

AEN Infos



Dans ce numéro :

Réponses à l'accident nucléaire de Fukushima Daiichi

Les progrès vers un régime mondial de responsabilité civile nucléaire

Science de la radioprotection : état des connaissances

L'économie de l'aval du cycle du combustible nucléaire

Le rôle du GIF dans le développement des technologies nucléaires futures

et encore...

AEN Infos est publié 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 31 pays membres : l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la Fédération de Russie, 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

Rédaction :
Cynthia Gannon-Picot
Janice Griffiths

Graphisme et mise en page :
Fabienne Vuillaume

Assistante de production :
Andrée Pham Van

Photos de la page de couverture : L'Initiative de Fukushima Daiichi, Date, Japon, 7-8 juillet 2012 ; Centrale nucléaire de Point Lepreau, Nouveau-Brunswick, Canada (AECL) ; Un travailleur de la centrale passe de la zone verte à la zone jaune à Saclay, France (A. Gonin, CEA) ; Installation de transport de fûts de stockage provisoire de Gorleben, Gorleben, Allemagne (GNS – Gesellschaft für Nuklear Service mbH). Photo de Luis Echavarrri en page 3 (M. Lemelle, France).

Table des matières

Faits et opinions

- Réponses à l'accident nucléaire de Fukushima Daiichi 4
- Les progrès vers un régime mondial de responsabilité civile nucléaire 8
- Science de la radioprotection : état des connaissances 13

Actualités

- L'économie de l'aval du cycle du combustible nucléaire 16
- Le rôle du GIF dans le développement des technologies nucléaires futures 20
- Trente ans de renforcement de la confiance dans les calculs thermodynamiques 22

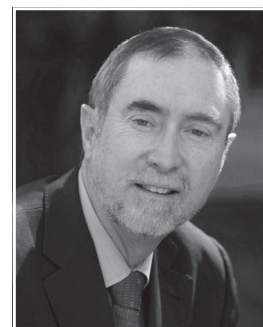
Nouvelles brèves

- JANIS – Améliorations des services de données nucléaires 24
- Gestion des connaissances issues des expériences intégrales en neutronique 27

- Nouvelles publications 29



L'AEN et le nucléaire face aux besoins énergétiques futurs



Comment répondre à la croissance de la demande énergétique mondiale de façon sûre, fiable et économique dans les décennies à venir est une question cruciale à laquelle font face les gouvernements. Il n'existe pas de solution idéale adaptable à tous les cas. Pour que l'énergie nucléaire soit sûre, la conception doit être robuste, les exploitants doivent être compétents et posséder une solide culture de la sûreté, et les autorités réglementaires doivent être efficaces. La notion de « sûreté », pour l'homme et l'environnement, ne se réduit pas à la prévention des accidents, mais elle signifie également l'atténuation des effets du changement climatique. La coopération internationale, le partage de l'expérience et les bonnes pratiques y contribuent positivement et ont récemment conduit l'AEN à publier le rapport intitulé *The Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident: OECD/NEA Nuclear Safety Response and Lessons Learnt*.

Le premier article de la présente édition de l'AEN *Infos* reprend les principaux messages et conclusions de cette publication et donne un bref aperçu des activités clés entreprises par l'AEN. En plus de sensibiliser davantage à la sûreté, l'accident de la centrale de Fukushima Daiichi a également ravivé l'intérêt pour l'établissement d'un régime global de responsabilité civile nucléaire. La déclaration conjointe récente des États-Unis et de la France montre également l'importance de ce régime et l'avancée des pays producteurs d'énergie nucléaire dans cette direction. Le deuxième article de cette édition passe en revue l'ensemble des progrès réalisés vers ce régime de responsabilité civile nucléaire, qui a été également le sujet du débat de politique générale du Comité de direction de l'AEN en avril 2014.

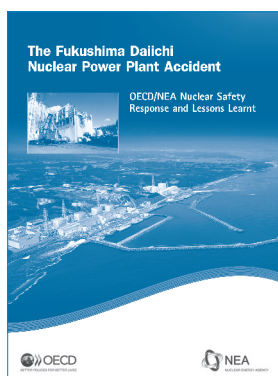
Il décrit aussi les travaux entrepris dans le cadre du *Forum international Génération IV (GIF)* pour rendre les technologies nucléaires futures plus sûres et plus économiques, ainsi que d'autres activités et rapports intéressants de l'AEN, concernant en particulier l'état des connaissances en matière de radioprotection et l'économie de l'aval du cycle du combustible nucléaire. L'Agence se félicite également de la signature récente de la déclaration conjointe de coopération entre l'AEN et la *China Atomic Energy Authority (CAEA)* et a hâte de la mettre en œuvre pratiquement.

Par ailleurs, cet éditorial étant le dernier que je signe pour l'AEN *Infos*, je voudrais en profiter pour exprimer toute ma gratitude à tous les collaborateurs avec qui j'ai travaillé au cours des 17 années passées à la direction de l'AEN. Je voudrais également souhaiter mes meilleurs vœux de réussite au prochain Directeur général de l'AEN et à l'ensemble de l'Agence dans ses activités futures.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Luis E. Echávarri', written in a cursive style.

Luis E. Echávarri
Directeur général de l'AEN

Réponses à l'accident nucléaire de Fukushima Daiichi



Le 11 mars 2011, le Japon a connu l'un des pires cumul de catastrophes naturelles de son histoire lorsqu'un violent séisme a frappé la côte est du pays, provoquant un tsunami qui a causé la perte de milliers de vies humaines. La conjugaison de ces catastrophes naturelles a également été à l'origine

de l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, provoqué par la perte prolongée de l'alimentation électrique et de la source froide ultime, nécessaires au refroidissement du réacteur. Bien que l'accident en lui-même n'ait pas fait de victime, il a affecté des dizaines de milliers de citoyens japonais qui ont dû être déplacés, entraîné des pertes économiques très importantes et causé des dommages environnementaux considérables dans les zones alentour.

À la suite de cet accident, les pays membres, les comités techniques permanents et le secrétariat de l'AEN ont rapidement réagi afin de s'assurer de la sûreté des réacteurs nucléaires en cours d'exploitation. Parallèlement à cela, ils ont également proposé une aide directe aux autorités japonaises pour les aider à faire face aux différents problèmes provoqués par l'accident et l'évacuation de la population dans les zones environnantes. Pendant les mois qui ont suivi, de nombreux travaux ont été entrepris par l'AEN et ses pays membres et associés, ce qui a entraîné le lancement de nouveaux projets, activités et études, et plus récemment, la publication en septembre 2013 du rapport de l'AEN : *The Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident: OECD/NEA Nuclear Safety Response and Lessons Learnt*.

Le rapport décrit les efforts internationaux visant à renforcer la réglementation, la sûreté, la recherche et la radioprotection nucléaires dans le contexte de l'après-Fukushima. Il décrit également les travaux relatifs aux nouveaux réacteurs et aux cadres juridiques et met en avant les messages clés et les leçons tirées, notamment concernant l'assurance de la sûreté, le partage des responsabilités, les facteurs humains et organisationnels, la défense en profondeur, l'implication des parties prenantes, la communication en cas de crise et la préparation aux situations d'urgence. Cet article résume les activités de l'AEN entreprises à la suite de l'accident de

Fukushima Daiichi. Les actions engagées immédiatement par les pays membres de l'AEN sont détaillées dans le rapport.

Il est évident que, plus de deux ans et demi après l'accident, le dossier de Fukushima Daiichi n'est pas clos. Les efforts déployés actuellement sur le site de la centrale et dans les communautés environnantes pour remédier à la situation, ainsi que les travaux en cours de réalisation au niveau international pour tirer des leçons de l'accident, vont se poursuivre pendant de nombreuses années et vont nécessiter une coopération internationale importante. À cet égard, la publication de ce rapport marque une première étape dans le processus de suivi de l'après-Fukushima.

Réglementation nucléaire

Les activités en cours et à venir sur les questions relatives à la réglementation, qui sont supervisées par le Comité sur les activités nucléaires réglementaires (CNRA), sont décrites dans le rapport. Les plus importantes comprennent la création du Groupe de travail sur la gestion des accidents (TGAM), qui vise à examiner les pratiques en matière de gestion des accidents à la lumière de celui de Fukushima Daiichi, ainsi que la tenue d'un séminaire conjoint organisé par le CNRA et le Comité sur la sûreté des installations nucléaires (CSNI) pour discuter des pistes d'amélioration de la défense en profondeur ainsi que des défis afférents. L'atelier conjoint, qui s'est déroulé le 5 juin 2013, a porté en partie sur la mise en œuvre du principe de défense en profondeur, notamment sur le renforcement des barrières multiples qui protègent le public et l'environnement des effets nocifs des rayonnements et sur l'amélioration de la préparation aux événements externes rares et extrêmes tels que les tsunamis.

L'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi a attiré l'attention sur la réglementation en matière de sélection des sites nucléaires. Les activités associées sont coordonnées par le Groupe de travail sur la réglementation des nouveaux réacteurs (WGRNR). L'importance de la communication de crise est également soulignée. Les lecteurs du rapport obtiendront des informations sur le séminaire international organisé par l'AEN les 9 et 10 mai 2012 à ce sujet en collaboration avec le *Consejo de Seguridad Nuclear* (CSN) espagnol. Les recommandations issues de ce séminaire ont été rassemblées dans un rapport intitulé *Crisis Communication: Facing the Challenges* et sont actuellement en cours d'intégration dans les actions des autorités de sûreté nationales.

Messages clés

- Les pays membres de l'AEN ont conduit des évaluations renforcées de la sûreté de leurs réacteurs en exploitation et ont conclu que leur niveau de sûreté était suffisant pour continuer l'exploitation. Des améliorations complémentaires de la sûreté, qui permettront de mieux faire face aux événements extérieurs et aux accidents graves, ont été identifiées et sont en cours de mise en œuvre.
- Les professionnels de la sûreté nucléaire ont conjointement la responsabilité de mettre efficacement en œuvre les principes et pratiques de sûreté.
- Les premiers responsables de la sûreté nucléaire sont les exploitants de centrales nucléaires. Les autorités de sûreté sont quant à elles responsables de s'assurer que le public et l'environnement sont protégés.
- Aucun laisser-aller ne peut être toléré dans la mise en œuvre des pratiques et des concepts de sûreté nucléaire.
- L'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi a permis d'identifier des défis humains, organisationnels et culturels importants, qui comprennent la garantie de l'indépendance, de la capacité technique et de la transparence des autorités de sûreté.
- Les principes fondamentaux de la défense en profondeur restent valides et continuent d'être partagés par ceux qui sont en charge de la sûreté nucléaire.
- Dans la mesure où un accident ne peut jamais être complètement exclu, les dispositions nécessaires pour le traitement et la gestion des situations radiologiques d'urgence, sur et hors site, doivent être définies, testées et revues régulièrement.
- Garantir la sûreté est une responsabilité nationale qui pose cependant un problème mondial en raison de l'ampleur potentielle des conséquences.
- Le retour d'expérience approfondi de l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi prendra de nombreuses années.
- Une attitude de questionnement et d'apprentissage est essentielle pour continuer à accroître le haut niveau des normes de sûreté et leur mise en œuvre efficace.

Source : *The Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident: OECD/NEA Nuclear Safety Response and Lessons Learnt (2013)*.

Sûreté nucléaire

Le rapport identifie un certain nombre d'activités hautement prioritaires relatives à la sûreté nucléaire entreprises par l'AEN et ses pays membres. Elles incluent une étude sur les performances humaines dans des conditions extrêmes. Les lecteurs obtiendront également des informations sur le Groupe de travail ROBELSYS, établi pour examiner la robustesse des systèmes électriques dans les centrales nucléaires, et sur les nouveaux rapports relatifs à la gestion de l'hydrogène et au système de ventilation de l'enceinte de confinement. Ces rapports

sont coordonnés par le Groupe de travail de l'AEN sur l'analyse et la gestion des accidents (WGAMA).

D'autres activités sont également associées à la sûreté nucléaire, notamment la rédaction d'un rapport sur les accidents relatifs au combustible usé et aux stratégies de mitigation, à la lumière de la perte de refroidissement de la piscine du réacteur 4 de la centrale de Fukushima Daiichi. Ce rapport évalue les forces et les faiblesses des méthodes actuelles d'analyse des accidents qui permettent de développer des stratégies de prévention et de mitigation avec différents mécanismes de refroidissement, de manière à identifier de nouvelles activités de recherche qui pourraient être nécessaires pour renforcer ces stratégies. Un *benchmark* des outils logiciels utilisés pour évaluer les rejets de produits de fission lors des accidents de centrales nucléaires sera réalisé. Un rapport traitant des bonnes pratiques et de l'expérience dans le domaine de l'analyse des risques externes naturels sera rédigé. Le projet sur les marges des composants métalliques sous fortes charges sismiques (*Metallic Component Margins under High Seismic Loads*, MECOS) a été lancé pour examiner comment l'évaluation des conséquences des événements sismiques sur les composants métalliques des centrales nucléaires peut être améliorée et prendre en compte le vieillissement des centrales. Pour chacun des projets ou activités, la liste exhaustive des institutions participantes figure dans le rapport.

Projets de recherche conjoints

Depuis plus de 30 ans, l'AEN fournit une plateforme permettant aux pays intéressés de poursuivre, en partageant les coûts, des recherches ou de mutualiser des données dans des domaines spécifiques de la sûreté nucléaire, ce qui serait difficile à entreprendre à un niveau national. Les informations générales sur les projets de recherche conjoints en cours sont disponibles sur le site internet de l'AEN ainsi que des informations sur les quatre premiers projets conjoints lancés pour répondre aux besoins en matière de recherche après l'accident de Fukushima Daiichi, sont disponibles dans ce rapport.

Le premier de ces quatre projets, basé sur une proposition du Japon et initié par l'AEN, vise à considérer les outils existants de simulation d'accidents graves pour modéliser le déroulement de l'accident de Fukushima Daiichi. Il vise également à identifier les améliorations qui pourraient être apportées à ces outils. Ce projet, appelé BSAF (*Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant*), se concentre particulièrement sur les six premiers jours de l'accident.

Les trois autres projets sont HYMERES (*Hydrogen Mitigation Experiments for Reactor Safety*), dont l'objectif est d'améliorer les connaissances portant sur le comportement de l'hydrogène dans les réacteurs pour la qualité des évaluations de sûreté des centrales nucléaires existantes et nouvelles ; le projet PKL (*Primary Coolant Loop Test Facility*) phase 3, basé

sur une extension du programme expérimental actuel de l'AEN sur l'installation d'essai d'Erlangen en Allemagne ; et le projet ATLAS (*Advanced Thermal-hydraulic Test Loop for Accident Simulation*) qui est exploité par l'institut coréen KAERI (*Korea Atomic Energy Research Institute*) et permet de simuler le comportement thermo-hydraulique des principaux systèmes et composants dans un réacteur APR1400 en condition d'accident. Ces deux derniers projets se pencheront sur le comportement thermo-hydraulique d'un réacteur à eau pressurisée pouvant faire suite à un accident grave.

Nouveaux réacteurs

Le rapport propose également des informations sur le Programme multinational d'évaluation des conceptions (MDEP), un forum international à l'intention des autorités de sûreté qui évaluent, ou qui évalueront prochainement, la sûreté des nouveaux réacteurs nucléaires. L'AEN assure le secrétariat technique du MDEP, au sein duquel est poursuivi un large éventail d'activités liées à l'harmonisation des codes, normes, guides et objectifs de sûreté, et qui facilite également la coopération sur les évaluations de la conception de réacteurs spécifiques tels que l'EPR, l'AP1000, l'APR1400, le VVER et l'ABWR.

Protection radiologique

Les implications de l'accident de Fukushima Daiichi sur la politique, la réglementation et la mise en œuvre de la protection radiologique sont très étendues, et l'AEN et ses pays membres continuent à allouer des ressources importantes pour étudier ces effets et contribuer aux efforts d'assainissement entrepris par le Japon.

Sont décrites dans le rapport les nombreuses activités réalisées sous l'égide du Groupe d'experts du Comité de l'AEN de protection radiologique et de santé publique (CRPPH) sur les aspects de radioprotection liés à l'accident de Fukushima (EGRPF), qui a été créé par l'AEN immédiatement après l'accident. L'EGRPF a mené des travaux sur le commerce international des denrées alimentaires et des marchandises provenant de zones contaminées du



Initiative de Dialogue Fukushima, Date, Japon, 7-8 juillet 2012.

Japon, réalisé une étude sur les problèmes émergents et les leçons relatives à la gestion de la réhabilitation, et enfin il a organisé le troisième séminaire « Science and Values » au Japon en novembre 2012, axé sur l'implication des parties prenantes dans la prise de décision sur les questions de protection radiologique.

Le Groupe de travail de l'AEN sur les urgences nucléaires (WPNEM) a été tout aussi actif et a considérablement adapté son programme de travail afin d'identifier et traiter les problèmes émergents tels que la gestion des urgences, la communication en cas d'urgence et le coût des accidents nucléaires.

Le rapport décrit également les activités du Système international d'information sur la radioexposition professionnelle (ISOE) qui a mobilisé ses membres après l'accident de Fukushima Daiichi pour réunir et consigner les expériences dans le domaine de la gestion de l'exposition professionnelle aux fortes doses et en cas d'accident grave.

L'AEN a été activement impliquée dans l'initiative de dialogue autour de Fukushima organisée par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR). Une série de forums locaux a été organisée pour permettre aux parties prenantes affectées de partager leurs préoccupations, expériences et actions.

Cadre et responsabilités juridiques

De nombreuses activités ciblées ont été entreprises par le Comité du droit nucléaire (NLC) de l'AEN suite à l'accident de Fukushima Daiichi. Le NLC s'est particulièrement intéressé au cadre juridique et à la mise en œuvre du régime d'indemnisations du Japon pour les victimes d'accident. Du fait de l'intérêt considérable porté à ce régime, le Secrétariat de l'AEN, en coopération avec la délégation permanente du Japon auprès de l'OCDE, a préparé la publication intitulée *Japan's Compensation System for Nuclear Damage: As Related to the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Accident*. Ce document réunit des traductions en anglais des principales lois, décrets et directives publiées au Japon pour établir et mettre en œuvre le régime d'indemnisations en réponse à l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi. Il comprend également plusieurs commentaires des experts japonais dans le domaine de la responsabilité civile nucléaire.

Messages clés et conclusions

Le rapport *The Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident: OECD/NEA Nuclear Safety Response and Lessons Learnt* met l'accent sur des messages clés dans plusieurs domaines comme le souligne l'encadré de la page 5. Certains de ces messages sont développés plus avant ci-dessous.

Les revues de sûreté exhaustives menées sur les centrales nucléaires après l'accident de Fukushima Daiichi véhiculent un message de sûreté important : les améliorations apportées aux centrales nucléaires

visent à rendre la survenue d'un nouvel accident du type de celui de Fukushima Daiichi (résultant de défaillances multiples des systèmes de sûreté) hautement improbable. Le cadre des revues de sûreté exhaustives menées dans les pays membres de l'AEN à la suite de l'accident de Fukushima Daiichi n'a cependant pas été réduit aux seuls facteurs de cet accident. En pratique, les revues ont consisté entre autres à confirmer que les bases de conception existantes des centrales nucléaires offraient l'assurance de leur sûreté et à mieux préparer les exploitants à faire face à des événements initiateurs extrêmes. En outre, il serait important de mettre à l'avenir l'accent sur le fait que chacune des entités travaillant dans le secteur nucléaire – exploitant, fournisseur, concepteur, constructeur, expert technique et autorité de sûreté – partage la responsabilité du développement et de la mise en œuvre effective des principes de sûreté nucléaire.

Les barrières en place pour protéger la population et l'environnement des effets dangereux des rayonnements, ou défense en profondeur, constituent la base de ces principes de sûreté nucléaire. Le concept fondamental de la défense en profondeur reste aussi valide après l'accident qu'il ne l'était auparavant, mais en allant plus loin, les autorités de sûreté de chaque pays devraient intégrer dans leurs guides des mesures à la fois de prévention et de mitigation à chacun des niveaux de la défense en profondeur, et appliquer la défense en profondeur à la fois à la phase de conception et à celle de sélection du site des centrales.

Les facteurs organisationnels, notamment l'indépendance, la capacité technique et la transparence de l'autorité de sûreté japonaise, sont reconnus comme ayant contribué aux difficultés de gestion de l'accident de Fukushima Daiichi et à la situation de crise associée. Fukushima a également montré que pour préparer et mettre en œuvre efficacement les mesures de gestion des accidents, il faut prendre en compte les facteurs de stress qui affectent les performances humaines.

Les plans et contre-mesures mis en œuvre en situation d'urgence pour protéger le public des effets dangereux des rayonnements constituent la dernière barrière de la défense en profondeur. La mise en œuvre des mesures de protection reste cependant un défi dans le cas où la situation perdure car les personnes évacuées ou mises à l'abri après l'accident de Fukushima Daiichi, par exemple, souhaitent reprendre une vie normale. Ce type de transition nécessite des ressources considérables et un engagement efficace des parties prenantes.

Des améliorations importantes sont également nécessaires dans le domaine de la communication et de l'échange d'informations entre les autorités de sûreté nationales et leurs centres de gestion de crise. L'expérience de Fukushima a clairement souligné la nécessité de communiquer de manière cohérente et claire afin que le public puisse comprendre la situation en matière de sûreté.

Pour ce qui concerne la préparation aux situations d'urgence (dans sa dimension internationale), les différences entre les recommandations de protection japonaises et celles des gouvernements étrangers pour leurs propres ressortissants se trouvant au Japon, laissent penser que les mécanismes de partage des informations techniques entre les gouvernements pourraient également être améliorés.

Les conclusions particulières tirées du processus de réhabilitation à Fukushima Daiichi pourraient avoir un effet sur les recommandations à long terme en matière de recherche et développement. Actuellement et pendant de nombreuses années encore, des informations importantes sont collectées à partir des processus de décontamination et de réhabilitation.

La coopération internationale devrait non seulement inclure les problèmes de court terme mais également faciliter les actions à moyen et à long termes pour prendre en considération les leçons tirées et proposer un forum de collecte, partage et analyse des données, dans le but de développer des approches cohérentes qui puissent être appliquées dans les cadres réglementaires nationaux. Ce forum proposé par l'AEN facilite une telle recherche et permet également aux autorités de sûreté de s'encourager activement les unes les autres à rester vigilantes dans leur mission de contrôle de la sûreté des centrales.

Dans la mesure où un accident grave ne peut jamais être exclu, la gestion des situations d'urgence radiologiques, sur et hors site, doit être planifiée, testée et revue régulièrement. À cet égard, protéger le public et l'environnement des effets dangereux des rayonnements reste fondamental et aucun laisser-aller ne peut être toléré dans ce domaine. Des informations complémentaires sur les messages clés et les conclusions sont disponibles dans le rapport.

Références

Pour accéder à l'intégralité du rapport *The Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident: OECD/NEA Nuclear Safety Response and Lessons Learnt*, voir www.oecd-nea.org/pub/2013/7161-fukushima2013.pdf.

Japan's Compensation System for Nuclear Damage: As Related to the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Accident est disponible à www.oecd-nea.org/law/fukushima/7089-fukushima-compensation-system-pp.pdf.

Pour obtenir des informations générales sur les projets de recherche conjoints en cours de l'AEN, voir www.oecd-nea.org/jointproj/.

Les progrès vers un régime mondial de responsabilité civile nucléaire

par S. Burns*

L'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi a remis à l'avant de la scène le débat sur les régimes internationaux de responsabilité civile nucléaire, un débat qui ne se limite pas aux problèmes théoriques liés à la gestion d'un système de responsabilité pour indemniser les dommages causés par un accident nucléaire. Bien que les conventions internationales en matière de responsabilité civile nucléaire soient parmi les plus anciens instruments juridiques internationaux concernant l'usage civil de l'énergie nucléaire, l'adhésion à ces conventions a progressé de manière irrégulière. C'est particulièrement évident si l'on prend comme objet de comparaison des instruments tels que la Convention sur la sûreté nucléaire de 1994, qui rallie une forte adhésion parmi les états impliqués dans la production électronucléaire. Même s'il est vrai que ces états disposent habituellement d'une législation sur la responsabilité civile nucléaire cohérente avec les principes des régimes internationaux, une plus grande harmonisation entre les lois et la pratique, ainsi qu'une meilleure gestion des dommages transfrontaliers potentiels, grâce à une participation renforcée aux régimes internationaux, demeurent des objectifs importants.

Les conventions internationales sur la responsabilité civile nucléaire existantes

Avec l'émergence de l'énergie nucléaire civile au milieu des années 1950, la nécessité d'un régime de responsabilité particulier se fit plus pressante face aux dangers spéciaux et incertains liés aux activités nucléaires et aux conséquences potentiellement graves d'un accident nucléaire qui pourraient dépasser les frontières nationales. Les discussions qui aboutirent à l'adoption de régimes de responsabilité civile nucléaire dans les années 1960 cherchaient à trouver un équilibre entre les intérêts des victimes potentielles d'un accident et ceux d'une industrie électronucléaire naissante. Ces régimes devaient ainsi aider à garantir des indemnités adéquates pour les dommages aux personnes et aux biens résultant d'un accident nucléaire et à encourager l'industrie à assumer l'entière responsabilité pour la sûreté sans être exposée à un fardeau de responsabilité excessif.

À la fin des années 1950, l'Organisation européenne de coopération économique (l'actuelle OCDE) rassembla des experts juridiques pour

L'indemnisation dans le cadre des régimes de responsabilité

Régime	Montant disponible
Convention de Paris, version d'origine (1960)	15 millions de DTS [en 1990, le Comité de direction de l'énergie nucléaire de l'AEN a recommandé d'augmenter ce montant à 150 millions de DTS]
Régime existant des Convention de Paris (1960) et de Bruxelles (1963)	300 millions de DTS
Convention de Vienne, version d'origine (1963)	Minimum 5 millions USD sur la base de la valeur-or du 29 avril 1963 (35 USD par once troy d'or fin), équivalant à environ 176,79 millions USD (sur la base de la valeur-or du 2 décembre 2013)
Convention de Paris révisée (2004) [pas encore en vigueur]	Minimum 700 millions EUR
Conventions de Paris et de Bruxelles révisées (2004) [pas encore en vigueur]	Minimum 1,5 milliard EUR
Convention de Vienne révisée (1997)	Minimum 300 millions de DTS
Convention sur la réparation complémentaire (1997) [pas encore en vigueur]	Minimum 600 millions de DTS

1 DTS = 1,53 USD le 2 décembre 2013.

explorer le développement d'un instrument régional qui fournirait un système de responsabilité uniforme pour les pays d'Europe de l'Ouest. Ces efforts aboutirent à l'adoption en 1960 de la Convention de Paris sur la responsabilité civile dans le domaine de l'énergie nucléaire. Naturellement, la Convention de Paris de 1960, entrée en vigueur en 1968, n'était que le premier pas vers l'élaboration d'un régime international de responsabilité civile nucléaire.

* M. Stephen Burns (stephen.burns@oecd.org) est Chef de la Section des affaires juridiques de l'AEN.

Après son adoption, la Convention de Bruxelles complémentaire à la Convention de Paris fut adoptée en 1963 (et entra en vigueur en 1974) dans le but de fournir des fonds supplémentaires pour la réparation des dommages résultant d'un accident nucléaire, si les fonds disponibles en vertu de la Convention de Paris s'avéraient insuffisants. La Convention de Paris et la Convention complémentaire de Bruxelles furent modifiées par des protocoles adoptés en 1964 et en 1982. La Convention de Vienne relative à la responsabilité civile en matière de dommages nucléaires fut également adoptée en 1963, sous les auspices de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), et entra en vigueur en 1977. La Convention de Vienne est, en ce qui concerne les conditions générales, ouverte à tous les états ; la Convention de Paris est ouverte aux pays membres de l'OCDE, et à tout pays non-membre avec l'accord des parties contractantes.

En 1986, l'accident de Tchernobyl servit de catalyseur pour l'adoption de la Convention sur la sûreté nucléaire de 1994 et d'autres instruments axés sur l'assistance et l'intervention d'urgence, mais il créa également une dynamique pour améliorer davantage les régimes de responsabilité civile nucléaire. En 1988, le Protocole commun relatif à l'application de la Convention de Vienne et de la Convention de Paris fut adopté sous les auspices conjoints de l'OCDE/AEN et de l'AIEA. Le Protocole commun, entré en vigueur en 1992, établit une passerelle entre les deux conventions et contribua ainsi à élargir leur champ d'application. Le but était d'étendre les droits découlant d'un régime aux victimes d'un accident sur le territoire d'états adhérents à l'autre régime, à condition que les deux états soient également parties au Protocole commun de 1988.

En 1997, s'achevèrent également les négociations relatives à deux instruments placés sous les auspices de l'AIEA : le Protocole d'amendement de la Convention de Vienne relative à la responsabilité civile en matière de dommages nucléaires (Protocole de 1997 de la Convention de Vienne) et un nouvel instrument, la Convention sur la réparation complémentaire des dommages nucléaires (CRC). La CRC est ouverte aux états parties à la Convention de Paris ou à la Convention de Vienne, auquel cas ces états seraient soumis aux deux conventions : d'une part, la Convention de Paris ou la Convention de Vienne et, d'autre part, la CRC. Les États-Unis n'ont, cependant, ratifié que la CRC, car elle inclut une clause d'antériorité qui prend en considération une spécificité de la Loi Price-Anderson des États-Unis sur la responsabilité civile nucléaire adoptée en 1957. Cette loi prévoit en effet la canalisation économique de la responsabilité plutôt que la canalisation juridique prévue dans le cadre des régimes de Paris ou de Vienne. À l'instar de la Convention complémentaire de Bruxelles, la CRC prévoit la mise en place par les parties contractantes d'un fonds supplémentaire, de manière à augmenter les montants disponibles.

Ces développements furent suivis de négociations qui s'achevèrent en 2004, lorsque les états membres de la Convention de Paris adoptèrent des révisions pour moderniser la Convention de Paris et la Convention complémentaire de Bruxelles. Les révisions prévoient une augmentation considérable des montants de réparation disponibles pour les victimes d'un accident nucléaire et étendent le champ d'application de la Convention de Paris en élargissant l'éventail des dommages ainsi que la portée géographique. Parmi les conventions sur la responsabilité qui ont été modernisées, seul le Protocole de 1997 de la Convention de Vienne est entré en vigueur.

Les principes communs inscrits dans les conventions internationales sur la responsabilité civile nucléaire

Les trois conventions contiennent les mêmes principes de base, qui ont été largement transposés dans les législations nationales. Même pour les états qui ne sont pas encore parties à une convention, mais qui ont une législation sur la responsabilité civile nucléaire, les principes des conventions sont généralement inscrits dans leur législation nationale. Ces principes incluent la responsabilité objective, la responsabilité exclusive (canalisation juridique), la limitation de la responsabilité quant au montant, la garantie financière obligatoire, la limitation de la responsabilité dans le temps et l'unicité de juridiction, ainsi que la loi applicable et l'égalité de traitement (la non-discrimination).

En vertu des conventions, les états peuvent également établir des montants moins élevés de responsabilité pour les activités à faible risque, suivant la nature de l'installation nucléaire (par exemple, les réacteurs de recherche) ou les substances nucléaires concernées (par exemple, pendant le transport).

Les défis pour parvenir à un régime mondial de responsabilité civile nucléaire

Malgré le consensus général sur les principes de responsabilité et les actions pour moderniser les conventions et faire adhérer de nouveaux états au régime international, les progrès vers un régime plus mondial ont été irréguliers. Par exemple, les protocoles de 2004 portant modification aux Conventions de Paris et de Bruxelles ne sont pas encore entrés en vigueur. Ce retard est dû en partie à la Décision de 2004 du Conseil de l'UE exigeant que les États membres européens qui sont également des parties contractantes à la Convention de Paris déposent simultanément leurs instruments de ratification. Le Protocole de 1997 de la Convention de Vienne, bien qu'entré en vigueur, ne compte que 11 parties contractantes (dont toutes ne sont pas des états producteurs d'énergie nucléaire). Bien que les États-Unis aient ratifié la CRC, la convention n'a

été ratifiée que par un petit nombre d'états et n'est pas encore entrée en vigueur par manque de parties contractantes représentant conjointement la capacité nucléaire installée requise à cet effet.

Plus important encore, un certain nombre d'états disposant d'une capacité de production d'énergie nucléaire importante n'adhèrent à aucun régime ; c'est le cas du Canada, de la Chine, de l'Inde, du Japon et de la République de Corée (le Canada et l'Inde ont bien signé la CRC, mais ne l'ont pas encore ratifiée). La majorité de ces états ont une législation nationale qui est en général conforme aux normes internationales. La législation indienne reste cependant controversée, car elle est considérée par beaucoup comme incompatible avec le principe de canalisation défini par les conventions internationales. Il y a également certains nouveaux entrants potentiels sur le marché de l'électronucléaire qui n'ont pas encore rejoint une convention. Globalement, près de 58 % des réacteurs en exploitation et en construction dans le monde ne sont actuellement soumis à aucun régime en vigueur.

L'expérience japonaise

L'expérience du Japon dans le traitement des problèmes d'indemnisation suite à l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi a suscité beaucoup d'intérêt. Depuis 1961, le Japon applique un régime national de responsabilité civile nucléaire qui reflète les principes internationaux. Le gouvernement japonais a entrepris des efforts extraordinaires en vue de mettre en œuvre son système national de responsabilité en la matière afin de traiter les nombreuses demandes en réparation pour les dommages imputables à l'accident. Le gouvernement a œuvré avec détermination pour la mise en place d'un comité d'experts indépendant (le Comité de règlement des différends relatifs à la réparation des dommages nucléaires), comme le prévoit sa législation. Ce Comité a adopté des lignes directrices pour déterminer l'étendue des dommages nucléaires donnant lieu à réparation. Il a également créé le *Nuclear Damage Compensation Facilitation Corporation* (Fonds pour la facilitation de la réparation des dommages nucléaires), détenu à parts égales par l'état, d'une part, et les opérateurs nucléaires japonais, d'autre part, dans le cadre du mécanisme établi pour fournir une aide financière gouvernementale en vertu du droit applicable pour financer les réparations lorsqu'elles dépassent le montant de la garantie financière mise en place par l'exploitant. L'expérience du Japon a démontré l'efficacité des principes de base du régime international et la nécessité d'établir un cadre juridique clair et détaillé pour indemniser les victimes d'un accident nucléaire. Ce cadre doit également permettre au gouvernement et à l'exploitant de s'adapter rapidement aux circonstances spécifiques qui découlent d'un accident.

Développements récents

Le Plan d'action de l'AIEA sur la sûreté nucléaire, entériné par la Conférence générale de septembre 2011, appelle les états membres à œuvrer pour la mise en place d'un régime mondial de responsabilité nucléaire. Un tel régime répondrait aux préoccupations de tous les états qui pourraient être touchés par un accident, en vue de garantir une réparation appropriée pour les dommages subis. Les états sont également encouragés à envisager d'adhérer à l'un des instruments internationaux de responsabilité civile nucléaire. Le Groupe international d'experts en matière de responsabilité civile nucléaire (INLEX) créé en 2003 a été chargé dans le Plan d'action de faire des recommandations pour aider à atteindre cet objectif.

En 2012, l'INLEX a émis un ensemble de recommandations pour faciliter les avancées vers un régime mondial de responsabilité civile nucléaire et encourager les états nucléaires et non nucléaires à envisager d'adhérer à un ou plusieurs instruments internationaux pertinents. Il a également demandé que les états inscrivent ces principes internationaux dans leur législation nationale afin de mettre en place un système plus universel, et a entériné les avancées vers l'adoption des caractéristiques modernisées des régimes. Ces dernières incluent la définition de montants de responsabilité plancher supérieurs et la garantie que les blessures corporelles latentes seront couvertes, ainsi que des mesures pour garantir la disponibilité des fonds ou la réparation lorsqu'un accident risque de dépasser le montant de la garantie financière requise. Ces mesures peuvent aboutir à une plus grande harmonisation des régimes d'indemnisation pour les victimes d'un accident. De plus, les états sont exhortés à veiller à ce que les demandes consécutives à un accident nucléaire soient traitées au sein d'un seul forum, d'une manière rapide, équitable et non discriminatoire, en faisant appel le moins possible aux voies judiciaires. Les recommandations de l'INLEX n'expriment pas une préférence pour l'un des régimes de responsabilité civile nucléaire existants, mais elles reconnaissent que le Protocole commun entre les Conventions de Vienne et de Paris établit des relations conventionnelles entre les états qui adhèrent à ces régimes, tandis que la CRC prévoit des relations conventionnelles entre les états, qu'ils soient parties à la Convention de Paris ou à celle de Vienne.

Bien qu'il faudra un certain temps pour parvenir à un régime mondial de responsabilité, il y a des signes de progrès. Le Canada, par exemple, a récemment signé la CRC (5 décembre 2013) et a fait part de son intention de la ratifier dans le cadre de ses efforts en vue de la mise à jour de sa législation nationale sur la responsabilité civile nucléaire. De nouveaux entrants potentiels sur le marché électronucléaire (tels que l'Arabie saoudite, les Émirats arabes unis et le Kazakhstan) sont en voie d'adhésion à l'un ou l'autre des régimes internationaux. Les parties

Pays producteurs d'énergie nucléaire

Situation concernant la ratification des conventions internationales en matière de responsabilité civile nucléaire (le 2 décembre 2013)

Pays	Centrales : en exploitation + en construction (EC)*	Conventions ratifiées	Pays	Centrales : en exploitation + en construction (EC)*	Conventions ratifiées
Afrique du Sud	2		Inde	21 + 6 EC	[CRC signée]
Allemagne	9	CP ; CCB ; PC ; CPR ; CCBR	Japon	50 + 2 EC	
Argentine	2 + 1 EC	CV, CVR, CRC	Mexique	2	CV
Arménie	1	CV	Pakistan	3 + 2 EC	
Belgique	7	CP ; CCB ; CPR ; CCBR	Pays-Bas	1	CP ; CCB ; PC ; CPR ; CCBR
Biélorussie	1 EC	CV, CVR	République de Corée	23 + 5 EC	
Brésil	2 + 1 EC	CV	République islamique d'Iran	1	
Bulgarie	2	CV ; PC	République slovaque	4 + 2 EC	CV ; PC
Canada	19	[CCR signée]	République tchèque	6	CV ; PC
Chine	18 + 30 EC		Roumanie	2	CV ; PC ; CVR ; CRC
Émirats arabes unis	2 EC	CVR ; PC	Royaume-Uni	16	CP ; CCB ; CPR ; CCBR
Espagne	8	CP ; CCB ; CPR ; CCBR	Slovénie	1	CP ; CCB ; PC ; CPR ; CCBR
États-Unis	100 + 5 EC	CRC	Suède	10	CP ; CCB ; PC ; CPR ; CCBR
Fédération de Russie	33 + 10 EC	CV	Suisse**	5	CP ; CCB ; CPR ; CCBR
Finlande	4 + 1 EC	CP ; CCB ; PC ; CPR ; CCBR	Taipei chinois	6 + 2 EC	
France	58 + 1 EC	CP ; CCB ; CPR ; CCBR	Ukraine	15 + 2 EC	CV ; PC
Hongrie	4	CV ; PC			

CP : Convention de Paris de 1960 sur la responsabilité civile dans le domaine de l'énergie nucléaire.

CCB : Convention complémentaire de Bruxelles à la Convention de Paris de 1963.

CPR : Protocole de 2004 portant modification de la Convention de Paris (Convention de Paris révisée – *pas en vigueur*).

CCBR : Protocole de 2004 portant modification de la Convention de Bruxelles complémentaire (*pas en vigueur*).

CV : Convention de Vienne de 1963 sur la responsabilité civile en matière de dommages nucléaires (Convention de Vienne).

CVR : Protocole de 1997 portant modification de la Convention de Vienne (Convention de Vienne révisée).

PC : Protocole commun de 1988 relatif à l'application des Conventions de Vienne et de Paris.

CRC : Convention de 1997 sur la réparation complémentaire (*pas en vigueur*).

* s réacteurs de puissance (PRIS) de l'AIEA, www.iaea.org/pris/ (à compter du 2 décembre 2013).

** La Suisse a déposé son instrument de ratification de la CP et de la CCB telles que modifiées par les Protocoles de 2004 ; les conventions n'entreront en vigueur pour la Suisse qu'après l'entrée en vigueur des Protocoles de 2004.

contractantes de la Convention de Paris touchées par la Décision du Conseil de l'UE de 2004 (c'est-à-dire 12 des 16 parties contractantes) aspirent à prendre les mesures nécessaires pour permettre l'entrée en vigueur des protocoles de 2004 dans un avenir proche.

En outre, les États-Unis et la France ont adopté une Déclaration conjointe sur la responsabilité civile en matière de dommages nucléaires en août 2013, s'accordant pour « promouvoir les efforts pour parvenir à un régime mondial de responsabilité nucléaire basé sur les relations conventionnelles entre la France, les États-Unis et d'autres pays qui

pourraient être touchés par un accident nucléaire », pour « coordonner leurs actions en encourageant l'adhésion aux instruments internationaux renforcés de responsabilité nucléaire » et pour « exhorter les pays à adopter des lois nationales qui intègrent les principes de responsabilité nucléaire et les récentes améliorations apportées à ces principes », ainsi que certaines pratiques exemplaires.

Cette déclaration conjointe est significative, car elle reflète une position commune sur l'importance des progrès à réaliser pour parvenir à un régime mondial de deux états qui figurent parmi les principaux producteurs d'énergie nucléaire.

Bien que la « France considère qu'un système basé sur la Convention de Paris révisée (associée à la Convention de Bruxelles révisée complémentaire à la Convention de Paris), la Convention de Vienne révisée et le Protocole commun constitue une base adéquate pour la réparation des dommages nucléaires », tandis que « les États-Unis considèrent la CRC comme le seul instrument international de responsabilité nucléaire existant auquel les États-Unis peuvent adhérer », les deux pays reconnaissent que « la CRC a été conçue pour fournir une base pour la mise en place d'un régime mondial de responsabilité nucléaire en permettant l'adhésion de pays parties à la Convention de Paris ou à la Convention de Vienne, y compris ceux qui sont liés par le Protocole commun, et l'adhésion de pays dont la législation nationale est pleinement conforme aux principes de responsabilité nucléaire énoncés par l'Annexe à la CRC ». La déclaration conjointe souligne l'engagement des deux pays à œuvrer en faveur d'un régime mondial de responsabilité, estimant que de « telles actions de leur part et de celle d'autres pays, garantiront une réparation adéquate et équitable aux victimes d'un dommage nucléaire résultant d'un accident nucléaire et établiront au niveau mondial la confiance nécessaire au développement de l'énergie nucléaire et des activités industrielles associées ».

Enfin, la déclaration publiée par le G20 en septembre 2013 après la réunion de Saint-Pétersbourg a encouragé « la coopération multilatérale pour parvenir à un régime mondial de responsabilité civile nucléaire ».

Le chemin vers un régime mondial de responsabilité nucléaire n'est peut-être pas aisé, mais les progrès même les plus modestes vers l'adoption de principes internationalement reconnus dans les législations nationales et les avancées vers l'entrée en vigueur des régimes modernisés, tout en élargissant leur portée géographique par de nouvelles adhésions, auront un effet salutaire. Une capacité de production nucléaire substantielle reste opérationnelle dans le monde et de nouvelles

centrales nucléaires sont en cours de construction dans un certain nombre de pays. Dans ce contexte, les efforts continus pour harmoniser les régimes internationaux de responsabilité et pour élargir la participation à ces régimes demeurent des objectifs louables.

À lire

Pour de plus amples informations sur la Convention sur la sûreté nucléaire de 1994, voir www-ns.iaea.org/conventions/nuclear-safety.asp.

Les textes des conventions internationales, dans leurs formes d'origine et modifiées, sont accessibles sur le site Web de l'AEN : www.oecd-nea.org/law/legal-documents.html#agreements. Les instruments placés sous les auspices de l'AIEA sont accessibles à <http://ola.iaea.org/ola/treaties/multi.html>.

Pour de plus amples informations sur la Décision du Conseil de l'UE de 2004, voir <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:097:0053:0054:FR:PDF>.

Le rapport de l'AEN intitulé *Japan's Compensation System for Nuclear Damage: As related to the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Accident* (2012) est disponible (seulement en anglais) à www.oecd-nea.org/law/fukushima/7089-fukushima-compensation-system-pp.pdf.

Le Plan d'action de l'AIEA sur la sûreté nucléaire (2011) est disponible à www-ns.iaea.org/actionplan/.

Les Recommandations de l'INLEX (2012) sont disponibles à <http://ola.iaea.org/ola/documents/ActionPlan.pdf>.

La déclaration conjointe entre les États-Unis et la France sur la responsabilité civile en matière de dommages nucléaires (*Joint Statement on Liability for Nuclear Damage*) (2013) est disponible à http://energy.gov/sites/prod/files/2013/08/f2/Joint%20Statement%20Signed_0.pdf (version anglaise) ; www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/DECLARATION_FR_USA.pdf (version française).

La déclaration des leaders du G20 est disponible à www.g20.org/news/20130906/782776427.html, et en français (traduction non officielle) voir www.tresor.economie.gouv.fr/file/390095.

Science de la radioprotection : état des connaissances

par T. Lazo*

La compréhension scientifique des questions liées à la radioprotection continue de progresser et un certain nombre de nouvelles avancées dans la recherche ont motivé de nouveaux travaux sur le sujet au sein de l'AEN, notamment des examens plus approfondis et la mise à jour des publications du Comité de radioprotection et de santé publique (CRPPH) sur l'*Évolution de radiobiologie et de radiopathologie : répercussions sur la radioprotection* (AEN, 1998) et *Scientific Issues and Emerging Challenges for Radiation Protection* (AEN, 2007). À l'époque, le rapport de 1998 résumait ce que la science la plus avancée pouvait révéler sur les risques radiologiques et traitait notamment des risques aux niveaux d'exposition auxquels les personnes et les ouvriers sont exposés quotidiennement, c'est-à-dire moins de 100 mSv par an. Il présentait également les résultats les plus récents dans les domaines de la radiobiologie, de la biologie cellulaire, de l'épidémiologie des rayonnements, de la causalité des maladies et des effets génétiques, et concluait que malgré l'étendue des connaissances en science de la radioprotection, il reste beaucoup à apprendre. Cet article aborde certaines de ces questions, examine les progrès des connaissances en science de la radioprotection depuis les publications de 1998 et 2007, puis fait le point sur quelques défis pour l'avenir et sur la voie à suivre.

Ce que nous savons à propos de la science de la radioprotection

On suppose que le principal effet stochastique des rayonnements ionisants à des doses relativement faibles est sa capacité à provoquer des cancers. Cependant, les rayonnements ionisants aux niveaux de dose auxquels s'intéresse la radioprotection (moins de 100 mSv) est considéré comme faiblement cancérogène. À des doses supérieures à 200 mSv, il existe des preuves solides des risques de cancer radio-induit chez l'homme. En outre, aucun effet biologique positif, par exemple, le développement d'une réaction protectrice par le système immunitaire à la suite d'une exposition à des doses aiguës de rayonnements ionisants (un effet semblable à l'hormèse), n'a été observé chez l'homme. Bien que les différents tissus et organes puissent présenter des niveaux de sensibilité aux cancers radio-induits, on sait qu'aux doses élevées dépassant 500 mGy, des effets déterministes tels que l'érythème, la cataracte ou la stérilité se produisent.

Il a été démontré que les cancers solides radio-induits ont une longue période de latence, généra-

lement supérieure à dix ans, tandis que la leucémie et le cancer de la thyroïde chez les enfants peuvent apparaître quelques années à peine après l'exposition. Divers facteurs hôte (tels que l'âge au moment de l'exposition, le temps écoulé depuis l'exposition, le sexe, la prédisposition génétique) et facteurs environnementaux (tels le tabagisme ou les agents infectieux) peuvent également influencer sur le risque de cancer aux niveaux d'exposition où les effets des rayonnements ont été observés. L'existence de mécanismes de réparation cellulaire est connue, mais les réparations peuvent être mauvaises et des événements principalement moléculaires et cellulaires (lésions résiduelles de l'ADN) peuvent se produire. Parfois, le rendement de ces lésions de l'ADN dépend de manière linéaire de l'énergie absorbée, mais de nombreux processus biologiques en plusieurs étapes sont connus pour être non linéaires.

Les études épidémiologiques seules ne peuvent pas fournir une preuve définitive de l'existence ou de la non-existence d'effets cancérogènes dus aux rayonnements à faible dose uniques ou à faible débit de dose continus. En même temps, l'absence de données épidémiologiques témoignant de l'existence des effets induits des rayonnements à faible dose et à faible débit de dose ne prouve pas que ces effets n'existent pas. Les études épidémiologiques n'ont pas détecté d'effets héréditaires des rayonnements sur l'homme avec un degré de certitude statistiquement pertinent, mais elles ont montré que l'embryon/le fœtus en développement est plus sensible à l'exposition aux rayonnements ionisants que les enfants ou les adultes.

Incertitudes persistantes

Le rôle des facteurs hôte – qui pourraient inclure l'âge au moment de l'exposition, le temps écoulé depuis l'exposition, le sexe, la prédisposition génétique et les facteurs environnementaux tels le tabagisme ou l'ingestion d'agents infectieux – en tant que déterminants des risques liés aux rayonnements reste incertain. De plus, la forme de la relation dose-effet (qu'elle soit linéaire, quadratique ou au niveau du seuil) aux faibles doses et débits de dose pour la carcinogénèse radio-induite chez l'homme est mal comprise. Pour une même dose absorbée, les différents types

* M. Ted Lazo (edward.lazo@oecd.org) est Administrateur principal dans la Division de la protection radiologique et de la gestion des déchets radioactifs de l'AEN.

de rayonnement (alpha, bêta, gamma, neutronique) ne présentent pas les mêmes niveaux de risques d'effets biologiques induits (extrémités détériorées), et la base biologique de ce facteur chez l'homme, aux faibles doses et débits de dose, continue de faire l'objet de débats dans la communauté scientifique.

Il faut dire que le mécanisme de la carcinogénèse, qu'elle soit induite par les rayonnements ou par d'autres agents, est considéré comme un processus en plusieurs étapes qu'il n'est pas possible de comprendre entièrement. L'origine du cancer serait, selon une hypothèse, le résultat d'événements mutationnels concernant des loci génétiques critiques et d'autres facteurs tels que le statut hormonal, l'âge ou les fonctions immunitaires. Les effets des rayonnements aux différentes étapes de la carcinogénèse sont aujourd'hui incertains. Bien que les lésions de l'ADN soient supposées être une étape clé dans la carcinogénèse radio-induite, on ne sait pas quelles lésions critiques de l'ADN sont responsables des mutations géniques ou ponctuelles et des aberrations chromosomiques conduisant au cancer. En conséquence, la cause d'un cancer individuel ne peut pas être rattachée spécifiquement à un événement déclencheur donné tel que l'exposition aux rayonnements. Par exemple, il est impossible de déterminer clairement combien de cellules tumorigènes sont nécessaires pour produire un cancer *in vivo* et pourquoi les organes et les tissus n'ont pas tous la même radiosensibilité. Autrement dit, il existe un manque de compréhension à propos de la sensibilité aux rayonnements et de la possibilité de la prédire à partir de l'incidence spontanée de la plupart des cancers. Aucune méthode n'est actuellement disponible pour mesurer la sensibilité d'un individu aux rayonnements.

On sait que les processus de réparation biologiques et chimiques des lésions dues aux rayonnements se produisent dans les cellules, mais l'influence de ces processus de réparation sur le risque radiogénique pour l'homme aux faibles doses et débits de dose n'est pas parfaitement comprise non plus. Cela contribue à l'incertitude concernant les facteurs de correction des doses et des débits de dose utilisés pour évaluer les risques radiogéniques. En outre, rien ne permet d'indiquer si une réponse adaptative, observée dans des cellules individuelles dans certaines conditions, influe sur les risques radiogéniques chez l'homme ou si les faibles doses de rayonnements chez l'homme ont des effets biologiques positifs sur la santé (hormèse).

Nouveaux défis et domaines dans lesquels les études doivent être approfondies

Le rapport de 1998 sur la science de la radioprotection avait permis d'informer l'AEN et la communauté élargie de la radioprotection sur l'état des connaissances à l'époque, mais le travail sur le terrain a continué de progresser. À l'occasion du 50^e anniversaire de la création du CRPPH, une mise à jour de ce rapport a

été publiée sous le titre *Scientific Issues and Emerging Challenges for Radiation Protection: Report of the Expert Group on the Implications of Radiation Protection Science* (AEN, 2007).

Ce rapport a largement confirmé les conclusions du précédent rapport, notamment l'état des connaissances, mais il a aussi fourni de nouvelles informations provenant d'études importantes sur les rayonnements et la biologie cellulaire réalisées depuis 1998. Le nouveau rapport a abordé plusieurs secteurs de la recherche scientifique et leurs implications, y compris les effets non ciblés et différés, la sensibilité individuelle, l'épidémiologie et d'autres défis pour le système unifié de limitation des doses. Il a également abordé plusieurs domaines d'application de la radioprotection qui pourraient poser de nouveaux défis importants, par exemple, la protection médicale pendant l'exposition médicale, la radioprotection de l'environnement, les défis pour le paradigme actuel, les impacts des accidents et des actes radiologiques malveillants sur la santé, ainsi que des champs de recherche possibles pour la nouvelle recherche collaborative internationale. Suite au travail décrit ci-dessus, le Comité a tiré les conclusions suivantes à propos des nouveaux défis.

Effets non ciblés, validité du concept de dose

Bien que les preuves ne soient pas encore concluantes, les recherches actuelles et futures en radiobiologie, dans des domaines comme les effets non ciblés ou les relations entre la réponse adaptative et la réponse à la dose, peuvent aboutir à la formulation d'un nouveau paradigme de la radiobiologie combinant les effets des rayonnements classiques (ciblés ou directs) et non ciblés (indirects). Ce paradigme pourrait avoir des implications importantes sur la manière d'évaluer les risques radiologiques. Par exemple, il pourrait s'avérer nécessaire d'élaborer une nouvelle approche scientifique ou d'apporter une modification significative à l'approche actuelle, pour une évaluation holistique et cohérente des risques (pour tous les types de rayonnements et tous les types de situations d'exposition aux rayonnements). Un tel changement pourrait également avoir un effet important sur les approches actuelles de la gestion des risques.

Radiosensibilité

Les progrès majeurs en biologie cellulaire et moléculaire offrent une base pour parvenir à une compréhension plus complète des variations de la radiosensibilité parmi les populations. Aujourd'hui, une radiosensibilité élevée à l'exposition aux rayonnements ionisants est identifiable uniquement pour les hauts niveaux d'exposition. Dans l'avenir, il est probable que les individus présentant des risques accrus de cancer radiogénique pourront être identifiés avec un simple dépistage génétique. De tels développements pourraient avoir des implications importantes pour le système actuel de limitation des doses et de radioprotection, notamment pour les ouvriers et les patients médicaux. Ces résultats font ressortir, en particulier, la nécessité de définir la

radiosensibilité des individus, la nécessité de rechercher si la protection serait mieux assurée avec une simple limite de dose ou avec des limites de dose personnalisées en fonction de groupes ayant une radiosensibilité différente et la nécessité d'analyser les problèmes éthiques posés par le dépistage génétique.

Épidémiologie

Dans la mesure où les rayonnements ne sont que faiblement cancérigène, les études épidémiologiques de grande envergure à long terme sont des éléments décisifs dans l'évaluation des risques. Le financement de ces études devrait être durable dans le temps pour autoriser une collecte précise et complète de données pertinentes. Ces études incluent, par exemple, l'étude de la durée de vie des survivants des bombardements atomiques au Japon, l'étude sur les travailleurs du secteur nucléaire, les études sur le radon ou celles sur les populations exposées de manière chronique. L'épidémiologie moléculaire sera nécessaire pour aborder la question des risques associés aux faibles doses, qui ne pourra pas être résolue par l'épidémiologie classique.

Exposition médicale

Les études sur l'exposition médicale des patients et des travailleurs de la santé ont montré qu'il existait une augmentation régulière des doses, ce qui justifie la nécessité d'une meilleure information sur les doses, et donc, de machines mieux équipées pour mesurer et afficher les expositions des patients. Cela pourrait également nécessiter la mise en œuvre d'une nouvelle approche, peut-être réglementaire, pour assurer l'optimisation de l'exposition. Une interface régulière entre les pratiques médicales et les autres domaines devrait être encouragée afin de tirer le meilleur parti des connaissances et des données disponibles.

Impacts d'un accident ou d'une exposition à grande échelle sur la santé

Maintenir la confiance du public est une question critique lorsqu'il s'agit de gérer les conséquences d'un accident nucléaire. Les gens demanderont probablement des informations et des conseils aux fournisseurs de soins de santé, qui joueront un rôle clé pour déterminer la manière dont le grand public réagira à l'événement. Les informations fournies par les organisations devraient concerner non seulement les conséquences d'une forte exposition, mais également la grande majorité des personnes qui auront été faiblement exposées, voire pas du tout. Un système de réponse médicale efficace et bien organisé doit être mis en place et perpétué pour susciter l'espoir et la confiance, réduire les craintes et l'anxiété, et appuyer la continuité des activités communautaires de base.

Radioprotection de l'environnement

Le développement de principes de radioprotection pour l'environnement est un nouveau défi qui ne devrait pas être séparé des autres principes plus larges et des approches conceptuelles associées qui

existent déjà ou sont en cours d'élaboration. Ces principes environnementaux devront tenir compte des approches législatives et réglementaires existantes pour avoir une utilité pratique.

La marche à suivre

L'AEN a continué de suivre la situation de la science de la radioprotection et, étant donné que ce sujet suscite beaucoup d'intérêt, examine les connaissances scientifiques actuelles des risques potentiels résultant d'une exposition radiologique inférieure à 100 mSv. Le Groupe d'experts sur la science de la radioprotection (EGRPS) a été créé en mai 2013 pour rédiger un rapport résumant l'état des connaissances en science de la radioprotection, en partant de l'analyse du rapport de 2007 élaboré par l'EGRPS, *Scientific Issues and Emerging Challenges for Radiological Protection: Report of the Expert Group on the Implications of Radiological Protection Science*. À cet effet, l'EGRPS :

- passera en revue les documents scientifiques pertinents et évaluera les implications possibles des résultats scientifiques à court terme qui sont susceptibles d'émerger des études en cours ;
- prendra en considération le travail réalisé actuellement par le Comité scientifique des Nations unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR), la plate-forme MELODI (*Multidisciplinary European Low Dose Initiative*), les recherches sur les faibles doses menées par le Département de l'énergie des États-Unis (US DOE) et d'autres travaux y afférents ;
- coordonnera l'élaboration du rapport avec le Groupe d'experts sur les aspects de radioprotection liés à l'accident de Fukushima (EGRPF) dans le contexte de sa pertinence en matière de gestion des conséquences de Fukushima.

Une première réunion de l'EGRPS a été organisée les 12 et 13 septembre 2013, au cours de laquelle la structure de base du rapport a été convenue. En partant des conclusions du rapport de 2007, qui, d'après l'avis du groupe, restent largement valables, le nouveau travail inclura une discussion sur la science de la radioprotection, y compris sur les risques associés aux faibles doses et débits de dose, les risques non cancéreux, la sensibilité individuelle et les aspects relevant des sciences sociales. Il s'intéressera également aux aspects touchant aux applications, par exemple, au système de radioprotection, aux impacts des accidents nucléaires et des actes de malveillance, aux questions liées à la radioprotection médicale, aux situations d'exposition existantes, et à la radiologie environnementale et radio-écologique. Ce nouveau rapport devrait être finalisé fin 2014 et publié après l'approbation finale en mai 2015.

Références

AEN (2007), *Scientific Issues and Emerging Challenges for Radiological Protection: Report of the Expert Group on the Implications of Radiological Protection Science*, OCDE, Paris.

AEN (1998), *Évolution de radiobiologie et de radiopathologie : répercussions sur la radioprotection*, OCDE, Paris.

L'économie de l'aval du cycle du combustible nucléaire

par M.E. Urso, A. Lokhov et R. Cameron*

Le combustible nucléaire usé et les déchets de haute activité du cycle du combustible des centrales nucléaires commerciales ne représentent qu'une petite proportion des déchets radioactifs produits dans le monde par différentes industries (notamment la médecine, l'agriculture et la recherche), mais ce sont eux qui ont la plus grande teneur radioactive et la plus grande longévité. Alors que les technologies pour le traitement et l'élimination de volumes beaucoup plus importants de déchets de faible activité et de moyenne activité à vie courte sont bien développées et largement utilisées, aucune installation de stockage définitif n'a encore été entièrement mise en œuvre pour le combustible nucléaire usé (CNU) et les déchets de haute activité (DHA). Le manque d'expérience dans la construction et l'exploitation des stockages géologiques en profondeur, combiné avec les longues périodes requises pour la mise en œuvre de solutions de l'aval du cycle, a ainsi contribué aux incertitudes croissantes sur les coûts associés à la gestion du CNU et des DHA. Le problème est devenu un défi central pour l'industrie nucléaire et un sujet de préoccupation et de débat public.

De nombreux rapports utiles ont été réalisés au fil des ans, décrivant les approches nationales de la gestion des déchets ou proposant des suggestions sur la manière d'analyser les coûts du stockage. Il convient de noter en particulier le travail approfondi réalisé par le Comité de la gestion des déchets radioactifs de l'AEN et ses groupes de travail. Dans les dernières années, un certain nombre d'études ont également été entreprises dans les pays membres de l'AEN pour examiner les coûts du stockage du combustible usé et des déchets de haute activité. Ces études nationales sont cependant liées à des choix politiques, des pratiques et des réglementations spécifiques, les résultats variant considérablement d'un pays à l'autre et n'étant donc pas directement comparables.

Comme aucune vue d'ensemble récente de l'état des connaissances sur les coûts des solutions d'aval dans les pays de l'AEN n'était disponible, une nouvelle analyse a été réalisée en vue d'approfondir la compréhension des problèmes économiques et des méthodologies pour la gestion du CNU et des DHA issus des centrales nucléaires commerciales. Sur la base de cette analyse, un rapport intitulé *The Economics of the Back End of the Nuclear Fuel Cycle* a été publié en octobre 2013. À partir des données officielles fournies par les autorités nationales, il

propose un aperçu descriptif des principes et des cadres généraux pour la gestion à long terme du CNU, des politiques et des pratiques nationales actuelles, ainsi que des options technologiques disponibles et envisageables, notamment des options suivantes :

- Stockage direct, où le combustible est utilisé une fois, puis considéré comme un déchet à stocker.
- Recyclage partiel, où le combustible usé est retraité pour que l'uranium et le plutonium non utilisés puissent être récupérés et recyclés dans des réacteurs à eau légère (REL). Une fois irradiés, les assemblages de combustible peuvent être soit entreposés (dans la perspective de leur retraitement et de leur recyclage dans les futurs réacteurs rapides) soit stockés après conditionnement.
- Systèmes et concepts avancés du cycle du combustible à long terme, étudiés sur le plan théorique ou à une échelle pilote, avec le double objectif de réduire la masse et la radioactivité des déchets destinés au stockage définitif et d'optimiser l'exploitation des ressources naturelles.

En outre, une analyse des coûts de ces options a été réalisée et des estimations ont été élaborées avec un modèle économique simplifié.

Les deux options industrielles pour le cycle du combustible, à savoir le stockage direct ou le recyclage partiel, ainsi que toute option avancée envisageable, nécessiteront finalement le stockage définitif des DHA ou du CNU (traité comme un déchet de haute activité dans le cycle ouvert du combustible). Il existe un consensus général sur le fait que les centres de stockage en couche géologique profonde (CSP) offrent la meilleure solution à cet égard. La principale différence entre les CSP requis pour les différentes options d'aval du cycle sera leur taille relative. Sous l'égide de plusieurs programmes nationaux, des progrès importants ont été réalisés dans le déploiement de CSP pour le stockage des DHA et du CNU. Les conditions favorables au

* Mme Maria-Elena Urso (mariaelena.urso@oecd.org) et M. Alexey Lokhov (alexey.lokhov@oecd.org) sont administrateurs au sein de la Division du développement de l'énergie nucléaire. M. Ron Cameron (ron.cameron@oecd.org) est Chef de la Division du développement de l'énergie nucléaire de l'AEN.

déploiement d'un CSP incluent la maturité de l'industrie nationale, la pérennité des politiques sur le long terme et l'importance particulière accordée aux partenariats avec les communes dans la mise en œuvre des stratégies. Dans certains pays, des approches graduelles favorisant les partenariats avec les communes d'importation potentielles ont abouti à une meilleure acceptation du public.

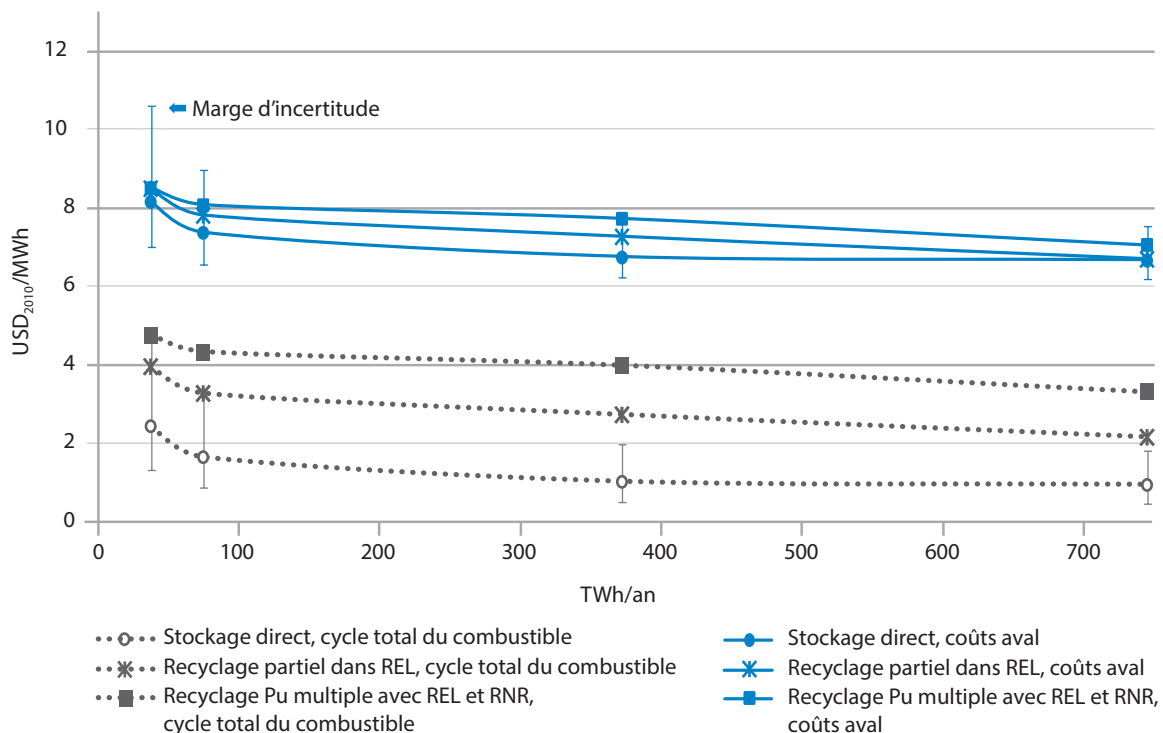
Financement et calcul des coûts

Les dépenses étant réparties sur de longues périodes et encourues en grande partie longtemps après l'arrêt de la production d'électricité et des revenus qu'elle génère, les frais de stockage constituent des engagements financiers pour l'avenir. Il est donc important que les dispositions financières appropriées soient prises et que l'accumulation de fonds adéquats et disponibles pour la mise en œuvre de la stratégie d'aval choisie soit poursuivie avec soin. Les évaluations des coûts pour la gestion du combustible usé et des déchets radioactifs provenant du cycle du combustible civil sont essentielles pour déterminer l'ampleur de ces engagements et garantir leur financement. Les estimations de coûts pour les futures installations, y compris les CSP, sont soumises à de nombreuses incertitudes, qui ne pourront être réduites que par l'expérience acquise

dans la mise en œuvre de ces infrastructures. Naturellement, les incertitudes les plus grandes sont celles qui concernent les coûts de l'option de recyclage complet, car cette stratégie est la plus éloignée de la commercialisation.

La plupart des pays réalisent des évaluations des coûts de gestion du GNU et des DHA, englobant les différentes étapes de l'aval du cycle (entreposage, conditionnement, transport) dans le but de définir et vérifier le statut des dispositions financières requises pour couvrir ces frais. Afin de vérifier l'adéquation des fonds dans le temps et de prendre en compte d'éventuels changements, les estimations de coûts et les exigences de financement sont généralement mises à jour à intervalles réguliers, en tenant compte des nouvelles connaissances techniques et des développements réels des fonds. Par ailleurs, afin de garantir la disponibilité des fonds, le cantonnement est indispensable pour que les ressources accumulées soient utilisées exclusivement aux fins prévues. La séparation des fonds est mise en œuvre par la plupart des pays (mais pas par tous) dans leurs législations nationales. Certains systèmes de financement intègrent également d'autres fonctions pour minimiser les risques ; à titre d'exemple, des cautions et des garanties peuvent être demandées aux opérateurs nucléaires pour assurer une protection contre les événements non prévus.

Figure 1 : Coûts moyens actualisés totaux du cycle du combustible et de l'aval pour différents parcs de réacteurs et stratégies, avec un taux d'actualisation de 3 %*



* Les marges d'incertitude sont tracées uniquement pour le cas du stockage direct. Des marges d'incertitude similaires s'appliquent aux autres options.

Source : *The Economics of the Back End of the Nuclear Fuel Cycle* (2013).

Analyse théorique des coûts pour les stratégies de gestion du CNU choisies

En raison des différences entre les évaluations individuelles, il n'a pas semblé possible, dans le cadre de cette étude, de procéder à une comparaison quantitative des coûts de gestion du CNU dans les différents pays. Ces variations sont imputables à des facteurs disparates, notamment aux types et quantités de CNU/DHA (et autres déchets radioactifs, qui sont parfois stockés dans les mêmes CSP) à traiter, aux particularités des cadres réglementaires et juridiques nationaux, aux différentes technologies concernées, ainsi qu'aux différentes hypothèses et façon de ventiler les coûts dans les estimations. Ainsi, plutôt que de se lancer dans des comparaisons directes des évaluations de coûts nationales, il a été décidé de réaliser les simulations de trois cas génériques théoriques pour les systèmes idéalisés, non liées à un pays particulier, à partir des informations fournies sur les coûts.

L'analyse inclut le stockage direct du combustible nucléaire usé, le recyclage partiel dans les réacteurs à eau légère et le recyclage multiple du plutonium dans une configuration symbiotique de réacteurs à eau légère et rapides. Des calculs ont été effectués pour les différents taux d'actualisation afin de déterminer les principaux facteurs de coûts et, à travers des analyses de sensibilité, de mettre en évidence les impacts des paramètres économiques clés ainsi que les variations et les incertitudes importantes. Les pays membres ont fourni les données d'entrée fondamentales sur les coûts en capital, les coûts d'exploitation et de maintenance des différentes installations de l'aval du cycle. Les principaux résultats incluent les coûts moyens actualisés totaux du cycle du combustible et leur composition, avec une attention particulière accordée aux composants de l'aval du cycle (voir Figure 1 pour le taux d'actualisation de 3 %). Il convient d'observer, cependant, que l'évaluation menée ne peut pas être simplement transposée dans un contexte national spécifique, car cela nécessiterait une analyse des coûts plus détaillée et mieux adaptée. L'exemple de ventilation des coûts du cycle du combustible pour les trois stratégies présenté dans la Figure 2 concerne un parc générant 75 TWh/an à un taux d'actualisation de 3 %.

Les résultats de cette analyse théorique montrent que les coûts calculés pour l'option cycle du combustible ouvert sont inférieurs à ceux des autres options idéalisées évaluées. Les différences entre les trois options concernant la partie consacrée à la totalité du cycle du combustible dans les coûts moyens actualisés de l'électricité restent cependant dans les marges d'incertitude. Pour les options de recyclage, les surcoûts du retraitement sont en partie compensés par les économies réalisées sur les coûts du combustible en amont. Les différences sont plus visibles si la composante aval du coût du cycle du combustible est prise séparément, dans la mesure où les effets de compensation ne sont pas pris en considération.

Il est important de souligner que pour toutes les options évaluées, la partie du coût du cycle du combustible associée à la gestion du CNU représente une part relativement faible des coûts moyens actualisés totaux de production d'électricité. Ces différences pourraient cependant se traduire par des coûts absolus élevés suivant l'ampleur du programme nucléaire et la période de production d'électricité.

Les analyses de sensibilité montrent que dans les trois stratégies, le coût total du cycle de combustible est plus sensible au coût du combustible UOX frais, qui englobe le prix de l'uranium naturel et les services d'enrichissement. Les autres facteurs déterminants incluent les coûts de l'entreposage et des centres de stockage en couche géologique profonde dans la stratégie de stockage direct (bien qu'une augmentation de 50 % des coûts du stockage en couche géologique profonde, qui, en termes absolus, correspondrait à une somme conséquente pour les programmes d'énergie nucléaire importants, n'entraînerait qu'un faible pourcentage d'augmentation des coûts totaux du cycle du combustible), le coût du retraitement dans les deux stratégies de recyclage et le surcoût des réacteurs à neutrons rapides¹ (RNR) pour l'option de recyclage multiple du plutonium.

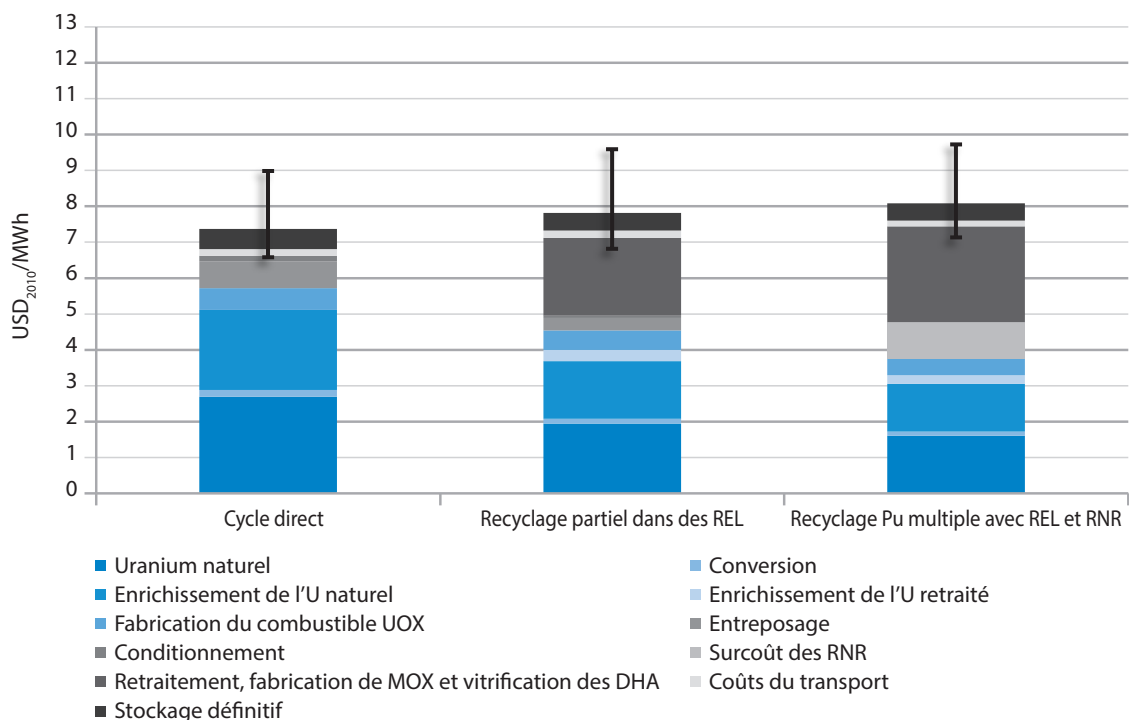
Les options avancées pour le traitement du CNU seraient économiquement avantageuses uniquement si les prix du combustible UOX étaient nettement plus élevés qu'ils ne le sont actuellement et si les surcoûts des réacteurs rapides étaient faibles.

Au-delà des considérations économiques, toute décision sociopolitique informée dans ce domaine doit également prendre en compte une évaluation complète des facteurs qualitatifs. Les différents facteurs qualitatifs qui entrent en ligne de compte dans la sélection des stratégies d'aval du cycle englobent les questions politiques, telle la sécurité de l'approvisionnement et la non-prolifération, les questions d'ordre administratif, social ou qui concernent les institutions gouvernementales, telles que la réglementation, la sûreté, les attitudes du public et le transport de matières, ainsi que des aspects plus techniques, tels que la protection environnementale, la réversibilité, la production de déchets et les futures avancées technologiques.

L'influence de ces facteurs non quantitatifs est également abordée dans le document intitulé *The Economics of the Back End of the Nuclear Fuel Cycle*. Leur importance relative est intrinsèquement liée aux contextes nationaux spécifiques et elle est susceptible d'évoluer au fil du temps, différents facteurs pouvant prendre le pas sur les autres selon les pays.

D'après les conclusions tirées des analyses et des informations fournies, bien qu'il puisse exister des raisons pour prolonger l'entreposage du CNU (une étape nécessaire dans l'aval de tout cycle du combustible), cela ne doit pas empêcher les gouvernements de poursuivre les efforts

Figure 2 : Ventilation des coûts du cycle de combustible pour différentes stratégies, pour un parc générant 75 TWh/an, dans le scénario de base (taux d'actualisation de 3 %)



Note : Les valeurs moyennes représentent les résultats du scénario de base et les barres d'erreur correspondent aux scénarios des coûts faibles et élevés.

Source : *The Economics of the Back End of the Nuclear Fuel Cycle* (2013).

soutenus pour établir des stockages géologiques en profondeur, et ainsi répondre aux attentes légitimes du public et satisfaire au principe « d'équité intergénérationnelle ». Dans ce processus et dans l'établissement et la mise en œuvre de la stratégie de gestion du CNU, l'implication du public est considérée comme vitale.

Les gouvernements devraient également rester vigilants en veillant à ce que les systèmes de financement adoptés soient stables et robustes, et à ce que les ressources financières accumulées soient adéquates. Les fonctions essentielles incluent le cantonnement des fonds et des revues régulières et fréquentes pour permettre l'intégration des nouvelles connaissances et des nouveaux développements, ainsi que la prise en compte rapide des lacunes qui peuvent être identifiées.

Pour les pays engagés dans l'utilisation continue ou le développement de l'énergie nucléaire, les comparaisons de coûts entre les différentes stratégies de gestion de l'aval du cycle devraient être établies sur la base du coût de l'ensemble du cycle du combustible. Pour les pays qui sont déjà sortis du nucléaire ou qui abandonnent progressivement ce type d'énergie, une comparaison directe des coûts d'aval serait plus appropriée. Dans tous les cas, les évaluations réalisées pour comparer les coûts du cycle du combustible, totaux ou partiels, doivent être transparentes quant à leurs hypothèses et leur champ d'application.

Dans tout processus de prise de décision sur les stratégies de gestion du CNU, il faudrait adopter, au niveau national, une approche multicritères qui élargisse les considérations économiques quantitatives pour inclure les facteurs qualitatifs qui exercent une influence considérable (voire déterminante).

Étant donné le rôle potentiel qu'ils peuvent jouer pour améliorer la viabilité à long terme de l'énergie nucléaire, la R-D sur les systèmes nucléaires avancés devrait être soutenue par les gouvernements, surtout lorsque les problèmes de l'approvisionnement en combustible à long terme et de la réduction des volumes des déchets sont particulièrement aigus. D'autres analyses techniques et des coûts seraient utiles pour réduire les incertitudes sur les coûts de leur mise en œuvre.

La coopération internationale et le partage d'expérience pour une mise en œuvre sûre, fiable et économique des stratégies d'aval devraient se poursuivre et être encouragés, y compris le partage des installations et de l'infrastructure du cycle du combustible, au bénéfice, notamment, des pays avec de petits programmes nucléaires.

Note

1. Il est probable que les réacteurs rapides soient plus chers que les réacteurs à eau légère, et donc un surcoût pour leur construction et opération a été introduit. Ce coût supplémentaire est attribué au composant de l'aval du cycle car, dans la stratégie du recyclage Pu multiple avec REL et RNR, les RNR sont considérés comme un moyen de gérer les CNU.

Le rôle du GIF dans le développement des technologies nucléaires futures

par J. Kelly, T. Dujardin et H. Paillère*

Le développement des premières technologies nucléaires de générations I et II a souvent été le résultat soit de programmes de recherche nationaux mis en œuvre par les industries nationales, soit de transferts de technologie d'entreprises pionnières américaines comme Westinghouse, General Electric ou Combustion Engineering. Le développement des réacteurs de génération III dans les années 1980 et 1990 a largement bénéficié de la collaboration internationale des partenaires industriels, par exemple le réacteur avancé à eau bouillante (ABWR) développé par General Electric, Hitachi et Toshiba, ou l'*European Pressure Reactor* (EPR) développé par Framatome (qui fait désormais partie d'Areva) et Siemens. Les travaux menés par les organisations de recherche qui collaborent sur des sujets tels que la gestion des accidents graves ont également contribué à ces avancements. Dans le cadre des technologies de génération IV, un degré de coopération encore plus élevé a été établi entre les gouvernements par le biais du Forum international génération IV (GIF).

Le GIF a été mis en place au début des années 2000 à l'initiative du Département de l'Énergie des États-Unis. Le rôle du GIF est de faire avancer la recherche et le développement en matière de conception des futurs systèmes d'énergie nucléaire. Ces systèmes comprennent les réacteurs rapides refroidis au sodium (RNR-Na), au plomb (RNR-Pb), au gaz (RNR-G) ; les réacteurs à très haute température (RTHT) ; les réacteurs refroidis à l'eau supercritique (RESC) et les réacteurs à sels fondus (RSF). L'un des avantages les plus immédiats de cette collaboration internationale est le partage des résultats de recherche entre les signataires des accords relatifs à chacun des systèmes, et un meilleur échange d'informations. Mais les travaux sur le développement des concepts bénéficient également des discussions qui ont lieu entre les scientifiques et les ingénieurs ayant des formations et des expériences différentes.

L'amélioration de la sûreté est l'un des critères de conception majeurs des réacteurs de génération IV, rendu d'autant plus important par l'accident récent de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi. C'est la raison pour laquelle le GIF a mis en place une force de travail spéciale pour développer les « critères de sûreté », qui sont essentiellement des exigences de sûreté indépendantes de la conception et des options proposées par les développeurs de technologie. Le GIF est actuellement en attente de retour d'expérience de la part des autorités de sûreté pour discuter de l'applicabilité, dans les futures activités d'autorisation, de la première version des critères

développés pour la technologie utilisée dans les réacteurs rapides refroidis au sodium. L'amélioration des aspects économiques est également un centre d'intérêt essentiel pour le GIF. Un groupe de travail spécifique a été mis en place très tôt pour développer des méthodes et des outils d'évaluation économique.

Avec plus de 300 responsables R-D issus de 8 pays (Canada, Chine, États-Unis, Fédération de Russie, France, Japon, République de Corée et Suisse), avec l'implication directe de l'UE dans la gestion des activités du GIF – et avec au moins dix fois plus d'ingénieurs et de scientifiques travaillant sur les projets de R-D relatifs au GIF – le forum rassemble les moyens pour faire face aux défis techniques que représente le développement de la nouvelle génération de réacteurs. Cependant, le développement technologique seul ne suffira pas à garantir le succès de ces efforts. M. John Kelly, du Département de l'Énergie des États-Unis, et M. Yutaka Sagayama de la *Japan Atomic Energy Agency* (JAEA), respectivement nouveau et ancien président du comité directeur du GIF (« le comité stratégique »), ont tous deux œuvré pour améliorer le niveau de collaboration au sein du GIF ainsi qu'avec d'autres organisations et initiatives internationales. C'est l'une des clés du succès de GIF.

Le GIF se tourne aussi vers l'industrie et travaille plus étroitement avec elle, notamment à travers l'amélioration des échanges d'informations avec le *Senior Industrial Advisory Panel*. Le GIF souhaite également établir une meilleure communication avec le public et plus particulièrement avec les jeunes générations. Cela implique d'apporter des informations factuelles sur les objectifs et les réalisations du GIF et de fournir du matériel pédagogique pour aider les chercheurs intéressés dans les systèmes de génération IV. Atteindre ces objectifs sera la preuve, devant les gouvernements soutenant cette initiative, que le GIF a réussi à gérer efficacement les ressources et à réaliser des progrès techniques. Ce point est particulièrement important, dans la mesure où ce sont les gouvernements et l'industrie qui recueilleront les

* M. John Kelly, Président du Forum international génération IV, est Vice-secrétaire d'État adjoint des technologies de réacteur nucléaire au sein du Département de l'Énergie des États-Unis. M. Thierry Dujardin (thierry.dujardin@oecd.org) est Directeur général adjoint de l'AEN et Directeur adjoint Sciences et Développement. M. Henri Paillère (henri.paillere@oecd.org) occupe les fonctions d'analyste énergie nucléaire au sein de la Division du développement nucléaire.

Arrangements de système (AS) et des protocoles d'accord (MOU)

Système		Signataires
RNR-G (réacteur à neutrons rapides à caloporteur gaz)	AS	Euratom, France, Japon, Suisse (2006)
RESC (réacteur refroidi à l'eau supercritique)	AS	Canada, Euratom (2006), Japon (2007), Russie (2011)
RNR-Na (réacteur à neutrons rapides à caloporteur sodium)	AS	Corée, États-Unis, Euratom, France, Japon (2006), Chine (2008), Russie (2010)
RTHT (réacteur à très haute température)	AS	Corée, États-Unis, Euratom, France, Japon, Suisse (2006), Chine (2008),
RNR-Pb (réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb)	MOU	Euratom, Japon (2010), Russie (2011)
RSF (réacteur à sels fondus)	MOU	Euratom, France (2010), Russie (2013)

Arrangements de projet (AP)

Système	Status	Signataires
RNR-G Concept et sûreté	Effectif depuis décembre 2009	Euratom, France, Suisse
RESC Thermohydraulique et sûreté	Effectif depuis octobre 2009	Canada, Euratom, Japon
RESC Matériaux et chimie	Effectif depuis décembre 2010	Canada, Euratom, Japon
RNR-Na Combustible avancé	Effectif depuis mars 2007	Corée, États-Unis, Euratom, France, Japon
RNR-Na <i>Global Actinide Cycle International Demonstration</i> (GACID)	Effectif depuis septembre 2007	États-Unis, France, Japon
RNR-Na Conception des composants et BOP	Effectif depuis octobre 2007	Corée, États-Unis, France, Japon
RNR-Na Sûreté et exploitation	Effectif depuis juin 2009. Nouveau AP signé en novembre 2012 avec trois nouveaux partenaires : CIAE (Chine), JRC (Euratom) et Rosatom (Russie)	Chine, Corée, États-Unis, Euratom, France, Japon, Russie
RNR-Na Intégration et évaluation des systèmes	Processus de signature en cours	Chine, Corée, États-Unis, Euratom, France, Japon, Russie
RTHT Matériaux	Effectif depuis avril 2010	Corée, États-Unis, Euratom, France, Japon, Suisse
RTHT Combustible et cycle du combustible	Effectif depuis janvier 2008	Corée, États-Unis, Euratom, France, Japon
RTHT Production d'hydrogène	Effectif depuis mars 2008	Canada, Corée, États-Unis, Euratom, France, Japon

résultats des activités de recherche du GIF et lanceront des activités qui demandent plus de ressources, comme le développement et les essais de prototypes.

Actuellement, le GIF met également à jour sa feuille de route technologique (*Technology Roadmap*). La mise à jour de la version 2002, à paraître prochainement, intégrera les progrès techniques réalisés à ce jour et prendra en compte les initiatives nationales qui visent à accélérer la phase de démonstration de plusieurs technologies. Ainsi, un état des lieux plus clair du développement des technologies de génération IV sera désormais disponible en termes de viabilité (test des concepts basiques et résolution des problèmes technologiques critiques) et de performance (test des processus et des matériaux au niveau ingénierie). D'après la dernière version de cette feuille de route, la démonstration des

réacteurs rapides refroidis par des métaux liquides, comme les RNR-Pb et les RNR-Na, devrait être prête au début des années 2020. Le déploiement industriel des réacteurs de génération IV pourrait démarrer dix ans plus tard, selon les conditions du marché et l'adéquation de cette offre par rapport aux besoins des électriciens.

Plus de dix ans après l'établissement du GIF, les travaux de développement de la dernière génération des technologies nucléaires progressent bien au sein du cadre collaboratif unique que propose le Forum. Contrairement aux précédentes générations de réacteurs, les systèmes de génération IV auront pu bénéficier de la collaboration internationale dès les premières étapes de la conception, et leur déploiement futur sera le témoin du succès de l'initiative GIF.

Trente ans de renforcement de la confiance dans les calculs thermodynamiques

par J. Perrone*

Lancé en 1984, le Projet de base de données thermodynamiques sur les espèces chimiques (TDB) est une activité menée conjointement par la Banque de données et la Division de la protection radiologique et de la gestion des déchets radioactifs de l'AEN. Son lancement fait suite à l'identification par la communauté de gestion des déchets radioactifs du besoin d'augmenter la confiance dans les calculs thermodynamiques au sein des pays membres de l'AEN. L'objectif premier de ce projet est de fournir des constantes de thermodynamique chimique qui répondent aux exigences de qualité décrites dans l'évaluation de sûreté relative aux stockages souterrains de déchets radioactifs.

Pour évaluer la sûreté d'un stockage de déchets radioactifs, il est essentiel de comprendre le comportement géochimique de ses composants. En effet, l'interaction des radionucléides avec les revêtements et surfaces des roches, ou la formation de composés insolubles, peut fortement entraver la migration des radionucléides dans l'environnement. La modélisation des processus affectant le comportement des radionucléides dans les systèmes naturels et les barrières ouvragées fait par conséquent partie intégrante de la méthodologie d'évaluation radiologique. Certaines informations basiques s'acquièrent par des calculs de spéciation utilisant des données de thermodynamique chimique générale, non spécifiques au site. La possibilité d'utiliser les résultats de la modélisation géochimique comme outil prévisionnel dépend de la qualité des données thermodynamiques utilisées pour calculer la spéciation chimique.

Pour être utile aux travaux d'évaluation des performances, une base de données thermo-chimiques ne doit pas uniquement contenir des données relatives à tous les éléments d'intérêt des systèmes de stockage des déchets radioactifs. Elle doit également traiter toutes les espèces solides et aqueuses relatives aux éléments concernés, expliquer pourquoi et comment les données ont été sélectionnées, consigner les sources des données expérimentales utilisées et avoir une cohérence interne.

Bien qu'un certain nombre de compilations et d'examen des données thermodynamiques aient été publiés au milieu des années 1980, aucun d'entre eux ne remplit l'ensemble des précédents critères ni ne pourrait être utilisé fiablement comme une source complète de données. En particulier, la documentation relative au mode et au motif de sélection de données spécifiques a souvent été omise.

Il est également courant de trouver des bases de données thermo-chimiques spécialisées, mais destinées à des utilisations assez différentes, comme la modélisation géochimique générale dans des conditions hydrothermiques ou les simulations, métallurgiques ou autres. En conséquence, la plupart des groupes de recherche soutenant l'évaluation des performances relatives au stockage des déchets radioactifs utilisent leurs propres bases de données pour la modélisation. Ces bases individuelles sont cependant susceptibles de manquer de cohérence et, en outre, elles diffèrent souvent considérablement, particulièrement en ce qui concerne les données sur les actinides. Il n'est donc pas surprenant que la spéciation des radionucléides ainsi que les solubilités maximales calculées par différents groupes avec différents codes de calcul et données géochimiques, dans des conditions similaires, puissent différer de plusieurs ordres de grandeur. Ces écarts ont été attribués aux lacunes des différentes bases de données plus qu'aux codes de calcul eux-mêmes.

Pendant la période allant de 1984 à 1998, une base de données thermodynamiques complète, cohérente et largement reconnue, soumise à un examen critique, a été développée pour cinq éléments : l'uranium, l'américium, le technétium, le neptunium et le plutonium. Cette première du Projet TDB a établi de nouvelles normes pour l'examen critique des données thermodynamiques chimiques à l'aide de la coopération internationale. Le cadre et les normes hautement scientifiques ont été appréciés par la communauté de stockage des déchets radioactifs car les objectifs avaient été convenus sur la base des besoins de plusieurs programmes nationaux. Ils ont été poursuivis par des équipes de scientifiques indépendants issus d'universités et de laboratoires de recherche sous la coordination de l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire.

La seconde phase, commencée en 1998, a été conçue pour répondre aux besoins ultérieurs des programmes de gestion des déchets radioactifs en mettant à jour et en appliquant la méthodologie à de nouveaux éléments. Depuis le démarrage de la Phase II, le Projet TDB s'organise en semi-autonomie sous la direction d'un conseil de gestion, dont les

* Mme Jane Perrone (tdb@oecd-nea.org) était Administratrice en charge du Projet TDB pour la Banque de données de l'AEN lors de la rédaction.

membres représentent les 17 organisations participantes issues de 13 pays membres de l'AEN¹. Les objectifs du projet ont été définis par le comité de gestion, prenant en compte la mobilité, la radioactivité, l'inventaire et les périodes des nucléides les plus présents dans les déchets radioactifs ainsi que les domaines d'intérêt spécifiques des participants. La Banque de données de l'AEN coordonne les travaux des équipes d'examen, garantit la publication des rapports relatifs aux examens² et maintient la base de données correspondante. L'activité principale du projet consiste à identifier et à réaliser un examen critique de toute la littérature publiée par les équipes d'experts internationalement reconnues, en suivant un ensemble de lignes directrices détaillant les aspects organisationnels et scientifiques du projet.

La première étape de la procédure d'examen consiste à compiler toutes les données publiées dans la littérature scientifique sur le sujet. Les examens du Projet TDB ne prennent en compte que les données expérimentales primaires et n'ont pas pour objectif de remplir par des estimations les vides de la base de données thermodynamiques. Au contraire, les régions nécessitant des investigations expérimentales supplémentaires sont indiquées dans les rapports. Ces derniers sont revus indépendamment par des experts qualifiés (pairs examinateurs) pour apprécier les jugements et les évaluations faits par les premiers examinateurs, pour vérifier les hypothèses, résultats et conclusions des rapports et si la littérature pertinente a suffisamment été prise en compte. Pour chacun des éléments, les jeux de données et le mode de sélection sont publiés sous le nom des examinateurs correspondants.

Les résultats des examens du Projet TDB de l'AEN incluent non seulement une base de données des valeurs thermodynamiques sélectionnées mais également une discussion détaillée sur les sources des données clés, une présentation des réévaluations réalisées par les examinateurs et l'ensemble complet de toutes les données auxiliaires utilisées au cours de l'évaluation, ainsi qu'une bibliographie exhaustive.

Cette documentation constitue une véritable base de connaissances. Elle permet aux modélisateurs de réaliser des calculs géochimiques sur la base d'informations chimiques sûres et mises à jour concernant des systèmes impliquant un grand nombre de composés aqueux et des solides à solubilité limitée. C'est également un excellent vecteur pour le transfert des connaissances entre deux communautés, par exemple entre celle développant de nouvelles données thermodynamiques – que ce soit par des expériences directes en laboratoire ou en participant aux examens des équipes TDB – et celle modélisant et analysant les données de terrain.

Le Projet TDB est actuellement dans sa quatrième phase, la cinquième étant convenue par les participants pour durer quatre ans à partir de janvier 2014. Onze examens officiels ont été publiés sur les espèces inorganiques d'actinides (uranium, nep-

tunium, plutonium, américium et thorium) et sur certains éléments importants comme les produits d'activation ou de fission (technétium, sélénium, nickel, zirconium et étain), ainsi que sur les composés et complexes de ces éléments avec des ligands organiques sélectionnés. Les données correspondantes sélectionnées sont téléchargeables sur le site internet de l'AEN. Cette série de publications comprend des livres supplémentaires dont l'objectif est différent de celui des livres relatifs aux examens. Ils peuvent également servir de guides (*Modelling in Aquatic Chemistry*, 1994) ou de rapports sur l'état des connaissances (*Chemical Thermodynamics of Solid Solutions of Interest in Nuclear Waste Management*, 2007). Un volume sur les composés et complexes aqueux du fer sera publié très bientôt, et trois examens supplémentaires ainsi que deux rapports sur l'état des connaissances sont en cours de préparation.

Environ 60 scientifiques internationalement reconnus ont été ou sont actuellement impliqués dans cet effort, qui, à ce jour, a entraîné l'examen critique de plus de 18 000 références écrites – la plus ancienne datant de 1796 – issues des travaux de plus de 12 000 scientifiques.

Avec presque 30 ans d'existence, le Projet TDB de l'AEN a développé un cadre collaboratif international fructueux dans lequel le besoin d'examen des données thermodynamiques chimiques sur le stockage des déchets radioactifs a pu être réalisé grâce au travail conjoint des experts. Ce travail est conduit avec la qualité scientifique pour seul critère, et il est soumis à l'examen des pairs qui garantit son excellence. La base de données TDB de l'AEN et les examens associés sont disponibles pour le grand public et sont reconnus à la fois dans et hors de la communauté de gestion des déchets radioactifs. Dans cette communauté, ces examens sont reconnus comme une source de données thermodynamiques de référence ainsi qu'un guide pour les futurs travaux de recherche. Ils contribuent également à améliorer la confiance dans les exercices d'évaluation des performances.

Notes

1. Les participants du Projet TDB sont, notamment : NIRAS/ONDRAF (Belgique), NWMO (Canada), RAWRA (République tchèque), POSIVA (Finlande), ANDRA (France), CEA (France), KIT (Allemagne), KAERI (République de Corée), JAEA (Japon), ENRESA (Espagne), SKB (Suède), NAGRA (Suisse), PSI (Suisse), ENSI (Suisse), NDA (Royaume-Uni), DOE-NE et DOE-EM (États-Unis). Pour accéder aux lignes directrices du projet, voir www.oecd-nea.org/dbtdb/guidelines/.
2. Pour plus d'informations sur les publications du projet relatif à la base de données thermodynamiques (TDB), voir www.oecd-nea.org/dbtdb/info/publications.

JANIS – Améliorations des services de données nucléaires

par E. Dupont, N. Soppera et M. Bossant*

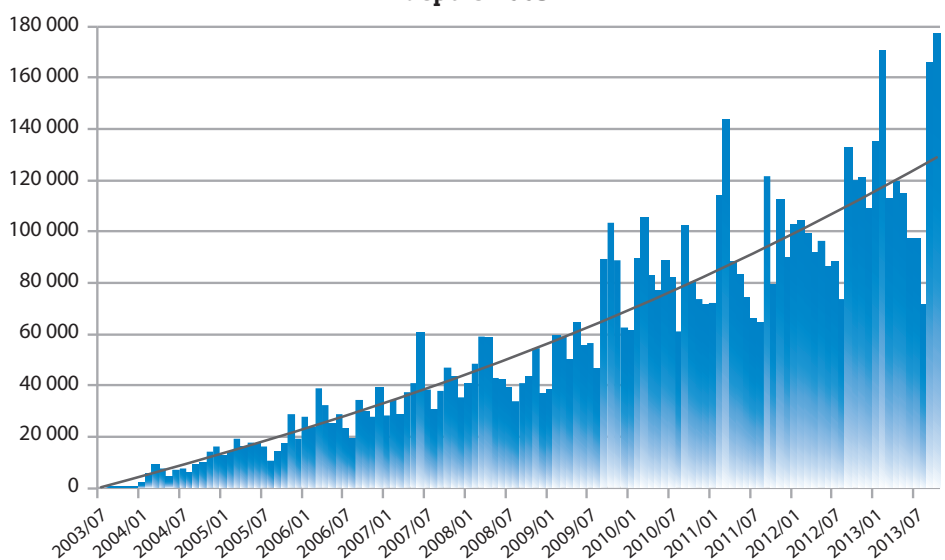
Les données nucléaires et les incertitudes associées sont des éléments clés des outils nucléaires employés pour l'analyse et la prédiction des phénomènes dans le secteur nucléaire. Ces données couvrent à la fois les propriétés des noyaux radioactifs et la description des réactions nucléaires. La compilation et la diffusion des données nucléaires sont supervisées par le réseau international de centres de données sur les réactions nucléaires (NRDC, *International Network of Nuclear Reaction Data Centres*). L'ampleur et le degré de détail des bibliothèques de données nucléaires, ainsi que la variété des applications et des utilisateurs finaux ont rendu nécessaire un stockage commode des données dans des formats internationaux normalisés, tels le format ENDF (*Evaluated Nuclear Data Format*) pour les données évaluées et le format EXFOR (*Exchange Format*) pour les travaux expérimentaux. La Banque de données de l'AEN, membre du réseau NRDC, gère et développe de vastes bases de données relationnelles et des outils conviviaux pour accéder aux données nucléaires et les manipuler indépendamment du format de stockage. Le logiciel d'informations nucléaires Java (JANIS) a été élaboré afin de faciliter l'accès à distance aux vastes bases de données nucléaires hébergées par la Banque de données de l'AEN. JANIS est devenu un outil populaire parmi les scientifiques et les étudiants, et le nombre d'utilisateurs a augmenté

régulièrement au fil des ans. La Figure 1 illustre l'évolution de l'accès à la base de données distante, qui est aujourd'hui interrogée plus de 120 000 fois par mois. Les derniers développements de JANIS sont décrits ci-dessous, notamment la récente extension Web, qui est maintenant la base pour les services de données nucléaires en ligne de la Banque de données.

Caractéristiques générales de JANIS

JANIS a été conçu dès le début comme un logiciel convivial. Le programme principal est une application autonome qui permet d'accéder directement aux bases de données distantes et locales, ainsi qu'aux données utilisateur. La base de données distante est disponible sur le serveur de la Banque de données de l'AEN à l'aide de la technologie des servlets Java. JANIS offre un accès direct à des données évaluées, expérimentales et bibliographiques. Les principaux formats normalisés pris en charge sont ENDF-6 (et les fichiers dérivés), EXFOR, CINDA (données bibliographiques) et NUBASE (propriétés de base des noyaux). En outre, les données utilisateur fournies dans un simple format texte peuvent être chargées au moyen d'une interface « texte vers données » polyvalente. Ces données peuvent être traitées de la même façon que les données provenant de la base de données principale. Divers outils de navigation

Figure 1 : Nombre de requêtes par mois sur la base de données distante depuis 2003



* MM. Emmeric Dupont (emmeric.dupont@oecd.org), Nicolas Soppera (nicolas.soppera@oecd.org) et Manuel Bossant (manuel.bossant@oecd.org) travaillent pour la Banque de données de l'AEN.

sont disponibles pour aider l'utilisateur à identifier les noyaux et les données qui présentent un intérêt. La fenêtre principale de l'application autonome est un « navigateur » qui donne accès aux données par l'intermédiaire d'une carte des noyaux.

Une autre façon d'accéder aux données et de les comparer consiste à utiliser les puissants outils de recherche qui permettent d'interroger les bases de données. Les données sont affichées dans une fenêtre distincte sur des onglets différents en fonction de la quantité et du mode d'affichage choisis, par exemple : tracé, tableau, texte, chaîne de décroissance ou cartes couleur (matrice). Ces données peuvent être sauvegardées dans différents formats de sortie. Les données tabulées, notamment, peuvent être sauvegardées au format texte pour la commodité de l'utilisateur. Plusieurs options de paramétrage permettent également de préparer des tracés prêts pour la publication dans le format graphique PNG ou dans un format graphique vectoriel (PostScript, PDF ou Windows Metafile). Enfin, il est possible d'enregistrer toutes les données sélectionnées, ainsi que les tracés, les tableaux et les paramètres d'affichage dans un seul fichier XML, qui peut être rouvert ultérieurement par JANIS sur le même ou sur un autre ordinateur.

Carte des noyaux

La fenêtre principale de l'application autonome affiche une carte de tous les noyaux disponibles dans la base de données sélectionnée. Cette carte peut également servir pour afficher d'autres informations : spin-parité, demi-vies, modes de décroissance, ou sections efficaces à 2 200 m/s. Des données supplémentaires sont disponibles en cliquant sur l'isotope voulu.

Outils de recherche

Plusieurs outils de recherche permettent à l'utilisateur d'explorer le contenu des trois bases de données principales. Les résultats de la requête peuvent être affinés et les données sélectionnées affichées en fonction du type de données.

- Données évaluées : recherche par bibliothèque, particule incidente, cible, réaction, type de données (section efficace, spectres). Des outils de recherche plus spécifiques sont disponibles pour récupérer les données évaluées pour les paramètres de résonance et les chaînes de décroissance radioactive.
- Données expérimentales : recherche par particule incidente, énergie, cible, réaction, produit, installation expérimentale, référence bibliographique.
- Données bibliographiques : recherche par particule incidente, énergie, cible, réaction, publication, type de travail (expérimental, théorique ou évalué).

Exemples de données nucléaires de base affichées avec JANIS

JANIS permet à l'utilisateur d'accéder à diverses quantités évaluées et expérimentales. Les données

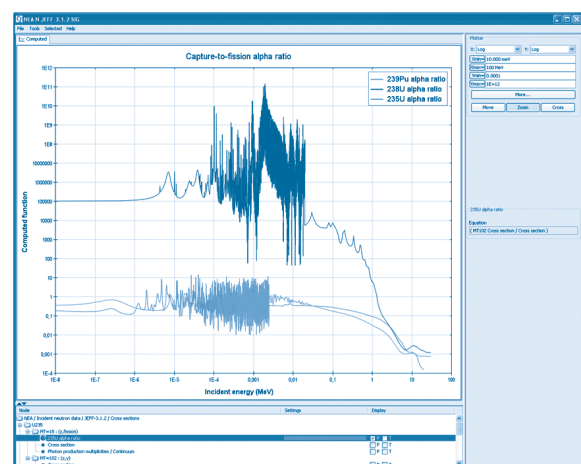
provenant des principaux fichiers d'évaluation (ENDF/B, JEFF, JENDL, ROSFOND/BROND, TENDL) sont affichées et la plupart d'entre elles sont comparées avec les données expérimentales de la base de données EXFOR. Les informations disponibles par l'intermédiaire de JANIS incluent notamment les types de données suivants :

- données de décroissance radioactive et informations de base sur la structure nucléaire, telles les propriétés des noyaux (masse, spin-parité, demi-vies, modes de décroissance), ainsi que les spectres discrets et continus des particules émises ;
- rendements des produits de fission, y compris les rendements indépendants et cumulés pour la fission spontanée et induite par neutrons ;
- sections efficaces, qui incluent les sections efficaces intégrales ou différentielles (en énergie) et doubles différentielles (en énergie et en angle), avec les paramètres de résonance ;
- multiplicités des neutrons et autres particules émises, telles les multiplicités moyennes des neutrons de fission (prompts, retardés), ainsi que la multiplicité gamma moyenne en fonction de l'énergie incidente ;
- distributions en angle, en énergie ou en énergie-angle, qui sont des distributions normalisées des particules émises en fonction de leur énergie ou de leur angle ;
- données sur la production de photons, par exemple, sections efficaces de production spécifiques d'un rayonnement gamma donné dans un ou plusieurs processus de réaction ;
- incertitudes des données nucléaires et matrices de corrélation associées.

Exemples de manipulation de données avec JANIS

L'application autonome inclut des fonctionnalités avancées pour la comparaison et le calcul de différents types de jeux de données (voir Figure 2).

Figure 2 : Calcul du rapport des sections efficaces de capture et de fission de ^{235}U , ^{238}U et ^{239}Pu à l'aide de l'éditeur d'équation



Les fonctionnalités peuvent inclure le calcul de sections efficaces moyennes multi-groupes avec des flux de pondération différents (constants, Maxwell, spectres de réacteur et définis par l'utilisateur), des opérations arithmétiques de base (+, -, ×, /) sur la plupart des données évaluées ponctuelles ou moyennées par groupes (sections efficaces, rendements et distribution en énergie et/ou angle de la particule émise) ou des comparaisons de données expérimentales et évaluées. Cet outil permet d'effectuer une comparaison complète entre les bibliothèques de données évaluées pour une réaction donnée, ainsi qu'une comparaison automatique entre les données expérimentales et les données évaluées. Dans ce dernier cas, l'outil, en se servant des capacités de calcul intégrées, exécute toutes les opérations requises pour adapter les données évaluées à la quantité expérimentale comparée (moyenne de Maxwell, rapport).

Les résultats de ces opérations peuvent être affichés, calculés, comparés et enregistrés dans différents formats aussi facilement que les jeux de données d'origine.

JANIS Web

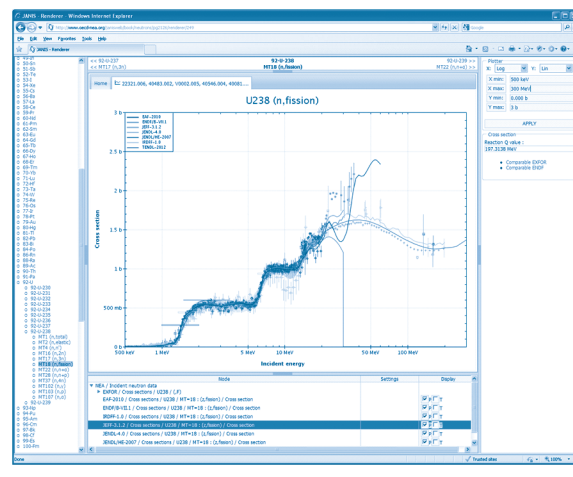
L'extension JANIS Web nécessite uniquement une connexion Internet et un navigateur, sans aucune installation de logiciel. La version Web n'est pas destinée à remplacer la version autonome, mais elle la complète en proposant un accès rapide aux fonctions les plus courantes, par exemple, l'accès direct à la base de données distante, des interfaces de recherche pour interroger les bases de données évaluées, expérimentales et bibliographiques, et l'affichage des données dans différents formats (tracés, tableaux, texte, chaînes de décroissance ou cartes couleur).

JANIS Web constitue désormais la base des services de données nucléaires en ligne de la Banque de données de l'AEN. La fonction de recherche permet à l'utilisateur de parcourir toutes les bases de données et l'interface d'affichage améliorée facilite la comparaison des résultats.

JANIS Books

Les JANIS Books sont une compilation complète de courbes de sections efficaces relatives aux données expérimentales et évaluées d'un certain nombre de bibliothèques, de réactions nucléaires et de produits de réaction associés. Ces ouvrages sont le résultat des derniers développements de JANIS, qui incluent des capacités de calcul intégrées, la comparaison automatique de données expérimentales et évaluées, et un fichier XML pour la sauvegarde des données et des paramètres. Les JANIS Books sont disponibles pour les réactions nucléaires induites par neutrons, photons et particules chargées légères. Les versions en ligne sont basées sur JANIS Web afin que les utilisateurs puissent effectuer des zooms sur les

Figure 3 : Sections efficaces de $^{238}\text{U}(n,f)$ du JANIS Book en ligne



tracés, accéder à des informations complémentaires et tracer des données supplémentaires (voir Figure 3).

Perspectives

JANIS a été développé pour offrir un accès polyvalent et convivial aux bases de données nucléaires locales et distantes. La navigation, l'affichage et les fonctions de calcul conviennent pour les débutants et les utilisateurs expérimentés. Le développement et la récente intégration de JANIS Web et des JANIS Books aux services en ligne de la Banque de données de l'AEN complètent l'application autonome en permettant d'accéder aux données sans installer aucun logiciel.

Des informations plus détaillées sont disponibles sur le site Web de l'AEN : www.oecd-nea.org/janis. Les auteurs de cet article souhaitent remercier les utilisateurs pour leur retour d'expérience, qui est essentiel pour poursuivre l'amélioration de JANIS.

À lire

AEN (2012), « Contributions de l'AEN aux efforts mondiaux de collecte, de compilation et de diffusion de données sur les réactions nucléaires », *AEN Infos*, Volume 30, N° 2, OCDE, Paris.

AEN (2001), « JANIS : un nouveau logiciel de services en données nucléaires », *AEN Infos*, Volume 19, N° 2, OCDE, Paris.

Gestion des connaissances issues des expériences intégrales en neutronique

par I. Hill, F. Michel-Sendis, N. Soppera et M. Bossant*

L'un des principaux objectifs de la Section des sciences nucléaires de l'AEN consiste à soutenir la préservation et la diffusion des connaissances essentielles dans le domaine des sciences nucléaires. Le groupe de travail sur la sûreté-criticité nucléaire (WPNCs) et le groupe de travail sur les aspects scientifiques des réacteurs (WPRS) ont compilé de vastes collections d'expériences intégrales de référence, qui sont disponibles sur demande. L'AEN coordonne l'évaluation et assure la distribution des expériences de référence dans des domaines tels que la sûreté-criticité (ICSBEP), la physique des réacteurs (IRPhE), les performances du combustible (IFPE), la protection contre les rayonnements (SINBAD) et les données des essais sur le combustible nucléaire usé (EGADSNF).




Ces expériences de référence représentent une grande quantité d'informations, le manuel ICSBEP à lui seul contenant plus de 65 000 pages. Les utilisateurs de ces bases de données sont confrontés au défi d'identifier efficacement les informations pertinentes, ainsi que les lacunes dans ces mêmes informations. Pour gérer les données, la Section des sciences nucléaires de l'AEN et la Banque de données travaillent ensemble à la création de bases de données relationnelles et des interfaces utilisateur correspondantes :

- DICE : Base de données pour le projet international d'évaluation d'expériences de sûreté-criticité ;

- IDAT : Base de données et outil d'analyse du projet international d'expériences de physique des réacteurs ;
- SFCOMPO : Base de données sur la composition isotopique du combustible usé.

Une vue d'ensemble des trois bases de données disponibles pour la gestion des connaissances issues des expériences intégrales en neutronique est illustrée dans la figure suivante.

Bases de données relationnelles de l'AEN

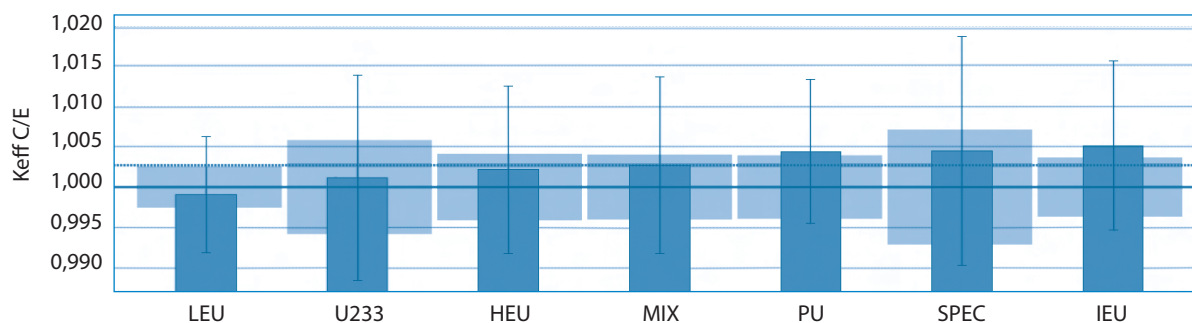
	Base de données : DICE Projet : ICSBEP Date de première diffusion de la base : 2001 Disponibilité de la base de données : DVD, téléchargement, en ligne
	Base de données : IDAT Projet : IRPhE Date de première diffusion de la base : 2013 Disponibilité de la base de données : DVD, téléchargement
	Base de données : WPNCs/EGADSNF Projet : WPNCs/EGADSNF Date de première diffusion de la base : prévue en 2014 Disponibilité de la base de données : site Web et téléchargement (2014)

Sous-ensemble non exhaustif de paramètres pouvant être recherchés

DICE	IDAT	SFCOMPO
Matériau fissile	Nom du réacteur	Nom du réacteur
Forme physique	Type de réacteur	Type de réacteur
Spectre	Type de mesure	Caloporteur
Laboratoire	Laboratoire	Modérateur
Forme de combustible	Combustible	Type de réseau
Rapport Pu/U+Pu	Indice spectral	Dimension du réseau
Modérateur/caloporteur	Type du coefficient de réactivité	Pas entre les crayons
Matériau réflecteur	Paramètre cinétique	Diamètre des crayons
Géométrie	Type de taux de réaction/films	Type de combustible
Keff de référence	Keff de référence	Enrichissement
Énergie de la léthargie moyenne des neutrons provoquant la fission	Incertitudes du keff	Burnup
Flux à 3 groupes	Flux à 3 groupes	Position axiale
Sensibilités du keff à 3 groupes	Sensibilités du keff à 3 groupes	Isotope

* M. Ian Hill (ian.hill@oecd.org) travaille dans la Section des sciences nucléaires. MM. Franco Michel-Sendis (franco.michel-sendis@oecd.org), Nicolas Soppera (nicolas.soppera@oecd.org) et Manuel Bossant (manuel.bossant@oecd.org) travaillent au sein de la Banque de données de l'AEN.

DICE : Le suivi de tendance des keff calculés par rapport aux keff expérimentaux en fonction des données ICSBEP



Au niveau le plus élevé, chaque base de données fonctionne comme un outil avec les mêmes objectifs généraux : rechercher efficacement les données expérimentales pertinentes et visualiser les tendances dans les données expérimentales.

Lancée en 2001, DICE a été le premier des outils de base de données développé par la Banque de données de l'AEN. Le code a été affiné pendant une décennie, puis amélioré pour créer les outils de base de données ultérieurs. DICE a été convertie en un code commun à chaque outil, qui fournit une fonction de recherche (voir le tableau pour des exemples) et une fonction générique pour le tracé et le suivi de tendance des valeurs numériques. En conséquence, les trois progiciels ont la même présentation.

En outre, chaque outil de base de données contient des fonctions personnalisées intégrées au-dessus de la couche commune. Ces caractéristiques personnalisées sont adaptées afin de prendre en charge les demandes de fonctionnalités des utilisateurs, dont certains exemples sont décrits ci-après :

- DICE contient de nombreux champs de classification qui sont nécessaires pour explorer efficacement le nombre global de configurations expérimentales décrites. En 2013, DICE a intégré un outil de recherche basé sur des données de sensibilité à 3 groupes.
- IDAT fournit un affichage graphique des « mesh tallies » de différents codes et autorise la comparaison des flux et des taux de réaction de différents modèles. Une autre fonction personnalisée identifie automatiquement les *benchmarks* similaires en utilisant des paramètres tels que les taux de réaction à 3 groupes et les données du bilan neutronique.
- SFCOMPO propose un affichage graphique personnalisé de l'emplacement des échantillons analysés dans l'assemblage combustible, fournit les données de conception des réacteurs, affiche les informations sur l'historique des opérations et les mesures isotopiques sous forme de graphiques et de tableaux, fournit des liens vers les références bibliographiques des rapports originaux sur les données de mesure et, dans la version actuelle de développement, a intégré des fonctions avancées de représentation graphique.

Les fonctions personnalisées proposées pour une base de données ont ensuite été jugées bénéfiques pour un autre outil. DICE 2013, par exemple, intègre une fonction développée initialement pour IDAT, qui permet d'effectuer le suivi de tendance des valeurs calculées par rapport aux valeurs expérimentales des keff, tout en visualisant en même temps l'incertitude du *benchmark*. Chaque base de données a bénéficié du retour d'expérience interdisciplinaire fourni par de nombreux experts.

Le développement est continu et les bases de données se trouvent à des étapes de développement différentes. DICE a été diffusée initialement sur CD-ROM en 2001 et, à partir de 2013, elle est également disponible publiquement en tant qu'application Web Start. IDAT a été diffusée sur DVD en 2013. SFCOMPO, initialement transférée en 2001 vers la Banque de données de l'AEN par l'Institut japonais de recherches sur l'énergie atomique (JAERI) en tant qu'application Web, subit actuellement une mise à niveau complète et sera restructurée dans une application Java intitulée SFCOMPO 2.0. Dans cette dernière version, le nombre de réacteurs/d'échantillons aura triplé par rapport à la version Web.

Tous ces outils de base de données continueront d'être perfectionnés, tout en offrant aux utilisateurs le moyen de passer au peigne fin l'énorme quantité d'informations expérimentales collectées au sein de la Section des sciences nucléaires et de la Banque de données.

Nouvelles publications

vo = En anglais seulement.

Aspects économiques et techniques du cycle du combustible nucléaire

The Economics of the Back End of the Nuclear Fuel Cycle vo

AEN N° 7061. 188 pages.

The feasibility and costs of spent nuclear fuel management and the consequent disposal of ultimate waste continue to be the subject of public debate in many countries, with particular concern often expressed over the lack of progress in implementing final disposal. Uncertainties about back-end costs and the financial risks associated with management of the back end have also been singled out as possible deterrents to investment in new nuclear power plants. This report offers an appraisal of economic issues and methodologies for the management of spent nuclear fuel and high-level waste from commercial power reactors. It includes a review of different back-end options and current policies and practices, with a focus on the cost estimates for these options and the funding mechanisms in place or under consideration in OECD/NEA countries. A generic economic assessment of high-level estimates of back-end cost impacts on fuel cycle costs is undertaken for selected idealised scenarios, by means of a simple static model. Sensitivity analyses are conducted for the evaluation of uncertainties in major components and the identification of cost drivers. Since factors other than economics are an important part of the decision-making process, an analysis of the influence of key qualitative parameters in the selection of back-end strategies is also presented in this report.

Données sur l'énergie nucléaire 2013/Nuclear Energy Data 2013

AEN N° 7162. 92 pages.

Les *Données sur l'énergie nucléaire*, compilation annuelle de statistiques et de rapports nationaux de l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire, présente la situation de l'énergie nucléaire dans les pays de l'OCDE. Les informations communiquées par les pouvoirs publics des pays membres de l'OCDE comprennent des statistiques sur la puissance nucléaire installée, la production d'électricité totale et nucléaire, les politiques nucléaires, les évolutions du cycle du combustible ainsi que, lorsqu'elles sont disponibles, des projections jusqu'en 2035 de la puissance nucléaire et de la production d'électricité. En 2012, la production totale d'électricité des centrales nucléaires mais aussi la part du nucléaire dans la production d'électricité ont diminué en raison de problèmes d'exploitation rencontrés par certaines installations et de la mise à l'arrêt de tous les réacteurs japonais sauf deux. À l'issue des réexamens de la sûreté entrepris après l'accident de Fukushima Daiichi, la sûreté nucléaire s'est renforcée en 2012. Les pays décidés à conserver le nucléaire dans leur mix énergétique ont avancé dans leurs projets d'augmentation de la puissance nucléaire installée. La Turquie a mis la dernière main au projet de construction de ses quatre premiers réacteurs destinés à la production d'électricité. Le lecteur trouvera de plus amples informations sur ces évolutions et d'autres développements dans les nombreux tableaux, graphiques et rapports nationaux que contient cet ouvrage.

Sûreté et réglementation nucléaires

The Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident: OECD/NEA Nuclear Safety Response and Lessons Learnt vo

AEN N° 7161. 68 pages.

This report outlines the response of the OECD Nuclear Energy Agency (NEA) and its member countries to the March 2011 accident at TEPCO's Fukushima Daiichi nuclear power plant. All NEA members took early action to ensure and confirm the continued safety of their nuclear power plants and the protection of the public. Consistent with its objective of maintaining and further developing the scientific, technological and legal bases for safe nuclear energy, the NEA has assisted its member countries in their individual and collective responses to the accident. It has also provided direct assistance to the relevant authorities in Japan. These actions are summarised in the report along with lessons learnt thus far. Key messages are offered as a means to help strengthen the basis for nuclear safety and its implementation in all countries using nuclear power.

Protection radiologique

Summary of the Fourth International Nuclear Emergency Exercise (INEX-4) ^{VO}

Exercise Conduct and Evaluation Questionnaires

AEN N° 7143. 48 pages.

The International Nuclear Emergency Exercise (INEX) series, organised under the OECD Nuclear Energy Agency (NEA) Working Party on Nuclear Emergency Matters (WPNEM), has proven successful in testing, investigating and improving national and international response arrangements for nuclear accidents and radiological emergencies. Early INEX exercises focused on the national and international aspects of early phase management of nuclear power plant emergencies. Starting with INEX-3 (2005-2006), the international community began looking at issues concerning longer-term consequence management. In 2008, the WPNEM started preparing the INEX-4 series, which was conducted in 2010-2011 and addressed consequence management and transition to recovery in response to malicious acts involving the release of radioactive materials in an urban setting. The goal of INEX-4 was to provide a basis for enhancing emergency management through the exchange of exercise experiences from participating countries and the identification of good practices and common issues. This summary report provides general outcomes based on country responses to the INEX-4 evaluation questionnaire and suggests areas of focus for future consideration.

Législation nucléaire

Bulletin de droit nucléaire n° 91

Volume 2013/1

ISSN N° 0304-3428. 212 pages.

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 sur les développements qui touchent ce droit. 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 : « La réponse à l'accident de Fukushima Daiichi : le rôle de la Convention sur la sûreté nucléaire dans le renforcement du cadre juridique de la sûreté nucléaire » ; « La protection suffisante après Fukushima : l'élément stable d'un monde changeant » ; « Internationaliser davantage pour améliorer la sûreté ? Action concertée contre souveraineté nationale » et ; « Compte-rendu spécial de la Deuxième réunion annuelle de l'Association de droit nucléaire, 'Le secteur de l'énergie nucléaire en Inde : opportunités commerciales et défis juridiques', 2 mars 2013, Mumbai, Inde ».

Sciences nucléaires et Banque de données

Chemical Thermodynamics of Iron ^{VO}

Volume 13a, Part 1

AEN N° 6355. 1 124 pages.

This volume is the 13th in the OECD Nuclear Energy Agency (NEA) «Chemical Thermodynamics» series. It is the first part of a critical review of the thermodynamic properties of iron, its solid compounds and aqueous complexes, initiated as part of the NEA Thermochemical Database Project Phase III (TDB III). The database system developed at the OECD/NEA Data Bank ensures consistency not only within the recommended data sets of iron, but also among all the data sets published in the series. This volume will be of particular interest to scientists carrying out performance assessments of deep geological disposal sites for radioactive waste.

International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments – ICSBEP ^{VO}

Version 2013

AEN N° 7166. DVD.

The Criticality Safety Benchmark Evaluation Project (CSBEP) was initiated in October of 1992 by the United States Department of Energy. The project quickly became an international effort as scientists from other interested countries became involved. The International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project (ICSBEP) became an official activity of the Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) Nuclear Energy Agency (NEA) in 1995. This handbook contains criticality safety benchmark specifications that have been derived from experiments performed at various nuclear critical experiment facilities around the world. The benchmark specifications are intended for use by criticality safety engineers to validate calculational techniques used to establish minimum subcritical margins for operations with fissile material and to determine criticality alarm requirement and placement.

Many of the specifications are also useful for nuclear data testing. Example calculations are presented; however, these calculations do not constitute a validation of the codes or cross section data. The evaluated criticality safety benchmark data are given in nine volumes. These volumes span nearly 66 000 pages and contain 558 evaluations with benchmark specifications for 4 798 critical, near critical or subcritical configurations, 24 criticality alarm placement/shielding configurations with multiple dose points for each and 200 configurations that have been categorised as fundamental physics measurements that are relevant to criticality safety applications. New to the Handbook are benchmark specifications for Critical, Bare, HEU(93.2)-Metal Sphere experiments referred to as ORSphere that were performed by a team of experimenters at Oak Ridge National Laboratory in the early 1970s. A photograph of this assembly is shown on the front cover.

Minor Actinide Burning in Thermal Reactors

A Report by the Working Party on Scientific Issues of Reactor Systems

AEN N° 6997. 82 pages.

This publication provides an introduction to minor actinide nuclear properties and discusses some of the arguments in favour of minor actinide recycling, as well as the potential role of thermal reactors in this regard. Various technical issues and challenges are examined from the fuel cycle, operations, fuel designs, core management and safety/dynamics responses to safety and economics. The focus of this report is on the general conclusions of recent research that could be applied to thermal reactors. Further research and development needs are also considered, with summaries of findings and recommendations for the direction of future R&D efforts.

Shielding Aspects of Accelerators, Targets and Irradiation Facilities – SATIF-11

Workshop Proceedings, Tsukuba, Japan, 11-13 September 2012

AEN N° 7157. 202 pages.

Particle accelerators have evolved over the last decades from simple devices to powerful machines, and are having an increasingly important impact on research, technology and daily life. Today they have a wide range of applications in many areas including material science and medical applications. In recent years, new technological and research applications have helped to define requirements while the number of accelerator facilities in operation, being commissioned, designed or planned has grown significantly. Their parameters, which include the beam energy, currents and intensities, and target composition, can vary widely, giving rise to new radiation shielding aspects and problems. Particle accelerators must be operated in safe ways to protect operators, the public and the environment. As the design and use of these facilities evolve, so must the analytical methods used in the safety analyses. These workshop proceedings review the state of the art in radiation shielding of accelerator facilities and irradiation targets. They also evaluate progress in the development of modelling methods used to assess the effectiveness of such shielding as part of safety analyses.

Status Report on Structural Materials for Advanced Nuclear Systems

AEN N° 6409. 107 pages.

Materials performance is critical to the safe and economic operation of any nuclear system. As the international community pursues the development of Generation IV reactor concepts and accelerator-driven transmutation systems, it will be increasingly necessary to develop advanced materials capable of tolerating the more challenging environments of these new systems. The international community supports numerous materials research programmes, with each country determining its individual focus on a case-by-case basis. In many instances, similar alloys of materials systems are being studied in several countries, providing the opportunity for collaborative and cross-cutting research that benefits different systems. This report is a snapshot of the current materials programmes supporting the development of advanced concepts. The descriptions of the research are grouped by concept, and national programmes are described within each concept. The report provides an overall sense of the importance of materials research worldwide and the opportunities for synergy among the countries represented in this overview.

Transition Towards a Sustainable Nuclear Fuel Cycle

AEN N° 7133. 68 pages.

Future fuel cycle characteristics, feasibility and acceptability will be crucial for the continued development of nuclear energy, especially in the post-Fukushima context. Fuel cycle choices have both long- and short-term impacts, and a holistic assessment of their characteristics, cost and associated safety issues is of paramount importance. This report seeks to associate quantified impacts with foreseeable nuclear energy development in different world regions. It gives initial results in terms of uranium resource availability, fuel cycle facility deployment and reactor types. In particular, the need to achieve short doubling times with future fast reactors is investigated and quantified. The report also provides guidelines for performing future studies to account for a wider range of hypotheses on energy demand growth, different hypotheses regarding uranium resource availability and different types of reactors to be deployed.

Visitez notre site internet :

www.oecd-nea.org

Vous pouvez aussi nous visiter sur **Facebook** à l'adresse

www.facebook.com/OECDNuclearEnergyAgency

et

nous suivre sur **Twitter** @OECD_NEA

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

AEN N° 7170