

AEN Infos

Volume 25, N° 2

Décembre 2007

Table des matières

Faits et opinions

Risques et avantages de l'énergie nucléaire 4

Gestion des matières fissiles et fertiles
recyclables 10

Actualités

Stockage en formations géologiques :
principales observations et leçons 14

Incidences des conditions de financement
et de l'impôt sur les coûts de production
de l'électricité 18

50 ans de radioprotection à l'AEN :
une réussite 24

L'École internationale de droit nucléaire 28

Problème standard international n° 47
sur la thermohydraulique de l'enceinte de
confinement 30

Nouvelles brèves

Progrès du Programme multinational
d'évaluation des conceptions (MDEP) 32

Dernières nouvelles du Forum international
Génération IV (GIF) 34

Projets communs de l'AEN 36

Nouvelles publications 40

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

Secrétariat de rédaction
AEN Infos, OCDE/AEN
12, boulevard des Îles
92130 Issy-les-Moulineaux
France
Tél. : +33 (0)1 45 24 10 12
Fax : +33 (0)1 45 24 11 12

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 28 pays membres : l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, la Belgique, le Canada, la Corée, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Japon, le Luxembourg, le Mexique, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, la République slovaque, la République tchèque, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie.

Pour plus d'informations sur l'AEN, voir :
www.nea.fr

Comité de rédaction :
Janice Dunn Lee
Karen Daifuku
Cynthia Gannon-Picot

Production :
Solange Quarneau

Mise en page/graphiques :
Annette Meunier
Andrée Pham Van

Page de couverture : Recherches sur le combustible MOX à Cadarache (Joly, CEA, France), maquette d'Olkiluoto-3 (TVO, Finlande), dépôt de déchets vitrifiés (BNFL, Royaume-Uni), contrôle de radioactivité (P. Berenger, EDF, France).





Le nucléaire se démarque



Dans un contexte de défis énergétiques croissants, l'énergie nucléaire figure de plus en plus souvent en tête du classement des politiques énergétiques de choix. Parmi ses atouts : sécurité d'approvisionnement, prix concurrentiels et stables, production quasi nulle de CO₂.

Dans les pays membres de l'OCDE/AEN, une centrale est en construction en Finlande et des projets prennent forme en France et en République slovaque. Pour la première fois depuis 30 ans, des demandes de permis de construction ont été déposées auprès de l'*US Nuclear Regulatory Commission* (des demandes ont déjà été reçues pour 5 tranches et sont attendues pour 32 tranches supplémentaires sur la période 2007-2009). Cette évolution est renforcée dans les pays de l'OCDE appartenant à la région Pacifique par des commandes fermes de 13 tranches au Japon et en Corée.

Comme l'article consacré aux risques et avantages de l'énergie nucléaire nous l'apprend, cette énergie a d'autres atouts encore. Son principal inconvénient tient à la nécessité de gérer les déchets radioactifs qu'elle produit, mais ce secteur aussi est en progrès. On recherche des solutions innovantes pour la gestion de matières fissiles et fertiles recyclables (voir page 10) que viendront appuyer les stratégies de stockage définitif dans des formations géologiques (voir page 14). Par ailleurs, pour garantir la sûreté des centrales nucléaires et de ceux qui y travaillent, les études se poursuivent dans les disciplines concernées comme l'évoque ce numéro de *AEN Infos*.



Enfin, plusieurs pays membres de l'AEN travaillent à rendre l'énergie nucléaire encore plus sûre et plus concurrentielle à la fois. Grâce à ses projets multilatéraux de recherches, le Forum international Génération IV (GIF) s'est fixé pour objectif de proposer des améliorations considérables des caractéristiques économiques, de la sûreté et de la fiabilité, de la résistance à la prolifération, de la protection physique et de la durabilité des systèmes nucléaires. Le lecteur trouvera à la page 34 les dernières nouvelles concernant les travaux du GIF, dont l'AEN assure le Secrétariat technique. Pour établir des références en matière de pratiques réglementaires et de réglementation dans le but de parfaire la sûreté des nouveaux réacteurs, plusieurs pays ont lancé le Programme multinational d'évaluation des conceptions (MDEP). *AEN Infos* en décrit la phase actuelle à la page 32.

Pour toutes ces raisons, l'AEN envisage de façon très positive l'environnement de travail dynamique qui devrait s'instaurer dans les années qui viennent ainsi que la perspective d'aider ses pays membres à tirer le meilleur parti possible de la coopération internationale.

Luis E. Echávarri
Directeur général de l'AEN

Risques et avantages de l'énergie nucléaire

S. Gordelier*

Demande d'énergie, hausse des prix, sécurité d'approvisionnement, changement climatique... autant de problèmes majeurs que doivent résoudre les responsables des politiques énergétiques aujourd'hui. Pour leur fournir des informations fiables sur lesquelles fonder leurs décisions, l'AEN vient de publier une étude consacrée aux risques et avantages de l'énergie nucléaire. Cet article est largement inspiré de l'étude.

Demande d'énergie et efficacité énergétique

La demande mondiale d'énergie continue son ascension apparemment inexorable. D'après l'Agence internationale de l'énergie (AIE)¹, la demande a plus que doublé entre 1970 et 2005, passant de près de 5 500 Mtep (millions de tonnes équivalent pétrole) à 11 200 Mtep. Avec les politiques gouvernementales actuelles, cette demande continuera de croître, toujours d'après l'AIE, pour atteindre 17 400 Mtep en 2030, soit une nouvelle progression de 55 % par rapport aux niveaux de 2005 et plus de trois fois ceux de 1970. En valeur absolue, c'est le charbon qui devrait connaître le plus fort essor.

* M. Stan Gordelier (stan.gordelier@oecd.org) est Chef de la Division du développement de l'énergie nucléaire de l'AEN.

La demande d'électricité continue de progresser encore plus vite que la demande d'énergie avec le développement économique. L'AIE prévoit qu'elle aura augmenté de 100 % d'ici 2030¹ et qu'en 2050, elle aura atteint 260 % de sa valeur de 2005².

L'efficacité énergétique est donc importante et vaut la peine que l'on fasse des efforts pour l'améliorer. On va souvent jusqu'à dire que ce serait la solution au problème. Or, à moins d'être convaincu, et de pouvoir le prouver, que la demande mondiale d'énergie plafonnera, l'efficacité énergétique, aussi utile soit-elle, permettra, au mieux, de gagner du temps pour trouver une véritable solution qui sera très certainement technologique.

Supposons par exemple que l'on parvienne du jour au lendemain à économiser 10 % de l'énergie consommée. L'offre totale d'énergie primaire croît à un rythme voisin de 1,9 % par an. En moins de six ans, on sera ramené au même niveau. Soyons plus ambitieux et améliorons l'efficacité énergétique de 20 %. Il faudra alors moins de 12 ans pour être ramené au même niveau. Cela ne veut pas dire qu'il faille abandonner l'idée d'améliorer l'efficacité énergétique, mais plutôt que le temps ainsi gagné doit être exploité pour accomplir les progrès technologiques qui apporteront les véritables réponses.

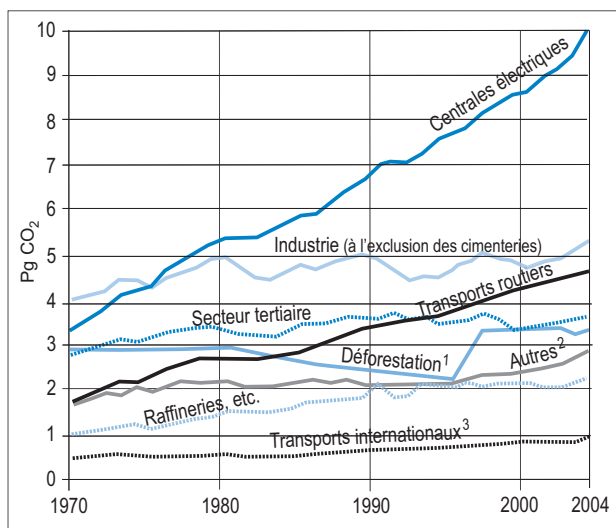
Émissions de gaz à effet de serre

S'agissant des émissions de CO₂, si l'intensité en carbone de la production totale d'énergie primaire s'est légèrement améliorée et si les émissions par unité du PIB ont décliné un peu plus, ces émissions suivent de près l'évolution démographique, le PIB par habitant et l'offre totale d'énergie primaire. La figure 1 montre les émissions de CO₂ de diverses formes de consommation d'énergie. Dans le

secteur énergétique, il est clair que les centrales électriques sont les principaux responsables de la croissance des émissions. Elles consomment deux fois plus d'énergie que le secteur qui les suit immédiatement, et leur consommation augmente beaucoup plus vite que celle des autres secteurs. Les transports routiers, qui sont au centre de l'attention des médias et des débats politiques, consomment moitié moins. Leur progression, bien que la deuxième par sa rapidité, est aussi plus lente. Les transports internationaux, et notamment aéronautiques, également montrés du doigt, seraient en réalité l'un des secteurs les moins préoccupants à l'échelle mondiale.

On retiendra donc que les centrales électriques sont **LE** problème principal. Il ne s'agit pas pour autant d'ignorer les autres secteurs, mais il est clair que l'on ne peut espérer réduire les émissions de manière significative si l'on ne règle pas le problème des émissions des centrales. L'énergie nucléaire

Figure 1. Origine des émissions mondiales de CO₂, 1974-2004 (émissions directes seulement, par secteur)



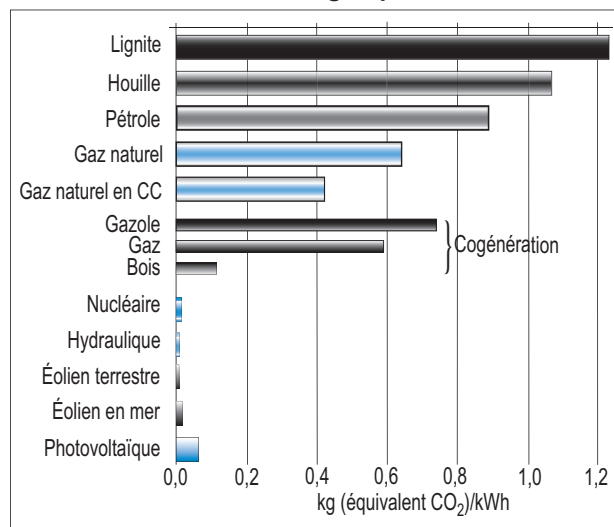
1. Y compris le bois de chauffage dont la contribution nette est de 10 %. S'agissant de la combustion à grande échelle de la biomasse, les données moyennes sur la période 1997-2002 sont fondées sur les données recueillies par satellite dans la *Global Fire Emissions Database* (van der Werf et al, 2003). Inclut la décomposition et les feux de tourbe (Hooijer et al, 2006). Exclut les feux de combustibles fossiles.
2. Autres transports en surface nationaux, usages non énergétiques des combustibles, cimenteries et torchères dans la production de pétrole.
3. Y compris les transports aériens et maritimes.

Source : GIEC (2007), *Climate Change 2007 : Mitigation of Climate Change*, Working Group III Report, Cambridge University Press, Cambridge.

peut assurément jouer un rôle, mais elle demeure aujourd'hui un acteur de second plan puisqu'elle ne représente que 16 % (25 % dans les économies plus développées de l'OCDE) de la production d'électricité et seulement 6 % de l'offre totale d'énergie primaire. La polémique qu'elle suscite dans les milieux politiques et le public a freiné sa croissance.

On trouvera à la figure 2 les émissions sur le cycle de vie des centrales des divers modes de production d'électricité, mesurées en kilogrammes normalisés d'équivalents CO₂ compte tenu du potentiel de réchauffement climatique propre à chaque gaz. Toutes les données présentées correspondent aux pays membres de l'Union pour la coordination du transport de l'électricité (UCTE)* en 2000. Les émissions de gaz à effet de serre du nucléaire et

Figure 2. Émissions de gaz à effet de serre de plusieurs filières énergétiques



Source : AEN (2007), *Risques et avantages de l'énergie nucléaire*, OCDE, Paris.

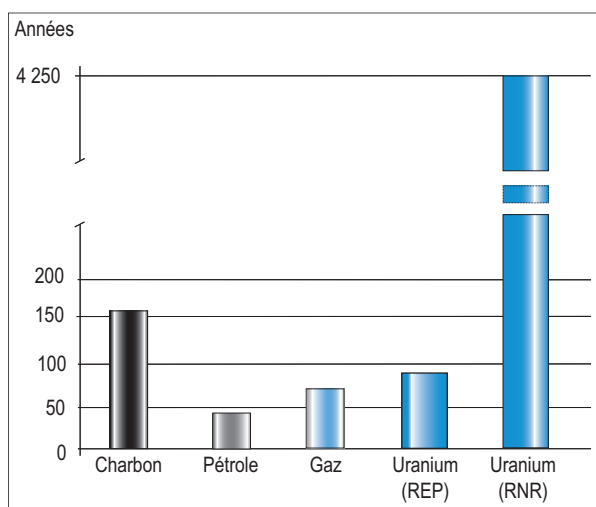
*En 2000 les pays suivants étaient représentés à l'Union pour la coordination du transport de l'électricité (UCTE) : Allemagne, Autriche, Belgique, Bosnie-Herzégovine, Croatie, Danemark (membre associé), Espagne, Ex-République yougoslave de Macédoine, France, Grèce, Italie, Luxembourg, Pays-Bas, Portugal, Serbie et Monténégro, Slovaquie et Suisse. (La Hongrie, la Pologne, la République slovaque et la République tchèque ont adhéré officiellement à l'UCTE en 2001.)

des énergies renouvelables sont inférieures d'un à deux ordres de grandeur aux émissions des chaînes combustibles fossiles. Les moyennes pour les pays de l'UCTE avoisinent 5 g d'équivalent CO₂/kWh pour l'énergie hydraulique, 8 g pour le nucléaire, 11 g pour l'éolien terrestre, 14 g pour l'éolien en mer, 60 g pour l'énergie photovoltaïque et 100 g pour la cogénération au bois.

Sécurité d'approvisionnement en uranium

D'après certains, les minerais à forte teneur en uranium viendront bientôt à s'épuiser et l'avantage du nucléaire en termes d'émissions sur la totalité du cycle de vie s'évanouira lorsque l'extraction de l'uranium nécessitera de consommer davantage d'énergie. Les statistiques officielles démontrent le contraire. D'après la publication intitulée *Uranium 2005 : Ressources, production et demande*³, le rapport entre les réserves et la production est nettement plus élevé pour l'uranium que pour le pétrole ou le gaz (voir figure 3). L'industrie ne consacre pas beaucoup de capitaux à prospecter très longtemps à l'avance, quelle que soit la source d'énergie considérée.

Figure 3. Durée de vie des ressources en combustibles* (années)



* Ressources identifiées, c'est-à-dire les ressources dont on sait qu'elles sont exploitables à un prix raisonnable.

Source : D'après des données publiées dans AEN (2007), *Risques et avantages de l'énergie nucléaire*, OCDE, Paris.

Tableau 1. Durée de vie des ressources en uranium (années)

Technologie	Ressources identifiées** ~4,7MtU	Total** res- sources classiques ~14,8 MtU	Total ressources classiques plus phosphates ~36,8 MtU
REP en cycle ouvert	85	270	675
Introduction progressive des RNR*	4 250	13 500	33 750

* On fait l'hypothèse que l'introduction progressive des réacteurs surgénérateurs rapides multiplie par 50 la quantité d'électricité produite avec 1 tonne d'uranium.

** Le lecteur trouvera dans la référence 3 citée à la fin de cet article les définitions de ressources identifiées et de ressources classiques totales.

De plus, si le nucléaire devait se développer de manière importante, le tableau 1 montre que l'introduction progressive des réacteurs surgénérateurs rapides, parce qu'elle multiplierait par 50 fois, voire plus, la quantité d'énergie tirée d'une quantité donnée d'uranium, augmenterait considérablement les quantités d'énergie disponibles. Étant donné que l'énergie nucléaire contribue actuellement à 6 % de l'offre totale d'énergie primaire, on peut facilement démontrer que les ressources en uranium dont on connaît l'existence dans des gisements classiques ou liés à des phosphates permettraient de produire de l'énergie représentant 2000 ans de l'offre totale d'énergie primaire actuelle et cela sans pratiquement produire de CO₂.

Le prix spot de l'uranium est passé d'un plancher historique au cours des vingt dernières années à de tels sommets que l'on envisage aujourd'hui d'extraire à échelle commerciale les infimes quantités d'uranium contenues dans certaines cendres de charbons. Si l'on devait utiliser cet uranium dans des réacteurs rapides, il produirait davantage d'énergie que le charbon dont il a été extrait. Il est également possible de mettre en place le cycle au thorium qui n'a jamais encore été développé à l'échelle commerciale. Or, le thorium est trois fois plus abondant dans la croûte terrestre que l'uranium. En résumé, celui qui choisit cette énergie, pour ainsi dire exempte de CO₂, n'a pas à redouter la pénurie.

Les centrales nucléaires - une opportunité et un risque

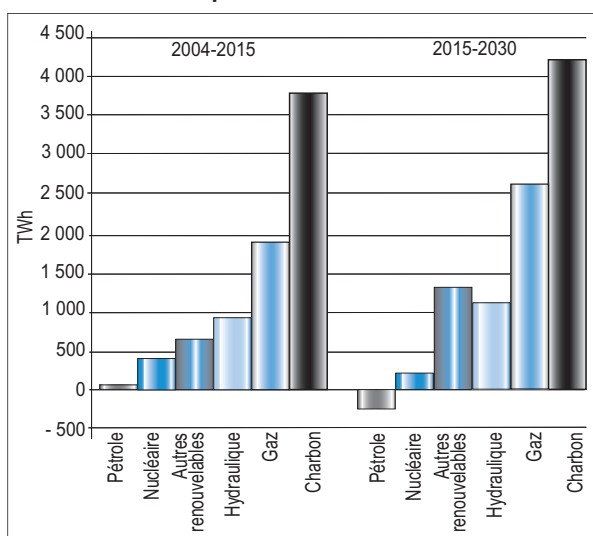
D'après le *World Energy Outlook*¹, il faudra investir environ 5 000 milliards d'USD dans les centrales électriques d'ici 2030. Étant donné que ces investissements ont des durées de vie économique moyennes de 40 ans environ, leur renouvellement est très lent. Nous avons, par conséquent, une occasion unique d'investir pour l'avenir dans des centrales produisant peu d'émissions. Choisir, à l'inverse, de construire des centrales thermiques classiques revient à condamner des régions entières à des émissions jusqu'en 2050 voire plus (les techniques de captation et de stockage du carbone pourraient éventuellement atténuer le problème à condition que la technologie soit au point et démontrée à l'échelle commerciale et que les centrales thermiques classiques aient été construites pour pouvoir intégrer ultérieurement ces techniques). La figure 4 correspondant aux politiques publiques actuelles montre que la grande majorité des nouvelles centrales brûleront des combustibles fossiles et que la demande supplémentaire d'électricité devrait être satisfaite en majeure partie par des centrales à charbon qui resteront les principaux producteurs d'électricité jusqu'en 2030. Dans cette

situation, nous ne sommes pas près d'atteindre les objectifs visés pour parer au changement climatique. Un changement rapide des politiques publiques sera nécessaire.

Étude des risques et avantages

La publication récente de l'AEN intitulée *Risques et avantages de l'énergie nucléaire*⁴ aborde les aspects quantitatifs et qualitatifs de ces risques et avantages du point de vue économique, social et environnemental. Le lecteur y trouvera de nombreuses comparaisons entre le nucléaire et les autres modes de production de l'électricité ainsi qu'une analyse des techniques permettant de pondérer un large éventail de facteurs dans le cadre d'une évaluation globale. Quelques exemples sont présentés ci-dessous. Les avantages du nucléaire en termes d'émissions de gaz à effet de serre ont déjà été évoqués ci-dessus. Sur le plan économique, le nucléaire est concurrentiel dans de nombreux pays où les rejets de carbone ne sont pas frappés d'une taxe et donc encore davantage là où la taxe est prélevée. La publication de l'AEN/AIE intitulée *Coûts prévisionnels de production de l'électricité*⁵ contient une description complète des questions de coûts et des comparaisons entre sources d'énergie.

Figure 4. Production mondiale d'électricité par combustible



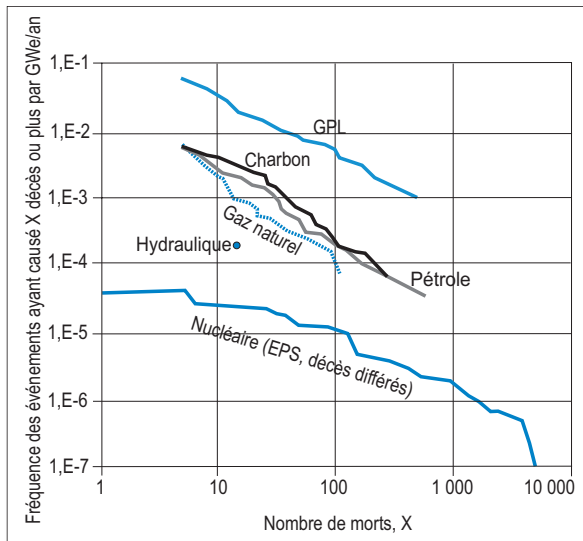
Source : AIE (2006), *World Energy Outlook, The Reference Scenario*, OCDE/AIE, Paris.

Risques d'accidents

La sûreté des centrales nucléaires est une préoccupation permanente du public et des hommes politiques. L'ENSAD, à savoir l'*Energy-related Severe Accident Database* créée par l'Institut Paul Scherrer, en Suisse, contient des données sur plus de 18 400 accidents survenus principalement entre 1969 et 2000, dont 35 % ont un rapport avec l'énergie et 3 117 sont classés parmi les accidents graves (ayant provoqués au moins 5 décès immédiats). La figure 5 montre les courbes fréquences/conséquences tirées de ces données dans les pays de l'OCDE. Les données pour le GPL, le charbon, le pétrole et le gaz naturel correspondent à des accidents réels. Au cours de cette période, les pays de l'OCDE n'ont enregistré qu'un seul accident grave dans l'hydroélectrique qui a provoqué 14 décès immédiats. Aucun accident nucléaire ne figure parmi les accidents graves dans les pays de l'OCDE.

Pour les besoins de la comparaison, la figure 5 montre également l'étude probabiliste de sûreté (EPS) d'une centrale nucléaire suisse. Il convient de souligner que le résultat n'est pas directement comparable puisqu'il concerne les morts tardives (par opposition aux morts immédiates des autres

Figure 5. Comparaison des courbes fréquences/conséquences de filières énergétiques complètes dans les pays de l'OCDE sur la période 1969-2000



Source : AEN (2007), *Risques et avantages de l'énergie nucléaire*, OCDE, Paris.

statistiques) que provoqueraient des rejets théoriques éventuels (non pas des rejets ou accidents réels). Cette figure permet néanmoins de conclure que l'énergie nucléaire est nettement plus sûre, par rapport aux autres sources d'énergie, que ne le penserait le grand public. Dans les pays de l'OCDE, l'hydraulique et le nucléaire surclassent nettement les autres sources d'énergie de ce point de vue.

Cette courbe pourrait prêter à plusieurs critiques. En choisissant les pays de l'OCDE, elle oublie l'accident de Tchernobyl. Toutefois, la centrale de Tchernobyl appartient à une filière qui n'existe pas dans les pays de l'OCDE et, aussi grave fut-il, l'accident n'a provoqué que 40 morts immédiates. On pourrait également reprocher à cette courbe de laisser de côté les estimations des morts tardives imputables à l'accident de Tchernobyl, mais il faudrait alors inclure aussi les morts tardives dues à l'exploitation et aux accidents des centrales thermiques classiques, ce qui placerait les technologies fondées sur des combustibles fossiles en mauvaise position (voir figure 6). Les accidents les plus graves qui se soient produits dans le secteur énergétique hors de la zone OCDE se rencontrent dans l'industrie pétrolière (3000 morts aux Philippines en 1987, 2700 morts en Afghanistan en 1982), dans l'hydro-électrique (1000 morts en Inde en 1980) et

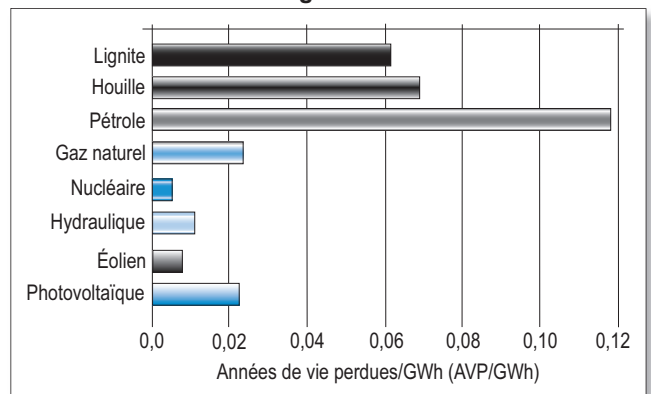
lors du transport de GPL (600 morts en Russie en 1989).

Pourquoi donc la sûreté de l'énergie nucléaire semble-t-elle susciter des craintes inhabituelles dans le subconscient public ? On pourrait évoquer l'assimilation avec les armes nucléaires, la crainte d'accidents de très faible probabilité mais d'une ampleur exceptionnelle, le fait que les morts tardives soient associées au cancer, une maladie à juste titre très redoutée (avec en plus le fait que le cancer peut tous nous toucher tandis que les accidents dans les secteurs du pétrole et du gaz ne concernent généralement que ceux qui y travaillent, sauf s'il s'agit d'une catastrophe) ainsi que la réputation faite au nucléaire à cause de ces particularités. Nul n'a oublié Tchernobyl ni même Three Mile Island (aucun décès immédiat). Qui se souvient (ou a même jamais entendu parlé) des accidents survenus dans les secteurs du pétrole, de l'hydroélectrique et du GPL que nous avons énumérés ci-dessus et qui se sont produits à peu près au même moment, faisant directement des milliers de victimes ?

Répercussions sanitaires de l'exploitation normale

Les répercussions de l'exploitation normale des centrales sur la vie humaine peuvent être représentées par la mortalité que l'on définit par la réduction de l'espérance de vie calculée en années de vie perdues (AVP). La figure 6 montre, à titre d'exemple, les résultats d'une analyse de la mortalité

Figure 6. Mortalité liée à l'exploitation normale d'installations de diverses filières énergétiques en Allemagne en 2000



Source : AEN (2007), *Risques et avantages de l'énergie nucléaire*, OCDE, Paris.

due aux émissions des principaux polluants associés aux systèmes énergétiques en Allemagne. L'énergie nucléaire, l'éolien et l'hydraulique affichent des taux de mortalité très faibles. La mortalité correspondant à l'exploitation normale des centrales au gaz naturel et aux centrales photovoltaïques est légèrement supérieure, et les autres systèmes exploitant des énergies fossiles présentent une mortalité nettement supérieure. On notera que, quelle que soit la filière énergétique, la mortalité due aux accidents est pour ainsi dire négligeable par rapport aux effets correspondants de l'exploitation normale, comme nous avons pu le voir ci-dessus. Un fait qui semble, une fois de plus, bien mal connu du public et des décideurs.

Aides à la décision

Deux techniques d'aide à la décision sont analysées dans l'ouvrage intitulé *Risques et avantages de l'énergie nucléaire : l'internationalisation des coûts externes et l'analyse multicritères*. On dit qu'il y a externalité lorsqu'un effet négatif ou positif est produit par une activité économique et imposé à des tiers sans faire l'objet d'une transaction sur un marché⁶. Si l'on pouvait dresser une liste exhaustive des externalités et si leur valeur pouvait être estimée de manière précise et fiable, l'internalisation des coûts externes permettrait de connaître les meilleurs choix. Malheureusement, ces deux conditions sont rarement remplies. La technique peut toutefois être intéressante si elle permet de prendre en compte des éléments essentiels raisonnablement fiables.

L'analyse multicritères s'emploie isolément ou en complément d'autres techniques. Elle offre une meilleure représentation des critères sociaux qui sont plus difficiles à définir, sélectionner et mesurer, et donc les plus discutables. La publication analyse plusieurs exemples correspondant à trois catégories de facteurs (évalués et pondérés les uns par rapport aux autres) : économiques, environnementaux et sociaux. En général, il faut avoir attribué des pondérations très élevées aux facteurs sociaux (aversion pour des accidents hypothétiques graves) pour que l'analyse élimine l'énergie nucléaire du groupe des techniques de production les plus intéressantes. Bon nombre de ces considérations sociales restent néanmoins controversées et, suivant la perspective socio-politique adoptée, peuvent prendre une importance cruciale. Sinon, avec des pondérations équilibrées, l'énergie nucléaire se classe régulièrement parmi les meilleures techniques de production disponibles.

Conclusions

Les défis énergétiques que la planète doit relever sont critiques. Les centrales électriques sont responsables de la part la plus importante de la production de gaz à effet de serre, et leur contribution est celle qui augmente le plus vite. Elles en produisent deux fois plus que le secteur qui les suit immédiatement.

Étant donné l'envolée de la demande d'énergie dans les pays en développement et la nécessité de remplacer les centrales anciennes dans les économies développées, on aura besoin d'investir environ 5 000 milliards d'USD au cours des vingt années qui viennent. Ce serait là une excellente occasion d'investir dans une capacité de production quasi-exempte de gaz à effet de serre. Les gouvernements et l'industrie doivent agir sans tarder pour ne pas manquer cette occasion.

L'électronucléaire ne produit pour ainsi dire pas de CO₂ et, en principe du moins, offre d'énormes quantités d'énergie aux pays qui décident de l'exploiter. Les ressources en uranium connues représentent une énergie potentielle équivalent à 2000 ans au niveau actuel de l'offre totale d'énergie primaire dans le monde.

Toutefois, l'énergie nucléaire reste un sujet de polémique dans de nombreux pays. L'OCDE/AEN a publié cette étude consacrée aux *Risques et avantages de l'énergie nucléaire* pour offrir aux décideurs une information fiable qui puisse nourrir les débats publics. ■

Références

1. AIE (2006), *World Energy Outlook*, OCDE/AIE, Paris.
2. AIE (2006), *Energy Technology Perspectives*, OCDE/AIE, Paris.
3. AEN (2006), *Uranium 2005 : Ressources, production et demande*, OCDE, Paris.
4. AEN (2007), *Risques et avantages de l'énergie nucléaire*, OCDE, Paris.
5. AEN et AIE (2005), *Coûts prévisionnels de production de l'électricité – Mise à jour 2005*, OCDE, Paris.
6. D. Pearce (2002), "Energy Policy and Externalities : An Overview", tiré des actes de l'Atelier de l'AIE/AEN consacré aux *Externalities and Energy Policy : The Life Cycle Analysis Approach*, OCDE, Paris.

Gestion des matières fissiles et fertiles recyclables

E. Bertel, T. Dujardin*

La possibilité de recycler le combustible est une propriété très intéressante des systèmes nucléaires qu'ils sont pratiquement les seuls à posséder. Les matières fissiles et fertiles contenues dans les combustibles nucléaires usés et les rejets des usines d'enrichissement, par exemple, peuvent être récupérés et réutilisés à des fins énergétiques. Cette opération permet également de réduire la quantité et la radiotoxicité des déchets qu'il faudra finalement stocker dans des dépôts.

À un moment où il devient de plus en plus attractif de recycler le combustible nucléaire usé à cause du renouveau d'intérêt pour l'énergie nucléaire et des objectifs de développement durable, de nombreux pays privilégient encore l'entreposage de longue durée et le stockage direct de matières recyclables. Les matières recyclables que l'on n'a pas l'intention de réutiliser peuvent être stockées dans des conditions sûres permettant de les isoler de la biosphère sur de très longues périodes, le temps qu'elles deviennent inoffensives tant pour l'homme que pour l'environnement.

L'étude que l'AEN a consacrée¹ aux matières fissiles et fertiles recyclables a été entreprise afin de faire le point des aspects techniques et stratégiques de la gestion de ces matières et d'apporter quelques éclaircissements sur les possibilités et difficultés que présentent les différentes approches possi-

bles. Les matières suivantes ont été étudiées : combustible usé, uranium appauvri sortant des usines d'enrichissement, uranium et plutonium de retraitement, matières démilitarisées (uranium hautement enrichi et plutonium) déclarées excédentaires par rapport aux besoins de la sécurité nationale par les États-Unis et la Fédération de Russie, et stocks de thorium.

Cet article repose sur les analyses, les résultats et les conclusions de l'étude. Il donne une vue d'ensemble des quantités et de la valeur énergétique potentielle des matières recyclables disponibles à l'échelle mondiale. Les principaux avantages et inconvénients des deux solutions de gestion qui s'offrent aux décideurs sont également décrits.

Stocks de matières recyclables

Les stocks actuels de matières fissiles et fertiles recyclables représentent une source d'énergie potentielle suffisamment importante pour être significatifs dans le cadre d'une politique à long terme, et l'on produit en permanence de nouvelles matières recyclables. En effet, l'exploitation du

* Mme Evelyne Bertel (evelyne.bertel@oecd.org) est Administrateur principal dans la Division du développement de l'énergie nucléaire de l'AEN. M. Thierry Dujardin (thierry.dujardin@oecd.org) est Directeur adjoint Sciences et développement à l'AEN. Cet article, ©OECD, a d'abord été soumis à l'American Nuclear Society (ANS) pour publication dans Global 2007: Advanced Nuclear Fuel Cycles and Systems.

Tableau 1. Stocks de matières fissiles recyclables séparées

Origine	Quantité (tHM)	Équivalent en U naturel (10 ³ tU)	Offre potentielle, années-réacteurs *
Uranium hautement enrichi (UHE) issu du démantèlement des armes	230	70	420
Plutonium issu du démantèlement des armes	70	15	90
Plutonium	320	60	380
Uranium récupéré lors du retraitement du combustible irradié (URT)	45 000	50	300
Rejets des usines d'enrichissement	1 600 000	450	2 650

* Pour un REO de 1 000 MWe fonctionnant avec un facteur de charge de 80 %.

parc actuel de centrales nucléaires génère environ 10 000 tonnes de combustibles usés chaque année.

Le tableau 1 présente les quantités de matières recyclables séparées stockées dans le monde entier à la fin de l'année 2005 ainsi qu'une estimation de leur valeur potentielle en termes d'offre de combustible. On s'aperçoit que les stocks de matières recyclables représentent près de 4 000 années-réacteurs d'approvisionnement en combustible pour des réacteurs de la génération actuelle. Autrement dit, si l'on recyclait la totalité des stocks de matières séparées dans les réacteurs en service aujourd'hui, on disposerait de 10 années supplémentaires de combustible pour les faire fonctionner, soit une prolongation de plus de 10 % par rapport aux 85 années que représentent les ressources en uranium identifiées aujourd'hui².

Les rejets des usines d'enrichissement constituent de loin le plus fort potentiel énergétique, mais leur exploitation exigerait des capacités considérables de réenrichissement qui n'existent pas à échelle industrielle aujourd'hui. En outre, la viabilité économique de cette option n'est pas acquise avec les technologies actuelles et les prix de l'uranium naturel aujourd'hui, même après les hausses récentes des prix spot.

Les stocks figurant sur le tableau 1 n'incluent pas les combustibles usés qui se sont accumulés dans les installations d'entreposage et devraient être retraités avant leur recyclage. Le retraitement

de la totalité du combustible usé ainsi accumulé produirait environ 1 700 tonnes de plutonium et 190 000 tonnes d'équivalent uranium naturel, soit près de 7 ans et demi de consommation des centrales nucléaires en service aujourd'hui.

Modes de gestion

Il existe aujourd'hui deux modes de gestion des matières recyclables : le stockage définitif et le recyclage. Dans les deux cas, on aura besoin finalement de dépôts de déchets mais l'approche choisie aura un impact très grand sur la taille et la date de mise en service des dépôts nécessaires. L'entreposage de longue durée n'est pas une solution viable. Il s'agit d'une mesure provisoire qui laisse un délai de réflexion avant d'adopter une décision définitive.

Les stocks de matières qui ne sont pas en cours de traitement dans des installations du cycle du combustible sont entreposés sous diverses formes physiques et chimiques sur différents sites. Dans tous les pays de l'OCDE, les transports, l'entreposage et le traitement de ces matières sont assujettis à une réglementation et à des normes rigoureuses, grâce à quoi les répercussions radiologiques sur la santé et l'environnement restent aussi faibles que raisonnablement possible.

Il est possible, avec les techniques actuelles, de stocker les matières recyclables, y compris le combustible usé, de manière sûre et économiquement viable. Bien que l'on n'ait pas encore conditionné

de combustible usé en vue de son stockage définitif, il est prévu d'analyser la possibilité d'appliquer au stockage du combustible usé les techniques aujourd'hui employées ou à l'étude pour les déchets de faible, de moyenne ou de haute activité. Pour le stockage, les formations géologiques offrent de l'avis général, une solution à coûts raisonnables à la fois fiable et sûre pour les générations actuelles et futures. Les projets en cours dans plusieurs pays pourraient conduire à la mise en service de dépôts d'ici 10 à 20 ans.

Pour les pays qui n'envisagent pas le recyclage, le stockage définitif des matières recyclables au moment opportun permet d'éviter les contraintes et les coûts que représente l'entreposage de longue durée et de s'affranchir des charges financières futures qu'il implique. En revanche, le stockage définitif de substances potentiellement valorisables peut être considéré comme une solution « non durable » par certains. C'est pourquoi les approches actuelles tendent à privilégier les solutions réversibles laissant ouverte la porte au recyclage le jour où cette solution sera adoptée.

Toutes les options conduiront nécessairement au stockage des déchets radioactifs, mais certaines d'entre elles permettent de limiter les volumes et la radiotoxicité des déchets plus que d'autres. Les conceptions et tailles des dépôts doivent donc être adaptées aux solutions choisies.

Recycler les matières fissiles et fertiles peut augmenter de manière substantielle la quantité d'énergie tirée de l'uranium naturel et du thorium, prolonger la durée de vie des ressources en combustibles nucléaires et donc renforcer la durabilité de l'énergie nucléaire. La solution du recyclage est adoptée principalement pour mieux exploiter l'énergie contenue dans les ressources naturelles et réduire les volumes de déchets et leur radiotoxicité. Recycler les matières fissiles et fertiles est un moyen, par conséquent, de se doter de ressources en combustible supplémentaires, de limiter les quantités de plutonium et d'actinides mineurs à stocker et donc d'alléger la gestion à long terme des déchets radioactifs.

Quelques exemples illustrent la diversité des possibilités offertes par les solutions de recyclage. Le retraitement du combustible usé des réacteurs à eau ordinaire suivi du recyclage de l'uranium et du plutonium dans ces mêmes réacteurs peut diminuer de moitié la consommation spécifique (par kWh) d'uranium neuf des systèmes nucléaires actuels. Les systèmes avancés qui font appel à des réacteurs à neutrons rapides pourraient eux multiplier par plus

de 50 l'énergie produite par tonne d'uranium naturel consommé.

Le rendement du recyclage dépend des différents systèmes nucléaires en service et du moment où ils sont déployés. L'analyse des diverses solutions de gestion des matières recyclables a montré que la quantité d'énergie récupérée est très sensible non seulement à la filière de réacteur et aux cycles du combustible choisis, mais aussi au moment de leur déploiement. Les stratégies les plus efficaces reposeront probablement sur des systèmes nucléaires capables de consommer différentes matières en synergie (par exemple, du plutonium et de l'uranium appauvri dans des réacteurs à neutrons rapides). Pour pouvoir identifier les meilleures stratégies, compte tenu de la taille et du rythme de développement du parc nucléaire national, régional ou mondial, une analyse approfondie des scénarios de transition entre le cycle ouvert et le cycle entièrement fermé s'impose.

Du point de vue de la réduction des volumes et de la toxicité des déchets – qui constitue un problème déterminant pour le déploiement de l'énergie nucléaire dans une perspective de développement durable à long terme – le recyclage présente des atouts importants. Il permet de reporter le stockage définitif des déchets de haute activité et, ce qui est plus important, de diminuer la quantité et la radiotoxicité des déchets à stocker, en particulier si le parc nucléaire comprend des systèmes avancés conçus pour la séparation et la transmutation des actinides mineurs.

Questions, défis et possibilités

Quelles que soient les stratégies de gestion des matières recyclables, il importe de mettre en place des mesures rigoureuses pour parvenir à des niveaux satisfaisants de sûreté, de protection radiologique, de résistance à la prolifération et de protection physique. Les régimes juridiques et réglementaires en vigueur dans les pays de l'OCDE offrent de ce point de vue un cadre solide.

Plusieurs pays ont acquis une bonne expérience industrielle de diverses étapes des options possibles (recyclage de certaines matières fissiles, essentiellement le plutonium, par exemple) si bien que les spécialistes sont convaincus que toutes les matières fissiles et fertiles recyclables pourront être gérées de manière sûre et fiable. Les technologies existantes permettent déjà d'exploiter en partie le contenu énergétique de ces matières recyclables. Par exemple, la quantité d'énergie que l'on peut retirer des

stocks d'uranium appauvri avec les techniques actuelles est si importante qu'elle dépasse celle du plutonium consommé dans les filières nucléaires actuelles. Toutefois, il faudrait adapter les capacités industrielles d'enrichissement au traitement de ces stocks d'uranium appauvri.

Suivant les options de recyclage choisies et les stratégies adoptées pour leur mise en œuvre, la quantité d'énergie que l'on parviendra à extraire des matières fissiles et fertiles recyclables variera dans de fortes proportions. Cette quantité pourrait être multipliée par 2 mais aussi par plus de 50, tel qu'évoqué ci-dessus.

Pour la définition des politiques à suivre, la collaboration internationale permettra de résoudre certains problèmes soulevés par la gestion des matières fissiles et fertiles recyclables qu'il serait difficile de régler au niveau national, en particulier pour les pays dont les infrastructures nucléaires sont limitées. La collaboration entre pays pourrait en effet apporter des solutions optimisées au niveau planétaire et faciliter la mise en œuvre d'infrastructures dont la viabilité au niveau national ne serait pas assurée.

La gestion des matières fissiles et fertiles recyclables exige des infrastructures et des installations qui risquent fort de ne pas être techniquement et économiquement viables dans tous les pays dotés de centrales nucléaires ou qui envisagent d'en construire. La construction d'installations multinationales régionales et/ou internationales présenterait l'avantage de diversifier l'offre pour tous les pays, y compris ceux qui sont dotés de programmes électronucléaires modestes ou moyens.

Les programmes d'études et de recherches entrepris dans de nombreux pays visent à améliorer non seulement les performances technologiques, mais aussi la sûreté et les caractéristiques économiques du stockage et des solutions de recyclage. Unir les efforts nationaux dans le cadre d'entreprises de R-D internationales est un moyen efficace de mettre au point des technologies avancées qui répondent aux besoins sociaux, environnementaux et économiques des générations futures.

Conclusions

Les stocks de matières fissiles et fertiles recyclables représentent une ressource énergétique potentielle considérable qui pourrait aider les pays dotés de programmes électronucléaires à améliorer la sécurité de leurs approvisionnements et abaisser simultanément les émissions de gaz à effet de serre de leur secteur énergétique à des coûts raisonnables.

L'examen attentif des solutions de gestion existantes pour entreposer, réutiliser ou stocker les matières recyclables montre qu'il existe, ou que l'on met au point actuellement, pour tous les matériaux un éventail de solutions techniquement, économiquement et écologiquement viables.

Aucune solution n'est optimale dans tous les cas, mais l'éventail des solutions entre lesquelles choisir en fonction des circonstances spécifiques et des priorités des décideurs est assez vaste. Ces solutions doivent être intégrées à des politiques énergétiques nationales à long terme, et leur évaluation nécessite d'étudier divers scénarios d'évolution de la contribution des systèmes nucléaires à la satisfaction de la demande d'énergie mondiale.

La solution optimale pour la gestion des matières recyclables dépendra de facteurs tels que la situation spécifique des détenteurs des matières en question, la politique énergétique nationale, la taille et les propriétés du parc nucléaire, l'existence d'un dépôt, l'infrastructure de l'industrie nucléaire et le cadre réglementaire national.

L'évaluation des diverses solutions possibles pour la gestion des matières recyclables doit s'appuyer sur une analyse multicritères qui intègre les facteurs économiques, environnementaux et sociaux dans le contexte global des politiques énergétiques nationales. Des aspects tels que la sécurité de l'approvisionnement énergétique, le fardeau de la surveillance des déchets imposé aux générations futures et la résistance à la prolifération ont un impact nettement plus marqué sur l'évaluation des différentes solutions que la variation des coûts du cycle du combustible qui, en tout état de cause, représente aujourd'hui moins de 20 % du coût total de l'électricité produite par les centrales nucléaires.

Avant toute décision dans ce domaine, il convient d'identifier les mesures irréversibles qui fermeraient la porte à toutes les autres solutions. En général, la réversibilité est souhaitable car elle offre la possibilité de reconsidérer plus tard les solutions choisies et ainsi de tirer parti des progrès technologiques et des changements du paysage socioéconomique. ■

Références

1. AEN (2007), *Gestion des matières fissiles et fertiles recyclables*, OCDE, Paris.
2. AEN et AIEA (2006), *Uranium 2005 : Ressources, production et demande*, OCDE, Paris.

Stockage en formations géologiques : principales observations et leçons

L. Echávarri, C. Pescatore*

L'AEN est depuis longtemps à la pointe des travaux sur la gestion des déchets radioactifs, notamment le stockage en formations géologiques. Ses activités couvrent un large éventail de sujets dont la politique à suivre, la réglementation, les aspects techniques et l'implication des parties prenantes. L'AEN a contribué à faire avancer cette discipline grâce à des projets communs ou novateurs, comme le projet Stripa dans les années 80, et à sa réflexion sur la réglementation et les politiques à suivre. L'AEN a mis au point une démarche qui fait aujourd'hui référence pour la réalisation du dossier de sûreté d'un dépôt.

Le premier rapport important de l'AEN dans ce domaine, à savoir *Objectifs, concepts et stratégies en matière de gestion des déchets radioactifs résultant de programmes nucléaires de puissance*, connu sous le nom de « Rapport Polvani », a été publié en septembre 1977, voilà 30 ans. Beaucoup a été appris depuis.

Pourquoi le stockage en formations géologiques ?

Quel que soit l'avenir de l'énergie nucléaire, il est généralement admis que l'on aura besoin de solutions sûres et acceptables pour stocker les déchets de haute activité et à vie longue qui ont déjà été produits ou le seront. Il n'y a pas de solution miracle : la

transmutation physique de certains déchets et les cycles du combustible avancés ne sonneront pas la fin du stockage. En outre, les déchets de haute activité et à vie longue sont produits aussi dans le cadre d'applications non énergétiques des matières nucléaires et isotopes, en médecine, dans l'industrie et dans la recherche notamment.

Des méthodes sûres et au point existent aujourd'hui pour gérer les déchets radioactifs et sont en train d'être mises en œuvre. À titre de précaution supplémentaire, la société a décidé de stocker certains déchets à vie longue, dont les déchets de haute activité et le combustible usé, de façon à les confiner et à les isoler de l'homme et de l'environnement accessible sans qu'il soit nécessaire de prévoir une intervention humaine continue.

Les conventions internationales interdisent de stocker les déchets sur les fonds marins ce qui, pour des raisons pratiques, limite les possibilités aux sites accessibles par la voie terrestre. Le stockage souterrain est donc étudié dans le monde entier comme la solution ultime de gestion des déchets. Le concept prévoit que tout rejet doit être faible tant par rapport à l'inventaire total des déchets qu'en termes absolus, et que ces rejets proportionnellement faibles migrent très lentement de sorte qu'ils n'aient tout au plus qu'un impact négligeable sur la santé des populations.

Les niveaux et la durée de protection qui sont exigés, et que peut d'ailleurs assurer un dépôt en formation géologique, sont inégaux si on les compare avec d'autres solutions pratiques, en particulier celles qui sont couramment utilisées pour de multiples déchets non radioactifs mais néanmoins dangereux. Le stockage des déchets radioactifs à de grandes profondeurs, dans un système ouvragé robuste situé dans un environnement géologique adapté est donc jugé assurer une protection suffisante aux générations actuelles et futures.

* M. Luis Echávarri (luis.echavarri@oecd.org) est le Directeur général de l'AEN. M. Claudio Pescatore (claudio.pescatore@oecd.org) est Administrateur principal dans la Division de la protection radiologique et de la gestion des déchets radioactifs de l'AEN. Cet article s'inspire d'une allocution de L. Echávarri à la Conférence internationale sur le stockage géologique, Berne, Suisse, 15-17 octobre 2007. Pour de plus amples informations concernant cette conférence et son compte rendu, voir www.icgr2007.org.

Le concept de stockage en formations géologiques, sa sûreté et ses aspects éthiques ont fait l'objet de débats dans les parlements nationaux, dans des instances nationales, régionales et locales, dans la littérature spécialisée, au sein des organisations internationales, dans des établissements scientifiques nationaux et aussi entre particuliers. Le résultat est un consensus général sur le stockage en formations géologiques, fruit d'une vaste consultation sociale.

Différer les travaux sur le stockage géologique ou adopter une position attentiste sont deux attitudes qui exigent un contrôle permanent de plus en plus exigeant des déchets dont la mise en œuvre ne peut être garantie. Une solution de gestion à long terme dont on n'aurait pas fixé le terme est donc non seulement inacceptable d'un point de vue éthique mais potentiellement dangereuse. C'est pourquoi, la plupart des pays ont inscrit le stockage en formations géologiques dans leurs objectifs stratégiques.

Où en est le stockage géologique ?

Depuis la Conférence de Stockholm au mois de décembre 2003, des pays membres de l'AEN ont franchi d'importantes étapes sur la voie du stockage en formations géologiques. À l'issue de concertations approfondies avec les principaux acteurs concernés et le public, le Canada, la France et le Royaume-Uni l'ont désormais adopté comme solution de référence. La France a identifié une région où implanter un dépôt de déchets de haute activité et à vie longue. Le Canada construit un dépôt en formation profonde pour les déchets d'exploitation et définit en parallèle un mécanisme de choix d'un site de dépôt où stocker le combustible nucléaire usé. Le Royaume-Uni a lancé une réflexion sur la mise en place d'un processus de décision associant les collectivités locales à l'identification d'un site de dépôt géologique pour les déchets radioactifs.

Dans le même temps, d'autres pays de l'AEN qui avaient déjà pris la direction du stockage géologique ont marqué des avancées importantes. La Finlande et les États-Unis ont identifié des sites et des conceptions et travaillent à l'aménagement des dépôts. En Suède, deux localités ont été retenues et les dernières études sont en cours avant le choix final du site d'un futur dépôt profond. En Suisse, après la promulgation de la nouvelle loi sur l'énergie nucléaire, un plan a été établi et la recherche de sites de dépôts a commencé. En Allemagne, le dépôt géologique de Konrad a obtenu un permis pour les déchets non thermogènes qui comprennent des déchets à vie longue. Enfin, on notera que la *Waste Isolation Pilot Plant* (WIPP), qui est un dépôt en formation géologique destiné aux déchets transuraniens, continue de bien fonctionner aux États-Unis.

Le stockage géologique est techniquement réalisable

Il est capital, pour la mise en œuvre du stockage en formations géologiques, de démontrer et de le faire savoir de manière claire, scientifiquement rationnelle et convaincante pour les décideurs et le public que le dépôt aura toutes les caractéristiques de sûreté et de sécurité, et cela sur des durées considérables.

La démarche générale à suivre pour les évaluations des caractéristiques techniques et de la sûreté du stockage géologique a fait l'objet d'un vaste consensus, et il existe de nombreux exemples récents d'exploitation réussie des dossiers de sûreté dans le cadre de décisions nationales. Parmi les plus récents figurent la Suisse (2005) et la France (2006). Ces progrès sont dus en grande partie aux échanges d'informations et aux travaux entrepris en coopération sous l'égide d'organisations internationales comme l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) et l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN).

Les expertises menées par l'AEN se sont révélées très utiles pour améliorer les dossiers de sûreté et prendre les décisions qui feront avancer les programmes nationaux à l'étape suivante. Ce fut le cas par exemple du Japon, des États-Unis, de la Suisse et de la France. On notera que les deux expertises concernant les États-Unis ont été organisées en collaboration avec l'AIEA.

Le concept de dépôt en formation géologique repose sur la capacité des barrières ouvragées et de la géologie locale d'assurer des fonctions de sûreté particulières de manière complémentaire ou redondante. Des quantités considérables de données sur les sites et matériaux ont été recueillies à ce jour et une grande expérience a été acquise. Notamment, on est parvenu à approfondir les processus qui interviennent à des échelles spatiales et temporelles différentes, et à réaliser d'importants progrès concernant les techniques de modélisation. Plusieurs installations souterraines de recherche, de démonstration ou de développement existent aujourd'hui. Dans l'ensemble, les spécialistes et les membres du public qui ont participé à ces activités jugent que l'on possède actuellement suffisamment d'éléments pour conclure à la faisabilité technique du stockage géologique.

Les grands défis de la mise en œuvre pratique

Aujourd'hui les programmes nationaux doivent passer au stade difficile de la mise en œuvre du stockage géologique, ce qui suppose de poursuivre les travaux de développement et la procédure

d'autorisation. Du point de vue réglementaire, les recommandations de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR), les Normes fondamentales de sûreté de l'AIEA et la Convention commune sur la sûreté de la gestion du combustible et sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs définissent des objectifs communs qui servent de référence pour cette mise en œuvre. Ce régime international précise en effet les objectifs à viser pour atteindre les niveaux de protection nécessaires, y compris des éléments tels que la création d'un régime réglementaire adapté, la mise en place d'une démarche de décision par étapes et la protection des générations futures sans leur imposer de fardeaux excessifs.

Bien qu'ils aient entrepris de mettre en œuvre ce cadre international et s'appliquent à atteindre les mêmes objectifs de sûreté, tous les pays se trouvent aujourd'hui à différentes étapes du processus et ont donc des besoins dissemblables. Certains d'entre eux ont jugé essentiel d'intégrer les spécificités des dépôts dans le choix des critères de performance de ces installations.

Les autorités de sûreté, les gestionnaires de déchets et les décideurs ont pris conscience peu à peu qu'il ne suffit pas que les spécialistes ne doutent point de la sûreté d'un dépôt pour en convaincre le public. Il est aujourd'hui reconnu qu'une stratégie nationale largement acceptée doit prévoir non seulement les moyens de construire l'installation mais un cadre et une feuille de route offrant aux décideurs et aux publics concernés le temps et les moyens nécessaires pour acquérir la conviction que les diverses décisions et, en fin de compte, le niveau de protection à long terme seront satisfaisants. Dans une première étape, la stratégie consiste à définir la politique énergétique nationale et la place attribuée à l'énergie nucléaire sans négliger la question des déchets. Il est bon d'établir un plan national précisant les modes de gestion finale des différents types de déchets radioactifs qui servira de base aux débats et contribuera à gagner l'adhésion du public.

Autre aspect très important, le cadre international en place, par exemple dans les conventions d'Aarhus et d'Espoo, exige aussi d'informer le public et d'associer la société civile tant au niveau national que par-delà les frontières. On trouve des exigences du même type en droit national, notamment celles qui concernent la transparence des décisions et celles qui exigent la réalisation d'études d'impact sur l'environnement.

La légitimité du processus est une dimension cruciale : il incombe aux pouvoirs exécutif et législatif de définir le processus à respecter et de donner les moyens de le faire. La qualité de ce processus est

également primordiale : les rôles doivent être clairement définis, chacun doit respecter le sien ainsi que les règles du processus, et enfin tous les intervenants doivent se montrer dignes de confiance et responsables.

On notera avec intérêt que les rôles assignés aux différents acteurs ont considérablement évolué avec le temps (voir tableau). Le public, par exemple, conçoit de plus en plus l'autorité de sûreté comme le spécialiste au service de la population et attend qu'elle joue ce rôle. Les communes hôtes, de leur côté, occupent désormais une place de premier plan dans le nouvel environnement décisionnel. De plus en plus, elles participent à la négociation de solutions acceptables localement qui minimisent les effets négatifs, favorisent un développement local, une maîtrise locale et des partenariats, et instaurent une relation durable entre l'installation et la collectivité qui l'accueille.

Un objectif commun mais des parcours divers

La culture, la politique et l'histoire varient avec les pays, cette recherche de la confiance du public et son maintien s'inscrivent dans des contextes différents. Ce qui réussira dans un pays risque d'échouer ailleurs. L'ouverture à différents points de vue doit inciter à s'ouvrir à des pays dont les processus et critères réglementaires reflètent des valeurs culturelles individuelles et sociales autres, ce qui, à l'échelle internationale, peut donner lieu à des similitudes ou des disparités. Là où l'on s'attendait à trouver par exemple une approche réglementaire, des critères de sûreté et un échéancier identiques, on trouve aujourd'hui un reflet plus complexe des intérêts nationaux et transnationaux, des valeurs sociales et des points de vue culturels régionaux et locaux. Or ces disparités dans la réglementation et sa mise en œuvre peuvent se révéler non seulement justifiées, mais essentielles pour gagner la confiance et l'adhésion du public.

Ces similitudes et différences culturelles, sociales et géographiques ont peut-être dessiné des trajectoires variées, mais les solutions choisies au niveau national pour le stockage reposent sur des objectifs de sûreté et de sécurité communs. Il devient alors nécessaire de chercher en permanence à comprendre comment cette progression a été possible et comment on pourrait atteindre les mêmes objectifs dans un autre pays en suivant un parcours différent. Les enceintes internationales sont à cet égard essentielles pour révéler les similitudes et différences, mais également pour dégager les thèmes principaux et les enseignements à tirer.

Rôles et responsabilités traditionnels et nouveaux

Parties prenantes	Rôles et responsabilités traditionnels	Nouveaux rôles et responsabilités
Décideurs	Définir les choix de politiques, étudier leurs conséquences dans diverses hypothèses, faire les choix stratégiques.	Informar et consulter les parties prenantes sur les choix de politiques, les hypothèses, les conséquences prévues, les valeurs et les préférences. Définir des règles de base pour les processus de décision. Communiquer les fondements des décisions stratégiques.
Autorités de sûreté (décideurs chez les autorités de sûreté)	Définir les choix réglementaires, étudier leurs conséquences dans différentes hypothèses, effectuer les choix.	Informar et consulter les parties prenantes sur les options réglementaires, les hypothèses, les conséquences prévues, les valeurs et les préférences. Informar des justifications des décisions réglementaires. Assurer une expertise indépendante aux collectivités locales.
Experts et consultants scientifiques	Fournir des données faisant autorité aux décideurs.	Fournir des informations impartiales et faisant autorité aux parties prenantes et ainsi contribuer à des jugements comparatifs éclairés. Rôle d'intermédiaires techniques entre le grand public et les décideurs.
Gestionnaires de déchets	Trouver une solution de gestion des déchets radioactifs et la mettre en œuvre.	Coopérer avec les collectivités locales de façon à trouver une solution acceptable pour la gestion des déchets radioactifs. Coopérer avec les collectivités locales à la mise en œuvre de cette solution.
Communes d'accueil pressenties	Accepter ou rejeter l'installation proposée.	Négocier avec les gestionnaires de déchets afin de trouver, pour la gestion des déchets radioactifs, des solutions localement acceptables qui permettent de réduire au minimum les impacts négatifs et simultanément favorisent le développement local, la maîtrise locale et le partenariat.
Élus locaux ou régionaux	Représenter leur électorat lors des discussions sur les installations de gestion des déchets radioactifs.	Servir d'arbitre entre les différents niveaux de pouvoir, les institutions et les collectivités locales pour faciliter la recherche de solutions acceptables par tous.
Producteurs des déchets	Financer partiellement ou intégralement la gestion des déchets radioactifs.	Financer la gestion des déchets radioactifs selon des modalités transparentes et apporter la preuve de cette transparence.

Conclusions

Il fut un temps où le stockage des déchets radioactifs en formations géologiques était considéré comme une activité provisoire qui ne durerait que l'espace d'une génération, l'objectif étant de construire une installation qui pourrait renfermer les déchets radioactifs en toute sécurité sans nécessiter d'opération ultérieure ni d'intervention des générations futures. De plus en plus, la mise en œuvre d'un projet de stockage est conçue comme un processus par étapes qui pourrait s'étaler sur plusieurs dizaines d'années. Cette vision nouvelle repose non seulement sur le concept de la protection des générations futures, mais elle fait hypothèse de leur participation au processus et de la nécessité de leur laisser la possibilité de choisir. Ces dix dernières années ont vu évoluer les rôles et le nombre des acteurs concernés et simultanément une progression de la complexité de la démarche de mise en œuvre d'un dépôt.

Les travaux de l'AEN ont profondément marqué la gestion de déchets radioactifs ainsi que les approches correspondantes à travers le monde. À la Conférence internationale sur le stockage géologique qui a eu lieu à Berne, en Suisse, au mois d'octobre 2007, les pays ont réaffirmé poursuivre l'objectif commun du stockage en formations géologiques dans des conditions sûres et souligné une fois de plus que l'attention soutenue des décideurs est déterminante pour la poursuite d'un processus qui devrait durer des dizaines d'années. Ils sont également parvenus à la conclusion que ces divers parcours possibles sont des voies complémentaires liées aux différents modes de gouvernance modernes, démocratiques mais propres à chaque pays. La communication à toutes les parties prenantes de cette vision commune des décideurs peut influencer de façon importante sur leur confiance. ■

Incidences des conditions de financement et de l'impôt sur les coûts de production de l'électricité

E. Bertel, J. Planté*

L'AEN effectue régulièrement des études économiques pour aider les pays membres à réaliser leurs propres évaluations avant de prendre des décisions concernant le secteur électrique. Dans le cadre des études entreprises sous l'égide du Comité chargé des études techniques et économiques sur le développement de l'énergie nucléaire et le cycle du combustible (NDC) de l'AEN, plusieurs outils ont été employés pour calculer les coûts de la production d'électricité, leurs différents éléments et leur sensibilité aux différents paramètres. Le modèle présenté dans cet article a été mis au point pour évaluer l'impact des conditions de financement et des impôts sur le revenu sur les coûts de production.

Les estimations des coûts de la production d'électricité que l'on trouve dans maintes études nationales et internationales contiennent de nombreuses données que l'on peut exploiter pour effectuer des évaluations économiques et finalement choisir des moyens et technologies de production. Toutefois, si le coût de production de l'électricité est le critère généralement adopté pour présenter les résultats, il est calculé diversement suivant les études, car la méthode sélectionnée doit s'appliquer au projet particulier (investisseur privé ou public, différences régionales...).

Les compagnies d'électricité, les autorités publiques et les organisations internationales se servent souvent de la méthode de calcul traditionnelle des coûts moyens actualisés pour réaliser des évaluations économiques des différents modes de production d'électricité. Cette méthode fournit des

résultats transparents et robustes particulièrement bien adaptés aux études préliminaires et aux comparaisons internationales. Toutefois, étant strictement économique, elle ne tient pas compte de tous les facteurs qui déterminent le choix des investisseurs sur des marchés de l'électricité ouverts. Elle laisse par exemple de côté les conditions de financement et les impôts sur le revenu, qui peuvent avoir pourtant des répercussions significatives sur le coût en capital à payer par l'investisseur.

L'approche décrite ci-dessous s'inscrit dans le cadre général de l'évaluation des coûts moyens actualisés sur la durée de vie de l'installation, mais elle tient compte également des conditions du montage financier adopté par l'investisseur et des impôts sur le revenu payés par l'exploitant de la centrale ou la compagnie d'électricité. Elle s'apparente aux modèles employés pour analyser les caractéristiques économiques de modes de production de l'électricité concurrents sur des marchés d'électricité ouverts tels que le modèle des flux de trésorerie d'une « marchand plant » adopté par le MIT¹.

Le modèle, ou outil de calcul mis au point pour l'application de cette approche a été utilisé pour effectuer des calculs sur des centrales nucléaires, à

* Mme Evelyne Bertel (evelyne.bertel@oecd.org) est Administrateur principal dans la Division du développement de l'énergie nucléaire de l'AEN. M. Jacques Planté (jacques.plante@soltem.com) est consultant auprès de l'AEN.

charbon ou à gaz et ainsi illustrer concrètement la façon d'appliquer cette méthodologie. Ces calculs étaient destinés à estimer l'impact des modes de financement et des impôts sur la compétitivité relative des différentes sources et technologies de production d'électricité.

Les résultats sont des coûts détaillés de production d'électricité estimés pour différents contextes variant avec le mode de financement et les impôts sur le revenu. Ils révèlent comment ces conditions influent sur les coûts de production et aussi comment l'effet résultant varie en fonction du mode de production. Ils montrent notamment que ces deux facteurs ont un impact sur la composante « capital » des coûts de production qui n'est pas indépendant de la technologie employée.

Les hypothèses adoptées pour les données d'entrée, à savoir les coûts unitaires et les conditions économiques, se rapportent à la situation actuelle mais ne renvoient pas à une technologie, une filière de réacteurs ou un pays particuliers. Deux situations sont considérées : des conditions de financement assez faciles et des conditions difficiles. À partir des données correspondant aux conditions particulières d'un investisseur ou d'une entreprise d'électricité pour un projet particulier, l'outil de calcul peut être appliqué à des études de cas spécifiques concernant des choix concrets de mode de production de l'électricité.

Méthodologie

Pour replacer la démarche adoptée dans son contexte, il est bon de rappeler le principe de la méthode du coût moyen actualisé sur la durée de vie de l'installation qui est utilisée, par exemple, dans les études de l'OCDE². Cette méthode consiste à calculer la valeur actuelle des séries chronologiques des dépenses, pour une année de référence donnée, en leur appliquant un taux d'actualisation. On applique une méthode analogue à la production d'électricité pour calculer sa valeur actualisée. Le ratio des dépenses actualisées à la production actualisée d'électricité donne le coût de l'électricité actualisé sur la durée de vie de l'installation, qui s'exprime en monnaie constante de l'année de référence. Ce coût souvent calculé aux bornes de la centrale se ventile en général en coût en capital, coût du combustible, et coût d'exploitation et de maintenance.

La démarche employée ci-dessous se différencie principalement de la méthode du coût actualisé par la façon dont sont traités les investissements ou coûts en capital. Les calculs sont effectués en monnaie nominale/courante, ce qui revient à dire que, à partir d'une valeur initiale adoptée pour l'année

de base, tous les coûts sont majorés en appliquant un taux d'inflation hypothétique. Si nécessaire, il est possible d'imprimer au taux d'inflation une tendance positive ou négative dans le temps. Les remboursements des prêts sont calculés conformément au taux d'intérêt de l'emprunt qui déjà intègre les tendances de l'inflation.

Les dépenses annuelles correspondant à l'investissement, aux coûts du combustible et aux coûts d'exploitation et de maintenance, ainsi que les impôts sur le revenu, sont calculées en fonction de l'inflation. Ces dépenses recouvrent également la gestion et le stockage des déchets ainsi que les coûts du démantèlement, le cas échéant (s'il s'agit de centrales nucléaires par exemple). Les investissements en capitaux sont traités en deux parties : les capitaux propres et l'emprunt (dépenses pendant la période de remboursement). L'amortissement annuel du capital est également calculé pour évaluer les impôts puisque les impôts sur le revenu sont perçus sur le revenu imposable calculé en déduisant du revenu net total l'amortissement de l'actif.

Les recettes annuelles sont calculées en multipliant la production annuelle par le prix de gros de l'électricité. Le prix de vente de l'électricité augmente avec le taux d'inflation mais reste néanmoins inchangé en valeur monétaire constante sur toute la durée de vie de l'installation.

On obtient alors les flux de trésorerie en déduisant les dépenses des recettes. À partir de ce flux de trésorerie, on calcule année après année le taux de rendement interne ou le rendement des capitaux propres, dont la valeur devient positive en même temps que celle du flux de trésorerie cumulé.

Ce modèle peut être utilisé pour des calculs de rentabilité ou du coût de production.

- **Calcul de la rentabilité.** Le prix de l'électricité est une donnée d'entrée et le modèle calcule le taux de rendement interne. Ce chiffre peut être obtenu soit sur toute la durée de vie économique de l'installation ou sur un nombre donné d'années d'exploitation si les actionnaires souhaitent obtenir un rendement des capitaux propres sur une période plus courte.
- **Calcul du coût de production.** Après un certain nombre d'années d'exploitation, le taux de rendement interne devient une entrée, et le modèle calcule le prix de vente de l'électricité qui permet de l'obtenir. Étant donné que ce prix de vente reste identique en monnaie constante au fil du temps, il peut être assimilé à un coût de production actualisé de l'électricité correspondant au taux de rendement des capitaux propres présélectionné.

L'atout supplémentaire de ce modèle tient au fait qu'il comporte, en plus de l'estimation du taux de rendement interne à partir des flux de trésorerie ou de celle du prix de vente de l'électricité, un calcul des dépenses actualisées pour un taux d'actualisation (inflation incluse) égal au taux de rendement interne. À partir des échéanciers de dépenses calculés dans le modèle de flux de trésorerie d'une « merchant plant », on peut calculer les dépenses actualisées et actualiser également la production d'électricité annuelle. Cette partie du modèle s'apparente au modèle économique classique employé pour calculer le coût de production actualisé, à ceci près qu'il faut appliquer un taux d'actualisation nominal pour actualiser les dépenses exprimées en valeurs nominales.

Cette fonction supplémentaire du modèle permet d'évaluer dans le détail les répercussions des conditions de financement et des impôts sur le revenu sur les coûts actualisés de la production d'électricité. Comme le montrent les calculs présentés ci-dessous, il est ainsi possible de calculer les trois composantes du coût de production actualisé (capital, combustible, exploitation et maintenance) et de faire ressortir séparément l'impôt sur le revenu du coût en capital.

Hypothèses

Le calcul est effectué pour trois modes de production d'électricité : le nucléaire, le gaz et le charbon sur des marchés libéralisés et dans les conditions moyennes rencontrées aux États-Unis. Les hypothèses techniques et les coûts unitaires (voir tableau 1) ne sont pas censés correspondre à une filière par-

ticulière, mais être représentatifs des modèles de tranches électriques que l'on trouve actuellement sur le marché.

Par commodité, les calculs ont été normalisés à des centrales de 1000 MWe, mais les résultats sont valables indépendamment de la taille de l'installation pourvu que les coûts en capital hors intérêts intercalaires pris comme hypothèse (en USD/kWe installé) soient adaptés aux centrales considérées. Les données de coût entrées et les résultats, c'est-à-dire les coûts de production par kWh, sont exprimés en USD de 2007.

Comme nous l'avons indiqué ci-dessus, les calculs ont été effectués pour deux situations économiques et financières contrastées (contraintes financières moyennes ou fortes) sachant que les paramètres financiers peuvent varier en fonction de la perception des risques qu'ont les investisseurs et les établissements bancaires. Ces paramètres financiers ont été résumés sur le tableau 2.

Un contexte financier contraignant correspond à une situation où l'investisseur manifeste peu de confiance dans des projets de production électrique, ce qui implique un fort ratio fonds propres/endettement, des rendements élevés des fonds propres et des taux d'intérêt également élevés. Un contexte financier moyen se caractérise par le fait que les investisseurs potentiels ont confiance dans la viabilité économique de projets de production électrique : d'où un faible ratio fonds propres/endettement, un rendement plus faible des capitaux propres et des taux d'intérêt plus bas.

Tableau 1. Données techniques et éléments de coût

	Unités	Nucléaire	Gaz	Charbon
Coût en capital hors intérêts intercalaires	USD/kW	2000	650	1400
Durée de vie de la centrale	années	40	25	40
Durée de construction	mois	60	24	48
Facteur de charge	%	90	90	90
Rendement thermique PCI	%	33	58	44
Démantèlement	millions d'USD	350	0	0
Coût du combustible	USD/MBtu ou tonne	0,50/MBtu	6,0MBtu	40/tonne
Augmentation des coûts du combustible	%	0	0	0
Gestion des déchets	cents/kWh	0,1	0	0
Coûts d'exploitation et de maintenance	USD par kW par an	50	25	50
Augmentation des coûts d'exploitation et de maintenance	%	0	0	0
Coût en capital annuel incrémental	USD/kW	20	6	12

Tableau 2. Paramètres financiers

	Unités	Contraintes financières moyennes			Fortes contraintes financières		
		Nucléaire	Gaz	Charbon	Nucléaire	Gaz	Charbon
Taux d'inflation	% annuel	3	3	3	3	3	3
Pourcentage de fonds propres	%	30	30	30	60	60	60
Rentabilité du capital	%	12	12	12	15	15	15
Délai de reconstitution des fonds propres	années	40	25	40	25	25	25
Pourcentage d'endettement	%	70	70	70	40	40	40
Taux d'intérêt de la dette	%	7	7	7	9	9	9
Durée de la dette	années	15	15	15	15	15	15
Taux de l'impôt sur le revenu	%	38	38	38	38	38	38
Amortissement	années	15	15	15	15	15	15
Tableau d'amortissement		MACRS*			MACRS*		

* MACRS = méthode modifiée de recouvrement accéléré des coûts.

Les conditions de financement sont par hypothèse identiques pour les trois technologies, nucléaire, charbon et gaz, ce qui n'est pas le cas de certaines études qui invoquent le fait que certaines énergies ou technologies sont perçues par les investisseurs potentiels comme présentant davantage de risques. Avec notre modèle, il serait aisé de réaliser des analyses de sensibilité pour étudier les effets d'une variation des contraintes financières avec les technologies.

Impact des conditions de financement

Les tableaux 3 et 4 contiennent les coûts de production de l'électricité dans les centrales au charbon, les centrales au gaz et les centrales nucléaires en présence de contraintes financières moyennes ou fortes et sachant que les données d'entrée et les paramètres financiers sont ceux figurant sur les tableaux 1 et 2. Les figures 1 et 2 donnent une représentation graphique de ces résultats.

Les différentes composantes du coût montrent que la prise en compte de l'impôt sur le revenu dans le calcul provoque une hausse des coûts de production quelle que soit la filière employée, mais que les effets des conditions de financement et de l'impôt sur le revenu varient substantiellement en fonction des technologies. En effet, le revenu imposable spécifique (par kWh) est très sensible à la structure de coût du mode de production considéré.

Le revenu imposable annuel, qui correspond aux recettes qui seront affectées au paiement du rendement des fonds propres, est égal aux recettes moins les dépenses totales d'exploitation, à savoir

Tableau 3. Coûts de production de l'électricité (USD/MWh) – Contraintes financières moyennes

	Nucléaire	Gaz	Charbon
Capital hors impôt sur le revenu	2,49	0,79	1,63
Impôt sur le revenu	0,39	0,10	0,25
Capital incluant l'impôt sur le revenu	2,88	0,89	1,88
Frais d'exploitation et de maintenance	0,63	0,34	0,63
Combustible	0,62	3,92	1,33
Total hors impôt sur le revenu	3,74	5,05	3,59
Total incluant impôt sur le revenu	4,13	5,15	3,84

Tableau 4. Coûts de production de l'électricité (USD/MWh) – Fortes contraintes financières

	Nucléaire	Gaz	Charbon
Capital hors impôt sur le revenu	3,77	1,05	2,45
Impôt sur le revenu	1,08	0,26	0,69
Capital incluant l'impôt sur le revenu	4,85	1,31	3,14
Frais d'exploitation et de maintenance	0,63	0,34	0,63
Combustible	0,62	3,92	1,32
Total hors impôt sur le revenu	5,02	5,31	4,40
Total incluant impôt sur le revenu	6,10	5,57	5,09

Figure 1. Coûts de production de l'électricité – Contraintes financières moyennes

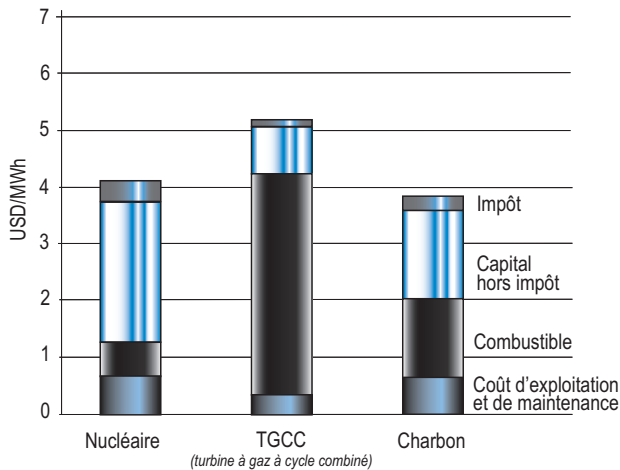
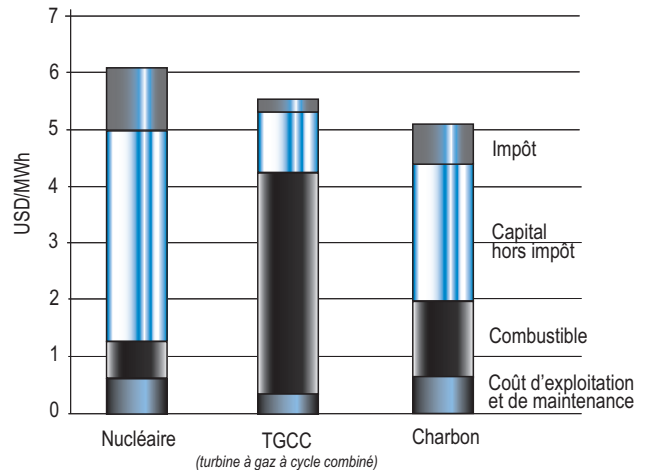


Figure 2. Coûts de production de l'électricité – Fortes contraintes financières



les coûts du combustible et les coûts d'exploitation et de maintenance, moins le service des intérêts et l'amortissement des actifs. Comme ce revenu imposable dépend de l'investissement en capital nécessaire pour financer la construction de la centrale, du ratio fonds propres/endettement et du rendement des capitaux propres exigé, le rendement annuel imposable spécifique sera plus élevé pour les modes de production d'électricité capitalistiques comme l'énergie nucléaire, moindre dans le cas des centrales au charbon et encore plus faible dans celui des centrales au gaz.

- En présence de contraintes financières moyennes, le coût de production augmente de 10 % dans le cas de l'énergie nucléaire, de 7 % pour le charbon et de seulement 2 % pour le gaz.
- Dans des conditions financières contraignantes, les écarts sont encore plus prononcés puisque l'augmentation est de 22 % pour le nucléaire, 16 % pour le charbon et 5 % pour le gaz.

Par conséquent, la prise en compte de l'impôt sur le revenu dans le coût de production peut modifier la compétitivité relative des modes de production d'électricité. Ainsi, avec les hypothèses et les données d'entrée adoptées dans l'étude mentionnée, dans des conditions financières contraignantes, l'énergie nucléaire revient moins cher que le gaz si l'on exclut les impôts, mais le gaz est moins cher lorsque les impôts sont inclus. D'où l'importance de n'omettre dans la présentation des résultats détaillés d'une estimation de coûts aucune hypothèse, donnée d'entrée ou condition aux limites adoptées.

Sensibilité au taux de l'impôt sur le revenu

Comme nous l'avons observé précédemment, le calcul de base a été effectué pour des marchés libéralisés correspondant aux conditions moyennes rencontrées aux États-Unis. Par conséquent, le taux de l'impôt sur le revenu a été fixé à 38 %.

Ce taux varie toutefois avec les pays de 15 % environ à plus de 40 %. Il est, par conséquent, intéressant d'étudier les répercussions de cette variation sur les résultats, tous les autres paramètres restant inchangés. Le calcul de sensibilité tient compte d'un taux d'imposition sur le revenu variant de 15 à 45 %.

Comme dans le scénario de base, le calcul de sensibilité a été effectué pour des centrales à charbon et à gaz et pour des centrales nucléaires. Les figures 3 et 4 illustrent les effets de la variation du taux d'imposition sur le coût de production de l'électricité, exprimés en pourcentage de ce coût.

Lorsque les contraintes financières sont moyennes (figure 3), le ratio de l'impôt sur le revenu au coût de production varie de 2,9 % à 12,4 %, dans le cas du nucléaire, de 0,6 % à 2,5 %, dans celui du gaz, et de 1,9 % à 8,4 % pour le charbon. Si les contraintes financières sont fortes (figure 4), le ratio de l'impôt sur le revenu au coût de production évolue dans une fourchette allant de 5,8 % à 22,4 % dans le cas du nucléaire, de 1,3 % à 6,0 % pour le gaz et de 4,3 % à 17,3 % pour le charbon.

Il convient de souligner que les résultats présentés sur les figures 3 et 4 sont valables pour les hypo-

Figure 3. Ratio impôt sur le revenu/coût de production de l'électricité – Contraintes financières moyennes

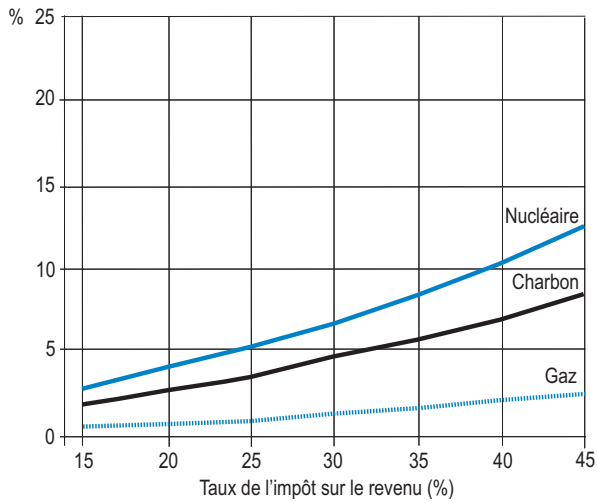
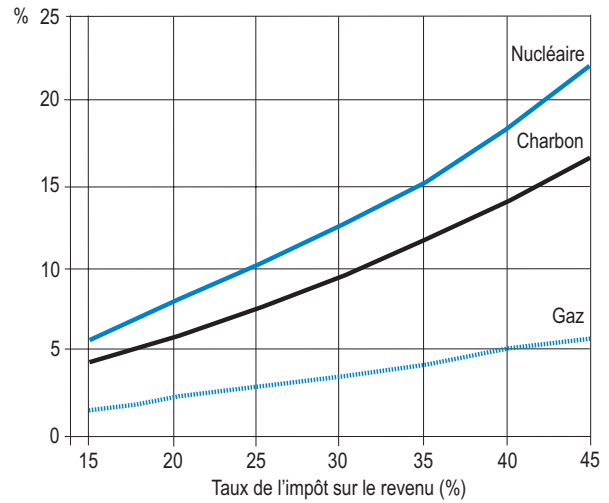


Figure 4. Ratio impôt sur le revenu/coût de production de l'électricité – Fortes contraintes financières



thèses et données d'entrée résumées sur le tableau 1. Hors de ce contexte, ils pourraient être très différents, notamment si l'importance du coût en capital par rapport au coût du combustible et aux coûts d'exploitation et de maintenance s'éloigne du niveau supposé dans les calculs effectués à titre d'exemple. Lorsque les coûts en capital sont proportionnellement plus forts, la sensibilité des coûts de production au taux d'imposition augmente et vice versa.

Conclusions

Les coûts de production moyens estimés par la méthode traditionnelle, qui ne tient pas compte des conditions financières, ni de l'impôt sur le revenu, constituent une base satisfaisante pour la sélection des modes de production et les comparaisons internationales. Ils ne permettent pas néanmoins de faire apparaître l'intégralité des paramètres qui déterminent les choix des investisseurs. L'intégration des contraintes financières et des impôts dans les calculs de coûts donne des estimations plus instructives pour qui veut comprendre les choix des investisseurs sur des marchés de l'électricité ouverts à la concurrence.

Les calculs effectués ici à titre d'illustration en faisant varier le taux de l'impôt sur le revenu dans des situations financières contrastées démontrent que la prise en compte de ces paramètres peut modifier la compétitivité relative des différents modes de pro-

duction d'électricité. Il en ressort qu'il importe, dans toute estimation de coûts, de présenter les résultats détaillés assortis de toutes les hypothèses, données d'entrée et conditions aux limites.

Les résultats obtenus montrent que les régimes d'imposition adoptés par les gouvernements ont des répercussions sur les coûts de production qui ne sont pas indépendantes de la technologie. Les décideurs publics pourraient en tenir compte pour mettre en œuvre un régime fiscal en harmonie avec les objectifs de la politique énergétique nationale. ■

Références

1. MIT (2003), *The Future of Nuclear Power*, MIT, Cambridge, MA.
2. AEN et AIE (2005), *Coûts prévisionnels de production de l'électricité*, OCDE, Paris.

50 ans de radioprotection à l'AEN : une réussite

T. Lazo*

Le 21 mars 1957, le Comité de direction de l'énergie nucléaire de l'Organisation de coopération économique européenne (OCEE) créa le Groupe de travail sur la santé publique et la sécurité, le prédécesseur de l'actuel Comité de protection radiologique et de santé publique (CRPPH). En mai 2007, ce Comité célébra 50 ans de travail au service de ses membres lors d'une manifestation d'un jour, tournée vers l'avenir et organisée au cours de la session annuelle du Comité. Il s'agissait à cette occasion de dresser le bilan des réalisations du CRPPH, mais aussi d'identifier les nouveaux défis pour la communauté des radioprotectionnistes dans son ensemble et de favoriser un véritable dialogue entre les autorités nationales et les organisations internationales afin d'identifier de nouvelles possibilités et démarches pour relever ces défis.

Assistèrent à cette manifestation de nombreux anciens présidents et membres éminents du Comité ainsi que plusieurs dirigeants d'autorités de sûreté et hauts représentants d'organisations internationales. La manifestation débuta par un court rappel de l'histoire du Comité et de ses réalisations, puis passa vite à une projection dans l'avenir. Se référant au rapport récent du Comité intitulé *La radioprotection aujourd'hui et la voie du développement durable* (AEN, 2007), les orateurs évoquèrent les nouveaux défis et la façon dont les gouvernements et organisations internationales pourraient travailler ensemble pour les résoudre de manière proactive.

Histoire du CRPPH

La radioprotection à l'AEN voit véritablement le jour avec la création du Groupe de travail sur la santé publique et la sécurité, près d'un an avant la création de l'Agence européenne pour l'énergie nucléaire de l'OCEE. Le Comité de direction de l'énergie nucléaire demande à ce groupe d'élaborer un programme de travail dans le domaine de la radioprotection et de la santé publique et de prévoir un mécanisme pour le mettre en œuvre. Ce

mécanisme serait le Sous-comité de la santé et de la sécurité, créé le 21 février 1958 et qui prit ensuite le nom de Comité de radioprotection avant de devenir le Comité de protection radiologique et de santé publique (CRPPH) en 1973.

La naissance du Groupe de travail et du Sous-comité de la santé et de la sécurité inaugure la coopération internationale dans le domaine de l'énergie nucléaire. Les préoccupations du moment conduisent naturellement les principales autorités sanitaires nationales et les spécialistes de la radioprotection à se réunir au sein d'un forum permanent doté de compétences très larges. Ces préoccupations concernent en particulier les conséquences éventuelles des essais atmosphériques d'armes atomiques, les perspectives de développement des programmes électronucléaires et des diverses applications des radio-isotopes dans un contexte où l'on commence à prendre conscience de la nécessité de protéger l'homme et la biosphère contre les effets des rayonnements. Ces préoccupations ont cédé la place à d'autres qui furent nombreuses tout au long de l'histoire du Comité, et notamment la question des normes de radioprotection, le stockage des déchets radioactifs, la gestion des situations de crise nucléaire, la radiobiologie et la science de la radioprotection ainsi que la démarche participative. Les grands thèmes de la radioprotection propres à chaque période (par exemple les recommandations de la Commission internationale de protection radiologique, l'immersion des déchets radioactifs, Tchernobyl) se retrouvent dans les programmes de travail du Comité, qui ont permis aux gouvernements et aux organisations internationales de trouver des réponses à ces questions. En résumé,

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

le CRPPH a, au cours de ces 50 années d'existence, centré son travail sur les sujets les plus pressants tout en se projetant dans l'avenir pour être à même de détecter à temps les problèmes naissants.

Principaux résultats du CRPPH

Tout au long de son histoire, le CRPPH a étudié de près les concepts et principes de la protection radiologique ainsi que leur application réglementaire et opérationnelle. Il n'a cessé d'accompagner le développement de l'énergie nucléaire, voire, à l'occasion, de l'anticiper et de prendre des mesures judicieuses pour faire face à des situations difficiles parfois dramatiques. On citera à titre d'exemple le Programme coordonné de recherche et de surveillance du milieu lié à l'immersion de déchets radioactifs en mer (CRESP), les travaux dans le domaine de la gestion des déchets radioactifs ainsi que les activités du Comité à la suite de la catastrophe de Tchernobyl, qui ont indéniablement marqué les orientations du Comité.

Le lecteur trouvera ci-dessous quelques exemples des travaux les plus importants entrepris par le CRPPH au cours de ces 50 années.

Premières normes de radioprotection

En 1959, 1963 et 1968, le CRPPH a publié des normes de radioprotection avant d'abandonner cette activité pour privilégier les normes de l'Union européenne et de l'Agence internationale de l'énergie atomique. Dans les années 70 jusque dans les années 80, il a toutefois continué de produire des recommandations concernant d'autres domaines tels que la gestion des produits de consommation, les dispositifs lumineux au tritium gazeux, les détecteurs de fumée à chambres d'ionisation et les stimulateurs cardiaques. Puis cette activité a été progressivement abandonnée au profit d'autres organisations.

Relations avec la CIPR

Tout au long de son existence, le CRPPH a collaboré avec la Commission internationale de protection radiologique (CIPR). Dans un premier temps il se contentait de revoir et d'évaluer les normes récemment publiées par la CIPR. Il est devenu aujourd'hui un lieu de dialogue actif avec la CIPR pendant l'élaboration même des nouvelles normes.

CRESP

À partir de 1974, plusieurs pays membres de l'AEN déversaient en mer leurs déchets radioactifs sur un seul site au nord-est de l'Atlantique. Pour respecter les objectifs d'une décision du Conseil de l'OCDE, l'AEN a réuni en 1979 un groupe international d'océanographes et de radioprotectionnistes afin

d'étudier la possibilité de continuer à immerger les déchets sur ce site étant donné les dispositions de la Convention de Londres sur l'immersion des déchets et des définitions et recommandations de l'AIEA aux fins de cette Convention. Le Programme coordonné de recherche et de surveillance du milieu lié à l'immersion de déchets radioactifs en mer, ou CRESP, a, par conséquent, été lancé en 1981 afin d'enrichir encore les bases scientifiques et techniques de futures évaluations du site d'immersion au nord-est de l'Atlantique. Ce programme a été mené aux termes de l'article 2(a)iii de la décision du Conseil de l'OCDE établissant un mécanisme multilatéral de consultation et de surveillance de l'immersion en mer des déchets radioactifs. L'immersion en mer des déchets radioactifs a cessé en 1982, et l'activité de surveillance du site de déversement qui avait été confié à l'AEN a pris officiellement fin en 1995.

Rapports scientifiques

Parce qu'il s'agit d'un Comité réunissant des scientifiques et des spécialistes de la réglementation, le CRPPH n'a cessé de réaliser des études scientifiques d'une qualité très appréciée. On trouvera ci-dessous une liste des sujets abordés au fil des ans :

- la radioécologie marine (1968) ;
- l'importance radiologique et la gestion du tritium, du carbone-14, du krypton-85 et de l'iode-129 produits au cours du cycle du combustible nucléaire (1980) ;
- le comportement biologique et environnemental du plutonium et d'autres éléments transuraniens (1981) ;
- la dosimétrie de l'exposition au radon et au thoron et à leurs produits de filiation (1985) ;
- l'absorption par voie gastro-intestinale de certains radionucléides (1998) ;
- les évolutions de la radiobiologie et de la radiopathologie et leurs répercussions sur la radioprotection (1998) ;
- les problèmes scientifiques et les nouveaux défis pour la radioprotection (2007).

Opinions collectives du CRPPH

Un autre rôle du CRPPH consistait à préparer des conférences et à rédiger les « opinions collectives » résultantes qui étaient ensuite soumises à un débat international. Parmi les opinions collectives rédigées, on retiendra *La radioprotection aujourd'hui et demain* (1994), *Évolutions de radiobiologie et de radiopathologie : répercussions sur la radioprotection* (1998), *Analyse critique du système de protection radiologique* (2000) et *La radioprotection aujourd'hui et la voie du développement durable* (2007).

Démarche participative

L'idée que les décisions prises en radioprotection relèvent pour une part infime de la science et pour le reste du jugement social a fait son chemin lentement mais sûrement chez les spécialistes, surtout grâce au fait que le CRPPH a commencé à s'intéresser à ce sujet dès 1994. Au cours des trois ateliers organisés à Villigen, en Suisse, le CRPPH a aidé à comprendre les conditions dans lesquelles il est nécessaire de faire participer la société civile aux décisions de radioprotection et les meilleures approches pour y parvenir si l'on veut pouvoir prendre des décisions facilement applicables et durables.

Le Système d'information sur la radioexposition professionnelle (ISOE)

À partir de 1992, l'AEN a créé un « club » de spécialistes de la radioprotection venant des centrales nucléaires et des autorités de sûreté, et qui avait pour mission de faciliter les échanges de données, d'expérience et d'enseignement. Depuis, la base de données d'ISOE sur la radioexposition professionnelle est devenue la base la plus riche au monde sur les centrales nucléaires (elle contient des données sur plus de 400 centrales du monde entier). Le réseau ISOE a si bien facilité les échanges d'expérience de la gestion des expositions que, depuis 1992, les expositions professionnelles ont été réduites de moitié.

Exercices internationaux d'urgence nucléaire (INEX)

Depuis l'accident de Tchernobyl surtout, la gestion des crises nucléaires est au centre des travaux des autorités de sûreté nucléaire. Pour aider les pays membres de l'AEN à améliorer leurs capacités dans ce domaine, le CRPPH a constitué un Groupe de travail sur les urgences nucléaires (WPNEM). Les exercices INEX constituent une source primordiale d'expérience et d'enseignements dans ce domaine. Organisés en 1993 (INEX 1), puis de 1996 à 2000 (INEX 2) et encore en 2006 (INEX 3), les exercices internationaux de cette série ont permis aux instances chargées de la gestion de crises de tester et d'améliorer les méthodes, mécanismes et procédures adoptés pour traiter les aspects internationaux et nationaux d'accidents nucléaires majeurs.

L'accident de Tchernobyl

Le CRPPH a publié sept rapports sur l'accident, évaluant ses répercussions dans les pays membres de l'AEN et analysant les leçons tirées de réhabilitation aux niveaux social, économique et environnemental. Les enseignements de Tchernobyl ont profondément influencé les méthodes adoptées pour le programme INEX.

Cadre décisionnel de demain

Les progrès de la science de la radioprotection, une plus grande expérience de sa mise en œuvre ainsi que les évolutions sociales sont autant de facteurs qui conditionnent la façon dont les principes de radioprotection sont interprétés et mis en pratique. Dressant un bilan de la situation actuelle, l'opinion collective du CRPPH de 2007 fait valoir que l'évolution dans ces domaines devrait ébranler toujours plus nos conceptions actuelles de la politique, de la réglementation et de la pratique de la radioprotection et qu'elles exigent de nouveaux points de vue et modes de pensée.

Ce besoin de nouvelles manières de penser ne découle pas d'un bouleversement qui serait survenu en sciences, dans la pratique ou dans la société. C'est plutôt la somme de petites évolutions progressives dans ces trois domaines qui révèle la nécessité de changer. Il est possible de décrire les effets du changement sur certains types de situations ainsi que la façon d'aborder ces situations pour pouvoir assurer la protection radiologique la plus appropriée compte tenu des circonstances. À cet égard, le CRPPH a identifié quatre grands domaines qui exigeront d'adopter de nouvelles approches. Le premier, reflet des défis rencontrés aux niveaux de la politique et de la réglementation, concerne l'arbitrage à réaliser entre des besoins locaux, nationaux et internationaux pour identifier et mettre en œuvre des solutions de protection radiologique durables. Le deuxième, qui a trait aux problèmes d'application, recouvre les manières d'identifier la protection la plus appropriée pour les travailleurs et le public. Le troisième porte sur la mise en œuvre des principes de protection radiologique dans quatre situations particulières : les zones et matières contaminées, le démantèlement des installations, les expositions médicales et les situations d'urgence radiologique et actes de malveillance. Le quatrième domaine, lié au développement rapide des usages des rayonnements, se rapporte à la préservation des compétences et à la transmission des savoirs d'une génération à l'autre.

Évolutions scientifiques

La recherche scientifique nous permet d'apprécier toujours mieux les risques radiologiques. Par le passé, la complexité de la radiobiologie et de la cancérogenèse a imposé des évaluations reposant essentiellement sur des études épidémiologiques macroscopiques de populations exposées d'hommes, d'animaux, d'insectes et de plantes. Toutefois, des études à l'échelle microscopique qu'ont rendues possible la biologie génétique et cellulaire moderne ont contribué de manière significative à notre compréhension

des réactions de l'homme et de l'environnement lorsqu'ils sont exposés à diverses sortes de rayonnements ionisants dans différents types de situations. Malgré cela, il est toujours périlleux d'utiliser les résultats des études épidémiologiques et radiobiologiques pour décider de la manière de gérer le risque, lorsqu'il subsiste des incertitudes scientifiques.

Se fondant sur des études en cours et des publications récentes, le CRPPH a identifié plusieurs questions importantes et de nouveaux défis qui sont susceptibles de remettre en cause les fondements scientifiques et l'application du système global de protection radiologique. Il s'agit notamment :

- des effets non ciblés de l'exposition aux rayonnements qui remettent en cause l'universalité de la théorie de la cible des effets radio-induits ;
- des effets de la sensibilité individuelle des patients, travailleurs et membres du public si l'on veut leur assurer une protection radiologique adaptée ;
- de l'utilisation accrue de l'épidémiologie moléculaire pour affiner encore la courbe dose-réponse ;
- de la validité du concept de dose dans les estimations des risques avec l'amélioration de la connaissance sur les mécanismes biologiques qui se mettent en place en réponse à une exposition aux rayonnements ;
- de la protection radiologique lors de l'exposition médicale, pour optimiser cette dernière ;
- de la radioprotection de l'environnement, pour mieux comprendre les effets et résultats possibles ;
- des effets sanitaires des actes de malveillance commis avec des sources de rayonnements ;
- de la nécessité d'interactions avec d'autres disciplines et organisations internationales afin d'optimiser les ressources utilisées et d'améliorer la collaboration.

Les participants aux célébrations du 50^{ème} anniversaire du CRPPH ont largement reconnu ces défis scientifiques et décisionnels et insisté une fois de plus pour que le Comité et d'autres organisations nationales et internationales s'appliquent à trouver des réponses en temps utile. Les responsables des autorités de sûreté présents à cette manifestation, mais aussi des hauts représentants de plusieurs organisations internationales concernées (AIEA, CIPR, CE, UNSCEAR et IRPA) ont complété la liste des défis qui attendent le CRPPH et notamment :

- Il convient de renforcer les interfaces entre sûreté et sécurité, les échanges d'information entre spécialistes de la radioprotection et de la sécurité (et leurs synergies) de même que la durabilité des infrastructures de sûreté et de sécurité.

- Il faudra approfondir la question des actes de malveillance perpétrés avec des substances radioactives dans le cadre de l'étude de la gestion des situations de crise.
- Le suivi et la surveillance des sources de rayonnement franchissant les frontières ainsi que l'évaluation des infrastructures nationales doivent être améliorés.
- La radioprotection des opérations de démantèlement nécessite des formations particulières.
- Il faut définir précisément les rôles et responsabilités des exploitants et de l'autorité de sûreté.
- La diminution du financement des études et recherches en radioprotection se répercutera un jour sur la capacité de protéger.
- Le cadre nécessaire à la protection radiologique de l'environnement mérite une certaine attention.
- On aura besoin de mettre sur pied des interventions rapides coordonnées pour éviter que des incidents locaux ne dégénèrent en situations de crise majeures. Il faudra en tirer des enseignements et les diffuser largement.
- Le transport des substances radioactives soulève plusieurs problèmes dont la résolution doit être internationale, notamment le refus de certains convois.
- Les organisations internationales doivent collaborer plus étroitement pour plus de sûreté et de qualité.
- Les expositions médicales se multiplient très rapidement sans que les autorités de sûreté nationales puissent toujours les maîtriser. Il est nécessaire d'améliorer la culture de sûreté radiologique dans le secteur médical.

Conclusions

Toute organisation s'expose à la routine, qui peut devenir un handicap et s'accompagne souvent d'une tendance à l'autosatisfaction voire d'un repli sur soi. Pour sa part, le CRPPH est resté ouvert et attentif aux préoccupations de ses membres et, au-delà, à celles de nombreux pans de la société qu'intéresse la radioprotection. Le Comité s'est organisé de façon à intégrer et à anticiper dans son travail les évolutions scientifiques, techniques et même sociales, économiques et politiques. Le CRPPH a donc toujours été un pionnier dans les divers secteurs de radioprotection et, de plus en plus, est considéré comme le lien nécessaire entre les autorités, les spécialistes de la radioprotection et la société. ■

Références

1. AEN (2007), *La radioprotection aujourd'hui et la voie du développement durable*, OCDE/AEN, Paris.
2. AEN (2007), *Cinquante ans de radioprotection : Rapport commémoratif du 50^e anniversaire du CRPPH*, OCDE/AEN, Paris.

L'École internationale de droit nucléaire

S. Kus*

L'École internationale de droit nucléaire a été créée en 2000 par l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire et l'Université de Montpellier 1. Elle bénéficie du soutien de l'Association internationale de droit nucléaire (AIDN) et de l'Agence internationale de l'énergie atomique. Cette école dispense un enseignement de grande qualité célèbre pour ses cours intensifs, ses intervenants professionnels ainsi qu'un juste équilibre entre l'enseignement théorique et la pratique. Au cours des sept dernières années, l'École internationale de droit nucléaire a accueilli près de 400 participants de 78 pays.

L'AEN attribue des bourses à certains étudiants méritants de ses pays membres pour leur permettre de suivre cet enseignement. L'AIEA accorde également des bourses universitaires à des représentants de ses propres pays membres. Ces dispositions assurent une large représentation des différents pays avec la pluralité de points de vue, d'expériences et de parcours juridiques que cela suppose. Les étudiants sont majoritairement mais pas en totalité des juristes. Cette diversité est bienvenue, l'interdisciplinarité dans les classes contribuant au dialogue et à l'apprentissage mutuel des juristes, scientifiques et économistes, par exemple.

Le programme

Chaque session de l'École internationale de droit nucléaire dure 15 jours. Les cours sont donnés exclusivement en anglais. Des études de cas, des travaux de groupe et des débats viennent compléter les cours.

Les participants ont la possibilité de postuler pour un diplôme d'université en droit international attribué en fonction des évaluations effectuées pendant le cycle d'enseignement, complétées par un examen à rendre au bout d'une dizaine de jours et par un

mémoire sur un sujet de droit nucléaire international. Ces diplômes valent 12 crédits ECTS (Système européen de transfert d'unités de valeurs).

Thèmes traités à l'École internationale de droit nucléaire

Le droit international régissant les utilisations pacifiques de l'énergie nucléaire est abordé de façon large étant donné son originalité et ses particularités. Les efforts consentis par la communauté internationale pour harmoniser les législations et réglementations nationales, notamment après l'accident de Tchernobyl, sont au centre du programme d'enseignement. Une autre particularité de ce droit relève des origines militaires de l'énergie nucléaire qui ont conduit à la mise en place d'un régime spécial de contrôles et de restrictions du commerce international de matières nucléaires pour éviter la prolifération des matières nucléaires utilisées à des fins non pacifiques. De surcroît, le droit de l'énergie nucléaire doit évoluer constamment pour s'adapter aux progrès technologiques et changements politiques et mieux maîtriser les risques liés à l'utilisation de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques. Les organisateurs et enseignants de l'école abordent par conséquent l'un des sujets les plus complexes, les plus difficiles et les plus sensibles de la sphère du droit.

L'enseignement commence par des exposés sur les diverses organisations internationales sous les auspices desquelles a été institué le cadre juridique international. L'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN), l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) et la Communauté européenne de l'énergie atomique (EURATOM) sont représentées par des spécialistes qui décrivent l'histoire, les statuts, la structure, les compétences et principaux objectifs de ces organisations. Le cadre juridique international régissant les utilisations pacifiques de l'énergie nucléaire fait ensuite l'objet de plusieurs conférences. Y sont abordés les sujets suivants :

* Mlle Selma Kus (selma.kus@oecd.org) travaille dans la Section des affaires juridiques de l'AEN.

- **sûreté nucléaire** (Convention sur la sûreté nucléaire, Convention sur la notification rapide d'un accident nucléaire et Convention sur l'assistance en cas d'accident nucléaire ou de situation d'urgence radiologique) ;
- **non-prolifération et protection physique** (Traité sur la non-prolifération des armes nucléaires, Convention sur la protection physique des armes nucléaires, système de garanties de l'AIEA, protection physique et trafic illicite de matières nucléaires) ;
- **gestion des déchets radioactifs** (Convention commune sur la sûreté de la gestion du combustible usé et sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs, transposition en droit national de la Convention commune) ;
- **protection radiologique** (Normes fondamentales internationales, recommandations de la Commission internationale de protection radiologique, Système européen d'échange d'informations en cas d'urgence radiologique (ECURIE), exercices internationaux d'intervention en cas d'urgence nucléaire (INEX), philosophie et principes directeurs de la radioprotection) ;
- **sûreté des transports** (droit international régissant la sûreté et la sécurité des transports de substances nucléaires et radioactives) ;
- **échanges de matières nucléaires** (règles d'EURATOM, règles d'échange de matières nucléaires et leurs relations avec les règles générales du commerce et de la concurrence) ;
- **responsabilité civile et indemnisation des dommages nucléaires** (Convention de Paris sur la responsabilité civile dans le domaine de l'énergie nucléaire, Convention complémentaire de Bruxelles, Convention de Vienne relative à la responsabilité civile en matière de dommages nucléaires, la Convention sur la réparation complémentaire des dommages nucléaires, Protocole commun relatif à l'application de la Convention de Vienne et de la Convention de Paris, assurance responsabilité civile).

Le caractère interdisciplinaire du droit de l'énergie nucléaire ressort des conférences et débats consacrés aussi bien aux aspects éthiques, juridiques et financiers de la gestion des déchets radioactifs et du combustible usé, qu'à l'économie de l'énergie nucléaire et à des questions techniques (avec l'aide de vidéos pour les transports de matières radioactives et le cycle du combustible nucléaire). La session de clôture de l'École internationale de droit nucléaire est réservée à des allocutions d'intervenants invités sur des sujets d'actualité.

Septième session de l'École internationale de droit nucléaire

La septième session de l'École internationale de droit nucléaire s'est tenue du 27 août au 7 septembre 2007 à Montpellier, en France. Elle a réuni 60 personnes de 35 pays et des représentants de la Commission européenne. Vingt-trois conférenciers ont balayé tout l'éventail des sujets de droit nucléaire international au cours de 35 présentations, toutes suivies de débats. Les participants ont échangé leurs expériences et débattu librement des grands problèmes à résoudre dans leur système juridique national. Dans ce sens, l'objectif que s'est fixée l'École internationale de droit nucléaire, à savoir de communiquer et d'échanger des expériences, a été parfaitement atteint. Les conférences ont suscité des débats approfondis et passionnants révélant toute la complexité et les aspects controversés du droit nucléaire. Les cours consacrés à la non-prolifération, à l'économie de l'énergie, à la responsabilité civile et la réparation des dommages nucléaires, au cadre juridique mis en place contre le terrorisme sont particulièrement révélateurs de la vigilance des spécialistes du droit nucléaire et de leur créativité lorsqu'il s'agit de mettre en place un cadre juridique à la fois juste et fiable.

Il a été impossible cette année de proposer aux participants la visite technique d'une installation nucléaire qui avait été organisée les années précédentes. Pour remplacer cette visite, Jean-Louis Tison de l'ANDRA, l'Agence française de gestion des déchets radioactifs, a proposé une séance d'information sur le cycle du combustible nucléaire comportant une introduction générale et un panorama complet de la gestion des déchets radioactifs en France.

La session de clôture de l'école a vu M. Walter Gehr évoquer « Le régime juridique mondial contre le terrorisme nucléaire » et M. Pierre Goldschmidt, « L'autorité de la loi, la politique et la non-prolifération ».

Conclusions

L'École internationale de droit nucléaire réunit divers conférenciers et orateurs issus des organismes de réglementation, des organisations internationales, des universités, de l'industrie et des établissements de recherche. En plus de leur formation universitaire, les participants peuvent bénéficier des services d'un réseau d'experts et participer à un échange de savoirs qui les préparera à leurs futurs engagements.

L'École internationale de droit nucléaire est un établissement reconnu dans la communauté nucléaire internationale et peut être très enrichissante pour les étudiants et les jeunes professionnels qui envisagent de se lancer dans le droit nucléaire. ■

Problème standard international n° 47 sur la thermohydraulique de l'enceinte de confinement

H. J. Allelein, K. Fischer, J. Vendel, J. Malet, E. Studer, S. Schwarz, M. Houkema, H. Paillère, A. Bentaib*

En organisant le Problème standard international n°47 (PSI-47), l'OCDE/AEN souhaitait évaluer les capacités des codes 0D et des codes de mécanique des fluides numérique (*computational fluid dynamics* – CFD) pour l'étude de la thermohydraulique de l'enceinte de confinement. Conformément aux recommandations du «*State-of-the-art Report on Containment Thermal-hydraulics and Hydrogen Distribution*», des données expérimentales provenant d'installations expérimentales complémentaires ont été utilisées pour les analyses comparatives présentant des problèmes de modélisation de difficulté croissante. Les trois installations en question TOSQAN, MISTRA ET ThAI ont fourni des données expérimentales de grande qualité adaptées aux comparaisons de codes 0D et de codes de CFD en régimes permanent ou transitoire.

Le programme du PSI-47 s'est achevé en 2007. Dix-neuf organisations de quatorze pays y ont apporté leur contribution : résultats expérimentaux, analyses effectuées avec douze codes différents et examens. Le rapport final sur ce programme qui contient un éventail complet de figures et les résultats détaillés, peut être consulté en ligne à l'adresse www.nea.fr/html/nsd/docs/2007/csni-r2007-10.pdf.

Expériences et benchmarks

Le programme de travail du PSI-47 s'est déroulé en deux étapes :

- La première étape était consacrée à la validation des codes à l'aide de données obtenues dans l'installation d'essais analytiques TOSQAN (volume de 7 m³) et l'installation à plus grande

échelle MISTRA (volume de 100 m³). Les essais effectués sur TOSQAN étaient consacrés à l'étude de la condensation en paroi, de l'injection de vapeur dans l'air ou dans des atmosphères constituées d'air et d'hélium et de la flottabilité dans des conditions initiales bien contrôlées et une géométrie simple. Les interactions entre phénomènes tels que la condensation et la stratification, la turbulence et la flottabilité ont été testées sur MISTRA. Les installations MISTRA et TOSQAN étaient toutes deux conçues spécifiquement pour produire des données à injecter dans les codes de CFD grâce à une instrumentation des plus modernes. Les calculs de comparaison de codes sur TOSQAN ont été effectués « en ouvert » tandis que le benchmark sur MISTRA a été réalisé en aveugle.

- La deuxième étape consistait à valider les codes sur une expérience effectuée dans l'installation multi-compartiments ThAI (volume de 60 m³) et caractérisée par différentes phases d'injection

* H. J. Allelein (*Hans-Josef.Allelein@grs.de*) et S. Schwarz (*Siegfried.Schwarz@grs.de*) travaillent à la *Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit in Allemagne* ; K. Fischer (*fischer@becker-technologies.com*) travaille à la *Becker Technologies GmbH en Allemagne* ; J. Vendel (*jacques.vendel@irsn.fr*), J. Malet (*jeanne.malet@irsn.fr*) et A. Bentaib (*ahmed.bentaib@irsn.fr*), travaillent à l'*IRSN en France* ; E. Studer (*etienne.studer@cea.fr*) et H. Paillère (*henri.paillere@cea.fr*) travaillent au *CEA en France* ; et M. Houkema (*houkema@nrg-nl.com*) travaille à *NRG aux Pays-Bas*.

de vapeur et d'hélium, des conditions transitoires de stratification et de mélange dans l'atmosphère, l'établissement de la convection naturelle, la répartition des condensats sur la paroi, la formation de brouillard et le comportement thermique transitoire des parois conductrices. Cette expérience a permis d'acquérir des données de mesure détaillées sur les champs de vitesse, de température et de concentration des gaz utilisables pour la validation des codes. Le benchmark sur les expériences ThAI recouvrait trois séries de calculs effectués respectivement en aveugle, en semi-aveugle et « en ouvert ».

Résultats

Les trois installations expérimentales ont fourni des données d'expérience d'excellente qualité, avec des techniques de mesures très précises et bien adaptées aux comparaisons de codes de CFD et de codes 0D en régimes permanent et transitoire. Outre des mesures de pression et de température de l'atmosphère, on a pu obtenir pour la première fois des mesures détaillées de la vitesse et de la concentration des gaz (air, vapeur et hélium).

Concernant la première étape, le benchmark ouvert sur les essais TOSQAN révèle que les prévisions concordent généralement bien avec les résultats d'expérimentaux obtenus en régime de condensation permanent. Les modèles ne parviennent pas toutefois à reproduire toujours certains phénomènes transitoires importants. Certains modèles multidimensionnels reproduisent la cinétique de la stratification transitoire tandis que la plupart de codes 0D ne donnent que la concentration finale.

Au cours du benchmark effectué en aveugle sur les données d'essai MISTRA, les codes 0D qui normalement intègrent la modélisation des brouillards fournissent des résultats corrects à condition que le maillage permette de représenter les principales caractéristiques du schéma d'écoulement. Les calculs de CFD fournis ont révélé des questions concernant la simulation d'un jet ascendant et le comportement thermique de la paroi de la cuve en acier. Tous les codes donnent des valeurs moyennes correctes telles que la pression totale. Certains calculs reproduisent bien les profils de température des gaz, d'autres affichent d'importants écarts dus principalement à une exagération de la surchauffe. Cette exagération n'a heureusement que des effets mineurs sur les concentrations calculées d'hélium, généralement bien simulées.

Au cours de la phase 2 consacrée au benchmark sur ThAI, plusieurs participants sont parve-

nus à améliorer nettement les prévisions des calculs réalisés en semi-aveugle par rapport aux calculs effectués en aveugle par le simple fait d'affiner le maillage et de traiter de manière plus systématique le phénomène d'entraînement par le jet. Notamment, plusieurs modèles 0D reproduisent bien les stratifications atmosphériques qui se produisent lorsque l'injection s'effectue à l'intérieur du nuage de gaz léger en partie supérieure. Ces phénomènes sont en général sous-estimés par la plupart des calculs effectués avec des codes 0D et les codes de CFD. Dans la plupart des cas, ces deux types de codes ne parviennent pas à reproduire les conditions très complexes de maintien de la stratification lorsque l'injection de vapeur s'effectue par le piquage inférieur. Les raisons pour lesquelles deux codes 0D sont parvenus à prévoir cette stratification en aveugle tiennent au maillage et à la simulation du phénomène d'entraînement.

Conclusions et recommandations

Compte tenu de l'excellente qualité des essais PSI-47, il est recommandé de valider les codes de calcul de l'enceinte sur ces essais avant de les utiliser pour évaluer la répartition de l'hydrogène dans les applications à des centrales. Ces recommandations valent pour les codes 0D comme pour les codes de CFD employés dans la recherche et l'industrie nucléaires.

À l'évidence, les modèles 0D sont aujourd'hui le principal outil d'analyse générale de la thermohydraulique de l'enceinte de confinement. Ils consomment nettement moins de temps de calcul que les codes de CFD et sont donc adaptés aux analyses paramétriques et aux EPS de niveau 2. Ces codes 0D présentent cependant quelques faiblesses qui tiennent au modèle d'écoulement simplifié qui est appliqué. Apparemment, l'utilisateur est en mesure de surmonter cet inconvénient par une modélisation appropriée qui tient compte des phénomènes pertinents attendus : c'est ainsi que les meilleurs résultats de l'étape 2 ont été obtenus par deux codes 0D.

Pour évaluer la sûreté des enceintes de REP vis-à-vis du risque d'explosion d'hydrogène, on recommande donc d'associer les deux types de codes, codes 0D et codes de CFD. Les codes 0D peuvent servir d'outil de base pour les analyses de l'enceinte tandis que les codes de CFD seront utilisés pour calculer :

- des scénarios d'accidents exigeant une analyse plus détaillée des phénomènes locaux ;
- des scénarios d'accidents critiques difficiles à analyser à l'aide des codes 0D à cause de leurs limitations inhérentes.

En revanche, l'effet utilisateur est à l'origine d'une forte dispersion des résultats des calculs effectués avec les codes 0D. Ces codes peuvent ainsi donner les meilleurs comme les pires résultats. L'effet utilisateur se fait sentir surtout au niveau du maillage.

Forts de l'expérience acquise dans le cadre de ce programme, notamment sur les codes 0D, nous recommandons de lancer une activité internationale pour élaborer des consignes générales (concernant notamment le maillage) d'usage des codes 0D contenant des recommandations particulières pour les modes d'emploi. Dans le cas des codes de CFD, on recommande d'améliorer encore la modélisation de la condensation et de la turbulence, en particulier le traitement des parois au cours de ces deux phénomènes.

Les essais réalisés dans le cadre du PSI-47 constituent une bonne base de données pour affiner les codes. Les données expérimentales sont encore rares cependant sur certains phénomènes. Les analystes doivent préciser les données dont ils ont besoin pour concevoir de nouveaux essais.

À l'heure actuelle, il n'a pas été proposé d'entreprendre un nouveau programme de comparaison de codes de calcul de thermohydraulique de l'enceinte. La situation pourrait changer à l'issue de nouvelles analyses des essais PSI-47 et après la réalisation du PSI envisagé sur la combustion de l'hydrogène. Le passage de l'échelle des essais aux applications à des centrales réelles reste un problème majeur. Un benchmark sur une application en centrale s'imposerait par conséquent pour étudier, entre autres, les effets du maillage et l'impact de l'injection de vapeur et de gaz léger dans une enceinte de confinement standard (et probablement simplifiée) d'un réacteur à eau pressurisée. ■

Références

1. AEN (1999), «*State-of-the-art Report on Containment Thermal-hydraulics and Hydrogen Distribution*», NEA/CSNI/R(99)16, OCDE, Paris.
2. AEN (2007), «*International Standard Problem ISP-47 on Containment Thermal-hydraulics*», NEA/CSNI(2007)10, OCDE, Paris.

Nouvelles brèves

Progrès du Programme multinational d'évaluation des conceptions (MDEP)

Comme nous l'avions évoqué dans un précédent numéro de *AEN Infos*¹, l'AEN a été choisie pour assurer le Secrétariat technique de la deuxième étape du Programme multinational d'évaluation des conceptions (MDEP). Cette activité a été lancée afin de mutualiser les ressources et les connaissances des autorités de sûreté nationales pour l'évaluation de nouvelles filières de réacteurs et ainsi d'améliorer l'efficacité et l'efficacité du

processus. Bien que la dimension internationale du projet soit un de ses atouts, le MDEP repose sur le principe que les autorités de sûreté nationales conservent la maîtrise de la délivrance des autorisations et de toutes les décisions réglementaires.

La deuxième étape du MDEP a pour objectifs une meilleure coopération multinationale et l'harmonisation des codes, normes et objectifs de sûreté. Cela suppose, entre autres, de rapprocher

des régimes réglementaires nationaux applicables aux nouvelles conceptions de réacteurs. Ces travaux ont été entrepris à la fin de 2006 par un Groupe de politique générale sous la présidence du Directeur général de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) française, M. André-Claude Lacoste. Dix pays² participent à la première phase de cette deuxième étape, qui devrait s'achever sous peu.

Un projet pilote d'un an a été entrepris au début de la deuxième étape du MDEP afin de recenser les domaines dans lesquels on pouvait envisager de faire converger les exigences réglementaires et de renforcer la collaboration entre autorités de sûreté. Deux aspects ont été abordés : l'un général concernant le référentiel et les objectifs de sûreté, et l'autre spécifique concernant le contrôle de la fabrication des composants. La première tâche a été accomplie par le Comité de direction technique du MDEP ; un groupe de travail a été constitué pour mener à bien la seconde.

Pour plus d'efficacité, le Comité de direction technique s'est concentré sur les exigences, les programmes et les pratiques réglementaires dans trois domaines particuliers : les accidents graves, le fonctionnement des systèmes de refroidissement de secours du cœur et les contrôles-commandes numériques. Le groupe de travail a restreint son domaine d'étude aux composants de l'enveloppe sous pression du réacteur qui appartiennent aux classes de sûreté les plus élevées (pompes, vannes, tuyauteries et cuves sous pression). Dans un premier temps, les deux groupes ont suivi une démarche similaire, à savoir l'utilisation d'enquêtes et l'analyse des résultats pour pouvoir mieux apprécier l'état actuel de la situation.

Des premiers résultats de ces enquêtes, le Comité de direction technique a conclu à la nécessité de réunir de nouveau les spécialistes des trois domaines considérés pour enrichir les informations disponibles sur les politiques et pratiques réglementaires nationales et relever les similitudes et les différences entre pays. En outre, un autre groupe d'experts s'est réuni afin de recenser les problèmes communs à ces trois domaines. Les groupes d'experts ont chacun étudié des aspects particuliers, établi des niveaux de similitude (forte, moyenne, faible) et procédé à une analyse coûts-bénéfices pour apprécier la possibilité de convergence.

De son côté, le groupe de travail s'est intéressé à l'utilisation des règles et des normes, aux programmes de gestion et d'assurance de la qualité, aux programmes d'inspection par le fabricant, aux organismes d'inspection extérieurs désignés et à

l'autorité de sûreté. Outre les enquêtes et les discussions, le groupe a communiqué avec d'autres organisations intéressées ou concernées dont des constructeurs et des organisations qui élaborent les règles et les normes. Les membres du groupe étaient aussi en relation avec les fabricants.

Les résultats des travaux des groupes d'experts et du groupe de travail ont été analysés à l'automne lors d'une réunion du Comité de direction technique, puis exploités pour en tirer une image globale des activités réglementaires de chaque pays et commencer à élaborer un nouveau programme pour le MDEP axé sur le renforcement de la collaboration dans le domaine de l'analyse de la conception et des inspections associées. Le Comité de direction technique a entrepris de compiler ces informations dans un rapport final sur le projet pilote qui devrait être achevé en janvier 2008. Le Groupe de politique générale se réunira ensuite pour examiner le rapport et évaluer la possibilité de passer au stade suivant, la phase de mise en œuvre de la deuxième étape du MDEP, qui sera consacrée à de nouveaux aspects. ■

Notes

1. AEN (2006), *AEN Infos*, No. 24.2, OCDE/AEN, Paris.
2. Dix pays, dont sept membres (*) de l'AEN, participent à la première phase de la deuxième étape du MDEP : l'Afrique du Sud, le Canada*, la Chine, les États-Unis*, la Fédération de Russie, la Finlande*, la France*, le Japon*, la République de Corée* et le Royaume-Uni*. L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) prend également part aux travaux de la deuxième étape du MDEP.

Dernières nouvelles du Forum international Génération IV (GIF)

Les systèmes nucléaires de quatrième génération devraient apporter d'importants progrès par rapport aux systèmes actuels dans les domaines de l'économie, de la sûreté et de la fiabilité, de la résistance à la prolifération, de la protection physique et de la durabilité. La « Feuille de route » technologique du GIF a permis d'évaluer plus d'une centaine de concepts, de retenir les six systèmes les plus prometteurs et de définir la R-D nécessaire pour pouvoir commercialiser ces systèmes vers 2030. Pour mettre au point des systèmes nucléaires de quatrième génération, les membres du GIF collaborent à des travaux de R-D qui dépassent par leur portée ceux qu'entreprend l'industrie.

Les membres du GIF sont, outre les premiers signataires de la charte du GIF – à savoir, l'Afrique du Sud, l'Argentine, le Brésil, le Canada, la Corée, les États-Unis, la France, le Japon, le Royaume-Uni – la Suisse (qui a signé la charte en 2002), Euratom (2003), la Chine (2006) et la Fédération de Russie (2006). Quatre membres fondateurs n'ont pas signé ou ratifié l'Accord-cadre du GIF et ont donc, officiellement, le statut de membres non actifs¹.

Le Forum s'est doté d'un cadre juridique pour la coopération et a mis en place une organisation pour coordonner et gérer le travail. Des Comités de pilotage système ont été établis afin de réaliser les travaux de R-D sur les six concepts de réacteurs, tels que décrits dans les programmes de recherches sur les systèmes. Chacun de ces programmes définit les modalités de réalisation du projet sous la supervision de Conseils de gestion de projet en respectant des objectifs, des étapes et des calendriers bien définis.

Progrès accomplis en 2007

Le temps fort de l'année 2007 fut la signature du premier arrangement-projet du GIF en mars par cinq membres du Forum (la Corée, les États-Unis, Euratom, la France et le Japon) qui porte sur les combustibles avancés pour les réacteurs à neutrons rapides à caloporteur sodium (RNR-Na). Le lecteur trouvera ci-dessous une synthèse des autres avancées de 2007 concernant les six concepts choisis.

GNEP et GIF : les caractéristiques qui les distinguent

Le Partenariat mondial pour l'énergie nucléaire (GNEP) est une initiative internationale dont la finalité est de développer l'énergie nucléaire dans le monde, tout en gérant les déchets radioactifs et en réduisant les risques de prolifération. La déclaration de principes du Partenariat reconnaît le rôle du GIF en tant qu'outil de collaboration multilatérale dans le domaine de la R-D. L'objectif annoncé du GNEP est de venir compléter, et non de remplacer, des mécanismes de collaborations tels que le GIF.

Le GIF s'intéresse à une génération future de systèmes nucléaires, ce qui recouvre tant les cycles du combustible que les technologies des réacteurs. Le GNEP a à la fois une cible plus étroite, à savoir les systèmes nucléaires qui consomment les éléments transuraniens du combustible usé recyclé et, d'un autre côté, une cible plus large quant à ses objectifs qui sont le renforcement des garanties nucléaires, la mise en place de services internationaux du cycle du combustible nucléaire et la promotion de l'énergie nucléaire dans les pays et régions en développement. Les membres du GNEP envisagent d'utiliser les contrats (arrangements) conclus dans le cadre du GIF pour mener certaines recherches en commun. Les membres du GIF se sont félicités de pouvoir travailler sur les systèmes nucléaires avancés en collaboration avec le GNEP.

Réacteur à neutrons rapides à caloporteur gaz (RNR-G)

Les négociations entreprises en vue de lancer des projets de recherches consacrés à l'intégration, la conception et la sûreté des RNR-G mais aussi au combustible, aux matériaux du cœur et aux procédés spécifiques au cycle du combustible des RNR-G ont avancé. On vise la mise en place d'un réacteur expérimental de démonstration de la technologie d'ici 2020.

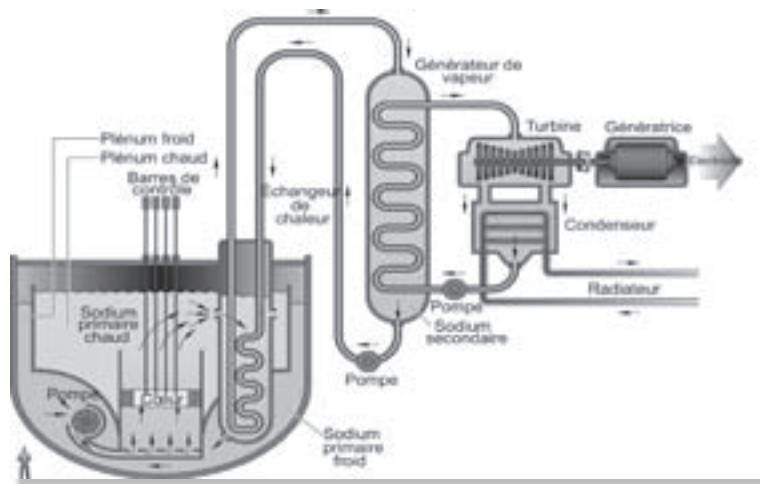


Diagramme schématique du réacteur à neutrons rapides à caloporteur sodium (RNR-Na)

Réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb (RNR-Pb)

Le programme de recherches sur les RNR-Pb qui décrit les recherches nécessaires sur la conception du système, la technologie du combustible et les matériaux a été mis à jour au cours de l'année. Ce programme prévoit deux axes de développement qui doivent aboutir à la construction d'une seule installation de démonstration d'ici 2018. Cette installation servira à étudier deux conceptions, un petit RNR-Pb transportable caractérisé par la longue durée de vie du cœur ainsi qu'une centrale de taille moyenne.

Réacteur à sels fondus (RSF)

Le projet de programme de recherches sur le RSF a été mis à jour au cours de l'année 2007. Conformément au plan de développement général de ce système, la phase d'exploration et de sélection se poursuivra jusqu'en 2011. À ce stade, les possibilités des sels (choix, propriétés et compatibilité avec les autres matériaux) seront connues. Les filières de référence auront été choisies en 2018, lorsque le projet passera au stade de l'exécution.

Réacteur à neutrons rapides à caloporteur sodium (RNR-Na)

Après la signature en mars d'un arrangement-projet sur les combustibles avancés, deux autres arrangements ont été signés qui portent sur la conception des composants et de l'ensemble de la centrale, et sur la démonstration internationale du cycle global des actinides (GACID). Le projet consacré aux composants et à l'organisation de la centrale doit servir à mettre au point les principaux composants et équipements de la centrale et à étudier des principes de conversion d'énergie

qui soient sûrs et efficaces. Le projet GACID doit, quant à lui, démontrer à une échelle significative que les réacteurs à neutrons rapides peuvent gérer l'intégralité de l'inventaire des actinides.

Réacteur refroidi à l'eau supercritique (RESC)

Une première version du programme de recherches sur le RESC a été achevée en 2007. Des Conseils de gestion de projets ont été constitués pour les travaux dans les domaines suivants : thermohydraulique et sûreté, matériaux et chimie, et conception et intégration. Les négociations destinées à mettre en place les arrangements-projets correspondants ont bien avancé en 2007.

Réacteur à très haute température (RTHT)

Un programme de recherches sur le RTHT a été établi au cours de l'année. À l'heure actuelle, les négociations concernant les arrangements-projets sur les sujets suivants se trouvent dans la dernière ligne droite : mise au point et validation des matériaux à utiliser dans le RTHT, combustibles et cycle du combustible, et emploi des RTHT pour produire de l'hydrogène. L'objectif global de ces recherches est de définir les concepts de base d'ici 2010 pour optimiser la conception et les caractéristiques de fonctionnement des systèmes d'ici 2015.

L'AEN assure le Secrétariat technique du Forum international Génération IV (GIF). Pour plus d'informations sur ce Forum, se reporter à www.gen-4.org. ■

Note

1. Les membres non actifs sont aujourd'hui l'Afrique du Sud, l'Argentine, le Brésil et le Royaume-Uni. Ce dernier a l'intention de participer aux activités du GIF par l'intermédiaire d'Euratom.

Projets communs de l'AEN : *sûreté nucléaire*

Les projets communs et programmes d'échange d'informations de l'AEN sont l'occasion pour les pays intéressés de réaliser des recherches ou de se communiquer des informations sur des disciplines ou des problèmes particuliers, en partageant les frais. Ces projets sont menés sous les auspices et avec l'assistance de l'AEN. On trouvera ci-dessous une description de tous les

Projet	Participants	Budget
<p>Programme CPD (Programme de coopération sur le démantèlement) Contact : patrick.osullivan@oecd.org Mandat actuel : janvier 2004-décembre 2008</p>	Allemagne, Belgique, Canada, Corée, Espagne, France, Italie, Japon, République slovaque, Royaume-Uni, Suède, Taïpei chinois	≈€ 60K /an
<p>Projet BIP (Projet sur le comportement de l'iode) Contact : carlo.vitanza@oecd.org Mandat actuel : 2007-2010</p>	Allemagne, Belgique, Canada, Corée, Espagne, États-Unis, Finlande, France, Japon, Pays-Bas, Royaume-Uni, Suède, Suisse	≈€ 1 million
<p>Projet Cabri-Boucle à eau Contact : carlo.vitanza@oecd.org Mandat actuel : 2000-2010</p>	Allemagne, Corée, Espagne, États-Unis, Finlande, France, Hongrie, Japon République slovaque, République tchèque, Royaume-Uni, Suède, Suisse	≈€ 60 millions
<p>Projet COMPSIS (Projet sur les systèmes informatisés importants pour la sûreté) Contact : jean.gauvain@oecd.org Mandat actuel : janvier 2005-décembre 2007</p>	Allemagne, Corée, États-Unis, Finlande, Hongrie, Japon, République slovaque, Suède, Suisse, Taïpei chinois	€ 100K /an
<p>Projet du réacteur de Halden Contact : carlo.vitanza@oecd.org Contact à Halden : Fridtjov.owre@hrp.no Mandat actuel : janvier 2006-décembre 2008</p>	Allemagne, Belgique, Bulgarie, Corée, Danemark, Espagne, États-Unis, Finlande, France, Hongrie, Japon, Norvège, République slovaque, République tchèque, Royaume-Uni, Russie, Suède, Suisse	≈€ 15 millions /an
<p>Projet FIRE (Projet d'échange de données sur les incendies) Contact : jean.gauvain@oecd.org Mandat actuel : janvier 2006-décembre 2009</p>	Allemagne, Canada, Corée, Espagne, États-Unis, Finlande, France, Japon, Pays-Bas, République tchèque, Suède, Suisse	≈€ 91K /an
<p>Projet ICDE (Projet international d'échange de données de défaillance de cause commune) Contact : jean.gauvain@oecd.org Mandat actuel : avril 2005-mars 2008</p>	Allemagne, Canada, Corée, Espagne, États-Unis, Finlande, France, Japon, Royaume-Uni, Suède, Suisse	≈€ 140 K /an
<p>Projet MCCI (Projet sur le refroidissement du corium et les interactions avec le béton) Contact : carlo.vitanza@oecd.org Mandat actuel : avril 2006-décembre 2009</p>	Allemagne, Belgique, Corée, Espagne, États-Unis, Finlande, France, Hongrie, Japon, Norvège, République tchèque, Suède, Suisse	€ 0,9 million/an

, gestion des déchets radioactifs, radioprotection

projets communs de l'AEN en cours. Actuellement, 15 projets sont menés dans le secteur de la sûreté nucléaire, deux dans la gestion des déchets radioactifs et un sur la radioprotection. Ces projets étayent le programme de travail de l'AEN et contribuent à la poursuite de l'excellence dans chacun de ces secteurs de recherche.

Objectifs

- Organiser un échange d'informations scientifiques et techniques entre différents projets de démantèlement d'installations nucléaires.
-
- Fournir des résultats d'essais analytiques et des études de modélisation sur le comportement de l'iode dans une enceinte de réacteur après un accident grave.
 - Fournir aux participants les données des trois essais réalisés dans l'installation RTF ainsi que leur interprétation en vue d'un usage coopératif de développement et de validation de modèles.
 - Aboutir à une compréhension commune du comportement de l'iode et des autres produits de fission dans une enceinte de réacteur après un accident grave.
-
- Enrichir la base de données du comportement du combustible à haut taux de combustion lors des accidents de réactivité.
 - Réaliser les essais nécessaires dans des conditions de refroidissement représentatives des conditions existant dans des réacteurs à eau sous pression (REP).
 - Étendre la base de données pour inclure les résultats de tests réalisés au Réacteur de recherche pour la sûreté nucléaire (Japon) sur du combustible de REB et de REP.
-
- Définir un format et recueillir un retour d'expérience sur les pannes de logiciel et de matériel dans des systèmes informatisés importants pour la sûreté (appelés ci-après les « événements COMPSIS ») dans une base de données structurée sous assurance qualité.
 - Recueillir et analyser ces événements COMPSIS sur une période suffisamment longue pour pouvoir mieux les comprendre et approfondir leurs causes et les moyens de les éviter.
 - En tirer des enseignements qualitatifs sur les causes premières de ces événements et les principaux contributeurs pour pouvoir ensuite concevoir des méthodes ou mécanismes permettant de les éviter ou d'en atténuer les conséquences.
 - Établir un mécanisme de retour d'expérience efficace sur les événements COMPSIS, y compris la conception de parades, telles que des diagnostics, des tests et des inspections.
 - Archiver les propriétés de ces événements et les principaux contributeurs de façon à constituer la base à partir de laquelle il sera possible d'effectuer des études de risque au niveau national des systèmes informatisés.
-
- Produire des informations essentielles pour les évaluations de la sûreté et l'instruction des demandes d'autorisations concernant :
- l'allongement des campagnes de combustible : fournir des données fondamentales sur le comportement du combustible, dans les conditions normales d'exploitation et lors des transitoires, en mettant l'accent sur l'utilisation prolongée du combustible dans les réacteurs commerciaux ;
 - la dégradation des matériaux du cœur : améliorer notre connaissance du comportement des matériaux dans les centrales sous l'effet combiné de la chimie de l'eau et de l'environnement nucléaire, également utile pour les évaluations de la durée de vie des centrales ;
 - systèmes homme-machine : faire progresser les systèmes informatiques de surveillance, les simulations, les informations numérisées, ainsi que l'étude des facteurs humains et des interactions homme-machine de façon à mettre au point des salles de commande plus perfectionnées.
-
- Recueillir, dans le cadre d'échanges internationaux et dans le format défini, des données d'expérience sur les incendies dans une base de données cohérente sous assurance qualité.
 - Recueillir et analyser sur le long terme des données sur les incendies de façon à mieux comprendre de tels événements, leurs causes et les moyens de les éviter.
 - Dégager des enseignements qualitatifs sur les causes premières des incendies afin de concevoir des méthodes ou mécanismes destinés à prévenir ces événements ou à en limiter les effets.
 - Trouver un mécanisme efficace de retour d'expérience sur les incendies et mettre au point des parades, telles que des indicateurs destinés aux inspections fondées sur le risque.
 - Enregistrer les caractéristiques des incidents pour faciliter les études de risque d'incendie, dont la quantification de leur fréquence.
-
- Recueillir et analyser les défaillances de cause commune sur le long terme, afin de mieux comprendre comment se déroulent ces événements, quelles sont leurs causes et comment les éviter.
 - Dégager des enseignements qualitatifs sur les causes premières de ces événements, dont on pourra ensuite déduire des approches et mécanismes permettant d'éviter ces événements ou d'en limiter les conséquences.
 - Mettre en place un mécanisme permettant un retour efficace de l'expérience acquise sur ces phénomènes, et adopter des parades, telles que des indicateurs destinés aux inspections fondées sur le risque.
 - Dégager des enseignements quantitatifs et enregistrer les caractéristiques de ces événements afin de faciliter le calcul de leur fréquence dans les pays membres.
 - Se servir des données recueillies pour estimer les paramètres des défaillances de cause commune.
-
- Procurer des données expérimentales sur les possibilités de refroidir le cœur fondu et sur ses interactions avec le béton lors d'accidents graves.
 - Résoudre deux problèmes importants pour la gestion des accidents :
 - vérifier que les débris fondus répandus à la base de l'enceinte peuvent être stabilisés et refroidis en déversant de l'eau par le haut ;
 - étudier les interactions 2-D à long terme de la masse fondue avec la structure en béton de l'enceinte, sachant que la cinétique de cette interaction est primordiale pour évaluer les conséquences d'un accident grave.

Projet	Participants	Budget
Projet OPDE (Projet d'échange de données sur les ruptures de tuyauteries) Contact : alejandro.huerta@oecd.org Mandat actuel : juillet 2005-juillet 2008	Allemagne, Belgique, Canada, Corée, Espagne, États-Unis, Finlande, France, Japon, République tchèque, Suède, Suisse	≈€ 54 K /an
Projet PRISME (Projet sur la propagation d'un incendie pour des scénarios multi-locaux élémentaires) Contact: carlo.vitanza@oecd.org Mandat actuel : janvier 2006-décembre 2010	Allemagne, Belgique, Canada, Corée, Espagne, Finlande, France, Japon, Pays-Bas, Suède	€7 millions
Projet ROSA (Rig of Safety Assessment) Contact : carlo.vitanza@oecd.org Mandat actuel : avril 2005-décembre 2009	Allemagne, Belgique, Corée, Espagne, États-Unis, Finlande, France, Hongrie, Japon, Pays-Bas, République tchèque, Royaume-Uni, Suède, Suisse	€ 0,7 million /an
Projet SCAP (Projet sur la fissuration par corrosion sous contrainte et le vieillissement des câbles) Contact: akihiro.yamamoto@oecd.org Mandat actuel : juin 2006-juin 2010	Allemagne, Belgique, Canada, Corée, Espagne, États-Unis, Finlande, France, Japon, Mexique, Norvège, République slovaque, République tchèque, Suède	€ 480 K /an
Projet SCIP (Projet Studsvik sur l'intégrité des gaines de combustible) Contact : carlo.vitanza@oecd.org Mandat actuel : juillet 2004-juin 2009	Allemagne, Corée, Espagne, États-Unis, Finlande, France, Japon, République tchèque, Royaume-Uni, Suède, Suisse	€ 1,4 million /an
Projet SERENA (Steam Explosion Resolution for Nuclear Applications) Contact: carlo.vitanza@oecd.org Mandat actuel : octobre 2007-septembre 2011	Allemagne, Canada, Corée, États-Unis, Finlande, France, Japon, Slovaquie, Suède	€ 2,6 millions
Projet SETH-2 (Projet SESAR thermohydraulique) Contact: jean.gauvain@oecd.org Mandat actuel : mars 2007-décembre 2010	Allemagne, Corée, Finlande, France, Japon, République tchèque, Slovaquie, Suède, Suisse	€ 0,8 million /an
Projet TDB (Projet de base de données thermodynamiques sur les espèces chimiques) Contact : nea.tdb@oecd.org Mandat actuel : février 2003-janvier 2008	Allemagne, Belgique, Canada, Espagne, États-Unis, Finlande, France, Japon, République tchèque, Royaume-Uni, Suède, Suisse	≈€ 400K /an
Projet ThAI (Projet sur la thermohydraulique, l'hydrogène, les aérosols et l'iode) Contact: carlo.vitanza@oecd.org Mandat actuel : janvier 2007-décembre 2009	Allemagne, Canada, Corée, Finlande, France, Hongrie, Pays-Bas, Suisse	€ 2,8 millions
Système ISOE (Système d'information sur la radioexposition professionnelle) Contact : brian.ahier@oecd.org Mandat actuel : 2002-2007	Afrique du Sud, Allemagne, Arménie, Belgique, Brésil, Bulgarie, Canada, Chine, Corée, Espagne, États-Unis, Finlande, France, Hongrie, Italie, Japon, Lituanie, Mexique, Pakistan, Pays-Bas, République slovaque, République tchèque, Roumanie, Royaume-Uni, Russie, Slovaquie, Suède, Suisse, Ukraine	≈€ 370K /an

Objectifs

- Recueillir et analyser les données sur les ruptures de tuyauteries afin de mieux en comprendre les causes et les répercussions sur l'exploitation et la sûreté, et de les éviter.
 - Dégager des enseignements qualitatifs sur les causes premières de ces événements.
 - Trouver un mécanisme permettant un retour efficace de l'expérience acquise sur les ruptures de tuyauteries, et mettre en place des parades.
 - Recueillir des informations sur les caractéristiques de fiabilité des tuyauteries et les facteurs d'influence afin de faciliter le calcul de la fréquence des ruptures de tuyauteries, quand le demande le Groupe d'examen du Projet.
- Répondre à des questions qui se posent sur la propagation des fumées et de la chaleur à l'intérieur d'une installation en réalisant des expériences spécialement conçues pour valider des logiciels de calcul.
 - Fournir des informations sur le transfert de chaleur aux câbles et sur les dégâts faits aux câbles.
- Constituer une base de données d'expériences intégrales et analytiques afin de valider la capacité prédictive des codes et de vérifier la précision des modèles. Seront étudiés en particulier, des phénomènes couplés à des phénomènes de mélange multidimensionnel, de stratification, à des écoulements parallèles, oscillatoires et à des écoulements de gaz incondensables.
 - Préciser la capacité prédictive des codes employés aujourd'hui dans les analyses thermohydrauliques de sûreté ainsi que celle des codes avancés que l'on met au point aujourd'hui, et constituer ainsi un groupe de pays membres unis par le besoin de préserver et d'améliorer leurs compétences techniques en thermohydraulique pour les études de sûreté des réacteurs nucléaires.
- Établir deux bases de données exhaustives sur les principaux phénomènes de vieillissement pour la fissuration par corrosion sous contrainte (CSC) et pour la dégradation de l'isolation des câbles.
 - Établir une base de connaissances en collectant et évaluant systématiquement les données et les informations recueillies.
 - Réaliser une évaluation des données et identifier les bases pour des pratiques recommandées susceptibles d'aider les autorités de sûreté et les exploitants à améliorer la gestion du vieillissement.
- Évaluer les propriétés des matériaux et déterminer les conditions susceptibles d'entraîner la rupture du combustible.
 - Approfondir la connaissance générale de la fiabilité du gainage à des taux de combustion élevés grâce à des études avancées des phénomènes et mécanismes susceptibles d'entraîner une dégradation de l'intégrité du combustible pendant son utilisation dans les centrales nucléaires mais aussi pendant sa manipulation, son entreposage ou son stockage.
 - Obtenir des résultats d'application générale (en d'autres termes indépendants de la conception du combustible, des spécifications de fabrication et des conditions de fonctionnement).
- Recueillir des données expérimentales permettant de clarifier le comportement de coriums fondus proches de la réalité en présence d'une explosion.
 - Recueillir des données expérimentales pour valider les modèles d'explosion sur des matériaux proches de la réalité, y compris la distribution spatiale du combustible et des vides dans la phase de pré-mélange et au moment de l'explosion ainsi que la dynamique de l'explosion.
 - Recueillir des données expérimentales sur les explosions de vapeur dans des situations plus réalistes, proches de celles qui existeraient dans un réacteur afin de vérifier les capacités d'extrapolation géométrique des codes.
- Produire des données expérimentales de haute qualité qui seront utilisées pour améliorer la modélisation et la validation des codes de calcul de dynamique des fluides discrétisés et 0D destinés à la prédiction des conditions thermohydrauliques post-accidentelles dans l'enceinte (pour les conceptions courantes ou avancées de réacteurs).
 - Traiter un grand nombre de paramètres mesurés, de configurations et d'échelles afin d'améliorer la valeur des données pour l'application des codes.
 - Étudier les phénomènes pertinents pour l'enceinte et les effets séparés, y compris l'effet des jets, de la convection naturelle, des échangeurs pour l'enceinte et de l'aspersion.
- Constituer une base de données qui :
- contienne des données sur tous les éléments pertinents pour les systèmes de dépôts de déchets radioactifs ;
 - explique pourquoi et comment les données ont été choisies ;
 - spécifie les sources des données expérimentales utilisées ;
 - ait une cohérence interne ;
 - contienne des recommandations établies d'après des données d'expérience originales plutôt que des compilations et des estimations ;
 - porte sur toutes les espèces solides et aqueuses des éléments présentant un intérêt pour les évaluations des performances des stockages de déchets.
- Traiter les questions essentielles concernant le comportement de l'hydrogène (combustion et élimination à l'aide de recombineurs), de l'iode et des aérosols (dépôt sur les parois, lessivage et interaction) en conditions d'accident grave.
 - Améliorer la compréhension des processus respectifs pour évaluer les menaces sur l'intégrité du confinement (hydrogène) et pour évaluer la quantité de radioactivité en suspension dans l'atmosphère durant un accident avec dégradation du cœur (iode et aérosols).
 - Produire des données pour l'évaluation de la répartition spatiale de l'hydrogène dans l'enceinte, son élimination effective par le biais d'équipements tels que des recombineurs passifs autocatalytiques ou la combustion lente de l'hydrogène.
- Recueillir et analyser des données sur l'exposition et sur les expériences de tous les participants afin de former les bases de données ISOE.
 - Fournir des informations générales, régulièrement mises à jour, sur les méthodes employées pour améliorer la protection des travailleurs et sur la radioexposition professionnelle dans les centrales nucléaires.
 - Constituer un mécanisme de diffusion de l'information, d'évaluation et d'analyse des données recueillies sur ces sujets et des échanges d'expérience, et ainsi contribuer à l'optimisation de la protection radiologique.

Nouvelles publications



Sûreté et réglementation nucléaires

Transparency of Nuclear Regulatory Activities ^{vo}

Workshop Proceedings, Tokyo and Tokai-Mura, Japan, 22-24 May 2007

ISBN 978-92-64-04095-3, 316 pages. Prix : € 60, US\$ 78, £ 43, ¥ 8 300.

^{vo} = existe en anglais seulement

Gestion des déchets radioactifs

Changements culturels et organisationnels dans les organismes de gestion des déchets radioactifs

Enseignements tirés

ISBN 978-92-64-99037-1, 44 pages. Gratuit : versions papier ou web.

L'environnement sociopolitique de la gestion des déchets radioactifs a connu de profonds changements ces dernières années. La concertation avec les parties prenantes est devenue l'un des principes directeurs. Comment se sont adaptés les organismes gestionnaires des déchets à cette nouvelle donne ? Comment trouver l'équilibre entre la nécessité de transparence et la préoccupation croissante de sauvegarder la sécurité des installations ? Trouve-t-on des organismes qui ont réussi la transition d'une culture technocentriste à une culture axée sur le client ? Quelle opposition a été rencontrée ? Quels outils et instruments ont aidé les organismes à évoluer ? Ce rapport documente les changements observés par les gestionnaires de ce secteur, et place ces changements dans un cadre d'analyse provenant des sciences de l'organisation. L'expérience et les analyses rapportées seront d'intérêt pour tous ceux qui cherchent à savoir plus sur les changements opérés dans le domaine de la gestion des déchets radioactifs, ou dont la propre organisation – tous secteurs confondus – est appelée à s'adapter à la nouvelle donne sociale.

Engineered Barrier Systems (EBS) in the Safety Case: Design Confirmation and Demonstration ^{vo}

Workshop Proceedings, Tokyo, Japan, 12-15 September 2006

ISBN 978-92-64-03995-7, 150 pages. Prix : € 45, US\$ 58, £ 32, ¥ 6 200.

Financement du démantèlement : éthique, mise en œuvre, incertitudes

Rapport de synthèse

ISBN 978-92-64-99029-6, 44 pages. Gratuit : versions papier ou web.

Ce rapport de synthèse sur le *Financement du démantèlement : éthique, mise en œuvre, incertitudes* a été rédigé en s'appuyant sur la littérature récente et sur les informations présentées lors des réunions de l'AEN en 2003 et en 2004, notamment lors de la session thématique organisée en novembre 2004 sur le financement du démantèlement d'installations nucléaires. Ce rapport tire aussi parti de l'expérience du Groupe de travail de l'AEN sur le déclassement et le démantèlement (WPDD). Sous une forme concise, il passe en revue les considérations que les mécanismes de financement du démantèlement suscitent en matière d'éthique, de mise en œuvre et d'incertitudes. Il présente les principes éthiques de base contenus dans les accords internationaux, décrit les facteurs influant sur la constitution et la gestion de fonds destinés au démantèlement d'installations nucléaires et expose les principales sources d'incertitudes des systèmes de financement.

Radioactive Waste Management in Spain: Co-ordination and Projects ^{vo}

FSC Workshop Proceedings, L'Hospitalet de l'Infant, Spain, 21-23 November 2005

ISBN 978-92-64-03941-4, 142 pages. Prix : € 40, US\$ 52, £ 28, ¥ 5 500.

Radioprotection

The Process of Regulatory Authorisation 規制認可のプロセス

(Version bilingue anglais-japonais)

ISBN 978-92-64-99028-9, 148 pages. Gratuit : versions papier ou web.

Scientific Issues and Emerging Challenges for Radiological Protection ^{vo}

Report of the Expert Group on the Implications of Radiological Protection Science

ISBN 978-92-64-99032-6. Gratuit : versions papier ou web.

Droit nucléaire

Bulletin de droit nucléaire

ISSN 0304-3428. Abonnement annuel (2 numéros) : € 99, US\$ 125, £ 68, ¥ 13 400.

Considéré comme l'ouvrage de référence en la matière, le *Bulletin de droit nucléaire* est une publication internationale unique en son genre où juristes et universitaires peuvent trouver une information à jour sur l'évolution de ce droit. Publié deux fois par an en anglais et en français, il rend compte du développement des législations dans une soixantaine de pays du monde entier. Il tient le lecteur informé de la jurisprudence, des décisions administratives, des accords internationaux et des activités réglementaires des organisations internationales, dans le domaine de l'énergie nucléaire.

Sciences nucléaires et Banque de données

Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation

Ninth Information Exchange Meeting, Nîmes, France, 25-29 September 2006

ISBN 978-92-64-99030-2, 752 pages. Gratuit : versions papier ou web.

Assessment of Fission Product Decay Data for Decay Heat Calculations

International Evaluation Co-operation, Volume 25

ISBN 978-92-64-99034-0, 60 pages. Gratuit : versions papier ou web.

Chemical Thermodynamics of Solid Solutions of Interest in Nuclear Waste Management - Volume 10

A State-of-the-art Report

ISBN 978-92-64-02655-1, 288 pages. Prix : € 80, US\$ 104, £ 57, ¥ 11 100.

JANIS-3.0 (DVD)

Gratuit sur demande.

VVER-1000 Coolant Transient Benchmark

Phase I (V1000CT-1), Vol. 3: Summary Results of Exercise 2 on Coupled 3-D Kinetics/Core Thermal-hydraulics

ISBN 978-92-64-99035-7, 92 pages. Gratuit : versions papier ou web.

Où acheter les publications de l'AEN

OECD Publications, c/o Turpin Distribution

Pegasus Drive, Stratton Business Park, Biggleswade, Bedfordshire, SG18 8QB, UK

Tél. : +44 (0) 1767 604960 ; Fax : +44 (0) 1767 601640

E-mail : oeclrow@turpin-distribution.com

Commandes en ligne : www.oecd.org/bookshop

Visualisez les titres de l'OCDE à www.oecd.org/bookshop. Commandez un ouvrage et téléchargez-le au format PDF. Économisez 20 % en n'achetant que le fichier PDF.

Paiement sécurisé par carte bancaire.

Où commander nos publications gratuites

Service des publications de l'AEN

12, boulevard des Îles, F-92130 Issy-les-Moulineaux, France

Tél. : +33 (0)1 45 24 10 15 – Fax : +33 (0)1 45 24 11 10

E-mail : neapub@nea.fr

www.nea.fr

See what you've been missing . . .

Radwaste Solutions

. . . **Subscribe for 2008!**

Radwaste Solutions is the magazine of radioactive waste management and facility remediation. In the United States, this business is centered on four industry subsets: (1) The U.S. Department of Energy's remediation of its weapons production and research facilities; (2) The U.S. DOE's civilian radioactive waste activities; (3) nuclear utilities, and (4) nonpower, non-DOE activities. In addition, other countries are also cleaning up and decommissioning their government nuclear facilities and their older nuclear power plants, and U.S. businesses are increasingly obtaining contracts and subcontracts to perform this work.

ANS Members: Your significantly discounted rate remains at \$42 (non-U.S. subscribers add \$36 for postage outside N. America). Simply call the Membership Department today at 1-708-579-8266 or -8217 and ADD A SUBSCRIPTION today!

Nonmember/Corporate: If you are a nonmember, or would like a subscription for your company the cost is \$460, but that includes Class C Electronic Access as well! Call 1-708-579-8207 or subscribe online at www.ans.org/store/vi-160000.

(all prices in U.S. Dollars)



A publication of
the American Nuclear Society

2008 Editorial Feature Issues Include:

- Utility Waste Operations
- Decommissioning and Decontamination
- Low-Level Waste
- Environmental Remediation
- High-Level Waste/Spent Fuel
- 4th Annual Buyers Guide

Les Éditions de l'OCDE, 2 rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16
IMPRIMÉ EN FRANCE (68 2007 02 2 P)
ISSN 1605-959X