entreposage, l'AIEA maintient en tout temps la continuité des connaissances concernant ces matières. Celle-ci contribue à donner une assurance crédible que les matières nucléaires ne sont pas détournées de leur utilisation pacifique », dit Lai San Chew, inspecteur des garanties nucléaires à l'AIEA. M. Chew est chargé de vérifier les éléments de combustible utilisé, d'observer les transferts et d'examiner les renseignements descriptifs actualisés lors des transferts de combustible utilisé en vue du déclassement définitif.

Une fois que toutes les matières nucléaires ont été retirées, l'exploitant de l'installation entame le démantèlement du matériel essentiel. Enfin, l'exploitant retire la pièce la plus importante du matériel essentiel, le cœur du réacteur, qui est envoyé dans une installation de traitement des déchets. Le pays envoie ensuite à l'AIEA la version finale des renseignements descriptifs actualisés concernant l'installation afin de lui notifier officiellement que l'installation a été déclassée.

Une fois que les matières nucléaires se trouvent en lieu sûr sous des garanties appropriées dans une installation d'entreposage ou de stockage définitif, l'AIEA vérifie l'absence de matières nucléaires dans l'installation d'origine

en cours de déclassement et confirme également que tout le matériel essentiel a été retiré ou rendu inutilisable. Une fois qu'il est établi qu'une installation a été déclassée aux fins des garanties, l'AIEA met fin aux activités d'inspection de routine et de vérification de la conception pour cette installation.

« En collaborant avec le pays et l'exploitant de l'installation afin que les besoins particuliers liés au déclassement d'une installation soumise aux garanties soient bien compris, nous contribuons à assurer une transition sûre et sécurisée vers une cessation des activités conforme aux obligations internationales du pays », explique Kerrin Swan, analyste des garanties à l'AIEA.

**Inspection au titre des garanties à URENCO, à Almelo (Pays-Bas).** (Photo : D. Calma/AIEA)



# Se préparer 60 années à l'avance

## La première centrale nucléaire des Émirats arabes unis et les plans de déclassement

Par Artem Vlasov

Depuis que des réserves de pétrole et de gaz y ont été découvertes il y a plus d'un demi-siècle, les Émirats arabes unis ont connu une transformation économique spectaculaire. Le pays, qui était une petite économie de pêche et de commerce de perles il y a quelques décennies à peine, est devenu un centre mondial du tourisme, du commerce, des affaires et de la finance. Soucieux de soutenir ce progrès économique tout en réduisant ses émissions de carbone, les Émirats arabes unis diversifient leur bouquet énergétique, notamment en y introduisant l'énergie nucléaire.

La centrale nucléaire de Barakah, la première des Émirats arabes unis et du monde arabe, est entrée en service en 2020. Trois réacteurs sont actuellement en exploitation et la construction d'un quatrième est presque terminée. La centrale nucléaire devrait fournir jusqu'à 25 % de l'électricité du pays, soit la capacité d'alimenter plus d'un demi-million de ménages émiratis, lorsqu'elle deviendra pleinement opérationnelle dans les prochaines années. Cependant, comme toute autre centrale nucléaire, elle devra être démantelée au terme de sa durée d'utilité, dans environ 60 à 80 ans. Aujourd'hui, tout pays qui entreprend un programme nucléaire est tenu, lors de la conception d'une installation nucléaire, d'élaborer des plans préliminaires de déclassement de l'installation afin que le site puisse être réaffecté à d'autres utilisations.

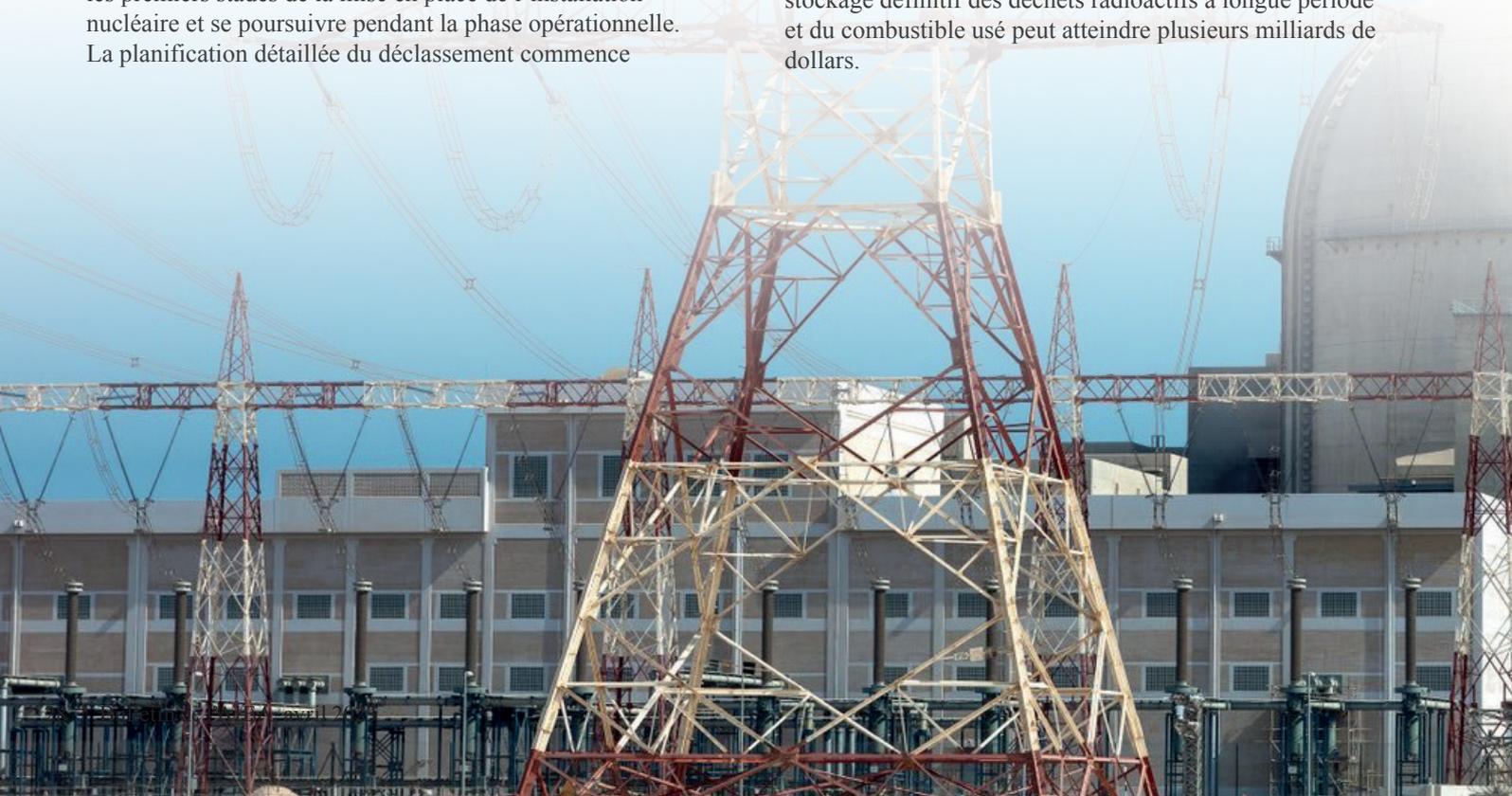
« Le déclassement est un processus multidisciplinaire. La planification du déclassement, y compris la constitution des moyens financiers nécessaires, doit commencer dès les premiers stades de la mise en place de l'installation nucléaire et se poursuivre pendant la phase opérationnelle. La planification détaillée du déclassement commence

généralement quelques années avant la mise à l'arrêt définitif de l'installation et comprend des activités visant à assurer la préparation organisationnelle et technique d'une transition harmonieuse entre l'exploitation et le déclassement », explique Tetiana Kilochytska, spécialiste du déclassement à l'AIEA. « Les Émirats arabes unis, qui ont lancé avec succès leur première centrale nucléaire, disposent déjà d'un plan de déclassement initial en prévision de la fin de vie de la centrale. »

### Le pouvoir d'une planification minutieuse

L'exploitant de la centrale nucléaire de Barakah, Nawah Energy Company, a soumis un plan de déclassement initial dans le cadre de sa demande d'autorisation d'exploitation à l'Autorité fédérale de réglementation nucléaire des Émirats arabes unis. Selon le plan, le déclassement sera assuré par Nawah Energy Company et commencera cinq ans après la mise à l'arrêt définitif du dernier réacteur. Selon la Société de l'énergie nucléaire des Émirats arabes unis (ENEC), entreprise responsable du programme électronucléaire des Émirats arabes unis, le processus de déclassement devrait durer environ 13 ans pour chacune des quatre unités.

Une difficulté récurrente du déclassement est l'incertitude entourant le coût total des activités associées, notamment le coût de la gestion à long terme des déchets radioactifs issus du déclassement et du combustible nucléaire utilisé. Par exemple, le coût de la mise en place d'un dépôt géologique destiné au stockage définitif des déchets radioactifs à longue période et du combustible utilisé peut atteindre plusieurs milliards de dollars.



Les Émirats arabes unis sont prêts à relever ce défi et ont pris des mesures pour créer un « fonds spécial déclassement » financé par des contributions annuelles, qui prendra en charge le coût du déclassement de la centrale nucléaire et des activités connexes. Pour que ce fonds puisse répondre aux attentes futures, il est prévu d'examiner régulièrement le montant des contributions annuelles et d'actualiser le plan de déclassement de la centrale au moins tous les trois ans au cours de la durée de vie de la centrale.

« Un des éléments clés de la réussite du déclassement est l'accès adéquat aux compétences et à la technologie au moment du déclassement », explique M<sup>me</sup> Kilochytska. Les Émirats arabes unis font le nécessaire pour disposer en temps voulu d'un personnel qualifié et compétent pour s'occuper du déclassement et du stockage définitif des déchets radioactifs, et assurer la radioprotection des personnes et de l'environnement au cours de ce processus. Comme les technologies telles que la robotique et l'intelligence artificielle ne cessent d'évoluer, de nouvelles avancées devraient permettre un déclassement plus efficace en fournissant des techniques de démantèlement plus rapides, de décontamination plus efficaces et de protection accrue des travailleurs.

## Préparer aujourd'hui un avenir durable

L'AIEA aide les pays à planifier et à mettre en œuvre le déclassement, en leur fournissant des conseils sur la sûreté et les aspects juridiques et techniques, et en favorisant le partage de connaissances par des cours et des ateliers. Elle joue un rôle important en facilitant une large collaboration internationale et en menant des examens techniques pour établir des meilleures

pratiques et veiller à ce que des enseignements soient tirés des exemples passés.

« L'élaboration de la politique d'énergie nucléaire des Émirats arabes unis a bénéficié de leur interaction constante avec l'AIEA », explique M<sup>me</sup> Kilochytska. Les Émirats arabes unis collaborent avec les experts de l'AIEA pour garantir la sûreté et la sécurité nucléaires et la transparence tout au long de l'exploitation de la centrale nucléaire de Barakah, y compris en ce qui concerne ses plans de déclassement.

La centrale nucléaire de Barakah jouera un rôle clé dans la stratégie neutralité carbone 2050 des Émirats arabes unis, qui vise à augmenter considérablement la production d'énergie propre du pays. Elle évitera le rejet de plus de 22 millions de tonnes de gaz à effet de serre par an, soit l'équivalent des émissions de près de cinq millions de voitures, ou un quart des engagements de réduction des émissions pris par les Émirats arabes unis dans le cadre de l'Accord de Paris, le traité international sur le changement climatique. La centrale nucléaire de Barakah est déjà le plus grand générateur d'électricité et la plus importante source d'électricité propre de la région.

**La première centrale nucléaire des Émirats arabes unis n'est pas encore pleinement opérationnelle, mais le pays planifie déjà minutieusement son futur déclassement.**

(Photo : ENEC)



# Encourager la prochaine génération à faire carrière dans le déclassement

Par Annie Engstroem

L'un des principaux défis d'aujourd'hui pour l'industrie du déclassement est d'attirer des jeunes professionnels. Le besoin d'une nouvelle génération de travailleurs a une double cause. D'une part, il faut disposer immédiatement d'une main-d'œuvre plus nombreuse pour déclasser un nombre croissant de réacteurs qui arrivent en fin de vie. D'autre part, le secteur doit se préparer pour l'avenir : il devrait connaître un essor qui créera une demande encore plus forte de scientifiques et d'ingénieurs.

Entre 12 et 15 % des réacteurs nucléaires actuellement en exploitation devraient être mis hors service d'ici 2030 et il faudra de nombreux professionnels de diverses disciplines pour assurer la sécurité et la rentabilité du processus en tenant compte de leur utilisation future. En parallèle, de nouvelles installations nucléaires qui devront aussi être déclassées à terme sont en construction dans le monde entier.

« Les jeunes professionnels comme moi ont hâte de mettre leurs compétences au service des programmes de déclassement et de faire grandir la confiance du public dans le nucléaire », déclare Simona Šandalová, une chimiste nucléaire de 25 ans, boursière du programme Marie Skłodowska-Curie de l'AIEA.

Les défis complexes du déclassement des sites nucléaires suscitent de multiples possibilités de carrière pour les jeunes professionnels dans ce domaine. Ces possibilités concernent les technologies émergentes telles que l'intelligence artificielle, la science des données et la robotique, ainsi que des spécialisations en physique, en chimie, en ingénierie, en gestion de projets, en gestion des déchets ou en remédiation de l'environnement. En bref, le secteur du déclassement offrira à la fois une sécurité d'emploi et des possibilités de carrière aux personnes qui y entrent aujourd'hui et dans un avenir prévisible.

« Il y a quarante ans, le déclassement n'était pas une priorité pour les concepteurs de centrales nucléaires ou d'installations du cycle du combustible et on ne se souciait guère de garantir la disponibilité d'une main-d'œuvre qualifiée au moment de la fin de vie », explique Patrick O'Sullivan, consultant en déclassement à l'AIEA. « Aujourd'hui, attirer de jeunes professionnels du nucléaire vers les activités de déclassement et de gestion des déchets associés est devenu une priorité dans la plupart des programmes. »

Pour décarbonner l'économie, les pays investissent également dans des réacteurs nucléaires avancés tels que les petits réacteurs modulaires, qui devraient être plus faciles et moins coûteux à déclasser car ils peuvent être renvoyés à l'usine pour y être démantelés et recyclés.

« Si les pays décident de faire des efforts et d'inclure l'énergie nucléaire dans leur bouquet énergétique, ils doivent absolument commencer dès maintenant à développer les compétences permettant de prévoir d'emblée le démantèlement des centrales nucléaires », explique Marorisang Makututsa, vice-présidente de l'African Young Generation in Nuclear (AYGN). L'AYGN est une organisation à but non lucratif qui vise à mobiliser les jeunes professionnels du nucléaire en Afrique et à accroître leurs capacités en organisant des formations et des activités nationales de mise en réseau. Actuellement, l'Afrique du Sud exploite deux réacteurs nucléaires, l'Égypte construit ses premiers réacteurs et le Ghana ainsi qu'une dizaine d'autres pays du continent envisagent d'introduire l'électronucléaire dans leur bouquet énergétique.

## Possibilités pour les jeunes

Le déclassement est l'étape finale du cycle de vie d'une installation nucléaire mais le processus multidisciplinaire de démantèlement d'une centrale nécessite une connaissance de l'ensemble du cycle. Les ingénieurs, scientifiques et autres professionnels du déclassement ont donc des compétences transférables à d'autres parties du cycle nucléaire, notamment la conception, la construction et l'exploitation de l'installation.

« De nombreuses possibilités dans d'autres secteurs s'offrent aux jeunes qui ont des compétences et de l'expérience dans le déclassement », dit Lisa Lande, spécialiste de la mise en valeur des ressources humaines dans le nucléaire à l'AIEA. « La capacité de gérer des projets, d'acquérir les compétences techniques nécessaires à la gestion des déchets radioactifs et de comprendre l'impact des polluants sur l'environnement est inestimable dans le secteur de l'environnement et dans divers domaines de l'industrie technologique. »

En France, l'Institut national des sciences et technologies nucléaires (INSTN) encourage activement les étudiants à rechercher des solutions innovantes en matière de déclassement. Florent Lemont est directeur de recherche au CEA et chef de l'INSTN - Marcoule. En 2022, il a également organisé en France le « Hackadem », au cours duquel 600 lycéens et étudiants se sont affrontés par équipes en proposant des solutions créatives pour le déclassement des centrales nucléaires à l'avenir. « De nombreux participants ne savaient pas que le déclassement est un domaine novateur et transversal qui fait appel aux technologies de pointe, à la numérisation, à la chimie et davantage », ajoute M. Lemont. « Grâce à cette compétition, ils ont beaucoup appris sur les possibilités futures dans le domaine du déclassement et de l'intérêt d'y acquérir de l'expérience. »

## Initiatives de l'AIEA pour impliquer les étudiants et les jeunes professionnels

L'AIEA organise une série d'initiatives pour présenter les possibilités de carrière dans le domaine du déclassement et soutenir le renforcement des capacités nucléaires dans ses États Membres.

L'AIEA coopère activement avec des universités du monde entier – notamment en France, en République de Corée, en République tchèque, en Slovaquie et au Royaume-Uni – pour mener des recherches et échanger des informations techniques, des données d'expérience et des meilleures pratiques en matière de déclassement et de remédiation de l'environnement. À la Florida International University (FIU), aux États-Unis d'Amérique, cette coopération a permis à l'AIEA de proposer des programmes de formation et de stage à des étudiants ayant une formation en sciences, en technologie, en ingénierie et en mathématiques, et d'intégrer du matériel pédagogique de l'AIEA sur le déclassement dans les programmes de la FIU.

En septembre 2022, l'AIEA a organisé le défi AIEA sur les innovations dans le déclassement des installations nucléaires, et invité les étudiants et les jeunes professionnels à soumettre des essais originaux sur le démantèlement des installations nucléaires. Parmi les thèmes abordés, l'amélioration de l'efficacité du déclassement, la planification et la mise en

œuvre du déclassement à partir d'un modèle d'économie circulaire, et l'intégration d'une stratégie de déclassement dans la conception d'une centrale nucléaire.

« Le déclassement est un défi d'avenir qui nécessite une main-d'œuvre future dotée des compétences appropriées », explique M. O'Sullivan. « C'est pourquoi l'AIEA organise et met en œuvre une série d'initiatives – partenariats universitaires, programmes de formation et de bourses – directement et par l'intermédiaire de ses centres collaborateurs, pour promouvoir l'implication des jeunes dans le déclassement et pour encourager la participation des jeunes à ses ateliers et conférences spécialisés. »

« Travailleurs participant aux activités de démantèlement d'une usine de retraitement de combustible nucléaire à La Hague (France). » (Photo : M. Klingenboeck/AIEA)



# Avis d'expert sur le déclassement de l'usine de retraitement du combustible usé de La Hague

Par Michael Amdi Madsen

*Aujourd'hui, en France, 56 centrales nucléaires produisent environ 70 % de l'électricité. Tout le combustible usé qui en provient, ainsi que celui de certains autres pays, est retraité et partiellement recyclé à La Hague, dans le nord de la péninsule du Cotentin.*

*Après 35 ans d'exploitation, la première usine de retraitement du site, UP2-400, a été fermée en 2003 et est en cours de déclassement – opération qui devrait prendre plusieurs dizaines d'années. Pour mieux comprendre l'avancement de ce projet et les difficultés liées au déclassement d'une installation comme celle-ci, nous nous sommes entretenus avec Éric Delaunay, vice-président chargé des opérations de fin du cycle de vie chez Orano, l'entreprise majoritairement détenue par l'État français qui est chargée de veiller à ce que le site soit sûr et se prête à de futures utilisations.*



## **Question : Quelles sont certaines des difficultés propres à la mise en œuvre du déclassement d'UP2-400 et les différences par rapport à celui de grandes installations nucléaires, comme les centrales ?**

**Réponse :** La principale difficulté réside dans la présence de matières radioactives déposées et dans la contamination d'une grande partie des installations mises à l'arrêt. Dans une centrale nucléaire, l'enlèvement du combustible usé et la décontamination complète du système permettent d'éliminer plus de 99 % de la radioactivité initialement présente. Seuls la cuve sous pression du réacteur et ses composants internes restent largement radioactifs. Dans une usine de retraitement comme UP2-400, la situation est un peu différente. Chaque pièce d'équipement et chaque pièce sont plus ou moins radioactive, et il faut les extraire et les conditionner préalablement au démantèlement. En d'autres termes, les fonctions de sûreté de l'usine doivent être maintenues pendant la majeure partie de son processus de déclassement, alors que dans une centrale, on peut abaisser les classes et systèmes de sûreté une fois que le déchargement du combustible est terminé et que la piscine d'entreposage du combustible usé a été vidée.

## **Question : Quels sont les principaux risques opérationnels et stratégiques de ce projet de déclassement et comment sont-ils gérés ?**

**Réponse :** Parmi les risques stratégiques, on compte principalement les dépassements de coûts et les retards d'exécution du projet, puisque ceux-ci occasionnent des frais supplémentaires. Les retards peuvent être causés par des risques opérationnels variés, concernant tous les aspects du projet, mais surtout par, premièrement, le manque de connaissances concernant la situation radiologique initiale due à la présence des cellules de haute activité et des équipements radioactifs, et deuxièmement, par des difficultés liées à l'évolution professionnelle et à la rétention de personnel. Pour atténuer le premier type de risque, nous avons mené pendant plusieurs années un programme de caractérisation très complet qui réduit considérablement pour plusieurs années l'incertitude quant à la situation de l'usine de retraitement et l'état de ses cellules. S'agissant du deuxième, nous avons organisé une série d'actions, comme la participation à des programmes de formation régionaux et nationaux, une politique de recrutement proactive, la formation continue de notre personnel afin de favoriser la polyvalence et la mobilité au sein de l'organisme, ainsi que l'innovation dans les pratiques de déclassement afin d'améliorer l'environnement de travail.

**Question : Le projet de déclassement d'UP2-400, entamé il y a vingt ans environ, devrait encore se poursuivre sur plusieurs années. Quelles ont été les répercussions de l'innovation technologique sur le projet au fil du temps, et quels développements technologiques futurs auront, selon vous, le plus d'impact ?**

**Réponse :** Ces 20 dernières années, c'est la numérisation du projet, à tous les niveaux, qui a provoqué les plus grands changements. Les technologies numériques ont évolué en termes de puissance et d'efficacité, de coût, et de diversité. Il y a vingt ans, les modèles virtuels étaient complexes et coûteux à développer, la réalité virtuelle était limitée et les smartphones et tablettes n'existaient pas. Ces dernières années, ces technologies ont évolué au point d'apporter des bénéfices réels et mesurables à nos activités, et elles ont complètement transformé et amélioré les processus de notre organisation. À l'avenir, la robotique permettra d'augmenter la productivité, d'optimiser la sûreté des travailleurs, d'assurer à notre personnel de meilleures conditions de travail et de mieux le motiver.

**Question : Les principes de la durabilité et de l'économie circulaire gagnent en importance dans le secteur nucléaire. En quoi influencent-ils les activités de déclassement à La Hague ?**

**Réponse :** S'agissant de l'économie circulaire, une des difficultés auxquelles nous nous heurtons est le fait que nous déclassons des installations conçues et construites il y a quarante ou cinquante ans, alors que cette notion n'était pas prise en considération. Cependant, depuis 15 ans, après la création en 2008 dans notre entreprise de toute une division consacrée au déclassement de nos propres installations nucléaires, Orano s'engage en faveur de la fermeture du cycle nucléaire industriel et de la mise à disposition des bâtiments désaffectés pour de nouveaux usages. Nous nous efforçons aussi de réduire le plus possible la production de déchets à toutes les étapes du déclassement, et de plus en plus nous réutilisons les équipements et recyclons les matières. De récentes évolutions de la réglementation française ont aussi ouvert la porte au recyclage des métaux des installations nucléaires déclassées en vue de leur réutilisation dans le secteur nucléaire.

**Question : Quels sont les principaux effets socio-économiques des travaux de déclassement à La Hague et comment envisagez-vous votre responsabilité envers la communauté locale ?**

**Réponse :** Les activités de déclassement représentent environ 20 % de l'activité globale et de l'impact socio-économique du site de La Hague, où sont aussi en service deux usines de recyclage du combustible usé. En Normandie, les sites d'Orano sont des sources majeures d'emplois et de revenus pour les collectivités locales. Les dépenses annuelles de notre entreprise s'élèvent à 850 millions d'euros par an, dont plus de 70 % restent dans la région. Orano La Hague a aussi noué un partenariat avec la Chambre de commerce et d'industrie de Cherbourg-Cotentin pour former et embaucher des travailleurs locaux. En 2023, les sites d'Orano dans la région du Cotentin recruteront 500 personnes, dont 20 % travailleront sur le déclassement. De plus, 200 alternants seront recrutés pour des périodes d'un à trois ans.

**Question : De quelle manière l'AIEA accompagne-t-elle les travaux de déclassement sur le site de La Hague et comment ceux-ci peuvent-ils mieux bénéficier d'activités de collaboration internationale ?**

**Réponse :** Notre projet de déclassement est très exigeant et nous devons nous concentrer sur son exécution. Toutefois, il s'agit également d'une initiative à long terme qui bénéficie des innovations et des expériences des autres. En matière de déclassement et de remédiation de l'environnement, l'AIEA offre un cadre unique d'échange de vues et de partage de connaissances, y compris sur les tendances et innovations qui pourraient se révéler utiles pour nos activités, comme les technologies numériques, la robotique, la formation et le développement des compétences. Par exemple, les travaux en cours dans le cadre de la réunion technique sur les technologies nouvelles et émergentes permettant de faire progresser les projets de déclassement nous intéressent particulièrement et nous espérons que de telles initiatives permettront d'éviter les chevauchements d'activités de développement.

# Un nouveau modèle économique pour le déclasserment d'une centrale nucléaire

Par Bruce A. Watson



Bruce A. Watson est assistant spécial au sein de la Division du déclasserment, de la récupération de l'uranium et des déchets au sein de l'Office de la sûreté des matières nucléaires et des garanties de la Commission de la réglementation nucléaire (NRC) des États-Unis. Ancien exploitant d'installations nucléaires, il a acquis une grande expérience du déclasserment de réacteurs et de leurs matériaux sur site en tant que responsable technique des licences

octroyées aux réacteurs de puissance aux États-Unis arrivant à expiration. Bruce a également une vaste expérience internationale du déclasserment au sein de l'AIEA, où il a contribué à l'élaboration de guides de sûreté et de programmes de formation sur le sujet et a participé en tant qu'expert à plusieurs missions d'examen par des pairs et missions consultatives de l'organisation.

Pionniers de la technologie nucléaire, les États-Unis exploitent aujourd'hui l'un des parcs nucléaires les plus importants, mais aussi les plus anciens au monde, dont le vieillissement se traduit par l'émergence d'un nombre croissant de projets de déclasserment. La NRC supervise actuellement 17 centrales nucléaires en cours de déclasserment, huit centrales nucléaires mises en attente sûre, ainsi que le déclasserment de deux réacteurs de recherche et de plusieurs sites nucléaires. D'autres sites liés à la défense qui relèvent de la compétence réglementaire du Ministère de l'énergie sont également en cours de déclasserment. Cette demande stimule l'innovation dans les entreprises, qui font preuve de créativité pour relever le défi.

En 2010, un tout nouveau modèle économique de déclasserment a vu le jour aux États-Unis. Auparavant, tous les projets de déclasserment de réacteurs ayant fait l'objet d'une licence de la NRC suivaient un même modèle économique, selon lequel l'exploitant de la centrale nucléaire concernée assumait l'entière responsabilité de l'ensemble du processus de déclasserment. Les exploitants pouvaient réaliser les travaux de déclasserment eux-mêmes ou mandater une entreprise à cette fin. Au début des années 1990, dix réacteurs ayant obtenu une licence de la NRC ont été mis à l'arrêt. Leur déclasserment a été achevé en 2009, selon le modèle traditionnel.

Cependant, fin 2010, les longues discussions entre les entreprises spécialisées en déclasserment et les exploitants ont fini par porter leurs fruits et ouvert la voie à une nouvelle manière de mener à bien les projets de déclasserment. Dans le premier cas, un exploitant américain a convenu de transmettre une licence temporaire à une entreprise de déclasserment. Une fois le déclasserment achevé, il redeviendra titulaire de la licence attachée au terrain et à l'installation d'entreposage du combustible usé. La NRC a approuvé ce processus, puis, peu après, un autre similaire entre un deuxième exploitant et une entreprise de déclasserment.

## Perspectives et défis

Ces accords ne se sont concrétisés qu'après des années de négociations. Les futurs titulaires de licences ont dû étudier attentivement les possibilités à venir et les défis à relever. D'une part, le transfert de licence donne à l'entreprise de déclasserment libre accès au fonds d'affectation spécialement créé pour le déclasserment de la centrale nucléaire. De l'autre, l'entreprise assume l'entière responsabilité des risques financiers et réglementaires résultant de l'opération. Finalement, les accords ont été conclus en dépit de ces risques. Trois ans plus tard, en 2013, des entreprises ont commencé



à accepter des transferts de licence permanents, plutôt que temporaires, dans le cadre de la vente d'une installation.

À bien des égards, 2013 a été une année charnière. C'était la première fois qu'une entreprise spécialisée dans le déclasséement adressait une offre d'achat à l'exploitant d'une centrale nucléaire sur le point d'être mise à l'arrêt en vue de procéder à son déclasséement. Un accord de vente a alors été négocié pour une centrale nucléaire mise à l'arrêt cette année-là. L'exploitant et l'entreprise de déclasséement ont demandé le transfert définitif de la licence au profit de cette dernière.

Les entreprises de déclasséement qui se sont vu octroyer ces licences pouvaient souvent intégrer les tâches qui en découlent à leurs activités en cours si elles exploitaient déjà des sites de stockage définitif des déchets nucléaires ou étaient agréées pour fournir des services d'entreposage du combustible usé.

### Accélération considérable des délais de planification

Le transfert de licence intervenu en 2013 a très largement contribué à l'accélération significative du calendrier de planification des activités de déclasséement. La licence octroyée pour la centrale devait initialement expirer en 2073, ce qui signifie qu'initialement, l'exploitant était tenu de se conformer à la réglementation de la NRC, qui prévoit l'expiration de la licence dans un délai de 60 ans. Pour que la licence expire, la centrale devait être entièrement déclassée, ce qui inclut la remédiation environnementale du site afin qu'il puisse être réaffecté à d'autres usages. Un nouveau titulaire de licence prévoit d'achever ce même processus d'ici 2030, bien que l'installation d'entreposage à sec du combustible usé fasse toujours l'objet d'une autorisation et d'inspections.

D'autres exploitants dont les centrales nucléaires les plus anciennes ont été mises en attente sûre préalablement à leur déclasséement, pour lequel l'échéance est fixée à 2030, pourraient également envisager un tel transfert de licence pour accélérer le processus. Il est important de noter qu'aux États-Unis, une centrale nucléaire doit être déclassée et sa licence résiliée dans les 60 ans après la fin de son exploitation.

Les transferts de licence sont devenus assez courants aux États-Unis et concernent un grand nombre de centrales nucléaires en cours de déclasséement. Néanmoins, le modèle économique traditionnel en vertu duquel les exploitants se chargent du déclasséement des installations reste d'actualité dans nombre de projets de déclasséement en cours.

En outre, il est peu probable que d'autres pays soient tentés de suivre le modèle de déclasséement américain. La principale raison est que, contrairement à la plupart des autres pays, les centrales nucléaires américaines sont indépendantes sur le plan commercial. Par conséquent, le modèle économique américain est différent de celui de la plupart des autres pays.

### Accélérer les projets similaires dans le monde

Toutefois, les processus de déclasséement accéléré mis en œuvre aux États-Unis pourraient contribuer à faire avancer des projets similaires dans le monde entier. Nous communiquons à d'autres pays les enseignements qui en sont tirés par l'intermédiaire des organisations internationales et par le truchement des normes de sûreté, des ateliers, des forums, des missions et des publications de l'AIEA. Le travail de l'AIEA est essentiel pour promouvoir la cohérence des opérations de déclasséement, en faisant en sorte qu'elles se déroulent dans des conditions de sûreté et dans le cadre de réglementations solides.

L'AIEA joue un rôle important en communiquant des informations sur des modalités cohérentes de déclasséement, comme les limites de dose, afin de parvenir à un large accord sur les modalités de fin des opérations d'assainissement d'un site et d'accroître la sûreté des collectivités locales. Les documents de l'AIEA sont très utiles à cet égard. Les spécialistes du déclasséement du monde entier ont réellement soif d'en savoir plus sur la manière d'y procéder de manière sûre et efficace.



## Comment l'agriculture intelligente face au climat laisse entrevoir une amélioration de la productivité du coton en Azerbaïdjan



**Les techniques isotopiques aident les chercheurs et les agriculteurs azerbaïdjanais à obtenir des informations essentielles sur la manière d'optimiser l'utilisation des engrais et d'accroître le rendement de la production de coton tout en préservant la santé des sols.**

(Photo : M. Zaman/AIEA)

En Azerbaïdjan, la production de coton a été plus que doublée par des chercheurs et des agriculteurs recourant à l'agriculture intelligente face au climat ainsi qu'à d'autres techniques connexes dans le cadre d'un projet soutenu par l'AIEA en partenariat avec l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Grâce à une nouvelle variété appelée « super coton », associée à des pratiques d'agriculture intelligente face au climat bien mises en œuvre qui permettent de comprendre comment augmenter durablement la productivité agricole, le projet pilote a permis de faire passer le rendement de trois tonnes par hectare, la moyenne nationale, à huit tonnes.

Ce projet pilote, qui s'inscrit dans un projet de coopération technique de l'AIEA mis en œuvre en 2021, a été axé sur l'élaboration de lignes directrices en matière d'agriculture intelligente face au climat pour la production de coton, la formation de chercheurs et d'agriculteurs azerbaïdjanais à de telles pratiques et la préparation d'essais de démonstration dans des exploitations agricoles. Un autre projet, lancé en 2022,

qui est consacré au renforcement des meilleures pratiques agricoles en matière de gestion des sols, des nutriments et de l'eau pour la production de coton, vise à améliorer la productivité de ce dernier, les terres cultivables en Azerbaïdjan étant particulièrement vulnérables au changement climatique et à la dégradation des sols. La température annuelle moyenne dans le pays a augmenté de 0,4 degré Celsius depuis 1991. L'Azerbaïdjan connaît également une diminution des précipitations et une augmentation de la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes, tels que les inondations, les sécheresses et les vagues de chaleur.

« D'une manière générale, l'amélioration de la productivité des cultures est due à 60 % à l'emploi stratégique des nutriments du sol et à la gestion de l'eau », explique Mohammad Zaman, pédologue au Centre mixte FAO/AIEA des techniques nucléaires dans l'alimentation et l'agriculture et responsable technique du projet. « En fait, il s'agit d'appliquer la bonne quantité, de la bonne manière, au bon moment de la croissance. »

Les pratiques d'agriculture intelligente face au climat impliquent de recourir à des techniques isotopiques pour obtenir des informations essentielles sur la manière d'optimiser l'utilisation des engrais et d'accroître le rendement de la production agricole tout en préservant la santé des sols.

« Lorsque nous avons commencé, les sols azerbaïdjanais étaient fortement dégradés et leur fertilité très faible. Ils ne pouvaient donc pas fournir tous les nutriments essentiels à la croissance du coton », a déclaré M. Zaman. Pour remédier à cet état de choses, les experts de l'AIEA ont élaboré un ensemble complet de techniques agricoles nucléaires et connexes, en partant de la préparation des sols et de la sélection des meilleures variétés de coton jusqu'à l'application de nutriments et à l'irrigation des champs de coton, en passant par la lutte contre les mauvaises herbes, les ravageurs et les maladies.

« Grâce à la mise en place de pratiques de gestion des sols, des nutriments et de l'eau conjuguée à la culture du "super coton", notre productivité de

coton, sa qualité et nos bénéfices se sont améliorés », a affirmé Sakhavat Mammadov, agriculteur azerbaïdjanais qui applique les pratiques d'agriculture intelligente face au climat dans sa ferme depuis deux ans.

Les techniques nucléaires et connexes permettent non seulement d'accroître la productivité, mais aussi de renforcer la résilience des systèmes agricoles face au changement climatique. En Azerbaïdjan, les chercheurs ont utilisé une technique reposant sur l'azote 15 ( $^{15}\text{N}$ ), un isotope stable. L'azote joue un rôle important dans la croissance des plantes et la photosynthèse, processus par lequel les plantes transforment le dioxyde de carbone et la lumière du soleil en nutriments qui leur sont nécessaires. M. Zaman a expliqué qu'un manque de nutriments dans le sol, tels que l'azote, fait baisser les rendements et la teneur en nutriments. En revanche, l'utilisation impropre ou excessive d'engrais azotés contribue à l'émission de gaz à effet de serre et à la pollution des eaux de surface et eaux souterraines.

« Le coton devrait être l'une des cultures dont le rendement diminuera le plus en Azerbaïdjan en raison du changement climatique et de la dégradation rapide des sols », a expliqué M. Zaman. « L'application de techniques isotopiques, comme celle faisant appel à  $^{15}\text{N}$ , peut aider à s'adapter à cette situation, en se traduisant par une meilleure compétitivité du secteur du coton, la préservation des

emplois et l'amélioration de la qualité de vie de la population rurale. »

Autrefois, l'Azerbaïdjan était l'un des principaux producteurs et exportateurs de coton, produisant plus de 830 000 tonnes dans les années 1980, ce qui représentait jusqu'à un quart des revenus du pays. Toutefois, la transition vers l'économie de marché et la croissance rapide des autres secteurs industriels dans les années 1990 ont contribué à évincer le coton de son rôle clé dans l'économie azerbaïdjanaise, la production tombant même à 31 000 tonnes en 2009, quantité la plus faible jamais enregistrée.

Les résultats du projet font apparaître l'important potentiel des pratiques intelligentes face au climat dans l'accroissement de la productivité agricole. « Si 10 % des 105 000 hectares de terres où le coton est cultivé en Azerbaïdjan profitaient des pratiques agricoles intelligentes face au climat de l'AIEA, il serait possible de produire 84 000 tonnes de coton au lieu de 31 500, soit une augmentation de 166 % par rapport aux pratiques traditionnelles de culture du coton », a expliqué M. Zaman. « Le succès extraordinaire de l'application de pratiques agricoles intelligentes face au climat dans le cadre de ce projet est un stimulant tout en ouvrant des perspectives formidables sur la façon dont elles peuvent aider l'Azerbaïdjan à augmenter notablement sa production de coton et, par conséquent,

à bénéficier de retombées très positives au plan économique. »

L'AIEA aide les pays à appliquer, par l'intermédiaire de son programme de coopération technique et du Centre mixte FAO/AIEA, des méthodes d'agriculture intelligente face au climat afin d'accroître la productivité, d'adapter les systèmes agricoles au changement climatique et d'en réduire l'impact sur l'environnement. Le Centre mixte FAO/AIEA soutient également la recherche dans ce domaine. Dans le cadre d'un projet de recherche coordonnée favorisant l'application de techniques nucléaires intelligentes face au climat afin de minimiser l'impact de l'agriculture sur celui-ci, des scientifiques du Brésil, du Chili, du Costa Rica, du Pakistan et de la République islamique d'Iran ont fait état d'une réduction de 50 % des émissions de gaz à effet de serre. D'autres pratiques agricoles intelligentes face au climat contribuent à la mise au point de régimes équilibrés pour le bétail dans un contexte de sécheresses récurrentes en Angola, à une meilleure utilisation de l'eau et gestion des nutriments dans les sols au Kenya et à la lutte contre l'érosion des sols en Tunisie.

— Par Artem Vlasov



Grâce à l'azote 15, un isotope stable, les scientifiques recueillent des données quantitatives sur les besoins du coton en engrais azotés et sur la capacité d'absorption de ces derniers par la plante. (Photo : M. Zaman/AIEA)

## Faire face aux catastrophes naturelles en Amérique latine et dans les Caraïbes grâce aux techniques nucléaires



**Les techniques d'essais non destructifs (END) fournissent des données fiables sur la résistance et l'intégrité des matériaux sans interférer avec des structures potentiellement affaiblies ou dangereuses.**

[Photo : Accord régional de coopération pour la promotion de la science et de la technologie nucléaires en Amérique latine et dans les Caraïbes (ARCAL)]

La région Amérique latine et Caraïbes est la deuxième au monde à être la plus exposée aux catastrophes naturelles. Sa structure tectonique et ses conditions météorologiques uniques la rendent vulnérable aux événements naturels tels que les tremblements de terre, les inondations et les ouragans. Ces vulnérabilités s'aggravent sous l'effet du changement climatique, elle avait besoin d'urgence de capacités d'évaluation de la sûreté et de l'intégrité des constructions à la suite de catastrophes naturelles, en particulier dans les zones urbaines. Grâce à l'aide de l'AIEA, elle est devenue autonome dans ce domaine.

Quatre centres d'intervention, qui sont en mesure d'utiliser des techniques nucléaires d'essais non destructifs (END) pour évaluer l'intégrité de structures de génie civil (routes ou ponts, p. ex.), dans leur propre pays et dans les pays voisins, ont été créés en Argentine, au Chili, au Mexique et au Pérou, avec l'aide de l'AIEA. En cas d'urgence, ils viendront appuyer des interventions régionales coordonnées.

Les techniques d'END, qui permettent de détecter, à l'aide de différents types de rayonnements, les défauts présents dans le béton, les tuyauteries et les soudures, fournissent des données fiables sur la résistance et l'intégrité des matériaux sans fragiliser des structures potentiellement déjà affaiblies ou dangereuses. Sûres et rapides, elles contribuent à la protection des civils.

Les quatre centres d'intervention ont été créés dans le cadre d'un projet de coopération technique de l'AIEA lancé en 2018 pour améliorer l'évaluation des structures urbaines et la qualité des biens et services industriels en Amérique latine et dans les Caraïbes à l'aide des techniques nucléaires.

« Les récents tremblements de terre dans la région soulignent de manière spectaculaire l'importance des réseaux qui améliorent la coordination des interventions d'urgence dans cette région sujette aux catastrophes naturelles. Grâce à l'établissement des centres d'intervention, la région est parvenue à l'autonomie pour ce qui est d'atténuer

les effets des catastrophes naturelles », déclare Gerardo Maghella, expert associé en technologie industrielle à l'AIEA.

Dans le cadre de la création des centres, l'AIEA a organisé la formation et l'agrément d'experts en techniques d'END à Buenos Aires, du 7 au 18 novembre 2018, au titre du projet régional de coopération technique en cours. Neuf participants d'Argentine, du Brésil, du Costa Rica et du Mexique ont été nouvellement déclarés aptes à appliquer des méthodes de radiographie numérique avancées fondées sur les rayons X et gamma ou ont renouvelé leur certificat d'aptitude. Ils sont désormais qualifiés pour inspecter des structures de génie civil à l'aide des dernières techniques d'END.

Vingt-quatre autres participants de dix pays (Argentine, Chili, Costa Rica, Cuba, Équateur, Mexique, Pérou, République dominicaine, République bolivarienne du Venezuela et Uruguay) ont été formés à l'application de méthodes d'END sur des structures de génie civil, notamment à l'inspection visuelle et aux essais aux

ultrasons, qui permettent de détecter les défauts d'un matériau et d'en mesurer l'épaisseur grâce aux ondes sonores.

« L'agrément donne un élan décisif à la promotion des méthodes d'END dans le domaine du génie civil dans nos pays respectifs », a déclaré Eduardo Robles, chef de projet à l'Institut national de recherche nucléaire du Mexique, l'un des experts fraîchement diplômés et représentant du centre mexicain des interventions fondées sur les AND.

La formation et la délivrance de certificats ont été assurées par l'Association italienne à but non lucratif des essais non destructifs et de la maintenance prédictive dans le cadre d'arrangements pratiques conclus avec l'AIEA et conformément aux normes internationales ISO 9712 (sur les essais non destructifs) et ISO 17024, (sur les exigences générales applicables aux

organismes de certification), ce qui permet aux experts de former leurs collègues.

Hernán Xargay, chef de division à la Commission nationale argentine de l'énergie atomique et coordinateur au centre d'intervention récemment créé en Argentine, a déclaré : « La formation et la certification aux normes ISO, organisées par l'AIEA, permettent de s'assurer que les exigences internationales sont respectées et tendent à l'harmonisation des méthodologies à travers la région. »

Mario Barrera Méndez, coordinateur du contrôle de la qualité à la Commission chilienne de l'énergie nucléaire, qui dirige le nouveau centre d'intervention au Chili, partage cet avis : « Le réseau créé par l'AIEA est la pierre angulaire de la nouvelle capacité d'intervention d'urgence de la région. En tant que l'un des quatre centres d'intervention,

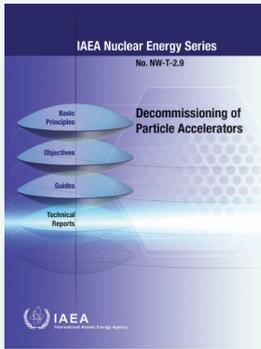
nous entendons diffuser les vastes connaissances que nous avons acquises sur les techniques d'END là où elles sont nécessaires en Amérique latine et dans les Caraïbes. »

Les essais non destructifs sont une méthode de contrôle de la qualité fondée sur des techniques nucléaires qui permet d'examiner des matériaux sans les endommager. L'AIEA favorise l'utilisation de la technologie des END afin de maintenir un contrôle de la qualité rigoureux, nécessaire à l'exploitation sûre des installations nucléaires et des autres installations industrielles. Ce soutien passe par la fourniture de matériel et d'une assistance aux États Membres, ainsi que par la formation du personnel local à l'utilisation de cette technologie. En savoir plus sur les travaux de l'AIEA relatifs aux END.

— Par Pauline Sophie Hennings

**Les END sont une méthode de contrôle de la qualité qui permet d'examiner les matériaux à l'aide de techniques nucléaires sans les endommager.** (Photo : ARCAL)

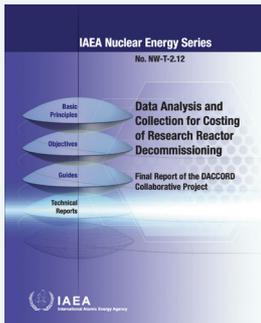




## DECOMMISSIONING OF PARTICLE ACCELERATORS

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

ISBN : 978-92-0-102419-0



## DATA ANALYSIS AND COLLECTION FOR COSTING OF RESEARCH REACTOR DECOMMISSIONING: FINAL REPORT OF THE DACCORD COLLABORATIVE PROJECT

Cette publication rend compte du projet DACCORD, qui aide les États Membres à préparer des estimations préliminaires des coûts liés au déclasserment des réacteurs de recherche. Le rapport est particulièrement utile pour les programmes ayant une expérience limitée en matière de déclasserment. Les projets d'évaluation des coûts pour le déclasserment des réacteurs de recherche peuvent avoir une large portée et comporter de nombreuses données et facteurs possibles qui doivent être dûment pris en compte lors de l'élaboration de l'estimation. La publication fournit des informations sur les facteurs relatifs au déclasserment des réacteurs de recherche, ainsi qu'une base pour l'estimation des incertitudes et des imprévus et pour l'évaluation de l'impact des activités de planification et de caractérisation du déclasserment. Elle traite également de l'utilisation du code logiciel CERREX-D2 (Estimation du coût du déclasserment de réacteurs de recherche dans Excel), élaboré par l'AIEA pour permettre à des non-spécialistes d'établir des estimations préliminaires des coûts liés au déclasserment.

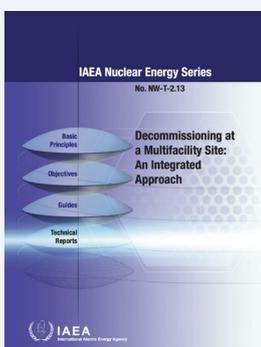
ISBN : 978-92-0-108621-1



## MANAGING THE DECOMMISSIONING AND REMEDIATION OF DAMAGED NUCLEAR FACILITIES

Dans le cadre du Plan d'action sur la sûreté nucléaire, l'AIEA a dirigé le Projet international sur la gestion du déclasserment et de la remédiation des installations nucléaires endommagées (Projet DAROD). Ce projet vise à fournir des conseils pratiques pour le déclasserment et la remédiation des installations nucléaires endommagées à la suite d'accidents, sur la base d'études de cas portant sur des installations réellement endommagées et des enseignements tirés de l'expérience. Cette publication synthétise les résultats du Projet DAROD. Elle s'adresse aux organismes de réglementation, aux organismes exploitants, aux organismes d'appui technique et aux responsables gouvernementaux qui participent au déclasserment et à la remédiation des installations nucléaires endommagées à la suite d'un accident ou en raison d'une détérioration héritée du passé.

ISBN : 978-92-0-142621-5



## DECOMMISSIONING AT A MULTIFACILITY SITE

Ces dernières années, plusieurs États Membres ont achevé le déclasserment de sites nucléaires comportant de multiples installations. Cette publication vise à consolider leur expérience technique et organisationnelle, et fournit des informations et des conseils pratiques qui favorisent une mise en œuvre sûre, rapide et menée dans un souci de maîtrise des coûts. Toutes les phases du déclasserment sont abordées, de la planification et du démantèlement à la gestion des déchets et à la libération du site, ainsi que les systèmes d'organisation et le financement. Cette publication s'adresse aux décideurs, aux exploitants de centrales, aux entrepreneurs et aux organismes de réglementation participant à la planification, à la gestion, à l'autorisation et à l'exécution des activités de déclasserment. Elle est particulièrement utile pour les exploitants de sites comportant de multiples installations et dont les installations nucléaires approchent de la fin de leur durée de vie prévue. Cette publication intéressera également les concepteurs et les constructeurs de nouvelles installations nucléaires dans la perspective de faciliter le déclasserment ultime.

ISBN : 978-92-0-119522-7

**POUR OBTENIR DE PLUS AMPLES INFORMATIONS OU POUR COMMANDER UNE PUBLICATION, VEUILLEZ ÉCRIRE À L'ADRESSE SUIVANTE :**

Unité de la promotion et de la vente  
 Agence internationale de l'énergie atomique  
 Centre international de Vienne, B.P. 100, 1400 Vienne (Autriche)  
 Courriel : [sales.publications@iaea.org](mailto:sales.publications@iaea.org)



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

Pour de plus amples informations sur l'AIEA et ses activités, rendez-vous sur le site  
[www.iaea.org](http://www.iaea.org)

ou suivez-nous sur

