

# AMÉLIORATION DES RÉACTEURS NUCLÉAIRES ET DU CYCLE DU COMBUSTIBLE DE NÉCESSAIRES INNOVATIONS

D. MAJUMDAR, J. KUPITZ, H. ROGNER, T. SHEA, F. NIEHAUS ET K. FUKUDA

À mesure que le siècle s'écoule, il apparaît certain que le développement mondial et la croissance démographique vont mettre à l'épreuve l'habitabilité de la planète. On prend de plus en plus conscience, en particulier, de l'urgence qu'il y a à satisfaire les besoins croissants en électricité et en eau d'une manière qui respecte l'environnement.

Au cours des 50 dernières années, l'énergie nucléaire s'est transformée d'une nouveauté scientifique en l'une des plus importantes formes d'énergie utilisées dans plus de 30 pays. En 1999, dix-sept pays utilisaient l'énergie nucléaire pour satisfaire au moins 25% de leurs besoins en électricité. Dans le même temps, davantage de pays souhaitent développer et démontrer diverses applications de l'énergie nucléaire telles que l'utilisation de réacteurs pour le dessalement de l'eau de mer.

Dans ce contexte, on pourrait s'attendre à constater une augmentation de la production d'électricité d'origine nucléaire. Or, ce n'est pas le cas, et la future contribution de l'électronucléaire à la résolution des problèmes posés par la recherche d'un développement énergétique durable est incertaine. Dans le monde, le tableau est mitigé : aucune nouvelle centrale nucléaire n'est en construction en Europe occidentale et en Amérique du Nord. Dans plusieurs pays d'Asie et dans

certaines régions d'Europe orientale, cependant, l'énergie nucléaire continue de se développer.

Les principaux facteurs qui expliquent ce tableau mitigé sont les inquiétudes et les perceptions erronées qui se font jour dans trois domaines :

- la sûreté et la sécurité;
- le lien qui existe entre l'énergie nucléaire et les armes nucléaires;
- les aspects environnementaux et économiques de l'énergie nucléaire et de son cycle du combustible.

Si l'on veut que l'énergie nucléaire contribue de façon significative à la satisfaction de la future demande d'énergie, il faut lever ces inquiétudes.

Concrètement, l'acceptation du nucléaire comme future source d'énergie dépendra de la façon dont auront été résolus les problèmes rencontrés pendant le déploiement du nucléaire au XX<sup>e</sup> siècle.

Chaque problème peut être abordé en agissant dans trois domaines étroitement liés.

- **Technologie.** Les caractéristiques de la technologie

proprement dite influent dans une mesure appréciable sur certains aspects essentiels de la sûreté et de la sécurité; sur la non-prolifération; et sur les facteurs environnementaux et économiques.

- **Cadre juridique et institutionnel.** Les contrats commerciaux, les législations et réglementations nationales ainsi que les traités et conventions intergouvernementaux fixent les règles de base qui conditionnent le développement et la mise en œuvre du nucléaire.

- **Surveillance et contrôle.** Les contrôles effectués par les propriétaires et exploitants d'installations nucléaires, par les autorités locales et nationales, par les organisations régionales et internationales et par les associations de citoyens ont pour objet de veiller à ce que la structure nécessaire de surveillance des opérations nucléaires soit en place et maintenue.

Dans chacun de ces trois domaines étroitement liés, diverses activités ont été et sont mises en œuvre; en fait, le demi-siècle écoulé a produit une

---

*M. Majumdar, expert américain, travaille à la Section de la planification et des études économiques du Département de l'énergie nucléaire de l'AIEA, section que dirige M. Rogner. M. Kupitz dirige la Section du développement de la technologie électronucléaire, et M. Fukuda la Section du cycle du combustible nucléaire et des matières nucléaires de ce Département. M. Shea dirige le Bureau de l'Initiative trilatérale au Département des garanties de l'AIEA. M. Niehaus dirige la Section de l'évaluation de la sûreté au Département de la sûreté nucléaire de l'AIEA.*

industrie qui a exploité l'énergie nucléaire avec un tel succès qu'elle satisfait actuellement un sixième des besoins mondiaux en électricité. Ce résultat vaut d'être mentionné.

Toutefois, les problèmes rencontrés aujourd'hui diffèrent de ceux rencontrés au cours des décennies écoulées et varient considérablement d'une région à l'autre de la planète. Ils sont particulièrement aigus dans les pays en développement, qui ont besoin d'électricité pour lutter contre la pauvreté et satisfaire les besoins fondamentaux liés à un développement durable. Il faut davantage aider les pays en développement qui souhaitent utiliser l'énergie nucléaire pour produire de l'électricité.

Très peu des moyens dont on dispose pour résoudre les problèmes inhérents à chacun de ces trois domaines peuvent être améliorés de façon simple ou rapide. Ces améliorations exigeront des efforts soutenus et très longs et nécessiteront de rechercher, en coopération, des solutions innovantes permettant de résoudre les principales questions, inquiétudes et conceptions erronées.

Étant donné la situation énergétique qui prévaut dans le monde et les exigences du développement durable, l'un des principaux objectifs doit être de renforcer les bases d'un accroissement de la contribution potentielle du nucléaire à l'offre d'électricité. De telles mesures peuvent être prises dans le cadre de programmes cohérents visant, pour obtenir le soutien du public et des responsables politiques, les aspects techniques, juridiques, institutionnels et réglementaires nécessaires.

Depuis qu'elle existe, l'AIEA joue un rôle moteur dans l'établissement et la coordination d'activités internationales soutenant les

applications pacifiques de l'énergie nucléaire. Alors que le nucléaire atteint un stade décisif de son développement, les activités de l'Agence dans des domaines tels que l'énergie nucléaire et le cycle du combustible revêtent une importance accrue. Le présent article examine la situation mondiale dans le contexte des grands problèmes qui se posent et s'interroge sur la nécessité d'une action coordonnée et durable indispensable pour progresser, à l'aube du siècle nouveau, dans le développement de l'énergie nucléaire. À l'heure où le marché mondial de l'énergie se développe, l'énergie nucléaire a la possibilité d'accroître sa contribution à la production d'électricité ainsi qu'à diverses applications finales non électriques de l'énergie, et ce dans différents domaines.

## LA SITUATION MONDIALE

La contribution de l'énergie nucléaire à la future offre d'énergie dépend de plusieurs facteurs clés. Le degré d'engagement, au niveau mondial, en faveur de stratégies énergétiques durables et la reconnaissance du rôle du nucléaire dans de telles stratégies influenceront sur sa future utilisation. La maturité technologique, la compétitivité économique, les mécanismes financiers et l'acceptation par le public sont d'autres facteurs clés qui influenceront sur la décision de construire de nouvelles centrales. La perception des choix énergétiques et des problèmes environnementaux par le public ainsi que l'information et l'éducation de celui-ci joueront également un rôle important. Il faut aussi veiller constamment à la sûreté d'exploitation des centrales existantes si l'on veut que le nucléaire conserve une

chance de contribuer aux futures stratégies énergétiques.

Fondamentalement, il va falloir que la recherche-développement scientifique et technique non seulement améliore les réacteurs nucléaires et le cycle du combustible actuels, mais aussi conçoive de nouveaux réacteurs et cycles originaux qui soient anti-proliférants, plus rentables, plus économiques et plus sûrs.

**Sept domaines d'action.** Les perspectives mondiales du nucléaire peuvent se résumer par l'action menée dans les sept domaines suivants.

**Technologie.** La technologie nucléaire est le résultat de cinq décennies de développement. Les commandes de centrales nucléaires ont commencé à prendre de l'importance dans les années 60 et leur exploitation commerciale a commencé à se généraliser dans les années 70. Actuellement, l'énergie nucléaire fournit dans le monde entre 6 et 7% de l'énergie primaire. La majorité des centrales en exploitation fonctionnent bien et continuent de s'améliorer.

Cependant, des problèmes ont été rencontrés dans plusieurs domaines; parfois, des centrales ont été prématurément fermées ou achevées sans avoir jamais fonctionné. Les constructions de centrales ont atteint leur apogée dans les années 70 et les raccordements au réseau dans les années 80, les niveaux actuels étant nettement inférieurs à ceux d'alors.

Les activités actuelles d'amélioration technique mises en œuvre dans l'industrie électronucléaire portent, en règle générale, sur trois types d'installations :

■ **Installations commerciales en activité.** Amélioration de la maintenance, de l'exploitation, du soutien technique, de l'approvisionnement en

combustible, et prolongement de la durée de vie.

#### ■ Modèles évolutifs.

Améliorations à court terme de la conception et de l'exploitation consistant en des modifications peu importantes par rapport aux installations commerciales existantes.

#### ■ Modèles novateurs.

Améliorations à long terme de la conception et de l'exploitation consistant en d'importantes modifications par rapport aux installations commerciales existantes.

Ces dernières années, de nombreuses propositions concernant de nouveaux types de réacteurs de puissance et de cycles du combustible ont surgi dans plusieurs pays. Certains de ces modèles pourraient contribuer à rajeunir l'énergie nucléaire, mais seulement s'ils sont conçus, éprouvés et testés dans des conditions qui favorisent leur réussite et leur concrétisation commerciale. Les délais de développement, dans le nucléaire, sont longs. La conception et les essais d'un nouveau modèle de réacteur nucléaire s'étalent généralement sur 15 à 20 ans, en fonction du soutien politique accordé et des ressources disponibles. Un délai bien plus long peut s'écouler avant que le candidat le plus prometteur puisse être sélectionné et testé pour devenir l'instrument d'un développement substantiel du nucléaire. Des mesures vigoureuses sont nécessaires pour maintenir et renforcer le savoir-faire nécessaire qui a été acquis.

**Sûreté.** Le niveau élevé de sûreté nucléaire actuel a été obtenu en apportant des améliorations constantes reposant sur l'expérience accumulée dans le monde. Des mesures de sûreté ont généralement été introduites lorsqu'elles étaient jugées "raisonnablement pratiques", comme le relève la publication de

la Collection Sécurité de l'AIEA intitulée *La sûreté des installations nucléaires*. Certains pays procèdent à une analyse formelle du rapport coût/avantage avant de décider d'améliorations. En cas d'incertitude, il est nécessaire de prendre des décisions prudentes. Vu le haut niveau actuel et futur de performance du matériel, l'accent doit être placé sur la gestion de la sûreté opérationnelle.

Il existe un vaste consensus international, y compris parmi les industriels et les organes de réglementation, concernant les objectifs de sûreté applicables aux futurs réacteurs. Comme le suggère le Groupe consultatif international pour la sûreté nucléaire (INSAG), il faut, pour l'essentiel, que les futures centrales nucléaires soient dix fois plus sûres que les objectifs fixés pour les réacteurs existants (par exemple, objectifs de  $10^{-5}$  par an pour la fréquence des dommages au cœur et de  $10^{-6}$  par an pour les importants rejets radioactifs sur les futures centrales). Il est précisé, dans l'INSAG-12, qu'un autre objectif, pour ces futures centrales, est l'élimination pratique des séquences d'accident susceptibles d'entraîner d'importants rejets radioactifs précoces, et la prise en compte réaliste et précise, lors de la phase d'étude, des accidents graves susceptibles d'entraîner des défaillances tardives de l'enceinte de confinement de façon que leur survenue ne nécessite que des mesures de protection limitées dans l'espace et dans le temps".

Sans évolution de la technologie, ces améliorations augmenteraient le coût – tant d'investissement que d'exploitation – de l'énergie nucléaire. Le problème, s'agissant de la conception et de la démonstration des futures centrales, est alors de savoir comment porter la sûreté à des

niveaux aussi ambitieux tout en réduisant les coûts pour garantir leur compétitivité sur le marché de l'énergie.

Il ne s'agit pas là, en principe, d'une tâche impossible. La volonté d'améliorer simultanément la sûreté d'exploitation et l'efficacité économique des techniques a toujours été l'un des moteurs fondamentaux de l'ingénierie et de l'innovation.

Les modèles évolutifs s'emploient à améliorer la sûreté, ce qui nécessite, sur le plan matériel, d'utiliser des systèmes de contrôle modernes, de simplifier les systèmes de sûreté, d'utiliser des appareils perfectionnés et de prolonger les délais d'activation des systèmes de sûreté et d'intervention de l'exploitant. Sur le plan logiciel, ces solutions peuvent aider à démontrer la conformité aux exigences. En outre, l'amélioration des connaissances techniques et des codes informatiques contribue à renforcer la sûreté d'exploitation. Un autre élément est la "prise de décisions compte tenu des risques", qui vise à axer les efforts sur des questions de sûreté importantes; elle peut se traduire, dans certains cas, par un durcissement des exigences et, dans d'autres, par un assouplissement. On s'attache également à simplifier le processus d'autorisation et à accroître sa prévisibilité.

Les nouveaux modèles utilisent encore plus d'éléments visant à renforcer la sûreté inhérente. En particulier, ils s'efforcent de démontrer que des appareils perfectionnés ou nouveaux peuvent rendre caducs certains systèmes de sûreté requis sur les réacteurs actuels; soit ils ne seraient absolument pas nécessaires, soit ils ne seraient nécessaires que pour protéger l'investissement que représente la

centrale, pas pour protéger la santé et la sûreté du public. Dans ce cas, l'équipement pourrait quand même être installé; il n'aurait pas besoin, cependant, de répondre à des normes de sûreté, ce qui, actuellement, accroît considérablement son coût. Ces appareils réduiraient aussi fortement l'investissement nécessaire à la mise au point de mesures de gestion des accidents et de préparation aux situations d'urgence.

**Sécurité physique.** Il est indispensable d'adopter des mesures adéquates de protection et un solide cadre international pour prévenir toute détention non autorisée de matières nucléaires et d'autres matières radioactives dangereuses, ainsi que pour prévenir la destruction délibérée d'installations nucléaires ou la dispersion intentionnelle de telles matières en transit.

**Gestion du combustible irradié et des déchets radioactifs.** La gestion du combustible irradié et des déchets ne laisse de préoccuper le public. Dans plusieurs pays, la pénurie de lieux d'entreposage du combustible irradié pose un grave problème. Simultanément, du fait de l'absence de site d'évacuation, le combustible irradié va devoir rester entreposé plus longtemps sur le même site. L'absence de démonstration d'une installation permanente d'évacuation des déchets a multiplié les craintes et entraîné des incertitudes quant à sa future exploitation et à la dégradation du soutien public, de la volonté politique et de la viabilité financière d'un tel projet. Des concepts originaux de cycle du combustible nucléaire reposant sur de nouvelles technologies pourraient aider à atténuer ce problème écologique en réduisant le volume et la toxicité des déchets pour améliorer la sûreté, la résistance à la prolifération et la rentabilité de l'énergie nucléaire.

**Non-prolifération.** La possibilité d'établissement d'un lien entre énergie nucléaire et armes nucléaires est au cœur du régime international de non-prolifération et sert de base aux garanties de l'AIEA. On sait que quinze États ont mis au point des méthodes d'enrichissement de l'uranium; tandis que son retraitement chimique n'a actuellement lieu que dans un État non doté d'armes nucléaires, la crainte persiste que les activités électronucléaires actuelles et futures n'encouragent l'acquisition d'armes nucléaires ou des technologies nécessaires à cette acquisition.

Suite aux événements survenus en Iraq et dans la République populaire démocratique de Corée, le régime international de non-prolifération a été étendu et renforcé : décision prise par les États de ne pas aider d'éventuels proliférateurs à acquérir des technologies et un savoir-faire essentiels; établissement, par les fournisseurs, d'un contrôle des matières, installations et équipements sensibles; et renforcement des garanties de l'AIEA – surtout pour ce qui est de leur aptitude à détecter toute activité non déclarée d'enrichissement ou de retraitement. Tout État qui se lancerait aujourd'hui dans un programme d'acquisition d'armes nucléaires se heurterait à des obstacles bien plus importants pour obtenir une aide internationale, risquerait bien plus d'être détecté avant de pouvoir mener à bien un tel programme, et s'exposerait davantage à des mesures concertées de contre-prolifération dans l'éventualité où un tel programme serait découvert.

**Économie.** La tendance mondiale à la déréglementation et au renforcement de la concurrence dans le secteur de l'électricité – parallèlement à la

faiblesse persistante du prix des combustibles fossiles et à la suroffre de capacité de base dans les pays développés – n'a pas favorisé le développement des centrales nucléaires. Bien que la plupart des centrales nucléaires existantes soient rentables, très peu de nouvelles centrales sont commandées.

L'offre, dans de nombreuses parties du monde, de gaz naturel peu onéreux et les progrès réalisés dans le domaine des turbines à gaz ainsi que l'amélioration des technologies d'extraction et de transformation du charbon ont réduit l'attrait économique que peuvent présenter de nouvelles centrales nucléaires pour des pays qui n'ont pas facilement accès au gaz naturel ou au charbon, ou qui accordent une grande importance à la sécurité.

Des études réalisées par l'Agence internationale de l'énergie (AIE) et par l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) ainsi que d'autres études réalisées aux États-Unis et à l'AIEA ont montré que compte tenu des taux élevés de rendement et des courtes périodes de remboursement fréquemment escomptées aujourd'hui, il sera difficile pour de nouvelles centrales nucléaires d'être compétitives dans des régions ayant facilement accès à du gaz ou disposant de réserves nationales de charbon. Les coûts élevés d'investissement et les délais de construction relativement longs font plus qu'annuler l'avantage économique présenté par le combustible nucléaire. Aujourd'hui, certaines centrales à gaz naturel peuvent être construites pour un coût d'investissement nettement inférieur à celui d'une centrale nucléaire équivalente et en moins d'un tiers du temps requis pour

cette dernière. À court terme, par conséquent, la capacité de l'électronucléaire ne devrait croître que dans un nombre limité de pays qui ne disposent ni de ressources énergétiques locales, ni d'infrastructures fonctionnant au gaz naturel.

**Acceptation par le public et par les responsables politiques.** Alors que les réacteurs de puissance nucléaires existants fonctionnent de manière fiable et sûre, des inquiétudes et des conceptions erronées se font jour lorsque la sûreté s'articule autour de systèmes complexes et des compétences du personnel d'exploitation. Malgré la mise au point de modèles évolutifs dont la sûreté a été améliorée par rapport aux centrales existantes, le soutien dont bénéficie l'énergie nucléaire s'est estompé dans de nombreux pays. Il faut s'efforcer de communiquer plus efficacement sur les progrès qui sont réalisés et pour aider le public à comprendre l'énergie nucléaire dans le contexte de la demande mondiale d'énergie, des différents systèmes énergétiques, et des cadres réglementaires et techniques dans lesquels les systèmes de production d'électricité opèrent.

## UNE NÉCESSAIRE INNOVATION

À plus long terme, la situation du marché mondial de l'énergie demeure incertain. De nombreuses analyses, cependant, y compris la récente Déclaration du Conseil mondial de l'énergie, préconisent vivement de conserver comme option l'énergie nucléaire (*voir article, page 2*). La croissance continue de la population et de la demande d'énergie – surtout dans les pays en développement – ainsi que la meilleure compréhension du phénomène de changement climatique planétaire imposent de mettre en service rapidement et

de façon généralisée, dans le monde, des centrales électriques n'utilisant pas de combustibles fossiles.

À sa réunion de mars 2000, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a approuvé un Rapport spécial sur les scénarios d'émissions (SRES) couvrant la période allant jusqu'en 2100. Ces scénarios prévoient, à compter de 2020, une importante demande de techniques énergétiques n'émettant pas de carbone.

Les projections concernant le développement du nucléaire sont généralement très favorables. Les scénarios prévoient certes une variation de la part du nucléaire, mais ils font constamment ressortir un vaste potentiel de croissance de celui-ci – des 350 GWe actuels à 2000-5000 GWe d'ici à 2050 et 3500-10 600 GWe d'ici à 2100 (*voir article, page 31*). Fondamentalement, la fourchette de capacités décrite dans ces scénarios pour 2050 équivaut, pour le nucléaire, à des suppléments de capacité mondiale de 50 à 150 GWe par an entre 2020 et 2050.

Compte tenu des problèmes déjà évoqués, il est difficile de prévoir, pour l'électronucléaire, une augmentation de capacité de cinq à dix fois reposant uniquement sur les techniques évolutives existantes. Des activités de recherche-développement novatrices seront nécessaires pour assurer la pleine participation de l'énergie nucléaire au futur marché mondial de l'énergie. Examinons les points suivants :

■ **Coût.** Il est nécessaire d'améliorer la compétitivité du nucléaire sur le marché déréglementé de l'énergie, en particulier dans les régions ayant facilement accès au gaz et/ou disposant de petits réseaux locaux, ainsi que pour les

applications nucléaires non électriques.

■ **Compatibilité de l'infrastructure.** La future augmentation de la demande d'électricité devrait, pour l'essentiel, se produire dans des pays peu familiers avec l'énergie nucléaire. Ces pays ne sont pas tous en mesure de développer rapidement l'infrastructure nécessaire pour exploiter des réacteurs et assurer les services inhérents aux parties initiale et terminale du cycle du combustible. De même, les critères locaux d'examen de la sûreté et d'autorisation de construction et d'exploitation devraient pouvoir être respectés à un coût raisonnable.

■ **Sûreté.** Grâce aux activités permanentes de recherche-développement, la sûreté des futurs réacteurs est en constante amélioration. L'un des objectifs est de pratiquement éliminer les séquences d'accident susceptibles d'entraîner d'importants rejets de radioactivité. Pour réduire les coûts, il faut trouver des solutions originales capables d'accroître la sûreté en simplifiant les systèmes et en utilisant mieux des appareils et équipements perfectionnés.

■ **Garanties.** L'importante augmentation, dans le monde, du nombre de centrales nucléaires et l'augmentation conséquente des quantités de plutonium présentes dans le combustible irradié sont la raison d'être des garanties de l'AIEA. Encore plus préoccupante, cependant, est la prolifération des techniques critiques d'enrichissement de l'uranium et d'extraction du plutonium.

Le coût des inspections nécessaires pour prouver avec suffisamment de certitude que les États continuent d'honorer leurs engagements en matière de non-prolifération varie largement en fonction de la technique utilisée : si la technique de référence est un

## TECHNIQUES NOVATRICES LIÉES AU CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE

| Attribut                                 | Procédé & système                                  | Pays                        | Caractéristiques  |
|--|--|-----------------------------|---|
| Composition et traitement du combustible | Pyrotraitement                                     | Japon, Russie, États-Unis   | Volume des déchets nucléaires plus faible et installation de traitement plus simple que pour le traitement humide (avantages économiques et écologiques escomptés). |
|  | Combustible vibro-tassé                            | Russie, Suisse              | Particules de combustible provenant directement d'une solution acide de retraitement (avantage économique escompté par rapport à la pulvérisation).                 |
|  | Système DUPIC                                      | Canada, République de Corée | Le plutonium n'est pas séparé du combustible irradié du REP (résistance à la prolifération escomptée).  |
|  | Thorium fuel (thorium-uranium, thorium-plutonium)  | Inde, États-Unis            | Le thorium est abondant. Le combustible thorium-uranium produit moins d'actinides mineurs (AM) que l'uranium-plutonium.   |
|  | Inert-matrix fuel                                  | France, Japon, Suisse       | Grâce à l'oxyde chimiquement stable, le combustible irradié est considéré comme forme de déchet (atténuation dans l'environnement).                                 |
| Système séparation & transmutation (S-T) | Système mu par accélérateur                        | France, Japon, États-Unis   | Énergie neutronique intense détruit AM, produits de fission à longue période. Cœur sous-critique renforce la sûreté.  |
|  | Système S-T avec réacteur à neutrons rapides (RNR) | Japon, Russie               | Technologie RNR existante utilisée pour détruire AM, produits de fission à longue période.  |
| Système réacteur                         | Réacteur à neutrons rapides au plomb (+ Bismuth)   | Russie                      | Sûreté renforcée utilisant réfrigérant au plomb.  |

réacteur à eau ordinaire, pour un réacteur de puissance en cours d'exploitation, les activités d'inspection sont environ cinq fois plus importantes; pour une centrale d'enrichissement d'uranium, elles sont dix fois plus importantes; et pour une centrale de retraitement chimique, 100 fois plus.

Il faudrait innover dans la conception des réacteurs et du cycle du combustible de façon à pouvoir à la fois développer de façon importante l'énergie nucléaire tout en minimisant l'accès aux matières qui pourraient facilement être utilisées dans des armes ou autres dispositifs explosifs nucléaires ainsi qu'aux

technologies permettant de les produire.

### Disponibilité des ressources.

Les ressources traditionnelles d'uranium risquent, au bout du compte, de devenir trop onéreuses pour permettre, dans le monde, un vaste développement de l'énergie nucléaire fondé uniquement sur des réacteurs thermiques traditionnels. Il faudrait donc établir un plan approfondi pour estimer et satisfaire les futurs besoins.

Telles sont les principales raisons pour lesquelles il faut concevoir, en dehors des réacteurs évolutifs, de nouveaux types de réacteur et de cycle du combustible.

## ACTIVITÉS NOVATRICES DE R&D

### Modèles de réacteur novateurs.

Actuellement, 40% des centrales nucléaires en construction (23% de la capacité en construction), principalement dans des pays en développement, sont de petite taille (inférieures à 300 MWe) ou de taille moyenne (inférieures à 700 MWe). Elles intègrent les technologies de base des grandes centrales nucléaires actuelles. Les petits réacteurs évolutifs (AP-600, VVER-640, PHWR-500 et CANDU-6, par exemple) s'inspirent également de centrales existantes.

La nécessité, toutefois, d'activités novatrices de

## RÉACTEURS NUCLÉAIRES DE PETITE ET MOYENNE TAILLES À L'ÉTUDE DANS LE MONDE

De petits réacteurs nucléaires sont à l'étude dans plusieurs pays. Il s'agit notamment des réacteurs suivants :

■ **Carem-25**, réacteur à eau sous pression de 25-MWe à l'étude en Argentine. Ce réacteur comprend un générateur de vapeur intégré pouvant être couplé à un système de dessalement.

■ **KLT-40**, réacteur à eau sous pression de 40-MWe à l'étude dans la Fédération de Russie. Ce réacteur est une version montée sur barge d'un petit réacteur de production d'électricité et de chaleur utilisé dans les brise-glaces dans le nord de la Sibérie.

■ **PBMR**, réacteur à haute température de 114-MWe à l'étude en Afrique du Sud. Ce réacteur modulaire à lit de boulets refroidi au gaz se caractérise par un cycle à passage unique et par des dispositifs de sûreté perfectionnés en raison de l'utilisation de particules de combustible céramique à haute capacité thermique.

■ **SMART**, réacteur à eau sous pression de 100-MWe à l'étude dans la République de Corée. Le concept de ce réacteur est pratiquement achevé et se caractérise par un générateur de vapeur intégré polyvalent pouvant notamment servir au dessalement d'eau de mer.

■ **NHR-200**, réacteur à eau sous pression de 200-MWth à l'étude en Chine. Également en Chine, la divergence initiale d'un petit réacteur à haute température de 10 MWth destiné à des applications non électriques est prévue en 2001.

■ **AHWR**, réacteur à eau lourde de 235-MWe à l'étude en Inde. Il s'agit d'un réacteur avancé à tubes verticaux qui utiliserait du combustible à base de thorium et intégrerait des systèmes de refroidissement passifs.

■ **GT-MHR**, réacteur refroidi au gaz de 285-MWe étudié conjointement par les États-Unis, la Fédération de Russie, la France et le Japon.

recherche-développement a été reconnue par l'industrie nucléaire et par les pays qui croient dans les avantages, la viabilité et l'importance à long terme de l'énergie nucléaire. Actuellement, d'importantes activités visent à mettre au point des concepts novateurs de cycle du combustible et de réacteur nucléaire sont mises en œuvre dans plusieurs pays, dont l'Argentine, le Canada, la Chine, la France, l'Inde, l'Italie, le Japon, la République de Corée, la Russie, l'Afrique du Sud et les États-Unis (*voir tableau et encadré*).

L'attention s'est focalisée sur la mise au point de réacteurs de petite et moyenne tailles qui

présentent diverses combinaisons associant simplicité relative de conception, production de masse économique, réduction des coûts d'implantation, cœur à longue durée de vie, télé-exploitation pratiquement sans personnel, et maintenance et réapprovisionnement en combustible fossile centralisés. La Russie a démontré l'exploitation commerciale de petits réacteurs thermiques et électriques dans des régions isolées. En 1999, les États-Unis ont lancé un programme de recherche sur l'énergie nucléaire afin de mettre au point des concepts avancés de réacteur et de cycle du combustible ainsi que des améliorations scientifiques devant

permettre de surmonter les obstacles posés par le développement de l'énergie nucléaire.

Des concepts novateurs s'orientant vers des centrales plus petites à plus courts délais de construction et à plus faibles coûts d'investissement sont à l'étude dans de nombreux pays. L'intention est de produire un modèle qui sera économique, plus sûr et antiproliférant. Il ne s'agit pas seulement de concevoir une version réduite des modèles plus anciens. La construction sur site au moyen de structures et d'éléments préfabriqués, y compris de modules complets permettant une installation rapide, est l'une des caractéristiques de ces réacteurs. On espère également que ceux-ci seront plus faciles à financer et pourront être déployés même dans des régions disposant de modestes réseaux électriques.

Du point de vue de l'innovation, on peut mentionner deux modèles de réacteur avancé non refroidis à l'eau. Il s'agit de réacteurs à gaz à haute température à cycle direct et de réacteurs rapides refroidis au plomb/plomb-bismuth. Le réacteur modulaire à lit de boulets refroidi à l'hélium (PBMR) de 114-MWe sud-africain intéresse le monde entier, car il prétend présenter les caractéristiques souhaitées (y compris la compétitivité commerciale). Les Russes ont également avancé des prétentions analogues, bien qu'à une échelle plus grande, pour leur réacteur rapide refroidi au plomb.

Ces réacteurs promettent tous d'atténuer certaines des inquiétudes liées au développement du nucléaire. Il importera de sélectionner, pour les futures activités de développement et de démonstration, les meilleurs candidats.

**Cycle du combustible nucléaire novateurs.** Depuis le début du développement de l'énergie nucléaire dans les années 60, le système cycle fermé/surgénérateur est perçu comme étant la meilleure solution pour un développement de grande ampleur de l'énergie nucléaire. Aujourd'hui, cependant, des progrès s'imposent si l'on veut résoudre divers problèmes liés à la non-prolifération, à l'atténuation de la pollution, à l'économie et au renforcement de la sûreté et de la sécurité.

Les caractéristiques attendues de cycles novateurs peuvent être définies par rapport à plusieurs objectifs :

- Compétitivité des cycles du combustible.
- Réduction des déchets radioactifs.
- Poursuite d'objectifs de non-prolifération : les matières nucléaires ne doivent pas pouvoir être facilement obtenues ou converties à des fins non pacifiques.
- Poursuite de l'amélioration de la sûreté grâce à des procédés techniques.

Bien qu'il n'existe, actuellement, aucun programme de grande ampleur consacré à la mise au point de cycles novateurs, de nombreux pays dotés de programmes électronucléaires étudient la question.

Ici encore, ces concepts de cycle du combustible promettent tous de lever au moins certaines des inquiétudes liées au développement du nucléaire. Il faudra veiller à atteindre les objectifs globaux de renouvellement de l'énergie nucléaire et, au bout du compte, se concentrer sur les cycles qui éliminent ou atténuent les préoccupations.

Les programmes novateurs actuels de R&D partagent des buts communs, mais leurs

méthodes et objectifs spécifiques différent. Il en résulte notamment une grande diversité de concepts de réacteurs et de cycles du combustible. Certains programmes réexaminent d'anciens concepts que des améliorations matérielles et techniques ont aujourd'hui rendus viables. D'autres tentent d'introduire des systèmes novateurs à la place d'autres plus traditionnels afin d'obtenir d'importantes améliorations. D'autres encore ont décidé d'étudier des solutions radicalement nouvelles.

La R&D actuelle couvre pratiquement tous les principaux types de cycle du combustible et de centrale – réacteurs à eau ordinaire, réacteurs à eau lourde, réacteurs refroidis au gaz et réacteurs à métal liquide – ainsi que certains autres types. Un aperçu des activités mondiales de R&D montre que 40 à 50 concepts différents sont à l'étude. Certains en sont au stade de l'étude initiale; d'autres sont plus avancés, au stade de la conception; et quelques-uns s'approchent de la construction de prototypes ou de modèles de démonstration.

On relève aussi une grande diversité des critères dans des domaines aussi essentiels que la sûreté, la gestion des déchets, la non-prolifération, la consommation des ressources et les types d'applications énergétiques. Sur le plan économique, par exemple, tous les concepts visent à être compétitifs sur le futur marché de l'énergie, mais les avis divergent sur le fait de savoir si ces concepts devraient devenir compétitifs en tenant compte ou non de l'introduction potentielle d'une taxation du CO<sub>2</sub> et de l'augmentation du prix des combustibles fossiles. Compte tenu de ces incertitudes, l'énergie

nucléaire devrait aspirer à se faire valoir par elle-même.

Dans le domaine de la sûreté, certains estiment que les réacteurs à eau ordinaire actuels sont suffisamment sûrs pour être développés à grande échelle, car ils sont respectueux du voisinage (aucun rejet important de radioactivité en dehors du site même en cas d'accident grave). D'autres insistent sur le fait que le public n'acceptera un déploiement de grande ampleur du nucléaire que si l'on propose un nouveau type de réacteur sans défaillance importante au niveau du combustible, ce que revendiquent parfois les réacteurs modulaires à haute température.

Dans le domaine de la gestion des déchets, certains estiment que l'évacuation directe du combustible irradié dans le sous-sol est une solution suffisamment sûre et que pour obtenir l'acceptation du public, il suffit d'en faire la démonstration pratique. D'autres insistent sur le fait qu'il faut éliminer par combustion ou transmutation les radionucléides à longue période dangereux si l'on veut que le public soutienne un vaste déploiement du nucléaire. Les avis diffèrent pour ce qui est de savoir quels éléments dangereux il convient d'éliminer et dans quelle mesure. Une autre question à résoudre est celle de la possibilité de reprise du combustible irradié.

Dans le domaine de la non-prolifération, certains proposent de mettre au point des concepts de réacteur et de cycle du combustible "antiproliférants" (nouveaux types de combustible, nouvelles techniques de retraitement sans extraction de plutonium, nouveaux concepts de réacteurs rapides, etc.) utilisant davantage de systèmes intrinsèques empêchant tout détournement éventuel de matières nucléaires. Il n'existe cependant, parmi les chercheurs,



aucun consensus quant à la façon de mesurer le niveau de “résistance à la prolifération” et quant à la mesure dans laquelle nous devrions intensifier notre recours aux techniques.

Les spécialistes du nucléaire doivent rechercher le moyen de réduire la multiplicité des solutions et retenir celles d'entre elles qui sont le plus prometteuses.

## UNE NÉCESSAIRE COOPÉRATION INTERNATIONALE

Vu le soutien limité accordé par les gouvernements à la R&D et la grande diversité des modèles conceptuels, il est impératif que les 10 à 15 prochaines années, qui seront cruciales, soient consacrées à mettre au point des réacteurs nucléaires et des cycles du combustible qui réussiront commercialement. En particulier, des objectifs trop ambitieux en matière de gestion des déchets, de sûreté ou de non-prolifération risquent d'entraîner une augmentation excessive du coût de l'énergie nucléaire, réduisant sa compétitivité.

Parallèlement aux innovations techniques, il va devenir impératif de revoir et d'adapter les mécanismes commerciaux, gouvernementaux et intergouvernementaux en fonction des progrès réalisés.

Il s'agit là, si l'on veut renouveler durablement l'énergie nucléaire, de questions importantes qu'il faudrait aborder le plus rapidement possible. L'une des façons de progresser et de parvenir à un consensus sur certaines de ces questions consiste à instaurer une collaboration internationale et une coordination mondiale des activités de R&D. Une coopération internationale entre des centres de recherche nationaux, des organisations

internationales telles que l'AIEA, l'AEN et la Commission européenne, et l'industrie nucléaire peut faciliter les progrès en centralisant les ressources aux fins de l'objectif commun. Les tâches suivantes, par exemple, pourraient être menées à bien conjointement :

- Évaluation des futurs besoins en installations et rôle de l'énergie nucléaire sur différents marchés;
- Élaboration d'un ensemble de critères souhaitables de sûreté, de sécurité, de gestion des déchets, de non-prolifération et de consommation des ressources pour les nouveaux réacteurs et cycles du combustible;

- Coopération internationale aux fins du développement des concepts les plus prometteurs.

Ces tâches sont importantes si l'on veut que les pays bénéficient durablement de la technologie nucléaire comme source d'énergie.

Activités de l'AIEA. L'AIEA met depuis longtemps en œuvre des programmes visant à aider les pays dans des domaines liés au développement de l'énergie nucléaire et au cycle du combustible. Les efforts visent maintenant à améliorer la coordination des activités et à définir des objectifs communs conformément aux intérêts des États Membres de l'Agence. Le nouveau programme et budget de l'AIEA, axé sur les résultats, pourra aider à intégrer toutes ses activités dans un programme de conception de réacteurs et de cycles du combustible novateurs permettant aux pays de mieux résoudre les problèmes de développement énergétique et électronucléaire auxquels ils sont confrontés. Ce cadre permettra d'évaluer le développement, dans le monde, de réacteurs et de cycles du combustible novateurs.

Comme le mentionne la Stratégie à moyen terme de l'Agence, l'un des principaux objectifs des activités mises en

œuvre est de soutenir et de faciliter l'échange d'informations et le développement de nouvelles applications des techniques nucléaires. Cela pourra se faire en permettant et en favorisant un examen de l'avancement des techniques liées à l'énergie nucléaire et du cycle du combustible dans les domaines suivants : petits et moyens réacteurs destinés à la production d'électricité et de chaleur, y compris le dessalement de l'eau de mer; nouvelles avancées technologiques intéressant la compétitivité, la sûreté et le rendement; amélioration de la résistance à la prolifération des réacteurs et des cycles associés; et réduction de la production de déchets radioactifs. Parmi les activités envisagées, l'Agence prévoit de mettre en rapport les États Membres qui souhaitent étudier des concepts techniques analogues. Cela aiderait grandement à regrouper, aux fins du développement de réacteurs et de cycles novateurs, les ressources et les compétences.

L'énergie nucléaire se situe aujourd'hui à un carrefour, aucun consensus n'existant quant à son futur rôle. Alors qu'elle a prouvé qu'elle pouvait aider les pays à satisfaire leurs besoins énergétiques – elle présente, dans l'optique d'un développement énergétique durable, des avantages comparatifs par rapport à d'autres modes de production d'électricité –, il lui reste à convaincre davantage le public et les responsables politiques de sa contribution potentielle. Les nouvelles initiatives et mesures intégrées mises en place pour renforcer la coopération nucléaire internationale vont permettre à l'AIEA d'agir de façon plus cohérente pour mieux servir les intérêts de ses États Membres et démontrer que l'option nucléaire est un élément vital de l'avenir énergétique de la planète. □