

# Une énergie nucléaire durable

*Les outils d'évaluation élaborés par l'AIEA aident les États Membres dans la planification stratégique et la prise des décisions concernant le développement et le déploiement durables de l'énergie nucléaire.*

La planification stratégique à long terme de l'évolution des systèmes énergétiques et du rôle potentiel de l'énergie nucléaire dans ces systèmes exige une bonne connaissance de la dynamique du changement et de l'innovation technologiques. Le déploiement de l'énergie nucléaire au niveau national doit comporter un examen approfondi des infrastructures énergétiques, des préférences sociales, des orientations du développement économique et des contraintes environnementales. L'évaluation des systèmes d'énergie nucléaire (NESA) fait partie intégrante du développement électro-nucléaire national avec la planification énergétique et le développement de l'infrastructure nucléaire suivant l'approche « par étapes » de l'AIEA pour les premières centrales nucléaires. L'adoption d'un programme électro-nucléaire comporte en particulier des incidences et des obligations intergénérationnelles s'étendant bien au-delà de 100 ans.

La planification énergétique a pour but de faire en sorte que les décisions concernant la demande d'énergie et les infrastructures d'approvisionnement associent toutes les parties prenantes, prennent en considération toutes les options possibles en matière d'offre et de demande d'énergie et soient conformes aux objectifs généraux du développement durable national. Dans le cadre de la décision d'incorporer l'énergie nucléaire dans un bouquet énergétique diversifié, il faudrait choisir la technologie des réacteurs, mettre en place l'infrastructure requise pour les premières centrales et comprendre toute l'étendue des impacts et des considérations se rapportant au déploiement d'un système d'énergie nucléaire durable. Les innovations en matière de technologie nucléaire et les arrangements institutionnels qui contribuent à l'évolution globale et sont causés par elle doivent en faire partie.

Un système d'énergie nucléaire englobe toutes les étapes du cycle du combustible nucléaire, depuis l'extraction du minerai jusqu'aux stades finals pour tous les déchets ainsi que les arrangements institutionnels associés. Les systèmes d'énergie nucléaire se caractérisent par des infrastructures complexes et une longue durée de vie qui s'étend aisément sur plusieurs générations. En outre, le développement ou l'expansion de l'énergie nucléaire

exigent de longs délais et des ressources importantes, en particulier pour la conception et la commercialisation de composants nouveaux et innovants. Les systèmes d'énergie nucléaire doivent être évalués globalement, c'est-à-dire sous tous les angles possibles du développement durable, qui comporte trois piliers interdépendants et complémentaires, à savoir le développement social, le développement économique et la protection de l'environnement, tous reliés entre eux par des institutions gouvernementales efficaces.

## **Évaluation des systèmes d'énergie nucléaire à l'aide de la méthodologie INPRO**

En vue d'aider les États Membres à évaluer leur planification stratégique à long terme pour les systèmes d'énergie nucléaire existants et futurs, le Projet international de l'AIEA sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible nucléaire innovants (INPRO) a mis au point la « méthodologie INPRO » avec le concours de 300 experts internationaux, dont certains du Forum international Génération IV (GIF). L'Évaluation des systèmes d'énergie nucléaire (NESA) est une approche globale faisant appel à cet outil validé sur le plan international qu'est la méthodologie INPRO à l'appui de la planification à long terme et de la prise de décisions stratégiques sur le développement et le déploiement de l'énergie nucléaire dans les États Membres.

Une condition préalable d'une NESA réside dans une étude de planification énergétique dans le cas des nouveaux venus — ou d'une stratégie énergétique nationale dans celui des pays ayant un programme électro-nucléaire bien établi — qui définit le rôle potentiel du nucléaire dans un bouquet énergétique au niveau national tout en tenant dûment compte des tendances régionales et mondiales. Les modèles de planification énergétique de l'AIEA aident les responsables de celle-ci à effectuer de telles études. Les autorités nationales chargées de la politique énergétique ou de la planification du système d'énergie nucléaire peuvent procéder à une évaluation complète ou à une NESA exploratoire.

## L'INPRO : un partenariat de dialogue et d'innovation

Le Projet international de l'AIEA sur les réacteurs nucléaires et les cycles du combustible nucléaire innovants (INPRO) joue un rôle important dans la compréhension du développement futur des systèmes d'énergie nucléaire dans une perspective nationale, régionale et mondiale ainsi que des innovations dans les technologies et les arrangements institutionnels à l'appui de ce développement.

Établi de par la volonté des États Membres de l'AIEA d'aider à faire en sorte que l'énergie nucléaire soit accessible pour contribuer à la satisfaction des besoins énergétiques du XXI<sup>e</sup> siècle d'une manière durable, l'INPRO rassemble des détenteurs et des utilisateurs de technologies pour qu'ils examinent ensemble les mesures d'ordre international et national qui déboucheraient sur les innovations requises en matière de réacteurs nucléaires et de cycle du combustible.

L'INPRO offre un cadre de discussion et de coopération entre les experts et les décideurs des pays industrialisés et des pays en développement sur tous les aspects de la planification, du développement et du déploiement durables de l'énergie nucléaire. Il favorise un dialogue mutuellement profitable entre les pays dotés de la technologie nucléaire et les pays envisageant de recourir à cette technologie pour mettre en place de nouvelles capacités de production d'énergie nucléaire. Il propose en outre un appui aux États Membres dans les domaines de la planification stratégique et de la prise des décisions au niveau national pour le développement et le déploiement de l'énergie nucléaire, et

fait mieux connaître les options en matière d'innovations technologiques pour l'avenir.

Les États Membres de l'AIEA et les organismes internationaux reconnus peuvent devenir membres de l'INPRO à condition qu'ils contribuent au projet. Ils peuvent y contribuer en versant des fonds extrabudgétaires, en fournissant des experts à titre gracieux, en effectuant des études d'évaluation à l'aide de la méthodologie INPRO ou en participant à des projets de coopération INPRO.

Depuis la création de l'INPRO, le nombre de ses membres est passé à 31. Ces pays représentent 75 % du PIB de la planète et 65 % de sa population.

Dix autres pays qui envisagent d'y adhérer ou y participent au niveau opérationnel ont le statut d'observateur. En outre, l'INPRO collabore avec d'autres initiatives internationales, dont le Forum international Génération IV (GIF) et la Plate-forme technologique européenne pour l'énergie nucléaire durable (SNET) afin d'assurer une bonne synergie et d'éviter les doubles emplois.

Financé essentiellement par des contributions extrabudgétaires, ce projet bénéficie désormais de l'engagement pris récemment par la Fédération de Russie de fournir des ressources pendant cinq ans; cela a accru la stabilité du projet et permet de le planifier à plus long terme. Récemment, les activités de l'INPRO ont été regroupées au sein de cinq domaines d'intervention sur lesquels s'articule également le plan d'action du projet pour 2010 et 2011. Douze projets

Une NESa effectuée avec la méthodologie INPRO évalue toutes les installations nucléaires dans un système d'énergie nucléaire donné, depuis l'extraction du minerai jusqu'aux stades finals pour tous les déchets, y compris le stockage définitif des déchets de haute activité, et toutes les mesures institutionnelles connexes. Elle considère l'ensemble du cycle de vie des installations nucléaires (« du berceau à la tombe »), c'est-à-dire la conception, la construction, l'exploitation et le déclassement, et évalue un système nucléaire dans les sept domaines recensés par les concepteurs de la méthodologie, qui englobent les dimensions du développement durable: économie, infrastructure (arrangements institutionnels), gestion des déchets, résistance à la prolifération, protection physique, environnement (impact des facteurs de stress et appauvrissement des ressources), et sûreté des réacteurs et des installations du combustible nucléaire.

Les pays ayant des programmes nucléaires bien établis tout comme les « nouveaux venus » qui envisagent de se lancer dans de nouveaux programmes nucléaires peuvent effectuer une NESa pour déterminer les lacunes éventuelles dans leur programme nucléaire et les mesures à prendre pour les combler. De telles études sont destinées à être effectuées par :

- 1 Les développeurs de technologie nucléaire, pour évaluer leur stratégie de développement et de déploiement à long terme en vue de confirmer qu'elle est viable et que les installations nucléaires qu'elle prévoit sont convenablement équilibrées;
- 2 Les utilisateurs expérimentés de technologie nucléaire, pour sensibiliser davantage les principales parties prenantes et comme aide à la planification stratégique et à la prise des décisions concernant l'extension de leur système d'énergie nucléaire;
- 3 Les utilisateurs primaires potentiels de technologie, pour déterminer les questions à examiner lorsqu'ils décident de mettre en place un système d'énergie nucléaire par étapes, c'est-à-dire de développer l'infrastructure nucléaire nécessaire et de construire une première centrale nucléaire.

### Évaluations nationales

Plusieurs pays ont effectué récemment une série de NESa nationales : Argentine, Arménie, Brésil, Inde, République de Corée et Ukraine. Par ailleurs, huit pays, à savoir le Canada, la Chine, la Fédération de Russie, la France,

de coopération appuient les activités avec la participation active des membres de l'INPRO.

## Domaines d'intervention de l'INPRO

### Évaluations des systèmes d'énergie nucléaire (NESA) à l'aide de la méthodologie INPRO

L'INPRO a franchi récemment une nouvelle étape avec la mise au point et l'application de la méthodologie INPRO qui peut aider les pays à évaluer globalement les systèmes d'énergie nucléaire existants et futurs à l'appui de la planification stratégique à long terme et de la prise des décisions. Après une première série d'études qui ont donné de bons résultats, huit autres pays ont déclaré souhaiter évaluer des systèmes d'énergie nucléaire existants ou futurs afin de déterminer s'ils satisfont aux critères nationaux de développement durable.

### Vision globale sur une énergie nucléaire durable

En définissant des scénarios potentiels et en harmonisant les visions pour le développement et le déploiement mondiaux à long terme du nucléaire, l'INPRO aide aussi bien les nouveaux venus que les pays nucléaires bien établis à comprendre les possibilités offertes par les innovations techniques et les nouvelles approches institutionnelles et juridiques pour le développement et le renforcement d'une « architecture nucléaire » durable au XXI<sup>e</sup> siècle, y compris les scénarios de transition possibles.

### Promotion d'innovations en matière de technologie nucléaire

La promotion de la collaboration entre les membres de l'INPRO sur certaines technologies nucléaires innovantes et la R-D connexe, qui contribuent à une

énergie nucléaire durable, constituent les principales activités menées dans ce domaine.

### Promotion d'innovations en matière d'arrangements institutionnels

Outre l'ensemble des étapes du cycle du combustible nucléaire, les arrangements institutionnels font également partie du système d'énergie nucléaire. Parmi ces arrangements figurent les accords, les traités, les cadres ou les régimes juridiques nationaux et internationaux et les conventions. Le déploiement de nouveaux modèles de réacteurs peut exiger des approches innovantes des mesures institutionnelles, en particulier pour les réacteurs mobiles et les réacteurs de faible ou moyenne puissance. L'INPRO favorise la collaboration dans ce domaine et aide les pays à concevoir et à appliquer des arrangements innovants.

### Le forum de dialogue de l'INPRO

Ce domaine transversal vise à favoriser l'échange d'informations entre les détenteurs et les utilisateurs de technologie nucléaire afin de veiller à ce que les innovations techniques et institutionnelles futures répondent aux attentes des uns et des autres.

*Les membres de l'INPRO sont l'Afrique du Sud, l'Algérie, l'Allemagne, l'Argentine, l'Arménie, le Bélarus, la Belgique, le Brésil, la Bulgarie, le Canada, le Chili, la Chine, l'Espagne, les États-Unis d'Amérique, la Fédération de Russie, la France, l'Inde, l'Indonésie, l'Italie, le Japon, le Kazakhstan, le Maroc, le Pakistan, les Pays-Bas, la République de Corée, la République tchèque, la Slovaquie, la Suisse, la Turquie, l'Ukraine et la Commission européenne.*

[www.iaea.org/INPRO](http://www.iaea.org/INPRO)

l'Inde, le Japon, la République de Corée et l'Ukraine, ont étudié conjointement un système d'énergie nucléaire faisant appel à des réacteurs à neutrons rapides refroidis par sodium avec cycle du combustible fermé (voir l'encadré « Cycle du combustible fermé avec réacteurs à neutrons rapides »).

Les NESA nationales ont été effectuées par des pays tant utilisateurs que développeurs de technologie et à différentes échelles d'évaluation. L'Argentine et l'Ukraine ont évalué la viabilité des systèmes nationaux d'énergie nucléaire qu'elles prévoyaient en évaluant toutes les installations du cycle du combustible nucléaire. Le Brésil, l'Inde et la République de Corée ont évalué des modèles de réacteurs déterminés et les cycles du combustible associés dans certains domaines de la méthodologie INPRO. L'équipe brésilienne a choisi le modèle de réacteur IRIS et l'a évalué dans les domaines de la sûreté et de l'économie. Elle a en outre évalué la viabilité du modèle de réacteur à lit fixe (RLF) pour ce qui est de sa sûreté et de sa résistance à la prolifération. L'étude indienne a porté sur le remplacement des combustibles fossiles par l'hydrogène dans le secteur des transports. L'étude coréenne avait pour principal objectif d'analyser quantitativement le degré de résistance à la prolifération du cycle du combustible DUPIC, qui

consiste à transformer du combustible utilisé de REP en un nouveau combustible pour réacteurs CANDU. L'Arménie a effectué une NESA en vue principalement de familiariser les décideurs nationaux avec toutes les questions liées au programme électronucléaire prévu, qui vise à remplacer le réacteur existant par une grande tranche nucléaire vers 2025.

L'étude conjointe a exploré plusieurs scénarios possibles en modélisant comment différentes technologies nucléaires pourraient contribuer à étendre le rôle de l'énergie nucléaire ainsi que les différents types de problèmes et d'approches à prendre en considération le cas échéant pour passer aisément à un cycle du combustible nucléaire fermé avec réacteurs à neutrons rapides.

## La méthodologie INPRO

La méthodologie INPRO s'articule autour d'une hiérarchie à trois niveaux – principes fondamentaux, exigences des utilisateurs et critères – comportant des indicateurs et des limites d'acceptation. Ces éléments sont utilisés dans les sept domaines d'évaluation de l'INPRO. Un système d'énergie nucléaire évalué représente une

## Cycle du combustible fermé avec réacteurs à neutrons rapides

Pendant deux ans, huit pays ont joint leurs forces pour évaluer un système d'énergie nucléaire fondé sur un cycle du combustible fermé avec réacteurs à neutrons rapides (CNFC-FR) à l'aide de la méthodologie INPRO. Cette « étude conjointe » avait pour objet de déterminer si ce cycle du combustible satisferait aux critères de développement durable, de définir les étapes de son déploiement et d'établir dans quels domaines des études de R-D devraient être menées à l'avenir. Ces pays étaient le Canada, la Chine, la Fédération de Russie, la France, l'Inde, le Japon, la République de Corée et l'Ukraine. Un système CNFC-FR à court terme faisant appel à des technologies éprouvées, comme le refroidissement au sodium, le combustible à pastilles MOX et la technologie du retraitement aqueux, a servi de système de référence.

Une observation générale qui a été faite est qu'un avenir optimisé pour le déploiement de l'énergie nucléaire n'est peut-être pas entièrement conforme aux plans nationaux actuels. Dans la perspective de faire du système CNFC-FR une solution viable pour le remplacement des sources d'énergie classiques, l'étude conjointe a recensé un certain nombre de points faibles auxquels il faut remédier dans les approches nationales actuelles. Il s'agit en particulier de l'économie et de la sûreté, domaines dans lesquels de nouvelles recherches sont nécessaires afin d'abaisser le niveau de risque d'accident grave.

La conception des systèmes d'énergie nucléaire CNFC-FR en exploitation actuellement ne répond peut-être pas aux exigences de la compétitivité économique. Une simplification de la conception, un accroissement du taux de combustion et une réduction des coûts grâce à des travaux de R-D ciblés et à des constructions en petites séries pourraient rendre le coût des centrales nucléaires équipées de réacteurs à neutrons rapides comparable à celui des centrales dotées de réacteurs à neutrons thermiques et des centrales à combustibles fossiles.

Dans certains pays, l'adoption de réacteurs à neutrons rapides pourrait contribuer à une utilisation efficace des ressources en combustible nucléaire grâce à un recours accru à des combustibles au plutonium et à uranium

dénaturé, produits au besoin dans la couverture des réacteurs à neutrons rapides.

Grâce à l'élaboration et à l'introduction de technologies nouvelles pour une gestion optimale des produits de fission nucléaire et des actinides mineurs, le système CNFC-FR offrirait la possibilité de réaliser une « percée » dans la satisfaction de tous les besoins actuels en matière de gestion des déchets.

En raison des caractéristiques technologiques du système CNFC-FR, sa résistance à la prolifération pourrait être comparable voire supérieure à celle du cycle du combustible à passage unique. Le système CNFC-FR est une technologie clé pour une utilisation équilibrée des matières fissiles.

Un système CNFC-FR exige une approche régionale ou multilatérale des services des parties initiale et terminale du cycle du combustible et un passage à une architecture nucléaire globale.

Une approche interdisciplinaire et des collaborations internationales chaque fois que cela est possible ayant été préconisées dans les conclusions de l'étude conjointe, plusieurs projets de coopération INPRO consacrés aux questions suivantes ont été lancés pour y donner suite :

- Architecture globale des systèmes d'énergie nucléaire fondés sur les réacteurs à neutrons thermiques et rapides avec cycle du combustible fermé (projet GAINS) ;
- Approche intégrée de la conception du système d'évacuation de la chaleur résiduelle de manière sûre dans le cas du réacteur refroidi par métal liquide (projet DHR) ;
- Évaluation de cycles avancés et innovants du cycle du combustible nucléaire dans des systèmes d'énergie nucléaire à grande échelle fondés sur le concept du CNFC en vue de satisfaire au principe de la durabilité au XXI<sup>e</sup> siècle (projet FINITE) ; et
- Recherches sur les enjeux technologiques liés à l'évacuation de la chaleur par les caloporteurs à métaux liquides et sels fondus du cœur des réacteurs à haute température (projet COOL).

source d'énergie conforme aux critères de développement durable d'un pays s'il est satisfait à l'ensemble des principes, des exigences et des critères. Si l'évaluation met une lacune en évidence, il faudrait entreprendre de nouvelles études de R-D.

S'il n'est pas satisfait à tous les éléments, un système d'énergie nucléaire donné pourra néanmoins apporter provisoirement une contribution importante à la satisfaction des besoins énergétiques d'un pays ou d'une région, mais devra changer et évoluer pour devenir viable à long terme. Les résultats d'une NESAs peuvent servir à orienter cette évolution. 

Une publication de l'AIEA intitulée « Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems: INPRO Manual — Overview of the Methodology » (TECDOC 1575 Rev.1) indique comment procéder à une NESAs à l'aide de la méthodologie INPRO.

*Yuri Sokolov est Directeur général adjoint de l'AIEA chargé du Département de l'énergie nucléaire et responsable du projet INPRO. Adresse électronique : Y.Sokolov@iaea.org.*

*Randy Beatty est le chef du Groupe INPRO à l'AIEA. Adresse électronique : R.Beatty@iaea.org.*