

Alimenter l'innovation

Les pays à la recherche de la prochaine génération d'énergie nucléaire

Judith Perera

Ces dernières années, plusieurs initiatives multinationales se sont penchées sur les perspectives de développement à moyen et long terme de l'énergie nucléaire. Il s'agit notamment du Forum international Generation IV (GIF) mené par les États-Unis, du projet international de l'AIEA sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible nucléaire innovants (INPRO), et du réseau européen Michelangelo pour la compétitivité et la durabilité de l'énergie nucléaire dans l'Union européenne (Micanet). Il a également été réalisé deux importantes études – une enquête menée par l'AIEA en collaboration avec l'Agence internationale de l'énergie (AIE) et l'Agence de l'énergie nucléaire (AEN) de l'OCDE, intitulée *Mise au point de réacteurs nucléaires innovants : possibilités de coopération internationale* ; et une étude interdisciplinaire réalisée par le Massachusetts Institute of Technology (MIT) sur *L'avenir de l'énergie nucléaire*.

Toutes ces initiatives traitent à peu près du même sujet, à savoir la mise au point de systèmes nucléaires – y compris des réacteurs et des cycles du combustible – innovants. Cependant, bien qu'étant mues par les mêmes impératifs sous-jacents, elles diffèrent dans une certaine mesure, en particulier par l'importance qu'elles accordent au cycle du combustible nucléaire. Le GIF et l'INPRO sont deux initiatives dans le cadre desquelles la coopération internationale pourrait se resserrer.

Le GIF

Le GIF est essentiellement une initiative américaine. En 1997, le Comité des conseillers du Président pour la science et la technologie a passé en revue les activités de recherche menées dans le pays dans le domaine de l'énergie et a élaboré un programme visant à satisfaire, au siècle prochain, les besoins en matière d'énergie et d'environnement. Il a noté qu'il fallait, pour pouvoir satisfaire ces besoins, mettre en œuvre une solution nucléaire viable, notamment des activités de recherche permettant de lever les principaux obstacles à la réalisation de cette solution, y compris ceux liés au combustible usé, à la prolifération, à l'économie et à la sûreté. En réponse, le Ministère de l'énergie des États-Unis a lancé, pour étudier les questions techniques et scientifiques susceptibles d'avoir une incidence sur la future consommation d'énergie aux États-Unis, l'Initiative de recherche sur l'énergie nucléaire (NERI). En 1998, le Ministère a créé le Comité consultatif pour la recherche sur l'énergie nucléaire (NERAC), organisme indépendant chargé de conseiller le ministre et le directeur du Bureau de l'énergie nucléaire, de la science et de la technologie pour ce qui est du programme nucléaire civil mis en œuvre par le Ministère.

Le GIF vise à mettre au point et à démontrer, en collaboration, un ou plusieurs systèmes nucléaires de quatrième génération présentant des avantages en matière d'économie, de sûreté, de fiabilité et de durabilité, et pouvant être exploités commercialement d'ici à 2030. L'idée est de partager les compétences, les ressources et les installations d'essais pour améliorer le rendement et éviter les redondances. (*Pour la composition du GIF, voir le tableau.*)

La Politique énergétique nationale, publiée en mai 2001 par un groupe *ad hoc* relevant du Vice-Président, préconise de développer l'énergie nucléaire, indispensable à la satisfaction des besoins croissants des États-Unis en énergie. En septembre 2002, le Sous-comité du NERAC chargé de la planification technologique du Forum Generation IV a publié un Plan de développement de systèmes nucléaires de quatrième génération. En coordination avec le GIF, il a été sélectionné six concepts innovants de réacteur qui feront l'objet de recherches conjointes plus poussées portant sur les cycles du combustible et serviront de support à des projets parrainés par la NERI. Ces concepts sont les suivants :

- Réacteur rapide refroidi par gaz (RRRG) – réacteur à spectre de neutrons rapides, refroidi par hélium et à cycle du combustible fermé ;

Membres de l'INPRO	Membres de l'INPRO et du GIF	Membres du GIF
Afrique du Sud	Afrique du Sud	Afrique du Sud
Allemagne	Argentine	Argentine
Argentine	Brésil	Brésil
Brésil	Canada	Canada
Bulgarie	France	États-Unis
Canada	République de Corée	France
Chine	Suisse	Japon
Espagne	Organisation :	République de Corée
Fédération de Russie	Commission européenne	Royaume-Uni
France		Suisse
Inde		Organisations :
Indonésie		FORATOM
Pakistan		Commission européenne
Pays-Bas		
République de Corée		
République tchèque		
Suisse		
Turquie		
Organisation :		
Commission européenne		

INPRO : situation en juin 2004. Des observateurs d'Euratom, de l'AIEA et de l'Agence de l'énergie nucléaire participent aux réunions du GIF.

- ▶ Réacteur à très haute température (RTHT) – réacteur modéré par graphite, refroidi par hélium et à cycle d’uranium à passage unique ;
- ▶ Réacteur surcritique refroidi par eau (RSRE) – réacteur à haute température, refroidi par eau à haute pression, fonctionnant au-dessus du point critique thermodynamique de l’eau ;
- ▶ Réacteur rapide refroidi par sodium (RRRS) – réacteur à spectre rapide refroidi par sodium et à cycle fermé améliorant le rendement de la gestion des actinides et de la conversion de l’uranium fertile ;
- ▶ Réacteur rapide refroidi par le plomb (RRRP) – réacteur à spectre rapide refroidi par un métal liquide eutectique (plomb ou plomb/bismuth) et à cycle fermé améliorant le rendement de la conversion de l’uranium fertile et de la gestion des actinides ;
- ▶ Réacteur à sels fondus (RSF) – produit de l’énergie de fission dans un mélange de sels fondus en circulation avec un réacteur à spectre épithermique et un cycle du combustible à recyclage complet des actinides.

Ils devraient être déployables dans les trente prochaines années. Leurs avantages comparatifs sont notamment un coût d’investissement réduit, une sûreté renforcée, une production de déchets minimale et une réduction plus poussée du risque de prolifération de matières de qualité militaire. Les travaux ont commencé sur quatre des systèmes sélectionnés. Les buts fixés pour les systèmes nucléaires Generation IV sont les suivants :

- ▶ Durabilité : respecter les objectifs de propreté de l’air et promouvoir, pour la production mondiale d’énergie, une offre durable de systèmes et une utilisation rationnelle du combustible ; réduire et gérer les déchets nucléaires, et réduire leur intendance sur le long terme ;
- ▶ Économie : offrir, sur la durée du cycle de vie, un avantage en matière de coût par rapport à d’autres sources d’énergie ; offrir un niveau de risque comparable à celui d’autres projets ;
- ▶ Sûreté et fiabilité : exceller dans ces domaines ; avoir une très faible probabilité de dommage au coeur du réacteur et, le cas échéant, un faible degré de gravité ; éliminer la nécessité d’une action d’urgence hors site ;
- ▶ Résistance à la prolifération et protection physique : représenter un moyen dissuasif et le moins intéressant possible de détournement ou de vol de matières de qualité militaire, et assurer une protection physique accrue contre les actes de terrorisme.

Des études du GIF ont défini quatre types de cycle du combustible nucléaire : à passage unique, à recyclage partiel du plutonium, à recyclage complet du plutonium, et à recyclage complet des transuraniens. Ces cycles ont été modélisés sur plus d’un siècle sur la base de projections de demande d’énergie nucléaire établies par le Conseil mondial de l’énergie et par l’Institut international d’analyse appliquée des systèmes.

Le cycle à passage unique s’est montré être le plus gourmand en uranium et celui qui produit le plus de déchets sous forme

de combustible usé, mais ces déchets demeurent limités par rapport à ceux d’autres techniques. Les ressources en uranium sont suffisantes pour alimenter un cycle à passage unique au moins jusqu’au milieu du siècle. La limite, cependant, tient à l’offre d’espace de stockage. Ce problème prend de l’importance, car il va obliger à construire de nouveaux dépôts en quelques décennies. À plus long terme, au-delà de 50 ans, l’offre d’uranium va aussi poser un problème.

Les systèmes à cycle complètement fermé peuvent réduire les besoins en espace de stockage et en capacité, mais il faut maintenir les coûts à des niveaux acceptables. Les cycles fermés permettent de séparer les déchets nucléaires et de gérer au mieux chaque fraction. Les stratégies avancées de gestion des déchets comprennent la transmutation de certains nucléides, la gestion rationnelle de la chaleur résiduelle, le stockage provisoire souple et l’adaptation des déchets à certains environnements géologiques. Elles promettent également de réduire au moins dans une certaine mesure la radiotoxicité à long terme des déchets destinés à l’entreposage géologique en récupérant la plupart des éléments radioactifs lourds à longue période.

Divers réacteurs pourraient aussi être combinés en cycles symbiotiques associant, par exemple, des réacteurs thermiques et rapides. Les actinides provenant des systèmes thermiques pourraient être recyclés dans des systèmes rapides, ce qui réduirait les inventaires d’actinides dans le monde. En améliorant la capacité de combustion des réacteurs thermiques refroidis par gaz ou par eau, on pourrait aussi gérer plus facilement les actinides dans le cadre d’un système symbiotique. Les systèmes thermiques pourraient aussi intégrer des dispositifs tels que la production d’hydrogène dans des réacteurs à gaz à haute température ou des réacteurs à eau ordinaire très économiques, formant un système global davantage inscrit dans la durée.

Il est également ressorti d’études réalisées par le GIF que l’énergie nucléaire se distingue, sur le marché, par le fait que son cycle du combustible ne représente que 20% environ de son coût de production. Il a en outre été avancé que l’on pourrait, pour un coût raisonnable, adopter un cycle du combustible allant au-delà du cycle à passage unique.

Le projet international INPRO

L’INPRO a été lancé en 2000 en application d’une résolution que les États Membres de l’AIEA ont adoptée de façon que le nucléaire contribue durablement à satisfaire les besoins en énergie au XXI^e siècle. Pour que ce mode de production joue un rôle significatif dans l’approvisionnement énergétique mondial, il va falloir mettre au point des méthodes innovantes à même de résoudre les problèmes de compétitivité, de sûreté, de gestion des déchets et de prolifération. C’est la raison pour laquelle l’INPRO vise un plus long terme que les autres projets et est le seul à aborder les problèmes du point de vue d’usagers potentiels de pays en développement, analysant leurs besoins spécifiques. Il définit comme « usagers » tout un éventail d’entités – investisseurs, concepteurs, exploitants, organes de réglementation, organisations et autorités locales, gouvernements, ONG, médias et consommateurs.

L’INPRO s’emploie à réunir tous les États Membres intéressés de l’AIEA – détenteurs et consommateurs de technologie – afin qu’ils étudient ensemble les mesures à prendre aux plans

international et national pour introduire dans les réacteurs et cycles du combustible nucléaires les innovations souhaitées. Ces dernières doivent faire appel à des solutions techniquement et économiquement compétitives reposant, dans toute la mesure possible, sur des systèmes dotés de dispositifs de sûreté intrinsèques réduisant le risque de prolifération et d'impact sur l'environnement. Le but est de lancer un processus qui, d'une part, associe toutes les parties prenantes et, d'autre part, influence, utilise et complète les activités menées par les institutions existantes et les projets mis en œuvre aux niveaux national et international.

Le champ d'application de l'INPRO englobe les réacteurs et installations nucléaires qu'il est prévu de mettre en service à l'avenir et les cycles du combustible associés. L'INPRO se donne 50 ans pour réaliser l'analyse nécessaire, mais cela ne signifie pas que les techniques seront mises en œuvre d'ici là. Toutefois, il devrait être mis en service et coexister, pendant cette période, un panachage de concepts actuels, évolutifs et innovants. L'INPRO n'a encore étudié, pour le moment, aucune technique particulière.

En 2001-2003, dans le cadre de sa Phase 1A, l'INPRO a produit des listes de principes fondamentaux, de besoins des usagers et de critères qui doivent permettre de comparer différents concepts et approches des questions essentielles concernant le futur rôle de l'énergie nucléaire, à savoir la compétitivité économique, la sûreté, les déchets, la prolifération, la sécurité et la protection physique ainsi que la durabilité. Outre cet examen des besoins techniques, il a aussi émis des recommandations concernant des aspects institutionnels et juridiques et diverses questions d'infrastructure, principalement dans le contexte de la mondialisation. Cette phase, qui s'est achevée en juin 2003, a donné lieu à l'élaboration de méthodes et d'orientations devant permettre d'évaluer différents concepts et approches.

La Phase 1B, qui a débuté en juillet 2003, prévoit la validation des méthodes de l'INPRO par des études de cas et l'examen de techniques nucléaires innovantes de production d'électricité. Cet examen sera réalisé par des États Membres sur la base des principes fondamentaux, besoins d'usagers, critères et méthodes définis au cours de la Phase 1A. Il inclura également une collecte préliminaire d'informations sur les réacteurs et cycles du combustible innovants. Six membres de l'INPRO ont proposé d'étudier, en appliquant les méthodes susmentionnées, certains systèmes nucléaires innovants :

- ▶ Argentine : système CAREM-X – réacteur CAREM et processus d'enrichissement du combustible SIGMA.
- ▶ Inde : ensemble réacteur à eau lourde sous pression de type avancé et cycle du combustible incluant un surgénérateur rapide et un système hydride pour la transmutation des déchets.
- ▶ République de Corée : cycle du combustible DUPIC.
- ▶ Fédération de Russie : famille de réacteurs BN-800 alimentés au nitrure et cycle du combustible adjacent à l'état d'équilibre.
- ▶ Chine : réacteur haute température à lit de boulets.
- ▶ République tchèque : réacteur à sels fondus (concept choisi par le Forum international Generation IV (GIF)).

Par ailleurs, plusieurs experts étudient, individuellement, les techniques non visées par les études nationales afin d'obtenir une validation aussi complète que possible des méthodes.

Les résultats définitifs de ces travaux et de plusieurs études de cas seront présentés à la septième réunion du Comité directeur de l'INPRO, à la fin de 2004. Les concepts innovants de réacteur nucléaire et de cycle du combustible seront alors évalués en regard des besoins et critères retenus. À partir des résultats de la Phase 1, la Phase 2 se concentrera sur les techniques disponibles et sur la possibilité de lancer un projet international.

Jusqu'à présent, l'INPRO a dépendu du soutien politique, financier et technique accordé par les États Membres de l'AIEA (en particulier de la Russie, son principal bailleur de fonds). Depuis 2004, cependant, le financement est partiellement inclus dans le budget ordinaire de l'AIEA. (*Pour la composition de l'INPRO, voir le tableau.*)

L'aspect essentiel de la méthodologie de l'INPRO tient aux informations qu'elle permet d'obtenir en ce qui concerne le potentiel de l'énergie nucléaire et les conséquences de son utilisation. Elle prend en compte les options de développement de la société, ses besoins en énergie et les dépenses connexes à prévoir en termes d'activités, de ressources et de temps. Elle aidera les membres de l'INPRO à recenser et à évaluer les éléments – réacteurs, installations de traitement des déchets et installations de fabrication et de recyclage du combustible – nécessaires à un futur système nucléaire de production d'énergie. Elle aidera aussi les États à définir les activités de recherche, de développement et de démonstration à mettre en œuvre pour améliorer les éléments existants en vue des futures applications et en concevoir, au besoin, de nouveaux.

Dans le domaine économique, l'INPRO envisage quatre scénarios commerciaux. Ces derniers se caractérisent par différents niveaux de mondialisation et de régionalisation et par différentes attitudes vis-à-vis de la croissance économique et des contraintes environnementales. Selon l'INPRO, les systèmes nucléaires innovants, s'ils sont économiquement compétitifs, peuvent grandement contribuer à satisfaire les futurs besoins en énergie. Pour que le coût unitaire de l'énergie reste compétitif, cependant, il faut que toutes ses composantes (dépenses d'investissement, d'exploitation et de maintenance, combustible) soient prises en compte et bien gérées. Une limitation liée au coût du combustible entraînera une limitation des dépenses d'investissement et d'exploitation des installations du cycle, y compris l'extraction, la transformation et l'enrichissement du combustible, le retraitement du combustible usé ainsi que le déclassement et la gestion à long terme des déchets issus de ces installations.

En ce qui concerne la durabilité, l'INPRO a édicté deux principes fondamentaux : l'acceptabilité des effets produits par l'énergie nucléaire sur l'environnement ; et l'aptitude des systèmes innovants à produire, au XXI^e siècle, une énergie durable. La protection de l'environnement est jugée fondamentale et, pour être durable, le système ne doit pas venir à manquer d'importantes ressources (matières fissiles/fertiles ou eau) à la moitié de sa durée de vie prévue. Il doit en outre les utiliser de manière aussi rationnelle que les autres solutions acceptables, nucléaires ou non.

S'agissant de la sûreté, les principes et critères de l'INPRO reposent sur l'extrapolation des tendances actuelles et visent à englober les intérêts potentiels des pays en développement et des pays en transition. Pour les réacteurs nucléaires, les fonctions fondamentales de sûreté consistent à contrôler la réactivité, à extraire la chaleur du cœur, à confiner les matières radioactives et à faire écran aux rayonnements. Pour les installations du cycle, elles consistent à contrôler la sous-criticité et la chimie du combustible, à extraire la chaleur de décroissance des radionucléides, à confiner la radioactivité et à faire écran aux rayonnements. L'élaboration de systèmes nucléaires innovants doit se fonder sur une analyse globale du cycle de vie prenant en compte les risques et incidences du cycle du combustible intégré.

La sûreté de la gestion des déchets fait intervenir des calendriers et, souvent, des termes sources et des cheminements qui diffèrent de ceux des installations nucléaires. Les neuf principes de gestion des déchets radioactifs déjà définis par l'AIEA ont été adoptés par l'INPRO sans aucune modification.

Comme la demande d'électricité devrait croître surtout dans les pays en développement, l'INPRO estime qu'il faudrait accorder une attention particulière à ces pays. Dans ceux qui n'ont besoin que d'un petit nombre de centrales nucléaires, cependant, il ne serait pas rationnel de créer une structure complète d'approvisionnement. Des compagnies internationales pourraient très bien fournir l'essentiel de l'infrastructure nécessaire à la construction et à l'exploitation de systèmes nucléaires de production d'électricité et proposer de précieux services.

Une nécessaire coopération mondiale

Il existe un consensus général quant à la nécessité d'agir au niveau international pour mettre au point de nouvelles techniques nucléaires. L'instauration d'un certain degré de coopération entre les projets existants, qui a fait l'objet de débats, progresse.

Les objectifs du GIF et les critères de l'INPRO présentent de nombreuses similarités pour ce qui est de l'économie, de la sûreté, de l'environnement, du cycle du combustible, des déchets, de la résistance à la prolifération et de la durabilité. Les méthodes de tri et de sélection des concepts candidats sont également très proches. Il existe, toutefois, quelques différences importantes :

► Le GIF en est déjà à la phase de recherche-développement, alors que l'INPRO ne vient que d'achever sa formulation des besoins des usagers ;

► Le GIF répond principalement aux exigences de quelques pays industriellement développés, alors que l'INPRO propose un examen plus approfondi de l'énergie nucléaire en général, prenant en compte les spécificités des pays et des régions ;

► L'INPRO devrait englober un spectre plus large de propositions techniques de réacteurs et de cycles du combustible innovants répondant aux exigences de la quasi-totalité des pays, et pas seulement de ceux qui possèdent une industrie nucléaire ;

► L'INPRO aborde aussi des questions non techniques, notamment les avantages que présenterait une coopération internationale pour ce qui est de créer l'infrastructure nécessaire dans chaque pays, ainsi que l'introduction d'innovations dans les structures juridiques et institutionnelles. Il est disposé à examiner les besoins des pays en développement à cet égard ;

► Le GIF limite son examen à des systèmes nucléaires distincts dotés de réacteurs et de cycles du combustible différents ;

► L'INPRO considère que la combinaison de ces systèmes devrait être adaptée à différents scénarios nationaux, régionaux et mondiaux de développement de l'énergie nucléaire.

Le GIF et l'INPRO ont des raisons de coopérer plus étroitement car leurs objectifs diffèrent. Les membres du GIF sont principalement les détenteurs de technologie et le Forum envisage des techniques très complexes. De son côté, l'INPRO considère que le futur marché du nucléaire sera l'Asie, y compris des pays en développement ayant besoin de systèmes plus simples mais fiables. L'INPRO compte, parmi ses membres, des pays en développement et peut donc mieux comprendre leurs besoins.

Le rôle joué par l'innovation comme facteur déterminant de l'avenir du nucléaire a été souligné à la Conférence internationale sur les techniques innovantes relatives aux cycles du combustible et à l'énergie nucléaires, organisée par l'AIEA à Vienne en juin 2003. Anil Kakodkar, président de la Commission indienne de l'énergie atomique, y a souligné l'importance du nucléaire dans un dosage diversifié des formes d'énergie. Il a ajouté, cependant, qu'il existait, en matière d'énergie nucléaire, un conflit sous-jacent opposant pays en développement et pays développés. Selon les premiers, a-t-il précisé, les mesures de non-prolifération avaient largement été utilisées pour freiner le transfert de technologie.

À la Conférence générale de l'AIEA, en septembre 2003, les États ont adopté une résolution qui soulignait la nécessité d'instaurer, pour mettre au point des techniques nucléaires innovantes, une collaboration internationale, et l'important parti que l'on pourrait tirer d'une telle collaboration. Le texte soulignait également la nécessité de recenser les synergies qui pourraient s'établir avec d'autres initiatives internationales visant le même objectif.

Il est clair que se met en place une collaboration multinationale plus active, même s'il demeure des obstacles à surmonter. Dans ce contexte, l'INPRO et le GIF pourraient bientôt commencer à coordonner leurs activités.

Judith Perera (JudithPerera@aol.com) a 15 ans d'expérience comme journaliste et consultant spécialisé dans l'énergie nucléaire. Le présent article s'inspire du rapport qu'elle a publié dans l'édition de janvier 2004 de Nuclear Engineering International. Pour tout renseignement concernant l'action menée par l'AIEA au travers de l'INPRO, voir le site www.iaea.org/INPRO/