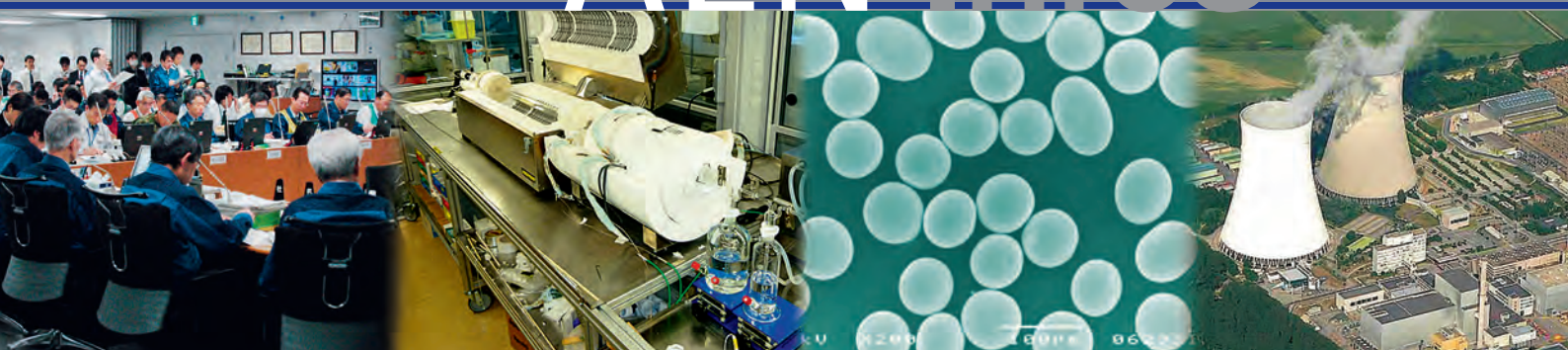


# AEN Infos



## Dans ce numéro :

La réponse intégrée de l'AEN à l'accident nucléaire de Fukushima Daiichi

Le coût économique de la sortie du nucléaire en Allemagne

Projets communs internationaux en matière de sûreté nucléaire : un système qui porte ses fruits depuis 30 ans

Bonnes pratiques de gestion des effluents dans les nouvelles constructions nucléaires

et encore...





AEN Infos est publié deux fois par an, en anglais et en français, par l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire. Les opinions exprimées n'engagent que les auteurs des articles et ne reflètent pas nécessairement les points de vue de l'Organisation ou ceux des pays membres. Les informations contenues dans AEN Infos peuvent être librement utilisées, à condition d'en citer la source. La correspondance doit être adressée comme suit :

La rédaction, AEN Infos  
Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire  
12, boulevard des Îles  
92130 Issy-les-Moulineaux  
France  
Tél. : +33 (0)1 45 24 10 12  
Fax : +33 (0)1 45 24 11 10

L'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN) est une organisation intergouvernementale qui a été fondée en 1958. Son principal objectif est d'aider ses pays membres à maintenir et à approfondir, par l'intermédiaire de la coopération internationale, les bases scientifiques, technologiques et juridiques indispensables à une utilisation sûre, respectueuse de l'environnement et économique de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques. Elle est une source d'informations, de données et d'analyses non partisane et constitue l'un des meilleurs réseaux d'experts techniques internationaux. Elle comprend actuellement 30 pays membres : l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Japon, le Luxembourg, le Mexique, la Norvège, les Pays-Bas, la Pologne, le Portugal, la République de Corée, la République slovaque, la République tchèque, le Royaume-Uni, la Slovaquie, la Suède, la Suisse et la Turquie.

Pour plus d'informations sur l'AEN, voir :

[www.oecd-nea.org](http://www.oecd-nea.org)

**Rédaction :**

Cynthia Gannon-Picot  
Serge Gas

**Production et marketing :**

Cynthia Gannon-Picot  
Andrée Pham Van  
Delphine Grandrieux

**Graphisme et mise en page :**

Fabienne Vuillaume

*Photos de la page de couverture : Centre de crise pour l'accident de Fukushima, avril 2011 (TEPCO, Japon) ; Étude des dépôts de ruthénium dans la tuyauterie à l'IRSN à Cadarache (OCDE/AEN, Projet STEM) ; Image microscopique d'U avec 10 % de masse de Zr ; Centrale nucléaire de Philippsburg, Allemagne (Lothar Neumann, Gernsbach). Photo de Luis Echavarrri en page 3 (M. Lemelle, France).*

## Table des matières

### Faits et opinions

---

- La réponse intégrée de l'AEN à l'accident nucléaire de Fukushima Daiichi 4
- Le coût économique de la sortie du nucléaire en Allemagne 8

### Actualités

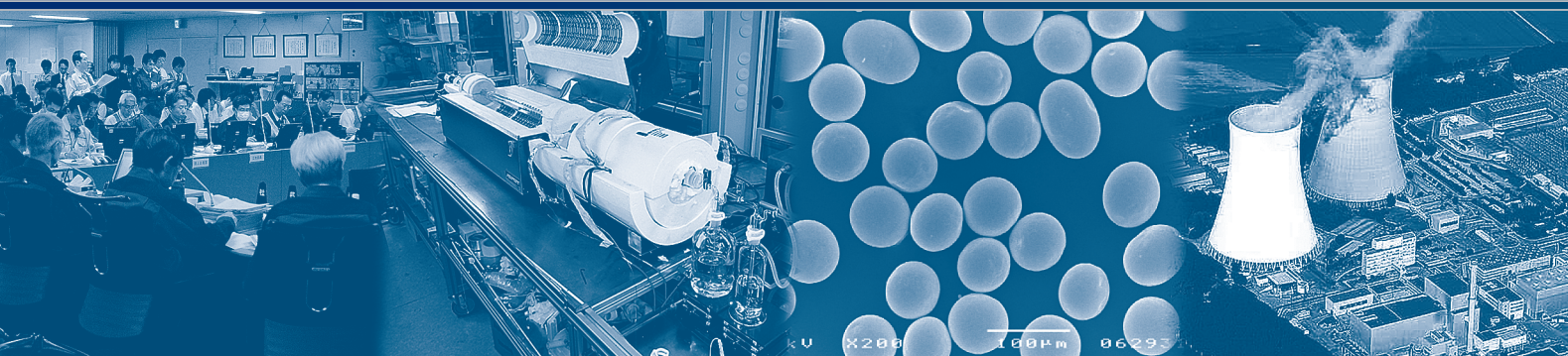
---

- Projets communs internationaux en matière de sûreté nucléaire : un système qui porte ses fruits depuis 30 ans 15
- Bonnes pratiques de gestion des effluents dans les nouvelles constructions nucléaires 19
- Combustibles innovants et matériaux de structure pour des systèmes d'énergie nucléaire avancés 21
- Caractérisation radiologique pour le démantèlement 24

### Nouvelles brèves

---

- Plus de deux décennies d'échange d'informations sur la séparation et la transmutation 26
- Nouvelles publications 27



## Bâtir une réponse pour l'après-Fukushima



La sûreté des réacteurs nucléaires existants et futurs partout dans le monde est la première priorité de l'Agence. Depuis l'accident qui s'est produit en mars 2011 dans la centrale japonaise de Fukushima Daiichi, la réponse des organisations internationales comme l'AEN est restée fortement axée sur les leçons à tirer de cet accident et sur l'échange efficace et réel d'informations entre les pays membres. Pour l'AEN, une réponse globale à l'accident nucléaire de Fukushima Daiichi est essentielle si l'on veut que les enseignements soient mis en œuvre et que la sûreté nucléaire mondiale soit renforcée plus avant.

Trois des comités techniques permanents de l'AEN, le Comité sur les activités nucléaires réglementaires (CANR), le Comité sur la sûreté des installations nucléaires (CSIN) et le Comité de protection radiologique et de santé publique (CRPPH) ont pris l'initiative de coordonner la réponse de l'AEN aux événements de mars 2011. Le programme INFASE (*Integrated NEA Fukushima Actions for Safety Enhancements*) va notamment s'intéresser à la gestion des accidents sur et hors site, à la communication de crise, aux infrastructures réglementaires et à la prise de décision, à la réévaluation de la défense en profondeur et à certaines méthodologies en matière de sûreté nucléaire, ainsi qu'à la radioprotection et à la santé publique. Sous la coordination générale du CANR, la réponse de l'AEN à l'accident de Fukushima Daiichi va garantir que les tâches urgentes les plus importantes apportent les premiers résultats dans l'année qui suit. Les lecteurs trouveront à ce sujet une description complète des neuf points majeurs du programme INFASE dans ce numéro.

Parmi ses répercussions, l'accident de Fukushima Daiichi a eu pour effet de retarder partout dans le monde le développement des programmes nucléaires du fait de l'analyse et de la mise en œuvre des leçons de l'accident. Ces conséquences touchent également certaines politiques énergétiques. Bien que la plupart des pays aient réaffirmé leur engagement pour l'énergie nucléaire, certains d'entre eux ont choisi d'en sortir ou de ne pas la réintroduire. Nos lecteurs trouveront sur cette question un article concernant les coûts de sortie du nucléaire en Allemagne où la décision qui a été prise suite à l'accident implique la fermeture de tous les réacteurs d'ici 2022, soit avant la fin de leur durée d'exploitation initialement prévue.

Une étape importante a été franchie dans la consolidation de la sûreté nucléaire mondiale de l'après-Fukushima avec l'adhésion le 23 mai 2012 de la Fédération de Russie à l'AEN et à sa Banque de données, adhésion formalisée par un échange officiel de lettres effectué au siège de l'OCDE, à Paris. La Russie possède le quatrième programme nucléaire du monde et son entrée à l'AEN, effective au 1<sup>er</sup> janvier 2013, va renforcer la coopération internationale et l'expertise collective de l'AEN.

Alors que l'Agence poursuit sa dynamique, les travaux entrepris suite à l'accident de Fukushima Daiichi vont avoir des résultats positifs pour la communauté de sûreté nucléaire et pour tous ceux qui utilisent l'énergie nucléaire partout dans le monde.

A handwritten signature in black ink, which appears to read 'Luis E. Echávarri'. The signature is fluid and cursive, written over a white background.

Luis E. Echávarri  
Directeur général de l'AEN

# La réponse intégrée de l'AEN à l'accident nucléaire de Fukushima Daiichi

par G. Lamarre, T. Lazo, D. Jackson, J. Nakoski et H.B. Okyar\*

Le 11 mars 2011, un tremblement de terre et un tsunami massif ont frappé la côte est du Japon, provoquant les accidents de fusion du cœur des tranches 1 à 3 de Fukushima Daiichi ainsi que de graves problèmes de refroidissement de la piscine de combustible usé de la tranche 4, laissant les autorités japonaises face à un énorme défi de prise en charge et de remise en état. Pour la communauté internationale de sûreté nucléaire, les interrogations sont nombreuses quant aux leçons pouvant être tirées de ce tragique accident afin de développer la sûreté des centrales nucléaires actuelles et à venir à travers le monde et d'améliorer les dispositions et les stratégies de gestion de crise tant au niveau national qu'international. Immédiatement après l'accident de Fukushima Daiichi, les pays membres de l'AEN et les pays associés se sont tournés vers l'Agence pour rassembler des experts et commencer à prendre en compte les enseignements se dégageant de l'accident.

## Processus intégré de l'AEN pour les actions post-Fukushima

Afin de s'assurer que l'AEN facilite l'échange efficace et productif d'informations et de réponses sur l'accident de Fukushima Daiichi, une réunion a été organisée en décembre 2011 entre les bureaux des trois principaux comités techniques permanents dont les responsabilités concernent le contrôle réglementaire, la sûreté nucléaire et la protection radiologique et la santé publique : le Comité sur les activités nucléaires réglementaires (CANR), le Comité sur la sûreté des installations nucléaires (CSIN) et le Comité de protection radiologique et de santé publique (CRPPH), afin de discuter du meilleur moyen de coordonner les efforts et de coopérer pour faire face aux événements du 11 mars. Les trois comités ont commencé à envisager, et dans certains cas à initier des tâches issues des leçons tirées de l'accident. La réunion a ainsi permis de trouver un accord sur le déroulement du processus de réponse intégrée. Le but était également de faciliter la communication d'un programme clair et complet sur la sûreté de Fukushima Daiichi à tous les acteurs internes et externes.

Les trois comités ont convenu que le CANR assumerait la coordination globale de la réponse intégrée de l'AEN et que le Groupe d'experts à haut niveau du CANR sur les impacts de l'accident de Fukushima (STG-FUKU), constitué immédiatement après l'accident, assumerait le rôle de supervision et coordi-

nation du programme. En outre, le CSIN a étendu la portée de son Groupe d'examen du programme (PRG) afin de gérer les activités transversales liées à l'accident de Fukushima. Enfin, le Groupe d'experts sur les aspects de radioprotection liés à l'accident de Fukushima (EGRPF) a été créé par le CRPPH pour faire office de point de convergence de la coopération entre les comités susmentionnés et toutes les organisations internationales concernées, notamment l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) et la Commission européenne (CE), pour les questions de gestion de crise et de protection radiologique. Le Groupe de travail sur les urgences nucléaires (WPNEM) du CRPPH offre également une assistance directe.

Les trois comités ont conclu que le travail approuvé et en cours devait absolument se poursuivre sans relâche mais que toutes les tâches devaient être considérées, dans la mesure du possible, dans une optique multilatérale, par exemple en développant des actions pouvant répondre à des questions dans plusieurs domaines de la sûreté.

## Éléments du plan d'action

À partir des contributions des trois comités techniques permanents, de leurs groupes de travail et groupes d'experts, une liste d'action des principales questions de sûreté a été préparée, des responsabilités ont été convenues et des mécanismes de coordination communs aux divers comités ont été confirmés. Le tableau ci-après donne un aperçu du programme *Integrated NEA Fukushima Actions for Safety Enhancements* (INFASE – Actions intégrées post-Fukushima de l'AEN pour l'amélioration de la sûreté).

\* M. Greg Lamarre ([greg.lamarre@oecd.org](mailto:greg.lamarre@oecd.org)), Mme Diane Jackson ([diane.jackson@oecd.org](mailto:diane.jackson@oecd.org)) et M. John Nakoski ([john.nakoski@oecd.org](mailto:john.nakoski@oecd.org)) travaillent dans la Division de la sûreté nucléaire de l'AEN. M. Ted Lazo ([edward.lazo@oecd.org](mailto:edward.lazo@oecd.org)) et M. Halil Burçin Okyar ([halilburcin.okyar@oecd.org](mailto:halilburcin.okyar@oecd.org)) travaillent en tant que spécialistes de la protection radiologique au sein de la Division de la protection radiologique et de la gestion des déchets radioactifs de l'AEN.

## Domaines thématiques

	Proposition	Statut	CANR	CRPPH	CSIN
<b>1. Gestion et progression des accidents</b>					
a. <b>Transition</b> : développement de programmes et de procédures visant à gérer la conduite transitoire des opérations lors du passage de conditions normales à des conditions d'accident, puis à des conditions d'accident grave, et enfin à la mise en œuvre des mesures de protection prévues aux plans de préparation aux situations d'urgence. Ces dispositions comprennent des processus décisionnels externes et internes.	CANR	P	CP	CA	CA
b. <b>Progression des accidents</b> : compréhension avancée des techniques et méthodes d'analyse de la progression des accidents.	CANR	P	CA	CA	CP
c. <b>Comportement humain</b> : questions de comportement humain et organisationnel dans des conditions d'accident.	CANR	P	CA	CA	CP
d. <b>Hors site</b> : amélioration de la préparation aux situations d'urgence hors site, en partageant les connaissances sur la progression des accidents de fusion du cœur et la quantification du terme source afin de perfectionner les outils techniques et les procédures d'urgence externes.	CRPPH	P	CA	CP	CA
<b>2. Communications en cas de crise ou d'urgence</b> (échange d'informations primaires entre le CANR et le CRPPH)					
a. <b>Public</b> : communication avec le public, les médias et d'autres parties prenantes.	CANR	A	CP	CA	
b. <b>Autorités de sûreté</b> : communication avec les autorités de sûreté d'autres pays et avec les organisations internationales, comme le Comité inter-agence sur les urgences radiologiques et nucléaires (IACRNE) et l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA).	CANR	P	CP	CP	
c. <b>Sur site-hors site</b> : communications de crise entre les organisations de gestion de crise.	CANR	P	CP	CP	
<b>3. Réévaluation de la défense en profondeur</b>					
	CSIN	P	CA		CP
<b>4. Évaluation des méthodologies de définition et d'évaluation des événements initiateurs internes et externes, y compris les événements couplés, ainsi que des méthodologies de définition des critères de dimensionnement</b>					
	CSIN	P	CA		CP
<b>5. Réévaluation du retour d'expérience et des opportunités passées afin d'identifier ou gérer les conditions menaçant la sûreté nucléaire</b>					
a. <b>Retour d'expérience</b> : évaluation du retour d'expérience pour les événements risquant de devenir des précurseurs d'événements futurs pouvant menacer la sûreté des centrales nucléaires d'après les enseignements de Fukushima.	CANR	A	CP		CA
b. <b>Recherches</b> : examen et analyse des lacunes des recherches sur la sûreté applicables à l'analyse de l'accident.	CSIN	A	CA		CP
<b>6. Équilibre entre les approches déterministes et probabilistes et la prise de décision réglementaire</b>					
	CANR	P	CP		CA
<b>7. Infrastructure réglementaire</b> (sujet traité par un seul comité)					
	CANR	A	CP		
<b>8. Protection radiologique</b> (sujet traité par un seul comité)					
	CRPPH	A		CP	
<b>9. Aspects de protection radiologique de la décontamination et de la remise en état</b> (sur site-hors site, sujet traité par un seul comité)					
	CRPPH	A		CP	

P : planifié, A : actif, CP : comité principal, CA : comité adjoint.

## Gestion sur site des accidents

Concernant la gestion sur site des accidents, le STG-FUKU a recommandé au CANR l'organisation d'une réunion d'experts afin de mieux définir les activités que l'AEN pourrait soutenir en ce domaine en tirant les enseignements de l'accident de Fukushima Daiichi. Cette réunion s'est déroulée du 20 au 22 mars 2012 et a été précédée d'une enquête visant à recueillir des informations sur les approches nationales de la gestion sur site des accidents. Des réponses ont été reçues de 12 pays et des experts de 10 pays ont participé à la réunion.

Pendant la réunion, les experts ont identifié quatre domaines principaux (procédures transitoires, interactions sur site-hors site, conception et équipement, facteurs humains et organisationnels) dans lesquels dix propositions ont été élaborées et hiérarchisées. Les tâches que les experts ont estimé devoir commencer immédiatement sont les suivantes : questions concernant la capacité des individus chargés de la gestion d'accidents à faire face à des conditions hors des cadres prévus ; comment et quand faire appel à l'aide extérieure ; approches décisionnelles et leurs principes directeurs lors des situations d'urgence ; disponibilité des instruments et de l'équipement pour traiter les aspects à long terme de la gestion sur site des accidents. Les autres questions qui, pour diverses raisons, pourront être abordées ultérieurement, comprennent le développement et l'entretien des compétences des individus devant faire face à des événements hors dimensionnement ainsi que les améliorations à apporter aux procédures et directives de gestion sur site des accidents d'après les leçons tirées de l'accident.



TEPCO, Japon

Centre de crise pour l'accident de Fukushima (avril 2011).

## Réévaluation de la défense en profondeur

D'après les questions et les priorités soulignées dans son Document de réflexion sur Fukushima et selon les priorités définies par le STG-FUKU, le CSIN et ses

groupes de travail étudient actuellement les tâches liées au renforcement de la solidité et à la réduction des vulnérabilités de la conception des réacteurs actuels et à venir. Avant tout, il convient d'étudier de façon plus approfondie les moyens d'améliorer la capacité d'une centrale à supporter la perte de ses fonctions de sûreté basiques comme le refroidissement du réacteur à l'arrêt, et les événements couplés comme la perte d'alimentation électrique et la perte ou la détérioration des systèmes cruciaux de contrôle-commande. Ces vulnérabilités seront regroupées en deux grandes catégories. La première concerne la perte des systèmes électriques, y compris la façon de mieux concevoir les systèmes de production et distribution de l'alimentation électrique à l'intérieur et à l'extérieur de la centrale afin de conserver les fonctions essentielles de sûreté (refroidissement du cœur, intégrité de l'enceinte, refroidissement du combustible usé et confinement de la radioactivité) et les surveiller efficacement pendant les événements prolongés de perte de l'alimentation électrique. Un autre concept essentiel à étudier concerne l'optimisation des charges de batterie actuelles et la prolongation de la durée de maintien de l'alimentation cruciale.

La seconde catégorie concerne la perte de la source froide ultime, comprenant un examen de la façon dont les fonctions de sûreté pour le refroidissement du cœur et le refroidissement des piscines de combustible usé peuvent être maintenues en cas de perte prolongée de la source froide. La conception et les autres dispositions permettant de faire face à la perte de la source froide ultime sont les points cruciaux à étudier pour améliorer la défense en profondeur et la robustesse des centrales. Lors de sa réunion des 6 et 7 juin 2012, le CSIN a examiné en détail ces deux domaines techniques ainsi que des études techniques individuelles les concernant.

## Radioprotection et santé publique

Concernant les questions de radioprotection et santé publique, le CRPPH a offert son assistance technique aux autorités japonaises et à la communauté internationale via des initiatives comme le Groupe d'experts sur les aspects de radioprotection liés à l'accident de Fukushima (EGRPF), l'évaluation et le partage des enseignements tirés, le coparrainage d'un symposium international sur la décontamination organisé par le gouvernement japonais en octobre 2011 et le coparrainage des colloques de l'Initiative de dialogue autour de Fukushima organisés par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR).

En outre, le CRPPH a convenu qu'il faudrait recueillir rapidement l'expérience et les enseignements de ses membres concernant l'évaluation des plans nationaux de gestion de crise suite à l'accident de Fukushima. Une brève liste de domaines-cadres a donc été préparée pour faciliter l'identification des points communs entre les évaluations nationales,

afin que le comité puisse identifier plus efficacement les domaines devant faire l'objet d'un travail ultérieur du CRPPH. Voici ci-dessous les catégories identifiées pour le recueil des points de vue et des approches des pays membres concernant leur auto-évaluation des plans de gestion de crise pré-Fukushima :

**En cas d'accident dans votre propre pays :**

- préparation des communications avec les autres pays : préparation en vue de la traduction, préparation de la prise en charge des problèmes liés aux pays étrangers, préparation de la notification des décisions prises (ou allant l'être) aux autres pays ;
- plans de préparation et d'intervention pour les rejets à long terme : gestion de la mise à l'abri, des populations évacuées, du bétail et de la protection civile (y compris assistance médicale) ;
- plans de préparation et d'intervention pour l'optimisation de la stratégie de protection (conformément à la Publication 109 de la CIPR) : évaluation des effets des contre-mesures à court terme, projection des circonstances et voies d'exposition à long terme (jusqu'à une année), définition de niveaux de référence, établissement de déclencheurs et d'outils d'évaluation et d'aide à la décision ;
- plans de préparation au rétablissement (conformément à la Publication 111 de la CIPR) : dispositifs de surveillance des rayonnements, introduction de programmes de surveillance sanitaire, implication des parties prenantes dans la planification de la gestion de crise, gestion des denrées alimentaires contaminées, mécanismes/processus de planification du rétablissement.

**En cas d'accident dans un autre pays :**

- préparation des communications avec les autres pays : prise de connaissance des installations (type, emplacement, alentours, population présente sur le site ou à proximité), approches de recueil des informations (auprès de l'AIEA, de la CE, de l'autorité de sûreté ou d'autres institutions du pays touché) ;
- plans de préparation pour l'évaluation des accidents à l'étranger : évaluation du terme source, accès aux données météorologiques locales/régionales ;
- plans de préparation des conseils prodigués : aux habitants du pays touché, à l'ambassade, aux compagnies aériennes et de transport, à l'industrie nationale du pays touché, en vue de l'importation de denrées alimentaires et de marchandises originaires du pays touché.

Les premiers résultats de l'enquête ont été évalués. Toutefois, pour obtenir une analyse plus approfondie, une nouvelle enquête commune des membres du CRPPH et du Groupe de travail sur les urgences nucléaires (WPNEM) est en cours.

## Recherches sur la sûreté

L'un des points fondamentaux de la réponse intégrée de l'AEN à l'accident de Fukushima Daiichi concerne l'examen des recherches sur la sûreté, passées et en cours, pour s'assurer qu'elles ne présentent pas de lacunes révélées par l'accident et devant être comblées. Le CSIN examine actuellement ses travaux expérimentaux passés réalisés dans le cadre de projets de recherches internationaux communs OCDE/AEN afin de communiquer les avancées réalisées jusqu'alors, identifier les principales lacunes techniques où des recherches sur la sûreté pourraient s'avérer nécessaires et fournir des recommandations concernant les futurs thèmes de recherche prioritaires dans le domaine de la sûreté. Les résultats seront présentés aux pays membres.

## Prochaines étapes

D'après les décisions prises par le CANR, le CSIN et le CRPPH au cours du premier semestre 2012, certaines tâches hautement prioritaires et urgentes vont être entamées. Les tâches actuelles entreprises suite à l'accident de Fukushima Daiichi vont se poursuivre conformément à leur calendrier original. L'objectif est d'obtenir rapidement des résultats dans l'intérêt des pays membres et pour leur fournir des informations et des données qui compléteront leur travail sur les initiatives de suivi de Fukushima. Les trois comités ont défini clairement leurs attentes : que les tâches hautement prioritaires et urgentes fournissent leurs premiers résultats en une année. Les tâches moins prioritaires et/ou moins urgentes devront être achevées d'ici un à trois ans. Les tâches faisant partie du programme INFASE feront l'objet d'un suivi et leurs comptes-rendus seront disponibles sur le site Internet de l'AEN et lors des réunions périodiques des comités techniques permanents.

# Le coût économique de la sortie du nucléaire en Allemagne

par J.H. Keppler\*

**I**mmédiatement après l'accident survenu en mars 2011 à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi exploitée par TEPCO, le gouvernement fédéral allemand a ordonné l'arrêt temporaire de ses huit plus vieux réacteurs nucléaires. Cette décision s'est accompagnée d'une proposition d'arrêt progressif, d'ici 2022, de l'ensemble des 17 réacteurs nucléaires d'une capacité combinée de 20,5 GW se trouvant sur le territoire allemand. Cette proposition a été adoptée le 31 juillet 2011, et les huit réacteurs temporairement arrêtés ont été fermés de manière définitive le 6 août 2011. Les neuf autres réacteurs doivent être fermés progressivement d'ici le 31 décembre 2022.

L'arrêt définitif de réacteurs ayant une durée de vie moyenne de 33,5 ans (sachant que le standard dans l'industrie est d'au moins 40 ans, et que dans certains pays comme les États-Unis, elle est de 60 ans) fait peser des coûts importants sur les producteurs d'énergie allemands, les consommateurs d'électricité et l'économie allemande. Dans cet article, sont évalués les coûts directs liés à l'arrêt des 17 réacteurs nucléaires allemands avant la fin de leur durée de vie utile, des coûts qui se répercutent immédiatement sur les producteurs d'électricité sous forme d'augmentation des coûts, et sur les consommateurs d'électricité sous forme de hausse des prix. Cet article n'aborde ni les coûts macroéconomiques ni les impacts sur la production totale d'électricité, l'inflation ou le chômage, et ne prend en compte ni les effets dynamiques sur les compétences industrielles de l'Allemagne ni les impacts associés sur les futures exportations.

Les coûts directs de cet arrêt se présentent sous trois formes : a) les coûts de construction et de fonctionnement des installations de remplacement du côté de l'offre, b) une hausse des prix de l'électricité et une perte concomitante de surplus du consommateur du côté de la demande, et c) une augmentation des importations d'électricité. Les coûts liés aux installations de remplacement se divisent entre les coûts d'investissement supplémentaires, les charges d'exploitation supérieures et les coûts accrus engagés pour le transport et la distribution, dans la mesure où les installations de remplacement intègrent des énergies renouvelables décentralisées situées loin des consommateurs finaux. La hausse des prix de l'électricité résulte, à court terme, d'une réduction des réserves de capacité (ce qui implique le recours à des équipements avec des charges d'exploitation supérieures) et, à long terme, d'une augmentation

des prix du gaz, du charbon et du carbone en raison de la demande supplémentaire.

## Aspects méthodologiques

Bien que les mécanismes permettant de déterminer le coût d'une sortie du nucléaire soient bien connus, il s'avère difficile de déterminer le montant de ce dernier. Le coût réel de cette sortie peut tout à fait se révéler impossible à déterminer avec précision, même si plusieurs paramètres importants peuvent en être déterminés. Cela est dû au fait qu'avant même de prendre la décision de sortir du nucléaire, l'Allemagne s'est engagée dans une restructuration écologique ambitieuse de son secteur énergétique (*Energiewende*), une restructuration qui comprend le déploiement de grandes quantités d'énergies renouvelables, notamment à travers des parcs éoliens terrestres et en mer. Les estimations du coût de la sortie du nucléaire dépendent principalement de la relation envisagée avec le *Energiewende*.

D'une part, la plus grosse partie des frais liés au *Energiewende*, qui comprend aussi un investissement à grande échelle dans le chauffage et l'efficacité énergétique, ont été engagés indépendamment de la sortie du nucléaire. D'autre part, une partie de la capacité attendue dans le cadre du *Energiewende*, qui amplifie de manière substantielle la production d'énergie éolienne en mer, permettra de remplacer la capacité nucléaire à l'arrêt. En outre, l'Allemagne prévoit d'installer 12,9 GW de capacité additionnelle d'énergie produite à partir de combustibles fossiles (dont 10,8 GW à base de charbon) d'ici 2015, objectif qui a été fixé à la suite de la première décision de renoncement progressif au nucléaire, le *Atomkonsens*, du 14 juin 2000, qui a pris force de loi le 22 avril 2002. Une grande partie de cette nouvelle capacité au charbon et au gaz fut commandée afin de tirer profit des quotas attribués à titre gratuit aux nouveaux entrants durant les deux premières périodes d'engagement (2005-2007 et 2008-2012) du système communautaire d'échange de quotas d'émissions, l'EU ETS.

La base utilisée pour évaluer les coûts du système électrique résultant de la décision de sortie

\* M. Jan Horst Keppler ([jan-horst.keppler@oecd.org](mailto:jan-horst.keppler@oecd.org)) est Administrateur principal dans la Division du développement nucléaire de l'AEN.

prise par le gouvernement allemand est un élément crucial de la détermination du coût de cette même décision. Cet exercice prend comme base la situation précédant immédiatement la décision de sortie du nucléaire de mars 2011. Dans les mois qui ont précédé cette décision, les exploitants des réacteurs nucléaires allemands avaient été autorisés à prolonger la durée de vie de leurs centrales de 1 804 TWh supplémentaires par rapport aux plafonds fixés par une décision antérieure d'avril 2002.

Depuis que le gouvernement allemand a décidé, en mars 2011, de sortir du nucléaire, de nombreux experts ont proposé une évaluation du coût de cette décision. Une étude abondamment citée menée en juillet 2011 par trois instituts de recherche pour le Ministère fédéral allemand de l'Économie a été publiée sous le nom de *Energieszenarien 2011*. Cette étude fondée sur des modèles évalue le coût supplémentaire net du côté de l'offre à EUR 16,4 milliards, en raison de la hausse des coûts variables, et le coût supplémentaire du côté de la demande à EUR 32 milliards jusqu'en 2030, en raison de l'augmentation des prix de l'électricité.<sup>1</sup> Bien que le coût total de EUR 48 milliards estimé pour la sortie du nucléaire soit assez proche des EUR 45,8 milliards de cette étude, la méthodologie et les calculs basés sur des prix estimés de façon endogène plutôt que basés sur des prix empiriques diffèrent sensiblement. Une autre étude, également fondée sur des modèles, de l'Institut pour l'utilisation rationnelle de l'énergie (IER) de l'Université de Stuttgart évalue les coûts liés à l'énergie dans le contexte de la sortie allemande du nucléaire à EUR 57 milliards en maintenant un objectif de réduction des gaz à effet de serre de 20 %, et à EUR 74 milliards en portant cet objectif à 30 %. Les valeurs respectives pour toute l'Europe seraient de l'ordre de EUR 81 milliards et EUR 94 milliards.<sup>2</sup>

En tant qu'organisation internationale, l'AEN est tenue de choisir une méthodologie transparente et solide applicable, en principe, à l'ensemble de ses 30 pays membres. L'utilisation de modèles macroéconomiques ou même sectoriels, dont les hypothèses pourraient ne pas nécessairement apparaître clairement aux lecteurs, n'est pas envisageable face à une question aussi politisée que celle de la sortie du nucléaire. Ces estimations sont donc délibérément et exclusivement fondées sur des données publiques traitées de façon transparente. La méthodologie adoptée considère que le coût de la sortie du nucléaire se compose de deux éléments essentiels : a) les coûts supplémentaires de construction et d'exploitation d'installations « programmables » — aux coûts variables plus élevés — pour remplacer des centrales nucléaires dont les charges de capital ont déjà été amorties, et b) les pertes encourues par les consommateurs en raison de la hausse des prix de l'électricité. Dans les deux cas, on part de l'hypothèse fondamentale que toute capacité manquante devra être remplacée au coût à long terme de production d'électricité, dont le contrat à long terme pour l'approvisionnement annuel en électricité de base pour la période 2013-2018 est un indicateur tout

à fait pertinent. Tous les coûts sont supposés être imputés directement au secteur de l'électricité. Ne sont pris en compte ni les effets secondaires s'exerçant sur la compétitivité industrielle ni les effets multiplicateurs sur la production, l'emploi et l'inflation au niveau macroéconomique.

Bien qu'elle soit d'une grande pertinence et transparence, la mesure du coût des autres modes de production d'électricité par le biais des prix du marché relevés pour l'approvisionnement à terme en électricité de base pose deux problèmes. Premièrement, les investissements réalisés sur le marché de l'énergie dépendent-ils des prix du marché ? Par exemple, 30 GW d'éolien en Allemagne ont été exclusivement financés à travers les tarifs de rachat. Deuxièmement, les prix au-delà de 2014 correspondront-ils à ceux actuellement annoncés pour les trois prochaines années ? Bien que ces questions soient légitimes, cet article ne tente pas d'y répondre, car cela risque de soulever plus de questions que de réponses. Toute hypothèse autre que celle de prix à terme reflétant les autres coûts de production donnerait nécessairement lieu à des discussions sur a) le montant des frais engagés indépendamment pour des sources d'énergie renouvelable répondant au *Energiewende*, et sur b) la situation des futurs prix à terme par rapport aux prix actuels. Les prix des contrats ne vont pas plus loin que 2012-2014 justement parce que les acteurs du marché n'ont aucun autre élément d'information leur permettant de conclure des transactions à plus long terme, bien que la Bourse européenne de l'énergie (EEX, *European Energy Exchange*) permette en principe d'établir des contrats jusqu'en 2017.

Ainsi, même si le choix d'utiliser les prix du marché de l'électricité pour évaluer les coûts d'opportunité de la sortie du nucléaire n'est pas infaillible, il est de loin le plus acceptable. Toute autre méthode, comme le calcul des coûts d'opportunité de la production alternative à partir d'hypothèses faites sur le coût des différentes technologies (ainsi que la prévoit l'étude de l'AIE/AEN sur les *Coûts prévisionnels de production de l'électricité*) plutôt qu'à partir des prix de gros, serait beaucoup plus spéculative, car elle ne tiendrait pas compte de la dynamique propre aux prix à terme de l'électricité sur les marchés de gros européens. Pour la période 2013-2015, le coût d'approvisionnement annuel s'élevait à EUR 52/MWh en mars 2011 ; il s'élève actuellement à EUR 51/MWh (avril 2012). Toutes les données de coûts sont exprimées en euros courants non actualisés.

On suppose en outre que la décision de sortie du nucléaire n'a aucune influence sur les coûts liés au démantèlement et au stockage du combustible usé. Bien que cette décision puisse accélérer les procédures de démantèlement et donc engendrer une augmentation des coûts du fait du renoncement aux gains de la réduction des dépenses futures, ces conséquences financières ne sont pas prises en compte dans le présent article. En outre, aucune annonce n'a été faite en ce sens.

## Coûts de remplacement de la production nucléaire par des moyens alternatifs

Cet exercice requiert une approche économique extrêmement stricte des coûts d'opportunité, en prenant la situation juridique antérieure à juillet 2011 comme base. D'après la première loi allemande sur la sortie du nucléaire d'avril 2002, les quatre exploitants de centrales nucléaires allemands (E.ON, RWE, Vattenfall et EnBW) avaient le droit de produire 2 623 TWh supplémentaires à compter du 1<sup>er</sup> janvier 2000. Sur ces 2 623 TWh, 981 TWh étaient toujours disponibles au 1<sup>er</sup> janvier 2011, ce qui correspondait à une durée de vie moyenne de 32 ans pour les réacteurs allemands.

Le 8 décembre 2010, une modification de la loi allemande sur l'énergie atomique (*Atomgesetz*) autorisait la prolongation de la durée de vie utile des centrales nucléaires allemandes de 1 804 TWh supplémentaires, sans limitation de durée. Toutefois, les volumes de production attribués individuellement indiquaient une prolongation de la durée de vie de huit ans en moyenne pour les six réacteurs dont l'exploitation commerciale avait débuté avant 1980, et une prolongation moyenne de 14 ans pour les 11 réacteurs dont l'exploitation commerciale avait commencé à partir de 1980. Les estimations basées sur les volumes de production attribués individuellement montrent que les réacteurs raccordés au réseau à la fin des années 1990 seraient restés opérationnels jusqu'au milieu des années 2030. La dernière modification de l'*Atomgesetz* en juillet 2011 a abrogé la prolongation de la durée de vie préalablement accordée de 1 804 TWh, réduisant ainsi les durées de vie restantes aux volumes de production originalement convenus, soit 981 TWh moins les volumes produits pendant les premiers mois de 2011. En outre, la loi spécifie désormais la date finale d'exploitation de chacun des neuf réacteurs restant en activité après le 6 août 2011.

Le calcul des coûts se base donc sur une perte de production des centrales nucléaires de 1 804 TWh. Le coût de production de 1 804 TWh d'électricité de base a également été comparé avec et sans les 17 centrales nucléaires allemandes. D'un côté de l'équation, il faut prendre en compte les coûts variables des centrales nucléaires désormais fermées dont les charges de capital considérables ont déjà été amorties<sup>3</sup>. De l'autre côté, il faut considérer le coût intégral (y compris les charges de capital) des moyens alternatifs. Il n'y a pas de meilleur indicateur du coût intégral de la production d'électricité de base que le contrat à terme annuel de l'électricité de base, le « calendar » négocié à grande échelle.

Selon l'étude de l'AIE/AEN sur les *Coûts prévisionnels de production de l'électricité (2010)*, le coût de production de cette quantité d'électricité avec des centrales nucléaires dont le capital a été amorti serait égal à la somme des coûts du combustible (y compris le stockage du combustible usé) et des

charges d'exploitation, soit EUR 12/MWh ou un total de EUR 21,65 milliards. De plus, des prolongements de la durée de vie auraient nécessité des investissements de EUR 500 millions/réacteur, soit EUR 8,5 milliards pour les 17 réacteurs. Le montant total de la production de 1 804 TWh avec le scénario allemand original de prolongation de la durée de vie se serait donc élevé à EUR 30,15 milliards.

Cette somme doit être comparée avec les coûts de production de 1 804 TWh d'électricité par des moyens alternatifs. Ces coûts correspondent au coût de la production alternative sur le marché allemand de l'électricité, pour lequel le prix du contrat à terme annuel de l'électricité de base à l'EEX de Leipzig, en Allemagne, est un bon indicateur (voir précédemment). Juste avant la décision de sortie du nucléaire, le prix de ce contrat s'élevait à EUR 52/MWh et le coût total de la production alternative correspondait alors à un total de EUR 93,80 milliards<sup>4</sup>. Le coût de la sortie allemande du nucléaire du côté de la production correspond donc à la différence entre la production de 1 804 TWh avec les centrales nucléaires allemandes et cette même production sans les centrales, soit EUR 63,65 milliards.

Il s'agirait de coûts totaux de la sortie du nucléaire pour l'économie allemande en supposant que l'offre et la demande étaient en équilibre sur le marché de l'électricité avant la décision de sortie. En d'autres termes, ce montant suppose que l'intégralité des installations permettant de remplacer les 20,5 GW de puissance nucléaire reste à construire. Toutefois, cette première approche générale doit être affinée en tenant compte du fait que, en Allemagne, des installations programmables de 12,9 GW (dont 10,8 GW pour les installations au charbon) sont actuellement en construction et pourraient remplacer jusqu'à 62 % des 20,5 GW de production des installations nucléaires allemandes. Une grande partie de cet investissement aurait entraîné une surcapacité si l'Allemagne n'était pas sortie du nucléaire puisqu'il était principalement induit par la valeur potentielle des futurs permis d'émissions de carbone à titre gratuit (voir ci-dessus). Par conséquent, ces installations doivent être déduites de coûts de production de la puissance perdue à compter des premiers déclassements de centrales nucléaires puisqu'elles éliminent en partie le besoin de construire de nouvelles centrales pour remplacer les réacteurs arrêtés.

La disponibilité de ces installations « gratuites » (puisque déjà payées) réduit les coûts de la production par des moyens alternatifs d'environ 19 %. Ce chiffre est calculé en tenant compte de : a) la part des charges de capital des différentes centrales au charbon allemandes dans les coûts de production totaux qui, selon l'étude *Coûts prévisionnels*, varie de 20 % à 41 %, pour une moyenne de 30 % ; b) la part d'environ 62 % des 20,5 GW des installations nucléaires, remplacée par des investissements de 12,9 GW dans des installations au charbon et au gaz<sup>5</sup>. Le coût total de financement de la production électrique par des moyens alternatifs passerait alors

de EUR 93,80 milliards à EUR 75,98 milliards, et le coût de la sortie du nucléaire du côté de l'offre diminuerait de EUR 63,65 milliards à EUR 45,83 milliards.

## Aspects de distribution

Le montant de EUR 45,83 milliards constitue les pertes de coûts pour la société allemande dues à la production d'électricité par des moyens autres que les centrales nucléaires existantes. Ces pertes seraient principalement subies par les employés et les actionnaires des quatre exploitants nucléaires allemands ainsi que par la société allemande en général en raison de la perte de recettes fiscales. Le montant total est indépendant des dispositions fiscales spécifiques qui pourraient affecter clairement la répartition, mais pas le total, de ces pertes. Prenons l'exemple de la taxe sur le combustible nucléaire de EUR 2,3/MWh ou la contribution à la promotion des énergies renouvelables de EUR 9/MWh. D'un point de vue économique plutôt que commercial, il s'agit de sommes transférées entre divers groupes sociaux n'ayant aucune conséquence sur les modifications globales du bien-être économique, dont la détermination est le seul objet de cet article.

## Pertes potentielles du surplus du consommateur

Les coûts de remplacement de la production perdue en raison de la réduction de la puissance des centrales nucléaires de 1 804 TWh ne constituent pas les seuls coûts imputables à la fermeture. Des conséquences sont également envisageables du côté de la demande pour les consommateurs d'électricité. Avant d'étudier les calculs à proprement parler, il convient de se demander si l'évaluation des coûts du côté de la demande doit se faire en tenant compte du prix du marché de gros ou du prix à la consommation payé par les consommateurs finaux. Le prix à la consommation de l'électricité est une construction

complexe qui comprend le coût de l'électricité sur le marché de gros ainsi que les tarifs réglementés pour le transport et la distribution (y compris le coût des tarifs de rachat des énergies renouvelables subventionnées) et la TVA. À l'exception du prix de gros de l'électricité, tous les autres éléments sont définis par les autorités ou le gouvernement. Ils ne changent donc pas avec les prix et n'affectent pas le comportement des consommateurs. De plus, les prix à la consommation sont fixés en fonction de contrats à long terme (à l'exception de quelques très gros industriels) qui sont difficiles à renégocier immédiatement. Comme les prix de gros sont donc le seul élément des prix à la consommation changeant en raison de la sortie du nucléaire et affectant le comportement des consommateurs, c'est sur cette base que les pertes de surplus du consommateur doivent être évaluées<sup>6</sup>.

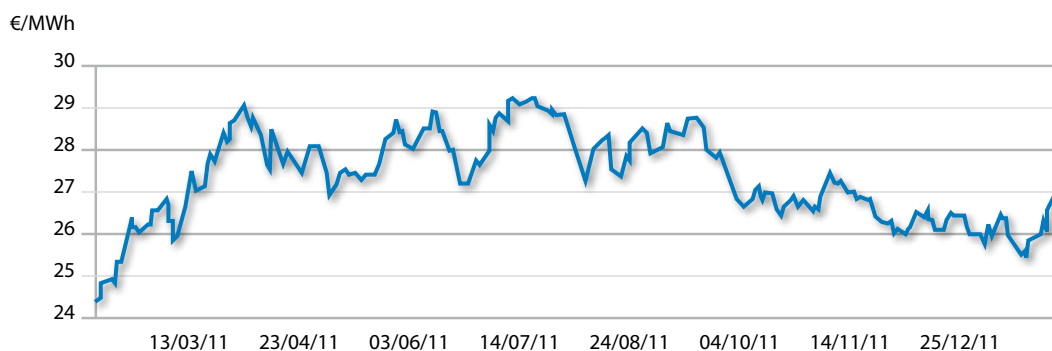
Si l'on considère le prix de gros, la Figure 1 indique comment le prix de gros allemand pour le contrat à terme annuel 2013 est passé de EUR 52/MWh à plus de EUR 60/MWh suite à la décision du gouvernement allemand, en mars 2011, de fermer les huit plus anciens réacteurs du pays et d'abandonner le nucléaire. Cette augmentation s'explique par le fait que le marché anticipe la hausse éventuelle du prix de l'électricité en raison d'une majoration des coûts variables de l'électricité produite par des technologies alternatives, principalement des centrales à gaz et au charbon. Les acteurs du marché supposent manifestement que la hausse de la demande de production des centrales à gaz et au charbon aura des répercussions sur les prix du gaz, du charbon et du carbone, entraînant une augmentation du prix de l'électricité. Les courbes de prix pour les contrats à terme annuels de 2014 et 2015 seront quasiment identiques. Actuellement, seules quelques transactions isolées portent au-delà de 2015. Le prix de gros de l'électricité 2013-15 sera vraisemblablement le meilleur indicateur prévisionnel du prix post-2015. Les quelques préoccupations exprimées quant au fait que les effets à long terme risquaient d'être

Figure 1 : Prix du contrat à terme annuel de l'électricité de base



Source : [www.eex.com/](http://www.eex.com/), prix correspondant à la fourniture de 1 MWh du 1<sup>er</sup> janvier au 31 décembre 2013.

Figure 2 : Prix du contrat à terme annuel du gaz naturel



Source : [www.eex.com/](http://www.eex.com/), prix correspondant à la fourniture de 1 MWh du 1<sup>er</sup> janvier au 31 décembre 2013.

bien plus importants sont sans fondement dans le contexte allemand. C'est plutôt l'inverse qui risque de se produire lorsque les 10,8 GW produits par les installations au charbon, comme mentionné précédemment, seront disponibles. En outre, une pression à la baisse va se produire sur les prix en raison de l'afflux croissant d'électricité provenant des énergies renouvelables intermittentes, comme l'éolien et l'énergie solaire photovoltaïque, rémunérée par des tarifs de rachat garantis et donc indépendante du prix du marché.

Le prix a déjà diminué depuis l'été 2011, pour atteindre EUR 51,30/MWh en avril 2012. Il est actuellement impossible de déterminer si la baisse du prix de gros de EUR 60/MWh à EUR 51/MWh est due à des changements dans l'appréciation des conséquences de la sortie allemande du nucléaire en raison des nouvelles installations à base de combustibles fossiles, à des hypothèses sur la baisse de la croissance économique ou à l'afflux des énergies renouvelables. La diminution du prix du gaz (voir Figure 2) joue certainement un rôle, mais elle est à son tour due à une combinaison de facteurs endogènes (ralentissement de la croissance, diminution de la demande en raison des énergies renouvelables) et de facteurs exogènes (exportations du Qatar, diminution de la demande d'importations par les États-Unis, baisse de la croissance chinoise).

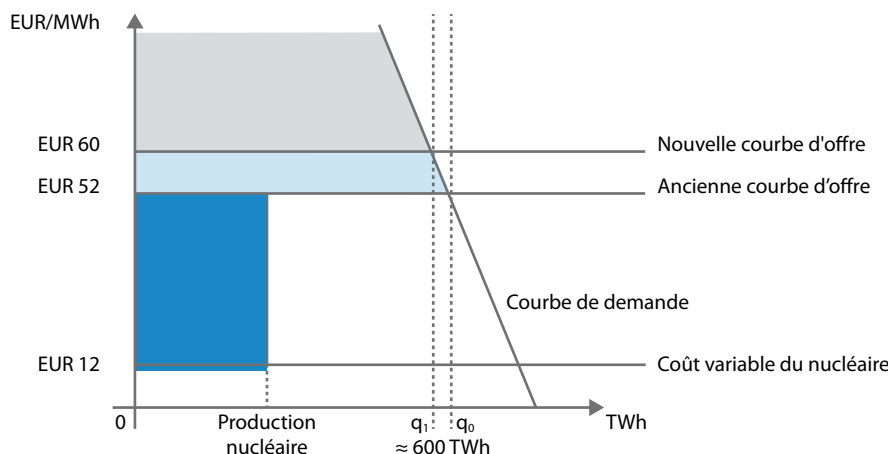
Dans cette situation, il est très difficile d'évaluer les conséquences de la sortie du nucléaire sur le bien-être des consommateurs sur la période concernée jusqu'à ce que les centrales ferment. Le fait que nous ne connaissions pas la réponse à la question « Que se serait-il passé si l'Allemagne n'avait pas abandonné le nucléaire ? » est une raison parmi d'autres. Alors que le prix de l'électricité a légèrement diminué depuis la décision de sortie du nucléaire, il est impossible d'en conclure directement que cette décision a bénéficié aux consommateurs. Ainsi, sans l'abandon du nucléaire, peut-être le prix de l'électricité aurait-il été inférieur de EUR 8 au prix actuel et que le prix du gaz aurait également diminué. Si le prix de l'électricité à terme s'avère inférieur en raison de l'afflux des énergies renouvelables intermittentes, il

est vraisemblable que, sans de nouvelles mesures, le marché allemand de l'électricité va se heurter à un problème d'installations. Sans des flux de revenus supplémentaires, les installations programmables ne seront plus capables de résister à la réduction des facteurs de charge due à l'« effet de compression » des énergies renouvelables. Cela entraînerait, bien sûr, une volatilité supérieure avec des flambées des prix potentiellement élevées puisque les installations traditionnelles sont absentes alors que les énergies renouvelables intermittentes font défaut. Un premier aperçu de ce scénario a été donné lors de la vague de froid qui a touché l'Europe en février 2012, lorsque le prix au comptant de l'électricité de pointe sur le marché franco-allemand EPEX Spot a atteint quasiment EUR 2 000/MWh au cours de la journée du 9 février 2012, avec une moyenne journalière de EUR 600.

Puisque les conséquences de la décision allemande de sortie du nucléaire sur le bien-être des consommateurs sont quasiment impossibles à prévoir, il convient d'entreprendre l'exercice méthodologique de calcul des pertes de surplus du consommateur si l'impact sur les prix d'une décision donnée était connu. Le présent article se base sur l'hypothèse que le prix de l'électricité est désormais supérieur de EUR 8/MWh à ce qu'il serait si toutes les centrales nucléaires allemandes étaient toujours en service. Toutefois, en raison de l'incertitude de cette hypothèse, les résultats n'ont pas été inclus dans l'estimation globale des coûts de la sortie allemande du nucléaire. Néanmoins, ce calcul peut être adapté si l'on estime que des différences, d'ordre supérieur ou inférieur, devraient s'appliquer.

Pour calculer la perte de bien-être suite à une augmentation des prix, il faut tout d'abord étudier la forme des courbes de demande et d'offre sur le marché de l'électricité. Étant donnée la volonté très appuyée de payer jusqu'à la dernière unité d'électricité, appelée également la valeur de la charge perdue (VOLL, *Value of Lost Load*), qui est artificiellement plafonnée dans l'EEX à EUR 3 000/MWh, supposer une élasticité des prix différente de zéro n'a quasiment aucun effet lorsqu'il s'agit de calculer

Figure 3 : Offre et demande sur le marché allemand de l'électricité



un passage de EUR 52 à EUR 60/MWh sous l'hypothèse de courbes de demande linéaires. Toute autre hypothèse dépasserait le niveau de détail et de complexité du présent article, qui doit être considéré comme une première estimation visant à obtenir des ordres de grandeur appropriés.

La situation est légèrement plus compliquée pour la courbe d'offre. La hausse des prix indique que la courbe d'offre de l'électricité n'est pas infiniment élastique. Toutefois, pour évaluer les aspects de bien-être, la question est de savoir si cette hausse des prix bénéficie aux producteurs allemands grâce à des rentes inframarginales ou aux importateurs étrangers de gaz et de charbon<sup>7</sup>. Dans le premier cas, ces gains supplémentaires devraient être déduits des conséquences totales sur le bien-être, mais pas dans le second puisque ces gains reviendraient à des bénéficiaires étrangers. Il existe de bonnes raisons de croire que l'augmentation virtuelle du prix de l'électricité était principalement due à une hausse virtuelle équivalente du prix des combustibles fossiles. Comme illustré à la Figure 2, le prix du gaz évolue à peu près parallèlement à celui de l'électricité. Une analyse économétrique plus fine devrait confirmer cette conjecture ainsi que déterminer le sens de la causalité.

La Figure 3 représente les différents composants des impacts sur le bien-être. La perte due à des coûts de production majorés correspond au rectangle bleu roi ; elle peut également être interprétée comme une perte de surplus du producteur (la différence entre le prix et le coût marginal). La perte de surplus du consommateur correspond au trapèze bleu clair. Les deux types de pertes sont indépendants et les coûts supplémentaires du côté de l'offre dus à la majoration du coût des ressources ne peuvent être compensés par les pertes de surplus du consommateur dues à la hausse des prix.

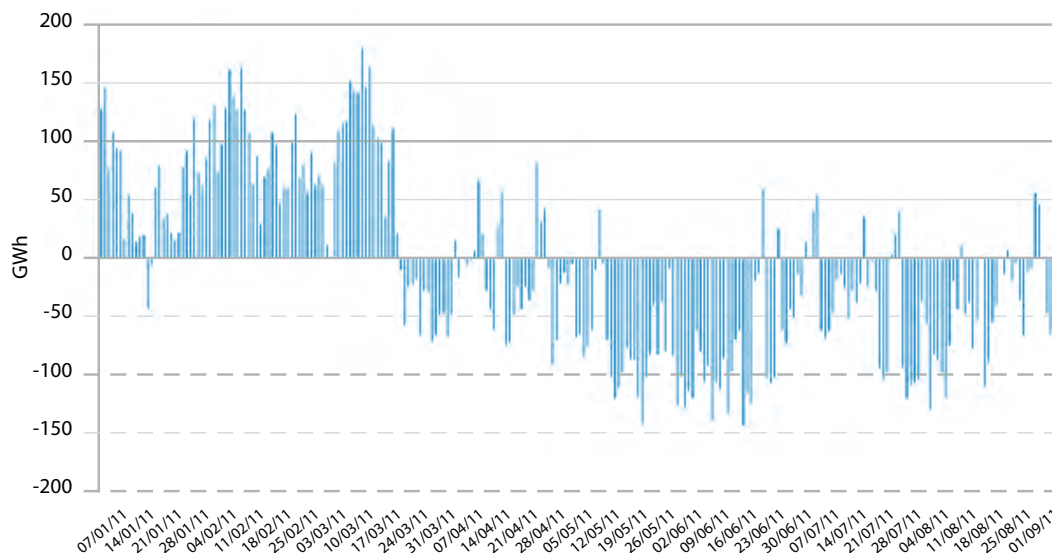
En 2010, l'Allemagne a consommé légèrement plus de 600 TWh d'électricité. En raison de l'inélasticité de la demande dans la gamme correspondante, cette quantité est peu susceptible de changer, et

une augmentation du prix de EUR 8/MWh réduirait l'utilité économique des consommateurs allemands d'électricité à EUR 4,8 milliards par an. Il reste à déterminer pendant combien d'années cette réduction du surplus du consommateur devrait être comptabilisée dans le coût de la sortie du nucléaire. Une période de sept ans semble convenir, si l'on suppose que garder les réacteurs nucléaires allemands en service aurait repoussé de sept ans la hausse inévitable des prix. Bien sûr, des effets partiels auraient été ressentis bien plus longtemps puisque le dernier réacteur n'aurait disparu du réseau qu'à compter du milieu des années 2030. Toutefois, son effet modérateur aurait été proportionnellement moindre et donc, comptabiliser un effet intégral pendant sept ans semble être l'hypothèse à privilégier. Ainsi, l'impact total de la hausse des prix de l'électricité sur le bien-être économique des consommateurs allemands est estimé à EUR 33,60 milliards.

### Impact sur la balance commerciale allemande

La Figure 4 indique que l'Allemagne est devenue un pays importateur net d'électricité d'une quantité d'environ 50 GWh/jour alors qu'elle était un exportateur net d'environ 70 GWh/jour avant mars 2011. Avec 360 jours de bourse par an, l'impact sur la balance commerciale allemande peut être estimé à EUR 2,5 milliards par an. Toutefois, les importations nettes ne peuvent être considérées comme des pertes puisque la dépense est égalée par les économies sur les coûts de production. De plus, le surplus de la balance commerciale allemande globale (environ EUR 120 milliards pour la seule année 2010) n'est que marginalement touché. Si le changement connu par la balance commerciale de l'électricité est le reflet exact de la décision allemande d'abandonner l'énergie nucléaire sur ses marchés de l'électricité, cet impact précis sur le bien-être économique global est limité.

Figure 4 : Balance commerciale nette de l'électricité en Allemagne en 2011



Source : Entso-e.

## Conclusions

Cette estimation du coût de la sortie du nucléaire en Allemagne a pris la situation immédiatement antérieure au mois de mars 2011 comme base. En partant de cette hypothèse, elle évalue les coûts d'opportunité pour la production perdue, ce qui correspond au coût de production d'une électricité alternative, à EUR 45,8 milliards. En vertu de l'hypothèse reconnue comme hautement incertaine que les prix de l'électricité sont actuellement EUR 8/MWh plus élevés qu'ils ne l'auraient été en l'absence de sortie du nucléaire, les coûts en termes de surplus du consommateur perdu sont estimés à EUR 33,6 milliards. Ce calcul dépend linéairement de l'impact supposé sur les prix et peut être adapté si l'on considère que des différences, d'ordre supérieur ou inférieur, devraient s'appliquer. Les coûts totaux de la restructuration de l'*Energiewende* seront pourtant considérablement plus élevés que les simples coûts de la sortie du nucléaire, et si ses objectifs politiques ambitieux deviennent une réalité, il se produira un chevauchement entre les chiffres de coût (qui changeront également puisque les installations éoliennes subventionnées vont remplacer le gaz et le charbon en tant qu'alternative au nucléaire) quasiment impossible à démêler. Plusieurs hypothèses alternatives ont été présentées que le lecteur pourra utiliser pour se forger sa propre opinion, en fonction de son interprétation du secteur allemand de l'électricité.

## Notes

1. Cette étude a été menée par les instituts Prognos AG (Bâle), EWI (Cologne) et GWS (Osnabrück) (voir [www.prognos.com/fileadmin/pdf/publikationsdatenbank/11\\_08\\_12\\_Energieszenarien\\_2011.pdf](http://www.prognos.com/fileadmin/pdf/publikationsdatenbank/11_08_12_Energieszenarien_2011.pdf)).
2. Voir « The post-Fukushima energy policy changes in Germany – An impact assessment », Alfred Voss, Université de Stuttgart à l'adresse [www.modelisation-prospective.org/journee\\_chaire\\_2011.html](http://www.modelisation-prospective.org/journee_chaire_2011.html).
3. Même pour les centrales dont l'amortissement n'est pas totalement terminé, l'hypothèse de l'absence de charges de capital est recevable puisque des frais d'amortissement sont dus que la centrale soit en exploitation ou non. Ils sont donc également dus avec la sortie du nucléaire et une production nucléaire réduite. Par conséquent, ils doivent être pris en compte dans les deux calculs (les coûts de production de 1 804 TWh, avec ou sans prolongation de la durée de vie) et la différence (le coût de la sortie du nucléaire) n'en sera pas affectée.
4. Le prix du contrat à terme annuel comprend le coût *intégral* de la production d'électricité, y compris les charges de capital.
5. En réalité, les centrales au charbon mentionnées resteront en exploitation plus longtemps que la durée nécessaire pour produire la capacité prévue pour les centrales nucléaires, et donc la réduction des coûts au prorata en raison des économies de charges de capital sera inférieure. D'autre part, les parts des coûts calculées dans l'étude *Coûts prévisionnels* comprennent un prix du carbone de USD 30, ce qui est plus élevé que le prix actuel de EUR 10 la tonne de CO<sub>2</sub> en vertu de l'EU ETS. La part des charges de capital (et la réduction concomitante des coûts) serait donc 2 à 3 % plus élevée. Étant donnée la nature obligatoirement approximative de ces estimations, il ne semble pas utile de faire état de ces affinages.
6. Concernant les élasticités de la demande dans le secteur de l'électricité, elles sont égales ou avoisinent zéro à court terme, tant sur le marché de gros que dans le secteur de la consommation. Les élasticités à long terme sont supérieures mais la littérature ne donne pas leur niveau exact. Également sur le long terme, toute augmentation de prix inférieure à EUR 5/MWh serait engloutie par d'autres facteurs de la demande d'électricité comme les conditions météorologiques, la croissance économique ou les améliorations des installations énergétiques.
7. On peut par exemple citer un producteur de charbon, dont la capacité à réduire ses émissions de carbone n'a pas changé mais qui est maintenant en mesure de réaliser de meilleurs bénéfices par tonne de CO<sub>2</sub> évité en raison des prix supérieurs sur le marché du carbone. L'usage de centrales moins efficaces, et donc aux coûts plus élevés, produirait également des bénéfices supplémentaires pour les exploitants que les centrales qu'ils ont utilisées jusqu'à présent.
8. Voir le site [www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/Statistik-und-Prognosen/energiedaten.html](http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/Statistik-und-Prognosen/energiedaten.html) qui donne de nombreuses informations statistiques sur le système énergétique allemand.

# Projets communs internationaux en matière de sûreté nucléaire : un système qui porte ses fruits depuis 30 ans

par A. Thadani, V. Teschendorff et J. Gauvain\*

L'AEN est officiellement mandatée pour aider ses pays membres à maintenir et à approfondir, par l'intermédiaire de la coopération internationale, les bases scientifiques, technologiques et juridiques indispensables à une utilisation sûre, respectueuse de l'environnement et économique de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques. Les comités techniques permanents de l'AEN sont activement engagés dans le développement de connaissances (par exemple, à travers des ateliers, des rapports sur l'état de l'art d'un sujet, des exercices de comparaison internationaux et des projets communs), et les échanges entre membres des comités et de leurs groupes de travail sont d'excellentes sources de savoir implicite et de mise en commun de bonnes pratiques. Les comités de l'AEN ont produit des informations techniques et scientifiques d'une grande portée qui s'avèrent précieuses pour les autorités de sûreté et les développeurs de technologie nucléaire.

Les activités du Comité sur la sûreté des installations nucléaires (CSIN) de l'AEN et celles des projets communs internationaux conduits sous l'égide de l'AEN répondent aux défis liés aux facteurs suivants : augmentations de puissance, taux de combustion du combustible plus élevés, conception de nouveaux assemblages combustibles, nouveaux matériaux de gainage et développement de modèles pour analyser les accidents, y compris les accidents graves, sous l'angle de la prévention et de la limitation de leurs conséquences. Une compréhension approfondie des phénomènes et des mécanismes de défaillance associés aux accidents, ainsi qu'une évaluation commune des données expérimentales et des modèles de calcul informatique renforcent les bases techniques pour les décisions concernant la sûreté. Les connaissances produites par ces projets communs internationaux représentent l'une des grandes réalisations de l'AEN. Ces projets, principalement dans les domaines de la sûreté nucléaire et de la gestion des déchets, permettent aux pays impliqués, sur la base d'un partage des coûts, de poursuivre les recherches ou le partage des données en ce qui concerne des secteurs ou des problèmes particuliers.

Depuis 1958 et le lancement du premier projet sur le réacteur de Halden, plus de 30 projets communs consacrés à la recherche en sûreté nucléaire ont été menés avec une large participation des pays membres. Les projets décrits dans cet article sont présentés sous forme de programmes expérimentaux individuels impliquant des installations importantes et contribuant ainsi à la maintenance

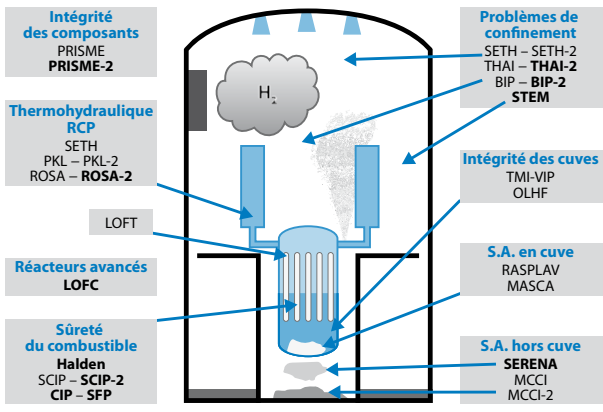
de l'indispensable infrastructure de recherche sur la sûreté et à l'expertise des équipes chargées de d'exploitation. Cet article récapitule les réalisations des projets communs de l'OCDE/AEN consacrés à la recherche sur la sûreté qui ont été menés dans les 30 dernières années, avec une attention particulière accordée à la thermohydraulique, au comportement du combustible et aux accidents graves. Il montre que les projets communs ont largement contribué à la résolution de problèmes de sûreté spécifiques dans ces domaines. Il souligne à quel point il est intéressant de collaborer pour entretenir une infrastructure expérimentale unique, préserver les compétences et produire de nouvelles connaissances.

## Contexte historique et plan de soutien à la sûreté et aux procédures d'octroi d'autorisation

Les trois premières entreprises conjointes de l'OCDE/AEN ont nécessité un financement lourd assuré par le biais d'une coopération intergouvernementale : le Projet du réacteur de Halden, lancé en 1958 et qui se poursuit encore aujourd'hui, le Projet Dragon de l'OCDE, ayant fonctionné d'avril 1959 jusqu'à 1976, et le projet Eurochemic, qui a démarré en juillet 1959 et s'est achevé en 1975. Dans les années 60, la coopération internationale visait les programmes de recherche importants, qui furent couverts ultérieurement par des programmes industriels nationaux, mais au tournant des années 80, il s'est avéré que les programmes de recherche sur la sûreté nationale pourraient difficilement être poursuivis sans un soutien extérieur. À cet égard, suite à une proposition des États-Unis, le premier projet commun OCDE/AEN entièrement consacré à la recherche sur la sûreté nucléaire – le Projet d'essais de perte en fluide de refroidissement (LOFT, Loss-of-fluid Test) – a été lancé

\* M. Ashok Thadani ([ashok.thadani@verizon.net](mailto:ashok.thadani@verizon.net)) est l'ancien directeur du Bureau pour la recherche sur la sûreté nucléaire (Office for Nuclear Regulatory Research) de l'Autorité de sûreté nucléaire américaine (USNRC, United States Nuclear Regulatory Commission) et président du CSIN. M. Victor Teschendorff ([victor-teschendorff@t-online.de](mailto:victor-teschendorff@t-online.de)) a dirigé la division dédiée à la recherche en sûreté nucléaire au sein du GRS (Allemagne) et exercé les fonctions de président du Groupe d'examen du programme du CSIN. M. Jean Gauvain ([jean.gauvain@oecd.org](mailto:jean.gauvain@oecd.org)) est coordinateur des projets communs dans la Division de la sûreté nucléaire de l'AEN.

**Figure 1 : Projets communs internationaux de l'OCDE/AEN en matière de sûreté nucléaire**



au printemps 1983 avec dix pays membres. Depuis, plus de 30 projets communs en matière de sûreté ont été organisés, avec, en moyenne, une durée de quatre ans et la participation d'une douzaine de pays.

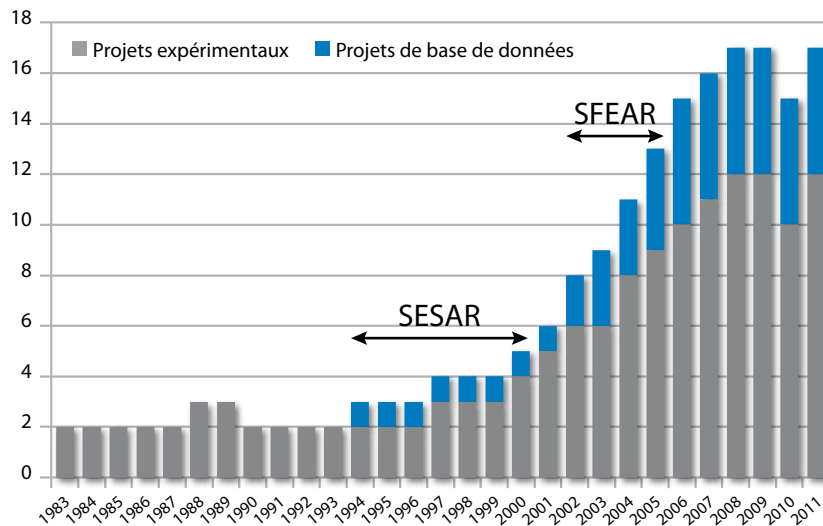
En 1992, un groupe d'experts de haut niveau sur la recherche en sûreté nucléaire (SESAR, *Senior Group of Experts on Safety Research*) a été mis en place par le CSIN pour examiner les recherches en cours et identifier les exigences et priorités futures. Dans ses rapports, des inquiétudes ont été formulées quant à la capacité des pays membres à maintenir un niveau de recherche sur la sûreté adéquat et il a, entre autres, été recommandé « que le CSIN joue un rôle proactif dans l'organisation et la mise en œuvre de projets coopératifs ». L'impact des rapports du SESAR et, plus tard, du groupe sur les installations de recherche pour les réacteurs actuels et avancés (SFEAR, *Support Facilities for Existing and Advanced Reactors*) a été important, tant pour le nombre de projets communs que pour leur contenu. La Figure 2 illustre l'augmentation du nombre de projets suivant les recommandations du SESAR.

## Thermohydraulique

Les questions de thermohydraulique ont été au cœur des problèmes de réglementation et de sûreté depuis le début de l'exploitation des centrales nucléaires. La priorité s'est détournée des accidents de perte de réfrigérant primaire (APRP) par grosse brèche au profit des événements initiateurs plus fréquents. Les questions liées aux APRP ont été résolues principalement par des programmes analytiques et expérimentaux, souvent dans le cadre d'une coopération internationale. Les matrices de validation, les problèmes de comparaisons internationales et les résultats des projets communs de l'OCDE/AEN ont nettement contribué à l'établissement d'un consensus sur la base technique pour résoudre les problèmes de thermohydraulique habituels. Le processus de résolution des problèmes récents tels que la dilution du bore et le bouchage des filtres a énormément tiré parti de ces projets.

Le Projet LOFT a permis aux pays participants d'accéder à une installation d'essais nucléaires unique et les a aidés à résoudre leurs dossiers de sûreté nationaux impliquant des APRP. Les Projets thermohydrauliques SESAR (SETH, *SESAR Thermohydraulics*) ont réussi à préserver les installations d'essais PANDA, PKL et MISTRA. Les phénomènes de mélange ont été étudiés et des données ont été fournies pour la validation des codes de mécanique des fluides numérique (CFD, *computational fluid dynamics*). Le Projet *Primärkreislauf* (PKL) a étudié la circulation naturelle dans une installation intégrale à quatre boucles et largement contribué à la résolution du problème de dilution du bore. Les Projets de banc d'essai pour les évaluations de sûreté (ROSA, *Rig of Safety Assessment*) ont étudié des phénomènes thermohydrauliques complexes dans une installation à grande échelle sous pleine pression et renforcé la base de données pour la validation des codes du système. Le Projet PSB-VVER et le Projet de condensateur à barboteur (*Bubbler Condenser*) ont nettement contribué à la résolution des problèmes

**Figure 2 : Nombre de projets en cours**



de sûreté propres aux VVER dans le circuit de refroidissement et dans l'enceinte. Le Projet de perte du refroidissement en convection forcée (LOFC, *Loss of Forced Coolant*) étudie la perte du refroidissement en convection forcée dans un réacteur à haute température refroidi au gaz (RHTRG, en anglais *HTGR*). Le Projet PRISME (sur la Propagation d'un incendie pour des scénarios multilocaux élémentaires) a étudié la propagation du feu et de la fumée dans un agencement complexe de grandes pièces. La modélisation de la circulation et du mélange de gaz chauds, ainsi que leur interaction avec la structure profiteront des données produites dans ce projet.

L'expérience en matière d'exploitation, la gestion de la durée de vie et les enseignements tirés des événements posent de nouvelles questions qui peuvent également nécessiter des recherches sur la sûreté nucléaire dans le secteur thermohydraulique. Les problèmes qui peuvent survenir pour les nouvelles filières de réacteurs figurent dans l'agenda des groupes de travail du CSIN concernés. La modélisation des codes de calcul a évolué, abandonnant les hypothèses pénalisantes pour une approche basée sur le principe de la meilleure estimation, complétée par des méthodes de quantification des incertitudes. Les codes de mécanique des fluides numérique investissent rapidement le champ de l'industrie nucléaire. Des activités de développement et de validation pour les écoulements diphasiques sont en cours. Les applications de la mécanique des fluides numérique pour la démonstration de la sûreté, qui ne cessent de se développer, doivent être accompagnées de pratiques exemplaires communément acceptées. La recherche en thermohydraulique a amélioré considérablement notre compréhension des phénomènes qui prédominent dans les transitoires et les accidents, ainsi que notre façon de les modéliser. Les projets communs de l'OCDE/AEN ont largement soutenu cette réalisation.

## Comportement du combustible

Le maintien de l'intégrité du combustible et de la gaine pendant les transitoires et les accidents est une préoccupation fondamentale en matière de sûreté. Par conséquent, les mécanismes de défaillance devraient être étudiés et compris de manière approfondie. Augmentations de puissance, suivi de charge, cycles plus longs et taux de combustion plus élevés vont de pair avec des conditions d'exploitation du combustible beaucoup plus exigeantes. Il faut veiller à maintenir des marges de sûreté suffisantes : le secteur de la recherche et du développement concernant le combustible est un vecteur d'innovation pour les réacteurs existants ; une autre spécificité est l'impact direct sur les performances des centrales, qui entraîne une concurrence entre les fournisseurs de combustible.

Les projets communs de l'OCDE/AEN ont abordé de nombreuses questions d'intérêt commun liées au combustible, toutes d'une extrême importance pour la sûreté. Le réacteur Cabri offre une oppor-

tunité presque unique pour tester, à l'intérieur du réacteur, un combustible à taux de combustion élevé dans des conditions réalistes d'un réacteur à eau sous pression (REP). Les cellules chaudes sont une autre infrastructure importante pour la recherche sur la sûreté du combustible. Le Projet Studsvik sur l'intégrité des gaines de combustible (SCIP, *Studsvik Cladding Integrity Project*) a bénéficié des installations sur place et des capacités analytiques associées. L'accident de Paks a été reconnu comme une opportunité de mieux comprendre le comportement d'une grande quantité de combustible réel dans des conditions de refroidissement dégradées et d'observer les phénomènes hors dimensionnement ainsi que les possibilités de prévoir ces derniers au moyen de codes de calcul. Le Projet de combustible Sandia (SFP, *Sandia Fuel Project*) confirme le fait que les transitoires et les accidents peuvent menacer l'intégrité du combustible, non seulement dans le cœur du réacteur, mais également dans la piscine de stockage du combustible usé. L'accident de Fukushima Daiichi a été une leçon à cet égard.

En résumé, les activités du Groupe de travail du CSIN sur la sûreté du combustible et les projets communs de l'OCDE/AEN dans le domaine du combustible répondent aux défis posés par les augmentations de puissance, les taux de combustion plus élevés, la conception de nouveaux assemblages combustibles et les nouveaux matériaux de gainage. Une compréhension approfondie des phénomènes et des mécanismes de défaillance, ainsi qu'une évaluation commune des données expérimentales et des modèles de code de calcul renforcent la base technique pour une révision possible des critères d'acceptation.

## Accidents graves

Les accidents graves peuvent provoquer des rejets importants de matières radioactives et entraîner des risques pour la santé et la sûreté du public, ainsi que pour l'environnement. Les processus impliqués dans la progression des accidents graves sont très complexes. Ils exigent des données expérimentales pour soutenir le développement de modèles permettant de déterminer les exigences procédurales et de conception, dans le but d'éviter et/ou d'atténuer les conséquences de tels accidents.

Le CSIN a joué un rôle majeur dans l'organisation et la conduite de projets communs dans le domaine des accidents graves. Ces projets incluent le Projet d'examen des cuves de Three Mile Island (TMI-VIP, *Three Mile Island Vessel Investigation Project*), le Projet RASPLAV et les deux projets de suivi sur la dégradation des matériaux (MASCA 1 et 2, *Material Scaling*), visant à évaluer l'intégrité de la cuve sous pression du réacteur dans des conditions de fusion du cœur, le Projet Sandia d'étude de la défaillance du fond inférieur de la cuve (LHF, *Lower Head Failure*), visant à examiner le comportement mécanique du fond inférieur de la cuve dans des conditions d'accident grave sous pression, le Projet sur le refroidissement et les

interactions du corium avec le béton (MCCI, *Melt Coolability and Concrete Interaction*), visant à évaluer le refroidissement des débris du cœur fondu hors cuve, le Projet sur le comportement de l'iode (BIP, *Behaviour of Iodine Project*), le Projet sur les explosions de vapeur dans les applications nucléaires (SERENA, *Steam Explosion Resolution for Nuclear Applications*), visant à évaluer les risques d'explosion de vapeur après des interactions combustible-réfrigérant, le Projet sur la thermohydraulique, l'hydrogène, les aérosols et l'iode (THAI, *Thermal-hydraulics, Hydrogen, Aerosols, Iodine*), concernant l'hydrogène et les aérosols dans l'enceinte et le Projet évaluation et atténuation du terme source (STEM, *Source Term Evaluation and Mitigation*). Ces programmes et les activités du CSIN sur la gestion des accidents ont contribué à enrichir les connaissances sur les phénomènes qui se produisent lors d'accidents graves, la résolution des questions liées aux accidents graves et les mesures de gestion des accidents (fonctions et procédures) pour enrayer ou atténuer la progression des accidents. Il faut cependant noter que les enseignements à tirer des événements récents dans la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi (rétention dans la cuve, gestion de l'accident, etc.) mériteraient d'être étudiés soigneusement pour confirmer les premières conclusions et/ou pour développer de nouveaux projets communs.

## Travailler ensemble

Les installations et les programmes expérimentaux ont joué un rôle important dans la recherche sur la sûreté dès le début et ont significativement contribué à la résolution de divers problèmes de sûreté. Ces installations étaient à l'origine construites pour résoudre un problème spécifique concernant la sûreté, et la gestion de leur première campagne expérimentale était normalement assurée par un programme de recherche national. L'avantage le plus évident, tant pour le pays qui propose un programme que pour les pays qui s'y associent, est la réduction des coûts par le regroupement des ressources. Les propositions de projets communs et la définition de programmes expérimentaux doivent faire référence explicitement aux objectifs techniques qui ont été identifiés dans les plans de fonctionnement du CSIN ou du Comité sur les activités nucléaires réglementaires (CANR) en réponse aux principaux défis de leur Plan stratégique commun.

L'initiative d'un nouveau projet est normalement prise par une organisation exploitant une installation, qui deviendra dans la plupart des cas l'agent d'exploitation si la proposition soumise au CSIN aboutit à un projet commun. Le financement est assuré en partageant les coûts entre les participants, le pays d'accueil supportant normalement 50 % du coût réel du programme. L'AEN continue à soutenir le projet pendant toute sa durée en tant que facilitateur fournissant une assistance administrative et technique. La progression du projet est généralement surveillée par un conseil de gestion

(MB, *Management Board*) qui peut prendre des décisions concernant l'adaptation indispensable du programme de recherche et l'attribution de fonds. Le conseil de gestion est soutenu par un groupe d'examen du programme (PRG, *Programme Review Group*) qui dispense des conseils techniques.

Les programmes expérimentaux sont généralement mis en œuvre pour fournir des données en vue de résoudre un problème de sûreté spécifique. La reconnaissance commune que les données sont pertinentes pour l'étendue des phénomènes et les thèmes de sûreté examinés représentent une valeur supplémentaire et une étape indispensable pour construire des consensus.

Il est courant que les activités analytiques qui traitent de la prédiction et de l'interprétation des résultats, du développement de modèles et de la validation des codes de calcul soient prises en charge par certains, voire tous les participants au projet parallèlement aux activités du projet. Ces analyses constituent un complément très précieux et un atout supplémentaire des projets communs de l'OCDE/AEN en matière de sûreté. La plate-forme de l'AEN rassemble les meilleurs experts internationaux qui contribuent à maintenir et à enrichir l'expertise et les outils dans les pays membres de l'AEN, à renforcer les échanges techniques entre les spécialistes et à encourager la recherche d'un consensus autour des approches possibles pour résoudre des problèmes de sûreté complexes lors des accidents graves.

## Conclusions

Les projets communs ont abouti à la réalisation de programmes concernant la sûreté qui n'auraient jamais été lancés si les pays individuels avaient dû entretenir et exploiter eux-mêmes ces grosses installations.

La durée des projets communs, y compris la préparation, la rédaction des contrats, l'exécution des programmes, le traitement des données et le reporting, couvre normalement plusieurs années. Les projets communs sont donc utiles principalement pour traiter les problèmes à moyen terme et à long terme. Une nouvelle génération d'experts prend la relève et de nouveaux pays font leur entrée dans le domaine nucléaire. Les projets communs offrent des possibilités importantes pour le transfert de connaissances et le développement d'une capacité d'expertise.

Au vu de la nature internationale des nouvelles filières de réacteurs, il est important de faire intervenir l'AEN de manière précoce pour exploiter pleinement les avantages offerts par la coopération internationale et, en particulier, l'expertise disponible au sein du CSIN.

## Référence

AEN (2012), *Main Benefits from 30 Years of Joint Projects in Nuclear Safety*, OCDE/AEN, Paris.

# Bonnes pratiques de gestion des effluents dans les nouvelles constructions nucléaires

par R. Doty et T. Lazo\*

**L**e Comité de protection radiologique et de santé publique (CRPPH) de l'AEN aide ses pays membres à réglementer et à appliquer la radioprotection, en identifiant et en abordant les principales questions d'intérêt commun ou d'envergure internationale. L'évolution du système de radioprotection appliqué à la protection de l'environnement et à la construction des réacteurs nucléaires est l'un des domaines en cours d'examen par le CRPPH. Il faut tenir compte du fait que les activités qui présentent un risque radiologique, de quelque niveau que ce soit, sont étudiées de près par le grand public. Et ce même public veut se faire entendre lors des processus d'autorisation de telles activités.

Concernant la production d'énergie par les nouveaux réacteurs nucléaires, le CRPPH s'attache à garantir que les rejets d'effluents de ces réacteurs sont gérés selon des bonnes pratiques issues des installations existantes et sont réduits, dans la limite du raisonnablement possible, grâce aux meilleures techniques disponibles et à des processus tels que l'optimisation. Le CRPPH a créé un Groupe d'experts sur les meilleures techniques disponibles (EGBAT) pour identifier clairement les problèmes concernés et commencer à les résoudre. Dans le cadre de son projet, après quatre ans de travaux préparatoires et la publication de deux synthèses sur l'état de la gestion des effluents, l'EGBAT a piloté un atelier international du 24 au 26 janvier 2012, pour garantir que les autorités de sûreté, les exploitants et les fournisseurs de réacteurs puissent apporter des éléments permettant de caractériser les bonnes pratiques disponibles en matière de gestion des effluents. Ces pratiques permettront de surveiller les effluents et d'établir des rapports en la matière ainsi que d'identifier les améliorations possibles.

Les participants ont convenu que les performances étaient remarquables en matière de réglementation et d'exploitation du parc existant de réacteurs nucléaires (y compris dans la gestion des effluents, tant en exploitation que lors des arrêts pour rechargement). Ils ont cependant souligné que les parties prenantes (autorité de sûreté, exploitant ou fournisseur) voulaient et s'attendaient, pour eux-mêmes ou d'autres acteurs, à davantage de performance. En outre, la capacité de communiquer avec précision et dans un langage compréhensible avec les législateurs, les médias et le grand public est perçue comme primordiale. Les participants ont également souligné le fait que les indicateurs de « réussite » ne sont pas clairement définis, ce qui

rend la réglementation, l'exploitation et la communication difficiles pour tous.

Le programme de l'atelier portait sur les questions générales de gestion des effluents, la gestion des effluents dans le cadre des nouvelles constructions de centrales, l'établissement de rapports et la définition des bonnes performances des centrales. Au cours des présentations et des discussions, diverses questions ont été soulevées quant à la façon de comprendre les bonnes pratiques et, dans une certaine mesure, les définir. Pour obtenir des réponses cohérentes à ces questions et élaborer une synthèse récapitulant les bonnes pratiques telles qu'elles sont perçues, il a été convenu d'envoyer un bref questionnaire à tous les participants. Les principales questions soulevées sont présentées ci-dessous.

## Questions sur la gestion des effluents

Les questions peuvent être regroupées en trois catégories : 1) faire connaître et valoir les mesures adoptées en faveur de la protection des personnes et de l'environnement, 2) déterminer s'il existe un point final logique ou raisonnable aux processus d'optimisation ou à l'usage des meilleures techniques disponibles et, le cas échéant, définir les orientations appropriées pour établir ce point final, et 3) rechercher les moyens les plus efficaces de réduction des effluents.

La réduction des rejets est basée sur un compromis entre les coûts et les avantages, en réduisant les doses (optimisation appliquée via le principe ALARA, « *as low as reasonably achievable* » ou « niveau le plus bas qu'il est raisonnablement possible d'atteindre »), ou en procédant à une optimisation par l'usage des meilleures techniques disponibles (MTD), ou leur équivalent, permettant de réduire les rejets. Les MTD soulignent l'importance des facteurs économiques et sociaux dans le choix de la technique (technologie et pratiques), notamment lorsqu'il s'agit de déterminer la faisabilité du déploiement de cette technique.

\* M. Richard Doty ([rldphd@gmail.com](mailto:rldphd@gmail.com)) est Consultant auprès de l'AEN. M. Ted Lazo ([edward.lazo@oecd.org](mailto:edward.lazo@oecd.org)) est Administrateur principal dans la Division de la protection radiologique et de la gestion des déchets radioactifs de l'AEN.

## Gestion des effluents dans le cadre des nouvelles constructions

Plusieurs questions ont été soulevées concernant les évaluations menées pour les nouvelles conceptions, notamment la façon dont la réglementation des nouveaux réacteurs doit être gérée par rapport à la réglementation des réacteurs existants, par exemple en ce qui concerne le tritium, les effluents des nouveaux réacteurs de plus grande puissance, la production et la gestion des déchets radioactifs solides ou encore les critères de benchmarking.

En général, le concepteur et/ou l'exploitant d'un site donné calcule(nt) les doses estimées pour les populations à proximité du site, en utilisant des données génériques applicables et les données disponibles spécifiques au site concernant l'utilisation des sols, la densité de la population et d'autres facteurs utilisables pour le calcul. Le concepteur et l'exploitant doivent s'assurer que ces doses annuelles estimées sont conformes aux limites applicables. De plus, dans de nombreux pays, d'autres contraintes, objectifs ou valeurs doivent être respectés par les doses estimées obtenues suite au processus de planification.

## Mesure des effluents et établissement de rapports

Avec une optique de recherche de points communs, les questions suivantes ont été soulevées :

- Comment sont déterminées les priorités en matière de gestion des effluents (par exemple, concernant la dose ou les quantités totales rejetées, le taux de rejet et l'efficacité des installations de réduction, vis-à-vis de l'intégrité du combustible) ?
- Comment est réglementé et appliqué le concept de frais généraux d'exploitation ?
- Faut-il continuer à établir des rapports pour les nucléides dont les rejets sont historiquement très faibles (en dessous du niveau de détection) et l'impact dosimétrique négligeable ?
- Quelle est la fréquence à adopter pour l'établissement de rapports réglementaires et comment les décisions et les résultats de la surveillance des rejets sont-ils communiqués au public ?

## Bonnes performances des centrales

Les questions connexes concernent principalement la caractérisation des attributs contribuant aux bonnes performances des centrales en matière de gestion des effluents, et l'existence de conditions favorisant ces performances. Les techniques utilisées efficacement et les pratiques de gestion qui se sont avérées efficaces ont fait l'objet de discussions. Selon plusieurs présentations faites lors de cet atelier, les améliorations apportées au fil des ans aux systèmes de gestion des effluents ont contribué à réduire la quantité de substances radioactives rejetées par les centrales nucléaires. Néanmoins, étant donné que les informa-

tions détaillées disponibles sont évaluées au regard de certains (types de) nucléides, de certaines voies d'élimination des effluents et de certains types de réacteurs, des différences de tendances apparaissent avec le temps. Une évaluation complémentaire de ces tendances pourrait fournir des indications utiles sur la conception et le fonctionnement des réacteurs pour pouvoir continuer à réduire les taux de rejets. Cependant, les doses d'exposition restent faibles à la fois pour les personnes vivant à proximité d'une centrale nucléaire et pour l'ensemble de la population.

Les questions connexes suivantes ont été soulevées :

- Comment équilibrer les transferts de risques de la population vers les travailleurs suite à la mise en place de nouvelles stratégies de gestion des effluents ?
- Comment sont évaluées les risques et les avantages des différentes stratégies de gestion des effluents/faut-il les évaluer ?
- Quels sont les indicateurs à retenir pour définir la « réussite » en termes de bonnes pratiques de gestion des effluents ?

## Progression

La construction de centrales nucléaires devrait connaître un nouvel essor dans plusieurs pays et régions du monde. En matière de gestion des déchets radioactifs, la tendance générale à abandonner des stratégies « diluées et dispersées » au profit de stratégies « centrées et maîtrisées » laisse à penser que la quantité de substances radioactives rejetées par les centrales sera déterminante dans leur acceptation générale, et importante pour leur réglementation et exploitation.

Le regroupement accru des fournisseurs de réacteurs, avec pour conséquence le déploiement à grande échelle de centrales quasiment identiques, suppose qu'un certain niveau d'harmonisation en termes de meilleures performances de rejet possibles est souhaitable, à la fois pour éviter la répétition de travaux et parce que de grandes similitudes dans la conception des réacteurs pourraient générer des attentes toujours plus fortes en matière de performances comparables.

Cet atelier a débouché sur un plan, approuvé par le CRPPH lors de sa réunion de mars 2012, visant à élaborer un questionnaire pour recueillir des informations complémentaires auprès des participants (et de certaines autres parties concernées), afin de pouvoir préparer un rapport final de l'atelier sur ce que les autorités de sûreté, les exploitants et les fournisseurs considèrent comme de « bonnes pratiques » et, par conséquent, de l'EGBAT. Il a été suggéré d'inclure dans ce rapport une description détaillée des objectifs de surveillance des effluents et, dans la mesure du possible, des conseils pour garantir la « réussite » de la gestion des effluents. Ce rapport devrait être publié au second semestre 2012, après approbation du CRPPH.

# Combustibles innovants et matériaux de structure pour des systèmes d'énergie nucléaire avancés

par Y.J. Choi, K.O. Pasamehmetoglu et T.R. Allen\*

**L**es systèmes d'énergie nucléaire avancés tels que les réacteurs de génération IV bénéficient de concepts innovants qui améliorent les performances des réacteurs nucléaires. Le développement de nouveaux combustibles nucléaires et matériaux de structure est une étape clé pour la mise en service réussie de systèmes d'énergie nucléaire avancés. Sous la conduite du Comité des sciences nucléaires de l'AEN, le Groupe de travail sur les aspects scientifiques du cycle du combustible suit donc de près les programmes de recherche et développement dans ces domaines. Deux de ses groupes d'experts ont étudié les dernières avancées.

L'expression « combustibles innovants » fait référence aux combustibles contenant des actinides mineurs (AM), notamment le neptunium, l'américium et le curium, par opposition aux combustibles standards, comme ceux à l'uranium ou à l'uranium-plutonium, qui sont actuellement utilisés. De plus, les combustibles comportant des actinides mineurs sont propices à la transmutation. Les types de combustibles qui ont été étudiés en détail sont les combustibles à oxydes, à nitrures métalliques et dispersés, et les formes particulières, par exemple, à particules, vibropac et sphere-pac. Une évaluation a été faite des procédés de fabrication et des performances d'irradiation des combustibles, ainsi que des propriétés fondamentales et des activités de caractérisation disponibles. L'état des connaissances techniques pour chaque type de combustible a également été estimé sur une échelle mesurant le niveau de maturité technologique (TRL, *technology readiness level*) de 1 à 9, le chiffre 9 correspondant aux technologies à pleine maturité et largement commercialisées.

Le point le plus important concernant les matériaux de structure innovants consiste à sélectionner et à caractériser des matériaux pouvant être mis en œuvre dans des cycles de combustible nucléaire avancé et dans des conditions extrêmes, telles que haute température, débit de dose élevé, environnements chimiques corrosifs et longue durée d'exploitation. Par conséquent, les étapes essentielles sont l'identification des exigences des réacteurs avancés, l'étude des matériaux avancés répondant à ces exigences et le niveau de maturité de chacun des matériaux. Une étude comparative a été menée à partir de l'état de la R-D des matériaux de structure pour chaque concept de réacteur avancé, dans le cadre du Forum international Génération IV, avec des champs d'investigation pour les réacteurs refroidis au gaz, les réacteurs refroidis au métal liquide, les réacteurs à eau et les réacteurs refroidis au sodium, ainsi que les

systèmes pilotés par accélérateur refroidis au plomb ou par des alliages eutectiques plomb-bismuth.

## Combustibles innovants

Deux combustibles métalliques ont été étudiés. Il s'agit des alliages uranium-plutonium-zirconium (U-Pu-Zr) destinés aux cœurs de réacteur rapide et des alliages non fertiles (sans uranium) ou faiblement fertiles destinés aux systèmes de transmutation pilotés par accélérateur ou aux combustibles des réacteurs incinérateurs de transuraniens (TRU). Les alliages combustibles U-Pu-Zr contiennent jusqu'à 8 % de masse d'actinides mineurs et des mélanges de terre rare (lanthanide). Les alliages combustibles TRU-Zr non fertiles ou faiblement fertiles contiennent une proportion supérieure de zirconium (30 à 60 % de la masse) alors que les alliages U-Pu-Zr en contiennent habituellement moins (10 à 20 % de la masse).

Concernant la transmutation des actinides mineurs, les réacteurs rapides à combustibles métalliques ont un taux de transmutation des AM élevé en raison du spectre neutronique à haute énergie. La récupération simultanée des AM et du plutonium au cours du procédé électrométallurgique facilite également le recyclage des AM pour une transmutation substantielle des AM dans un système de cycle de combustible de réacteur rapide. Les procédés électrométallurgiques et le moulage par injection peuvent être utilisés pour la fabrication de combustible métallique. La compatibilité combustible-gaine et l'interaction chimique combustible-gaine sont les plus importantes pour la durée de vie du combustible et de la sûreté, mais les informations à ce sujet sont très limitées. Une étude plus poussée sur les caractéristiques de l'alliage est nécessaire pour mieux comprendre les performances du combustible.

Pour le combustible à oxydes, deux scénarios ont été envisagés : un combustible homogène ayant 1 à 5 % de masse d'AM (autrement dit, du combustible comportant des actinides mineurs) et un combustible hétérogène ayant 10 à 20 % de masse d'AM à l'intérieur d'un support en  $UO_2$  (autrement dit, une couverture comportant des actinides mineurs). Les principaux défis liés au développement de

\* Au moment de la rédaction, M. Yong-Joon Choi travaillait à la Section des sciences nucléaires de l'AEN. Il travaille à présent au Laboratoire national de l'Idaho, aux États-Unis ([yong-joon.choi@inl.gov](mailto:yong-joon.choi@inl.gov)). M. Kemal O. Pasamehmetoglu ([kemal.pasamehmetoglu@inl.gov](mailto:kemal.pasamehmetoglu@inl.gov)) est Directeur adjoint de Laboratoire, Sciences et technologies nucléaires, au Laboratoire national de l'Idaho. M. Todd R. Allen ([allen@engr.wisc.edu](mailto:allen@engr.wisc.edu)) est professeur à l'Université du Wisconsin-Madison.

combustible homogène sont l'amélioration de la combustion et le rendement de la transmutation des AM. Des programmes de R-D ont récemment montré que la maturité du combustible homogène est suffisante pour planifier les besoins futurs. Il reste nécessaire de réaliser une démonstration à l'échelle d'une aiguille de combustible (en capsules) ou d'un assemblage. Dans le concept hétérogène, les AM sont dilués dans une matrice en  $UO_2$  placée à la périphérie du réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium (RNR-Na). Cette partie du cœur permettra une teneur en AM plus élevée avec peu d'effet sur les paramètres d'exploitation du réacteur et sur la sûreté du cœur. La R-D n'en est qu'au début de la conception et des essais préliminaires. D'autres programmes expérimentaux devraient être développés pour améliorer la conception de la composition, les dimensions de l'élément combustible, la technologie de fabrication, les propriétés et les lois de comportement, ainsi que la validation des performances du combustible.

Le combustible à nitrures est étudié depuis longtemps, car sa température de fusion est élevée par rapport à celle du combustible à oxydes. Sa conductivité thermique est comparable à celle des combustibles métalliques. Cette partie de l'étude s'est concentrée sur le mononitride d'uranium (UN). Par ailleurs, les nitrures supportent un spectre dur, indispensable pour une fission efficace des actinides. L'UN et le PuN montrent tous deux une bonne compatibilité avec les nitrures d'actinides. Deux techniques de fabrication sont en cours de développement : la réduction carbothermique des oxydes séparés à l'aide d'un procédé aqueux et la nitruration-distillation des métaux d'actinides récupérés dans une cathode en cadmium liquide au moyen d'un procédé pyrochimique. Une meilleure compréhension des propriétés fondamentales, ainsi que des essais d'irradiation des compositions fertile et non fertile restent nécessaires.

Les combustibles à matrice inerte (IMF, *inert matrix fuel*) se focalisent sur la transmutation du Pu et des AM, en remplaçant le matériau fertile ( $^{238}U$ ) par une matrice inerte du point de vue neutronique. La matrice dilue le matériau transurannique jusqu'à des niveaux de puissance acceptables et des températures de fonctionnement du combustible. Pour la conception du combustible ou de la cible, l'oxyde de zirconium stabilisé à l'yttrium (YSZ) sous

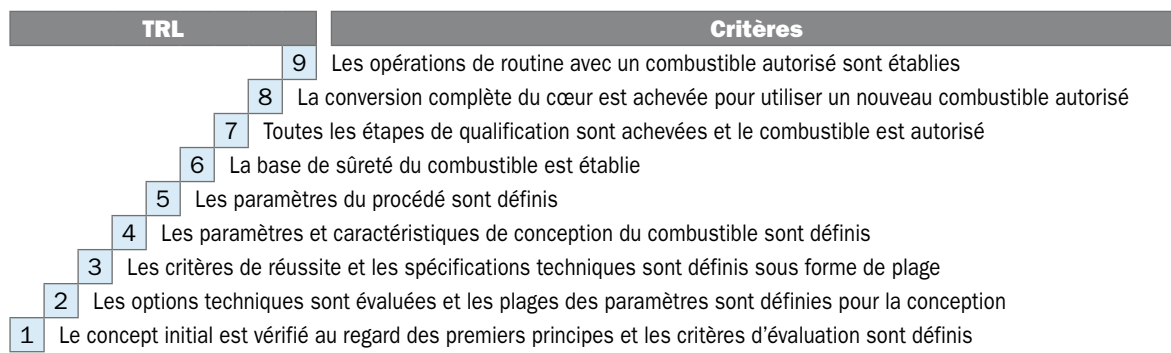
forme de céramique simple (CER) a été choisi ; des configurations céramique-céramique (CERCER) et céramique-métal (CERMET) ont été étudiées afin de faciliter l'ajustement des propriétés. La dispersion de l'oxyde d'actinides (mélangé) dans un second matériau, d'une plus grande conductivité thermique, est un moyen commode d'augmenter la conductivité thermique globale de l'échantillon.

Le concept du combustible nucléaire à particules implique de compacter le matériau combustible dans le crayon sous la forme de morceaux microscopiques ou de particules de matériau combustible (de l'ordre du micromètre ou du millimètre). Afin d'obtenir des combustibles de densités élevées acceptables, de type vibropac ou sphere-pac, la méthode habituelle consiste à remplir l'aiguille de plusieurs fractions de la taille de particules, tout en appliquant des vibrations. Le combustible vibropac est fabriqué à partir de particules collectées sur l'électrode d'un procédé pyrochimique. Le combustible sphere-pac implique de compacter les particules sphériques issues d'un procédé de formation de solutions de nitrate au cours d'un retraitement aqueux.

L'échelle du niveau de maturité technologique (TRL) des combustibles innovants a été élaborée pour quantifier la maturité d'une technologie donnée par rapport à sa mise en œuvre grandeur nature. Toutefois, il faut noter que la TRL ne fournit qu'une mesure relative de la maturité technologique, comparée à l'objectif final de déploiement grandeur nature. Le risque technique n'a pas été pris en considération dans l'évaluation TRL. Il a été observé que les procédés de fabrication de ces combustibles se limitent aux études à l'échelle du laboratoire ( $\sim 10^{-3}$  kg de transuranniens). Les essais d'irradiation se limitent à de petits échantillons ou crayons. Les essais d'irradiation à grande échelle (quelques crayons de taille réelle ou à l'échelle du sous-assemblage) n'existent pas. L'examen de la situation actuelle aboutit aux conclusions suivantes :

- Les combustibles métalliques et à oxydes comportant des transuranniens sont les plus matures. Ils correspondent plus ou moins au niveau TRL 4.
- Il existe quelques données à l'échelle du laboratoire pour la fabrication et la caractérisation des combustibles à nitrures, mais on manque d'essais d'irradiation réussis aux taux de combustion souhaités. La fabrication à grande échelle des

### Critères d'évaluation du niveau de maturité technologique (TRL) atteint



nitrides à l'aide d'un procédé de frittage mature est également un défi, en raison de la volatilité du nitrure d'américium. La TRL des combustibles aux nitrures comportant des TRU est estimée aux alentours de 3.

- Les combustibles dispersés (en particulier ceux ayant une matrice inerte) ont reçu une attention récente. Alors que les procédés de fabrication à l'échelle du laboratoire ont été démontrés, l'évaluation des performances d'irradiation attend l'examen post-irradiation des essais d'irradiation récents. On estime le niveau TRL entre 3 et 4.
- Il existe actuellement un nombre très limité d'études sur les formes spéciales de combustible (vibropac et/ou sphere-pac) qui incluent les transuraniens (hormis des données limitées sur le neptunium).

## Matériaux de structure innovants

Le Forum international Génération IV (GIF) a sélectionné six concepts de réacteur avancés qui promettent de meilleures performances des réacteurs nucléaires en termes de sûreté, de résistance à la prolifération, de performance économique, d'utilisation des ressources naturelles et de minimisation des déchets. L'amélioration des performances des matériaux sera un facteur décisif de réussite de ces six concepts. L'analyse indique que de nombreux matériaux, ou classes de matériaux, sont communs à plusieurs concepts. Il existe par conséquent de nombreuses opportunités de programmes de recherche transversaux profitant à plusieurs concepts.

Tant pour les aciers austénitiques que pour les aciers ferritiques ou martensitiques, un certain nombre de compositions d'alliage améliorées ont été développées et sont encore en développement. Néanmoins, le raisonnement de métallurgie physique qui guide le développement des alliages est loin d'être évident et mériterait plus d'attention au niveau fondamental. Il semblerait que l'amélioration des alliages au nickel ne suscite que des travaux limités, en dépit du fait que même de modestes améliorations de la résistance aux fortes températures seraient nettement bénéfiques. Au sein de chaque classe d'alliage, il est très improbable qu'un seul alliage universel soit adapté à tous les types d'application. Le développement d'alliages spécifiques pourrait bien être nécessaire à l'optimisation de la conception de composants spécifiques. De plus, bien qu'il existe des ressources mondiales pour la plupart des éléments d'alliage, la qualité des minerais employés peut différer, ce qui entraîne des niveaux et des types d'impureté différents. Un soin supplémentaire devra être apporté à la définition et l'analyse des compositions d'alliage.

Un certain nombre de projets de réacteurs reposent en grande partie sur la promesse d'aciers renforcés par dispersion d'oxydes (ODS, *oxide dispersion strengthened*) présentant de meilleures performances (résistance aux contraintes, au fluage, à la température et même à la corrosion). Cependant, afin que ces aciers soient réellement utilisés dans les

composants des réacteurs, des travaux de recherche tout à fait considérables seront nécessaires à tous les niveaux, depuis la recherche appliquée (fabrication, mise en forme, soudage) jusqu'à la recherche fondamentale (métallurgie physique, stabilité des microstructures, effets de l'irradiation). Il ne faut pas sous-estimer les efforts à fournir pour passer de la compréhension fondamentale à la maîtrise de procédés de fabrication solides, incluant la mise en forme et l'assemblage. Il serait utile d'engager des recherches internationales concertées, avec des jalons explicites déterminant la poursuite ou l'arrêt des travaux.

Les composites carbone-carbone (C-C) et silicium-carbone (SiC-SiC) ont été étudiés en profondeur et sont utilisés dans d'autres applications (aérospatiales), mais il n'est pas dit qu'ils soient faciles à transposer aux réacteurs nucléaires sans autre recherche substantielle, notamment pour la gaine du crayon de combustible. Les travaux sont bien moins nombreux au sujet des céramiques à base de carbure ternaire de titane et silicium ( $Ti_3SiC_2$ ) et la base de connaissances est quelque peu limitée. Malheureusement, les teneurs de graphite utilisés par le passé n'existent plus. Des études sont donc en cours pour qualifier les graphites actuels, car les propriétés changent en fonction des matériaux et des conditions de traitement.

Les grands défis techniques qui émergent dans tous les pays pour le développement de matériaux innovants sont notamment :

- le développement d'aciers structurels en composites à base de céramique pouvant servir à transporter des gaz à très haute température ;
- la qualification de matériaux en graphite actuel destinés à un usage nucléaire ;
- l'optimisation des aciers renforcés par dispersion d'oxydes (ODS) destinés au gainage haute température et aux conduits dans les systèmes de réacteurs rapides, présentant une résistance au rayonnement et à la corrosion ;
- le développement d'aciers plus résistants pour la tuyauterie de sodium, afin de réduire les coûts généraux de la centrale tout en maintenant une sûreté adéquate ;
- la compréhension de la dissolution, de l'oxydation et de la fragilisation des aciers exposés aux alliages de plomb, ainsi que le développement de revêtements protecteurs ;
- le développement de matériaux pouvant supporter la dissolution dans des sels fluorés à haute température.

## Suivi de l'AEN et lectures complémentaires

Les deux études – sur les combustibles innovants et sur les matériaux de structure innovants pour les systèmes nucléaires avancés – devraient être publiées en 2012 sous forme de rapports de l'AEN. Pour être informé de leur sortie, inscrivez-vous au bulletin mensuel gratuit de l'AEN à la page [www.oecd-nea.org/bulletin](http://www.oecd-nea.org/bulletin).

# Caractérisation radiologique pour le démantèlement

par S. Thierfeldt\*

**E**n avril 2012, l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire a organisé, à Studsvik, en Suède, un atelier sur la caractérisation radiologique pour le démantèlement, avec le concours de Studsvik Nuclear AB, l'Autorité suédoise de sûreté et de radioprotection (SSM), la Société suédoise de gestion du combustible et des déchets nucléaires (SKB) et AB SVAFO. Pendant trois jours, diverses présentations, affiches, débats et visites de sites ont rassemblé plus de 120 participants venus de 23 pays et 4 organisations internationales.



Le site de Studsvik où l'atelier a été organisé.

## Pourquoi une caractérisation radiologique aujourd'hui ?

De nombreux projets de démantèlement de tous types d'installations nucléaires ont considérablement avancé et/ou ont permis de restaurer les sites concernés en friches industrielles ou en espaces verts. Il était alors opportun de réunir les experts autour d'un atelier et d'évaluer les informations acquises en matière de caractérisation radiologique pour ces nombreux projets. L'information sera particulièrement utile à un grand nombre de projets de démantèlement qui doivent être lancés dans un futur proche.

En outre, la décision prise en avril 2011 par le Groupe de travail de l'AEN sur le déclassement et le démantèlement (WPDD, *Working Party on Decommissioning and Dismantling*) de former un Groupe d'experts sur la caractérisation radiologique et le démantèlement (TG-RCD) souligne l'importance de ce sujet. Ce groupe d'experts a évalué l'état actuel de la caractérisation radiologique dans les pays membres de l'AEN et il a participé à l'organisation de cet atelier.

Le travail qu'il a accompli a ainsi démontré que les méthodes et les objectifs de caractérisation radiologique diffèrent lorsqu'il s'agit des systèmes, des structures et composants (métal), des bâtiments et gravats (structures en béton) ou des sites (terrains).

- **Caractérisation pour les matériaux et les systèmes** : la caractérisation radiologique s'appuie principalement sur les méthodes de mesure des surfaces et les échantillons prélevés sur les matériaux afin d'en déterminer la contamination et la radioactivité induite du métal. Cette caractérisation représente la base de l'estimation des quantités de matériaux à traiter en tant que déchets radioactifs ou à évacuer, de l'évaluation du périmètre nécessaire de décontamination, du choix des techniques de segmentation les mieux adaptées et de la planification des mesures de protection radiologique.
- **Caractérisation des locaux et des bâtiments** : contrairement aux métaux, la caractérisation des surfaces des bâtiments vise à déterminer non seulement le périmètre de la contamination mais également la profondeur de pénétration. En outre, la radioactivité induite autour du cœur du réacteur peut être très profonde. Par conséquent, la caractérisation repose également sur les carottages, qui sont analysés échantillon par échantillon. Lorsque les systèmes, structures métalliques et composants d'une installation nucléaire ont été démontés, les résultats de la caractérisation des locaux et des bâtiments permettent de déterminer les zones à décontaminer, la profondeur de décontamination et la quantité de gravats à traiter en tant que déchets radioactifs.

\* M. Stefan Thierfeldt ([s.thierfeldt@brenk.com](mailto:s.thierfeldt@brenk.com)) travaille à Brenk Systemplanung GmbH en Allemagne, il est consultant auprès du Groupe d'experts du WPDD sur la caractérisation radiologique et le démantèlement (TG-RCD) de l'AEN.

- **Caractérisation des terrains et des eaux souterraines** : la caractérisation des terrains situés autour de l'installation nucléaire peut s'avérer problématique si des fuites de liquides radioactifs ont eu lieu lors de l'exploitation de l'installation. S'il existe des raisons de penser que la contamination ne s'est pas simplement étendue à la surface des terrains (comme les routes ou autres surfaces imperméables), déterminer la profondeur et le périmètre de la contamination souterraine peut alors nécessiter un effort considérable. Sur différents sites d'installations nucléaires, le sol a dû être retiré sur plusieurs mètres de profondeur et un large périmètre afin de localiser et éliminer la contamination.

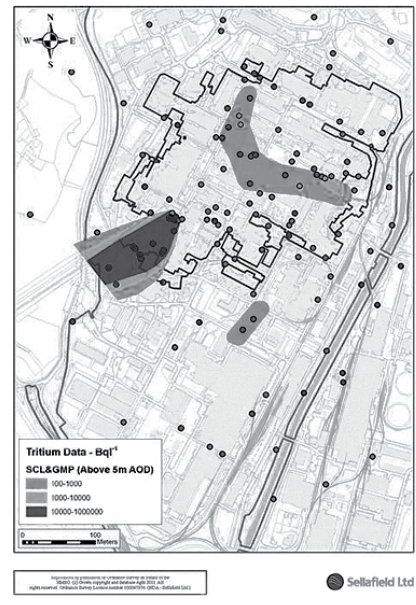
Cependant, la caractérisation radiologique implique davantage que de simples méthodes de mesure. De nombreux pays ont reconnu l'importance d'un soutien et de recommandations sur les stratégies efficaces en matière de caractérisation. Des documents très usités tels que les manuels MARSSIM (*Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual*), MARSAME (*Multi-Agency Radiation Survey and Assessment of Materials and Equipment Manual*) et EURSSEM (*Environmental Radiation Survey and Site Execution Manual*) sont disponibles et décrivent les méthodes d'échantillonnage et de mesure, les procédures d'évaluation, l'assurance qualité et répondent à d'autres questions applicables. En outre, les données collectées doivent être stockées, gérées, récupérées et évaluées grâce à des bases de données polyvalentes. Des logiciels très perfectionnés d'évaluation statistique des données et de visualisation des résultats de mesures ont été développés ces dernières années et sont très utilisés. Notamment, une analyse statistique fiable des données permet de réduire le nombre d'échantillons et de mesures sans diminuer la fiabilité des résultats.

## Pertinence de la caractérisation radiologique

La caractérisation radiologique est au cœur de chaque projet de démantèlement. Elle est nécessaire pour toutes les phases du démantèlement et doit être lancée le plus tôt possible. Elle est pertinente pour définir et affiner le plan de démantèlement, respecter les règles applicables en matière de radioprotection, planifier la gestion et l'élimination des déchets, évaluer les coûts et pour de nombreux aspects liés aux projets de démantèlement.

Les techniques de mesure et les stratégies d'échantillonnage s'appliquent à tous les types d'installation et à tous les types de contamination ou de radioactivité induite. Toutefois, il est évident que de nombreuses approches, qui étaient adoptées auparavant, devaient être améliorées grâce par exemple à une application plus rigoureuse des techniques statistiques de mesure et d'évaluation, une meilleure compréhension des objectifs de qualité des données ou d'une meilleure visualisation

des résultats des mesures. Il faut également développer des moyens permettant de mieux intégrer la caractérisation de la contamination dangereuse et radiologique [comme les polychlorobiphényles (PCB) très largement utilisés dans les traitements de décontamination, l'amiante et les hydrocarbures aromatiques polycycliques] et de réduire les coûts de cette caractérisation en utilisant des techniques innovantes de mesure et d'évaluation des données.



La caractérisation d'un site nucléaire complexe ayant été contaminé au niveau des sols et des eaux souterraines au cours de nombreuses années d'exploitation est une tâche considérable (schéma tiré de la présentation "The Sellafield Contaminated Land and Groundwater Management Project: Characterisation of a Complex Nuclear Facility" par Julian Cruickshank).

## Conclusion de l'atelier

L'atelier de l'AEN sur la caractérisation radiologique pour le démantèlement a abordé les sujets décrits par le biais d'un grand nombre de présentations, d'affiches et de débats très intéressants. Les conclusions de cet atelier seront très utiles pour toutes les personnes concernées par la planification et la mise en œuvre du démantèlement. Les actes de l'atelier doivent ainsi être publiés en tant que document de l'AEN au deuxième semestre 2012. Dans l'attente, la documentation ayant servi de support à l'atelier est disponible à l'adresse [www.oecd-nea.org/rwm/wpdd/rcd-workshop/](http://www.oecd-nea.org/rwm/wpdd/rcd-workshop/).

# Plus de deux décennies d'échange d'informations sur la séparation et la transmutation

par Y.J. Choi\*

**L**e procédé de la séparation et la transmutation (P&T) représente l'un des moyens permettant de réduire le fardeau du stockage géologique. Le plutonium et les actinides mineurs étant principalement responsables de la radiotoxicité à long terme, lorsque ces nucléides sont retirés des déchets (séparation) puis soumis au processus de fission (transmutation), les déchets résiduels perdent la plus grande partie de leur radiotoxicité à long terme. L'inventaire radioactif peut être réduit jusqu'à un facteur de dix si tout le plutonium est recyclé et transmuté. De plus, si des actinides mineurs sont brûlés, des facteurs de réduction supérieurs à 100 peuvent être atteints. En outre, la stratégie P&T permet une réduction cumulée des masses de radionucléides à stocker, de leur chaleur résiduelle associée ainsi que du volume et du coût du stockage, qui est une des conséquences possibles. Des développements récents montrent la nécessité d'intégrer davantage les stratégies P&T dans les cycles de combustible avancés en tenant compte à la fois de la gestion des déchets et des aspects économiques. Ces mêmes stratégies de séparation et transmutation sont également potentiellement en mesure d'améliorer le cycle du combustible dans son ensemble, y compris le stockage définitif, en réduisant le risque de prolifération, notamment si le plutonium n'est pas séparé des transuraniens (TRU).

Depuis 1990, l'AEN a ainsi organisé des réunions biennales d'échange d'informations sur la séparation et la transmutation des actinides et des produits de fission (IEMPT) afin d'offrir aux experts une tribune leur permettant de présenter et de débattre des problèmes scientifiques et stratégiques liés à la technologie de P&T. Les réunions se sont tenues à Mito (Japon) en 1990, à Argonne (États-Unis) en 1992, à Cadarache (France) en 1994, à Mito (Japon) en 1996, à Mol (Belgique) en 1998, à Madrid (Espagne) en 2000, à Jeju (Corée) en 2002, à Las Vegas (États-Unis) en 2004, à Nîmes (France) en 2006, à Mito (Japon) en 2008 et à San Francisco (États-Unis) en 2010.

Jusqu'en l'an 2000, ces réunions portaient principalement sur la physique et la chimie de la P&T, et moins de 60 papiers y avaient été présentés. Ce nombre a augmenté substantiellement lorsque l'objet des réunions a été étendu aux problématiques du cycle du combustible nucléaire, à la conception des systèmes, aux combustibles et matériaux ainsi qu'aux politiques et stratégies s'y rapportant. En 2008, ce sont plus de 140 papiers qui ont été présentés oralement ou sous forme d'affiches. Ce change-

ment d'orientation dans le sujet des réunions reflète également la tendance des problèmes de R-D auxquels est confronté le domaine du nucléaire dans le monde, comme l'avancée de la conception des systèmes de quatrième génération ou l'amélioration des combustibles et le développement des matériaux. Les réunions proposent généralement une session extraordinaire sur l'état actuel des programmes nationaux de P&T ou sur des questions spécifiques devant faire l'objet d'un débat. En 2008, une session extraordinaire a traité des stratégies du cycle du combustible et des scénarios de transition.

La 12<sup>e</sup> IEMPT se tiendra à Prague en République tchèque du 24 au 27 septembre 2012, dans les locaux de l'autorité chargée des dépôts de déchets radioactifs (Radioactive Waste Repository Authority – RAWRA) en partenariat avec la Commission européenne (CE) et l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA). Cette réunion traitera des développements scientifiques, stratégiques et politiques dans le domaine de la P&T, tels que les stratégies du cycle du combustible et les scénarios de transition ; les formes de déchets radioactifs ; l'impact de la P&T sur le stockage géologique ; les stratégies de gestion des déchets radioactifs (y compris des déchets secondaires) ; les combustibles et cibles de la transmutation ; les processus de séparation pyrotechniques et aqueux ; les matériaux, cibles de spallation et réfrigérants ; les expériences, les données et la physique de transmutation ; la conception, les performances et la sûreté des systèmes de transmutation ; la manutention et le transport des combustibles de transmutation ; et les aspects économiques de la P&T.

De plus amples informations sur cette 12<sup>e</sup> réunion ainsi que l'appel à contributions sont disponibles à l'adresse [www.oecd-nea.org/pt/iempt12/](http://www.oecd-nea.org/pt/iempt12/). Les actes des réunions précédentes peuvent être téléchargés à l'adresse [www.oecd-nea.org/pt/](http://www.oecd-nea.org/pt/).

\* Au moment de la rédaction de cet article, M. Yong-Joon Choi était Secrétaire scientifique du Groupe de travail de l'AEN sur les aspects scientifiques du cycle du combustible. Il travaille actuellement au Idaho National Laboratory aux États-Unis ([yong-joon.choi@inl.gov](mailto:yong-joon.choi@inl.gov)).

## Informations générales

---

### **AEN Rapport annuel – 2011**

978-92-64-99180-4. 56 pages. Gratuit : versions papier ou web.

## Aspects économiques et techniques du cycle du combustible nucléaire

---

### **Nuclear Education and Training: From Concern to Capability**

978-92-64-17637-9. 200 pages. Prix : € 60, US\$ 84, £ 54, ¥ 7 800.

The OECD Nuclear Energy Agency (NEA) first published in 2000 *Nuclear Education and Training: Cause for Concern?*, which highlighted significant issues in the availability of human resources for the nuclear industry. Ten years on, *Nuclear Education and Training: From Concern to Capability* considers what has changed in that time and finds that, while some countries have taken positive actions, in a number of others human resources could soon be facing serious challenges in coping with existing and potential new nuclear facilities. This is exacerbated by the increasing rate of retirement as the workforce ages. This report provides a qualitative characterisation of human resource needs and appraises instruments and programmes in nuclear education and training initiated by various stakeholders in different countries. In this context, it also examines the current and future uses of nuclear research facilities for education and training purposes. Regarding the nuclear training component of workforce competence, it outlines a job taxonomy which could be a basis for addressing the needs of workers across this sector. It presents the taxonomy as a way of enhancing mutual recognition and increasing consistency of education and training for both developed and developing countries.

### **The Role of Nuclear Energy in a Low-carbon Energy Future**

978-92-64-99189-7. Gratuit : version web seulement.

This report assesses the role that nuclear energy can play in supporting the transition to a low-carbon energy system. It begins by considering the greenhouse gas emissions from the full nuclear fuel cycle, reviewing recent studies on indirect emissions and assessing the impact that nuclear power could make in reducing greenhouse gas emissions. The report provides estimates of the construction rates that would be needed to meet the projected expansion of nuclear power foreseen by many energy scenarios published by international organisations. It then assesses the economic, technical, societal and institutional challenges represented by such an expansion to identify the most significant barriers. The capacity of nuclear power plants to operate in an electricity system with a large share of renewables, and the impact of smart grid technologies are also examined. Finally, long-term prospects for nuclear energy are discussed in terms of development of new reactor and fuel cycle technologies, non-electric applications and new operational and regulatory constraints that could arise as a consequence of climate change.

### **Trends towards Sustainability in the Nuclear Fuel Cycle**

978-92-64-16810-7. 184 pages. Prix : € 50, US\$ 70, £ 45, ¥ 6 500.

Interest in expanding nuclear power to cope with rising demand for energy and potential climate change places increased attention on the nuclear fuel cycle and whether significant moves are being taken towards ensuring sustainability over the long term. Future nuclear power programme decisions will be increasingly based on strategic considerations involving the complete nuclear fuel cycle, as illustrated by the international joint projects for generation V reactors. Currently, 90% of installed reactors worldwide operate on a once-through nuclear fuel cycle using uranium-oxide fuel. While closing the fuel cycle has been a general aim for several decades, progress towards that goal has been slow. This report reviews developments in the fuel cycle over the past ten years, potential developments over the next decade and the outlook for the longer term. It analyses technological developments and government actions (both nationally and internationally) related to the fuel cycle, and examines these within a set of sustainability parameters in order to identify trends and to make recommendations for further actions.

### **Avis techniques du CSIN n° 14**

Déterminer la pertinence des structures organisationnelles, des ressources et des compétences des exploitants nucléaires

978-92-64-99176-7. 20 pages. Gratuit : versions papier ou web.

La structure organisationnelle des exploitants ainsi que leurs ressources ont clairement un impact sur la sûreté nucléaire. L'expérience continue à montrer que les organisations qui bénéficient d'un programme de formation du personnel solide, de ressources adéquates et de services de direction et de gestion efficaces fonctionnent mieux en temps de crise que celles qui présentent des lacunes dans un ou plusieurs de ces domaines. En parallèle, le secteur nucléaire développe de nouvelles stratégies de déploiement des ressources qui font appel à un nombre croissant de fournisseurs et font l'objet de modifications structurelles, qui à leur tour créent des défis pour une exploitation sûre dans la durée des installations nucléaires. Cet avis technique présente le consensus de spécialistes des facteurs humains et organisationnels des pays membres de l'AEN et des pays associés sur les méthodes, approches et bonnes pratiques à suivre dans le cadre de la conception d'une organisation qui tient fortement compte de la sûreté mais aussi des impératifs commerciaux. Il aborde également les caractéristiques d'une organisation qui gère efficacement ses ressources et ses capacités.

### **Computational Fluid Dynamics (CFD) for Nuclear Reactor Safety Applications**

Workshop Proceedings, CFD4NRS-3, Bethesda, Maryland, USA, 14-16 September 2010

CD. Gratuit sur demande.

### **Le rôle de l'autorité de sûreté nucléaire dans l'évaluation de la surveillance par l'exploitant des services sous-traités**

978-92-64-99167-5. 40 pages. Gratuit : versions papier ou web.

Les services sous-traités font partie intégrante de la conception, de la construction et de l'exploitation d'une installation nucléaire. Les évolutions du secteur de l'industrie nucléaire, notamment une disponibilité de l'expertise nucléaire en mutation, un marché international de l'approvisionnement en expansion et l'introduction de nouvelles technologies, incitent les exploitants à recourir de plus en plus à ces services. Tous ces changements ont placé les exploitants et les autorités de sûreté face à des défis en termes de maintien de l'expertise nucléaire, de gestion efficace des interfaces entre les exploitants et les entreprises extérieures, et de surveillance de la qualité de fabrication de ces dernières dans le contexte d'une plus grande diversité multinationale. L'autorité de sûreté doit relever ces défis pour garantir que les exploitants continuent à assumer leur responsabilité en matière de sûreté des installations, quel que soit le fournisseur des biens et services ou le lieu où se déroulent les activités impliquées dans la chaîne d'approvisionnement. Ce rapport vise à aider les autorités de sûreté à évaluer leurs pratiques actuelles en matière de contrôle réglementaire du recours des exploitants à des entreprises extérieures, et à les adapter le cas échéant en fonction de l'évolution de la situation.

### **Main Benefits from 30 Years of Joint Projects in Nuclear Safety**

978-92-64-99171-2. 132 pages. Gratuit : versions papier ou web.

One of the major achievements of the OECD Nuclear Energy Agency (NEA) is the knowledge it has helped to generate through the organisation of joint international research projects. Such projects, primarily in the areas of nuclear safety and radioactive waste management, enable interested countries, on a cost-sharing basis, to pursue research or the sharing of data with respect to particular areas or issues. Over the years, more than 30 joint projects have been conducted with wide participation of member countries. The purpose of this report is to describe the achievements of the OECD/NEA joint projects on nuclear safety research that have been carried out over the past three decades, with a particular focus on thermal-hydraulics, fuel behaviour and severe accidents. It shows that the resolution of specific safety issues in these areas has greatly benefited from the joint projects' activities and results. It also highlights the added value of international co-operation for maintaining unique experimental infrastructure, preserving skills and generating new knowledge.

## Gestion des déchets radioactifs

---

### **International Structure for Decommissioning Costing (ISDC) of Nuclear Installations**

978-92-64-99173-6. 192 pages. Gratuit : versions papier ou web.

Cost estimation for the decommissioning of nuclear facilities can vary considerably in format, content and practice both within and across countries. These differences may have legitimate reasons but make the process of reviewing estimates complicated and the estimates themselves difficult to defend. Hence, the joint initiative of the OECD Nuclear Energy Agency (NEA), the International Atomic Energy Agency (IAEA) and the European Commission (EC) was

undertaken to propose a standard itemisation of decommissioning costs either directly for the production of cost estimates or for mapping estimates onto a standard, common structure for purposes of comparison. This report updates the earlier itemisation published in 1999 and takes into account experience accumulated thus far. The revised cost itemisation structure has sought to ensure that all costs within the planned scope of a decommissioning project may be reflected. The report also provides general guidance on developing a decommissioning cost estimate, including detailed advice on using the structure.

## Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste <sup>vo</sup>

Outcomes of the NEA MeSA Initiative

978-92-64-99190-3. *Gratuit : version web seulement.*

Safety assessment is an interdisciplinary approach that focuses on the scientific understanding and performance assessment of safety functions as well as the hazards associated with a geological disposal facility. It forms a central part of the safety case, and the results of the safety assessments provide evidence to support decision making. The goals of the NEA project on “Methods for Safety Assessment for Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste” (MeSA) were to examine and document methods used in safety assessment for radioactive waste disposal facilities, to generate collective views based on the methods’ similarities and differences, and to identify future work. The project reviewed a number of approaches used by various national and international organisations. Following the comprehensive review, a generic safety case with a safety assessment flowchart was developed and is presented herein. The elaboration of the safety concept, the use of safety functions, the implication of uncertainties and the formulation of scenarios are also discussed.

## Réversibilité des décisions et récupérabilité des déchets radioactifs

Éléments de réflexion pour les programmes nationaux de stockage géologique

978-92-64-99170-5. 32 pages. *Gratuit : versions papier ou web.*

La solution la plus communément adoptée en matière de gestion définitive des déchets radioactifs de haute activité consiste à placer ces déchets dans des centres de stockage en couche géologique profonde dont la sûreté ne devra pas être tributaire de la présence active de l’homme. C’est dans ce contexte que les programmes nationaux de stockage géologique étudient s’il est opportun d’incorporer les concepts de réversibilité des décisions et de récupérabilité des déchets et comment. On y regarde notamment dans quelle mesure le retrait peut ou doit être facilité dès la conception d’un centre de stockage et, dans ce cas, sur quelle échelle de temps. Cette brochure fournit les résultats principaux et les observations du projet de l’Agence de l’OCDE pour l’énergie nucléaire (AEN) relatif à la réversibilité et la récupérabilité, mené de 2007 à 2011 avec la participation de 15 pays et 2 organisations internationales. Elle décrit les activités entreprises dans le cadre de ce projet et propose des ressources complémentaires. Bien que portant sur le stockage en formation géologique profonde, elle contient des informations pratiques et précises qui ont aussi leur pertinence pour le stockage en sub-surface et pour la prise de décision en général. Cette brochure, et les autres documents relatifs au projet, intéresseront les professionnels traitant des questions techniques et stratégiques, les décideurs politiques ainsi que les parties prenantes concernés par le stockage des déchets radioactifs.

## Thermodynamic Sorption Modelling in Support of Radioactive Waste Disposal Safety Cases <sup>vo</sup>

NEA Sorption Project Phase III

978-92-64-17781-9. 152 pages. *Prix : € 46, US\$ 64, £ 41, ¥ 5 900.*

A central safety function of radioactive waste disposal repositories is the prevention or sufficient retardation of radionuclide migration to the biosphere. Performance assessment exercises in various countries, and for a range of disposal scenarios, have demonstrated that one of the most important processes providing this safety function is the sorption of radionuclides along potential migration paths beyond the engineered barriers. Thermodynamic sorption models (TSMs) are key for improving confidence in assumptions made about such radionuclide sorption when preparing a repository’s safety case. This report presents guidelines for TSM development as well as their application in repository performance assessments. They will be of particular interest to the sorption modelling community and radionuclide migration modellers in developing safety cases for radioactive waste disposal.

## Législation nucléaire

---

### Bulletin de droit nucléaire n° 88

Volume 2011/2 (Décembre 2011)

0304-3428. 222 pages. *Abonnement 2012 (deux numéros par an) : € 121, US\$ 161, £ 96, ¥ 16 000.*

Le *Bulletin de droit nucléaire* est une publication internationale unique en son genre destinée aux juristes et aux universitaires en droit nucléaire. Ses abonnés bénéficient d’informations exhaustives qui font autorité dans ce domaine. Publié deux fois par an en anglais et en français, il propose des articles thématiques rédigés par des experts juridiques renommés, rend compte du développement des législations à travers le monde et présente la jurisprudence

et les accords bilatéraux et multilatéraux pertinents ainsi que les activités réglementaires des organisations internationales. Les principaux articles de ce numéro portent sur « Le développement d'un site de stockage de déchets radioactifs aux États-Unis : état des lieux », « La Directive relative aux déchets radioactifs : une étape nécessaire dans la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs dans l'Union européenne », « Le rôle continu des accords par installation dans le système de garanties de l'AIEA » et « Fukushima : responsabilités et indemnisation ».

## Sciences nucléaires et Banque de données

---

### **Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation**

Eleventh Information Exchange Meeting, San Francisco, California, USA, 1-4 November 2010

978-92-64-99174-3. 404 pages. *Gratuit : versions papier ou web.*

In order to provide experts with a forum to present and discuss developments in the field of partitioning and transmutation (P&T), the OECD Nuclear Energy Agency (NEA) has been organising, since 1990, a series of biennial information exchange meetings on actinide and fission product P&T. These proceedings contain all the technical papers presented at the 11<sup>th</sup> Information Exchange Meeting, which was held on 1-4 November 2010 in San Francisco, California, USA. The meeting covered national programmes on P&T; fuel cycle strategies and transition scenarios; waste forms and geological disposal; transmutation fuels and targets; pyro and aqueous processes; transmutation physics and materials; and transmutation system design, performance and safety.

### **Burn-up Credit Criticality Safety Benchmark – Phase VII**

UO<sub>2</sub> Fuel: Study of Spent Fuel Compositions for Long-term Disposal

978-92-64-99172-9. 180 pages. *Gratuit : versions papier ou web.*

After spent nuclear fuel (SNF) is discharged from a nuclear reactor, fuel composition and reactivity continue to vary as a function of time due to the decay of unstable nuclides. Accurate predictions of the concentrations of long-lived radionuclides in SNF, which represent a significant potential hazard to human beings and to the environment over a very long period, are particularly necessary for radiological dose assessments. This report assesses the ability of existing computer codes and associated nuclear data to predict isotopic compositions and their corresponding neutron multiplication factor ( $k_{\text{eff}}$ ) values for pressurised-water-reactor (PWR) UO<sub>2</sub> fuel at 50 GWd/MTU burn-up in a generic spent fuel cask configuration. Fuel decay compositions and  $k_{\text{eff}}$  values have been calculated for 30 post-irradiation time steps out to one million years.

### **International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments**

September 2011

978-92-64-99163-7. DVD. *Gratuit sur demande.*

### **International Handbook of Evaluated Reactor Physics Benchmark Experiments**

978-92-64-99168-2. DVD. *Gratuit sur demande.*

### **JEFF 3.1.2**

Joint Evaluated Nuclear Data Library for Fission and Fusion Applications – February 2012

DVD. *Gratuit sur demande.*

## Magazines published by the American Nuclear Society

ANS was established on December 11, 1954, at the National Academy of Sciences in Washington, D.C., by pioneers of the industry who recognized the need to unify the professional activities within the various fields of nuclear science and technology. ANS has since developed a diverse membership composed of approximately 11,500 engineers, scientists, administrators and educators representing more than 1,600 corporations, educational institutions and government agencies throughout 40 countries. ANS is the recognized credible advocate for advancing and promoting nuclear science and technology.

## Nuclear News

**ANS's flagship monthly membership publication, considered "The World's Premier Nuclear Magazine."**



*Nuclear News* covers the latest developments in the nuclear field, a large part of which concerns nuclear energy—in particular, the 104 operating U.S. nuclear power plants, and another 331 operating elsewhere around the globe. News reports cover plant operations, maintenance, security, international developments, waste management, fuel, industry, and education, training and workforce issues.

## Radwaste Solutions

**A bimonthly specialty publication providing dedicated coverage of the waste management segment of the nuclear industry.**

Coverage includes practical approaches and solutions to everyday problems and issues in all fields of radioactive waste management and environmental restoration, as well as coverage of the generation, handling, removal, treatment, cleanup, and disposal of radioactive (including mixed) waste. In the



United States, this business is centered on four industry subsets:

- 1) the Department of Energy's remediation of its weapons production and research facilities
- 2) civilian radioactive waste activities
- 3) nuclear utilities
- 4) nonpower, non-DOE activities

Also, other countries are cleaning up and decommissioning their government facilities and older nuclear power plants, and U.S. businesses are increasingly obtaining contracts and subcontracts to perform this work.

Since the time *Nuclear News* accepted its first advertisement in 1960, our magazines have been an integral part of the business development plans of more than 1000 companies and organizations that promote their nuclear-related products, services, capabilities, conferences, and employment opportunities to this important segment of the power industry.

**Advertise • Subscribe**  
**www.ans.org**

**1-708-579-8226**  
**advertising@ans.org**

## Où acheter les publications en vente de l'AEN

### En Amérique du Nord

OECD Publications  
c/o Turpin Distribution  
The Bleachery, 143 West Street  
New Milford, CT 06776  
États-Unis  
Tél. : 1 (800) 456 6323  
Fax : 1 (860) 350 0039  
E-mail : [oecdna@turpin-distribution.com](mailto:oecdna@turpin-distribution.com)

### Dans le reste du monde

OECD Publications  
c/o Turpin Distribution  
Pegasus Drive, Stratton Business Park  
Biggleswade, Bedfordshire  
SG18 8QB, Royaume-Uni  
Tél. : +44 (0) 1767 604960  
Fax : +44 (0) 1767 601640  
E-mail : [oecdrow@turpin-distribution.com](mailto:oecdrow@turpin-distribution.com)

Commandes en ligne :

[www.oecd.org/bookshop](http://www.oecd.org/bookshop)

Paiement sécurisé avec carte bancaire.

## Où commander les publications gratuites de l'AEN

Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire  
Services des publications  
12, boulevard des Îles  
92130 Issy-les-Moulineaux, France  
Tél. : +33 (0)1 45 24 10 15  
Fax : +33 (0)1 45 24 11 10  
E-mail : [neapub@oecd-nea.org](mailto:neapub@oecd-nea.org)



Visitez notre site internet :

[www.oecd-nea.org](http://www.oecd-nea.org)

Vous pouvez aussi nous visiter sur **Facebook** à l'adresse  
[www.facebook.com/OECDNuclearEnergyAgency](http://www.facebook.com/OECDNuclearEnergyAgency)

et

nous suivre sur **Twitter** @OECD\_NEA

Les Éditions de l'OCDE/AEN, 2 rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16  
IMPRIMÉ EN FRANCE – ISSN 1605-959X

**Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire**

12, boulevard des Îles

92130 Issy-les-Moulineaux, France

Tél. : +33 (0)1 45 24 10 15

nea@oecd-nea.org www.oecd-nea.org

ISSN 1605-959X



9 771605 959000