

# La recherche en sûreté nucléaire et en radioprotection : un moteur pour l'amélioration de la protection contre les risques

Research in the field of nuclear safety and radiation protection: a driving force behind improved risk protection

par **Olivier Gupta**, sous-directeur "Réacteurs de puissance", et **Michel Bourguignon**, directeur général adjoint – Direction générale de la sûreté nucléaire et de la radioprotection.

Le dictionnaire définit la recherche scientifique comme "l'ensemble des travaux et des activités intellectuelles qui tendent à la découverte de connaissances et de lois nouvelles". Pour ce faire, le chercheur adopte une démarche cartésienne d'interrogation permanente, qui contribue à repousser les limites des connaissances acquises et peut remettre en question des résultats établis antérieurement. En ce sens, on peut rapprocher la recherche et la culture de sûreté qui exige elle aussi un effort permanent d'amélioration et une capacité d'interrogation et de remise en question.

Au-delà de cette analogie, la recherche fondamentale et appliquée est l'une des clés du progrès de la sûreté nucléaire et de la radioprotection, et cela à plusieurs titres :

- le développement et la validation de solutions techniques innovantes permettent l'émergence de produits ou procédés d'exploitation nouveaux et leur utilisation en substitution de techniques ou modes d'intervention offrant un degré de protection moindre ;
- certains travaux de recherche visent à mieux connaître les risques, ce qui permet de mieux orienter les mesures de protection, voire de mettre en lumière des risques jusque-là mal évalués : expériences sur le phénomène de colmatage des puisards des réacteurs à eau sous pression ; études de fiabilité humaine permettant de mieux quantifier le rôle des facteurs humains ; recherche sur les effets des rayonnements, notamment aux faibles doses ;
- enfin, la recherche permet de développer des compétences pointues dans le domaine de la sûreté nucléaire et de la radioprotection, contribuant ainsi à l'entretien d'un vivier de spécialistes.

## Qu'est-ce que la recherche en sûreté nucléaire et en radioprotection ?

Le contour exact de la recherche en sûreté nucléaire et radioprotection est difficile à définir pour deux raisons. D'une part, il n'y a pas vraiment de frontière entre la recherche et les études ou l'expertise. D'autre part, il est difficile de discriminer, parmi l'ensemble des travaux de recherche sur l'énergie nucléaire ou sur les applications médicales des rayonnements ionisants, ceux qui sont consacrés spécifiquement à la sûreté nucléaire ou à la radioprotection ; c'est aussi en cherchant à développer un nouveau produit ou à améliorer les performances de produits existants que l'on approfondit les connaissances en sûreté et que l'on fait progresser le niveau de protection.

## Les acteurs

Il faut distinguer plusieurs types d'acteurs, certains pouvant intervenir à différents niveaux.

## Executive Summary

Research highly contributes to the improvement of nuclear safety and radiation protection, since it generates safer solutions for design and operation, enables to better evaluate risks, and maintains high level competencies. Research is also a means to improve the soundness of the regulatory decisions. Thus, the French Nuclear Safety Authority (ASN) keeps informed of the content of the research programs, and gives its opinion on them. Furthermore, it is necessary that IRSN, as technical support of ASN, keeps on leading research programs focused on regulatory needs. ASN thinks that industry also has a responsibility to lead and finance research in the field of nuclear safety and radiation protection; ASN is satisfied to see that the amount of money currently invested by industry to meet this aim stays high. Finally, research on human factors should be reinforced in the field of nuclear safety, and research on the effect of low doses should be continued to strengthen radiation protection.

- Ceux qui financent la recherche : d'abord les exploitants, compris comme l'ensemble des responsables d'activités nucléaires, y compris dans le domaine médical (art.L.1333-1 et D.665-5-1 du code de santé publique), ensuite ceux que nous appellerons ici "les industriels", c'est-à-dire les concepteurs ou fabricants de dispositifs médicaux, industriels ou de recherche utilisant des rayonnements ionisants ainsi que les concepteurs ou fabricants d'installations nucléaires de base, et enfin les États, l'Union européenne...

- Ceux qui font la recherche : organismes de recherche de statut public ou privé, en France ou à l'étranger, universités, hôpitaux, industriels, exploitants, organismes de contrôle du nucléaire...

- Ceux qui utilisent la recherche : les industriels pour proposer des produits nouveaux (nouveaux appareils d'imagerie médicale, nouveaux radiopharmaceutiques ou, dans un tout autre domaine, nouveaux réacteurs nucléaires), les exploitants qui les mettent en œuvre, et les organismes de contrôle du nucléaire qui tiennent compte des résultats de la recherche pour rendre leurs avis ou prendre leurs décisions.

Bien entendu, la capacité à financer ou à conduire des activités de recherche dépend des moyens financiers et humains de l'organisme considéré. Il est nécessaire pour mener des recherches de disposer d'une "masse critique" de compétences pointues dans un domaine donné.

### La responsabilité des exploitants

Il importe que les exploitants contribuent significativement à l'effort de recherche en sûreté nucléaire et en radioprotection, et en utilisent les résultats : il est en effet de leur responsabilité de poursuivre un objectif d'augmentation continue du niveau de sûreté de leurs installations, et d'être à même de proposer des améliorations en ce sens.

L'ASN suit attentivement l'évolution de l'effort financier consacré par les exploitants à la recherche : en effet, dans un contexte concurrentiel, les exploitants peuvent avoir la tentation de diminuer les dépenses dans des domaines où leur réduction n'a pas d'effet à court terme, comme la recherche.

Dans le domaine des réacteurs à eau sous pression, l'ASN a ainsi demandé à EDF de lui communiquer annuellement les budgets et effectifs



Laboratoire IRSN travaillant sur les risques chroniques

alloués à la recherche en sûreté nucléaire et en radioprotection, de manière à pouvoir en examiner les évolutions. L'ASN constate aujourd'hui que le budget consacré par EDF à ce domaine reste à un niveau élevé, même s'il accuse une légère diminution depuis quelques années. Elle observe également avec satisfaction que la recherche dans ce domaine reste alimentée par plusieurs moteurs :

- les projets de réacteurs du futur : le projet EPR a ainsi donné lieu à des travaux de recherche et au développement de solutions techniques nouvelles, dont certaines pourront être mises en œuvre sur les réacteurs existants lors des réexamens décennaux de sûreté ;

- la volonté des industriels d'améliorer les performances de leurs outils : à titre d'exemple, le souhait d'EDF d'augmenter les performances des combustibles nucléaires a notamment généré des travaux sur les matériaux de gainage et les codes de calcul. Ces travaux permettent aussi d'approfondir les connaissances et dans certains cas de faire progresser la sûreté, par exemple en faisant apparaître des points faibles dans des méthodes utilisées jusqu'alors ;

- la question de la durée de vie des réacteurs ; le souhait d'EDF de poursuivre l'exploitation des

centrales existantes est à l'origine de recherches sur le vieillissement des matériaux, notamment le comportement des enceintes en bétons ou les propriétés des aciers sous irradiation ;

- la prise en compte du retour d'expérience des incidents ; on peut citer à ce titre les recherches relatives au risque d'inondations ou à la modélisation de la dérive des nappes de pétrole.

En matière de radioprotection, les recherches menées par les exploitants et les industriels sont susceptibles d'apporter de nouveaux progrès et on peut déjà noter des contributions efficaces dans de nombreux domaines, par exemple :

- en dosimétrie, les dosimètres électroniques couvrent une gamme d'énergie plus grande, en particulier vers les basses énergies où cela était indispensable pour les applications médicales ; on note aussi des progrès substantiels dans la dosimétrie des neutrons et dans la mise au point de nouveaux détecteurs thermoluminescents, par exemple sous la forme de fils implantables ;

- dans le domaine des équipements de protection, des progrès importants sont accomplis au poste de travail en ce qui concerne les hottes, les ventilations, les capteurs... ;

- en ce qui concerne les matériels médicaux, on peut citer les applications suivantes : les dispositifs de type chambre d'ionisation permettent une mesure directe du rayonnement émis par les sources de rayons X utilisées en radiologie ; les dispositifs de scopie pulsée permettent de réduire le temps d'exposition réel des patients lors des actes de radiologie interventionnelle ; la radiothérapie externe, dite conformationnelle, guidée par l'image scanographique de la tumeur en permet une irradiation plus précise et permet surtout de mieux préserver les tissus sains.

### Les missions de l'ASN

Le décret du 22 février 2002, qui crée la DGSNR, lui confère notamment pour mission d'assurer une veille sur les travaux de recherche et développement portant sur la sûreté nucléaire et la radioprotection. De plus, son rôle d'Autorité de sûreté l'amène naturellement à demander aux exploitants d'engager de tels travaux, et à en examiner les résultats en tant qu'éléments des démonstrations de sûreté ; en cela, l'ASN contribue à orienter la recherche. Par contre, le pilo-

tage des travaux ne fait pas partie de ses missions, même si pour des raisons historiques, elle en dirige quelques-uns dans le domaine de la métallurgie et des équipements sous pression.

A titre d'illustration, les exigences réglementaires imposées dans les décrets d'autorisation des usines de La Hague ont conduit COGEMA à faire des recherches pour améliorer les techniques de traitement et de conditionnement des déchets, et en réduire le volume. Le nouvel arrêté d'autorisation de rejets de La Hague, paru en 2003, demande également à COGEMA de réaliser sous trois ans des études technico-économiques pour réduire les rejets radioactifs et chimiques, ainsi qu'une analyse de la dispersion des produits radioactifs dans l'environnement : ces demandes nécessitent des recherches pour optimiser les procédés de traitement et, au final, améliorer encore la protection de l'environnement.

Les actions menées dans les domaines de la sûreté nucléaire et de la radioprotection pour prévenir les accidents et limiter les nuisances ont permis de réduire les risques, mais pas d'atteindre le risque zéro ni l'impact zéro, qu'il s'agisse des doses reçues par les travailleurs des domaines médical ou industriel, ou de celles associées aux rejets des INB. Les nombreuses incertitudes et inconnues qui persistent conduisent l'ASN à rester attentive aux résultats des travaux scientifiques, en cours en particulier en radiobiologie et radiopathologie.

### La recherche améliore l'efficacité de l'action des organismes de contrôle

Le fait de connaître les derniers résultats des recherches et de savoir quelles sont les questions qui restent encore sans réponse permet aux organismes de contrôle de savoir jusqu'où, au plan technique, il est possible de pousser un exploitant à mettre en œuvre des améliorations de sûreté ou de radioprotection. Ainsi, le fait que l'ASN suive les travaux de recherche doit contribuer à augmenter la pertinence de son action de contrôle.

Par ailleurs, le fait que l'ASN ou ses appuis techniques suivent ou pilotent des travaux de recherche leur permet d'accéder à des connaissances pointues indépendamment des exploitants. Cette question de l'indépendance est d'ailleurs une problématique à laquelle il convient de porter attention : si les exploitants et les organismes de sûreté coopèrent pour finan-

cer des recherches, ils en partagent les coûts et évitent les doublons. À l'inverse, ils peuvent être soupçonnés de collusion. Dans le cas de travaux expérimentaux, une bonne ligne de conduite peut être de faire en commun les expériences, qui sont en général coûteuses, et d'en interpréter indépendamment les résultats.

En outre, le fait qu'un organisme pilote des travaux de recherche contribue à garantir le haut niveau de compétence technique de ses agents et, compte tenu du caractère international des travaux de recherche, son ouverture vers l'extérieur.

Enfin, la capacité des organismes de contrôle, ou des experts sur lesquels ils s'appuient, à initier des recherches leur permet aussi parfois de mettre le doigt sur des questions de sûreté que l'on croyait à tort résolues : c'est ainsi l'interprétation d'expériences menées par l'IRSN qui a permis de redécouvrir le risque de colmatage des puisards des réacteurs nucléaires.

L'ASN attend ainsi que l'IRSN, son principal appui technique, continue de mener des travaux de recherche adaptés aux besoins du contrôle de la sûreté nucléaire et de la radioprotection, tels que ceux qui visent à mieux évaluer les risques ou à mieux asseoir les travaux d'expertise, afin de contribuer au final à la solidité technique des positions qu'elle prend. Cela n'exclut pas que l'IRSN puisse par ailleurs mener d'autres travaux de recherche, avec d'autres finalités.

### **Le point de vue de l'ASN**

Au titre de sa mission de veille, l'ASN a établi en 2003, dans le domaine des réacteurs à eau sous pression, un premier état des lieux des actions de recherche en sûreté nucléaire et en radioprotection menées en France. Elle constate que le financement des travaux est assuré au deux tiers environ par les industriels (EDF et AREVA pour l'essentiel), le tiers restant provenant de l'État, par l'intermédiaire du CEA ou de l'IRSN, et que les montants financiers en jeu sont importants. Une part significative de cet effort porte sur les accidents graves, c'est-à-dire avec fusion du cœur, et les moyens d'en limiter les conséquences. À l'inverse, les thématiques liées aux facteurs humains et organisationnels sont moins bien dotées, et pourraient être renforcées compte tenu que ce domaine reste un contributeur important aux incidents.

Dans le domaine de la radioprotection, l'ASN souhaite que des travaux de recherche soient poursuivis dans les domaines où les incertitudes demeurent : domaine des faibles doses de rayonnements ionisants et en particulier la relation dose-effet à ce niveau d'exposition aux rayonnements ionisants, effets sanitaires résultant de la contamination chronique de l'environnement (comme celle qui existe dans les régions proches de Tchernobyl), effets génétiques et épigénétiques des rayonnements ionisants... Il convient également qu'en dehors des recherches fondamentales, des recherches appliquées soient menées dans tous les domaines qui concourent à l'amélioration de la radioprotection des travailleurs, du public et des patients.

Enfin, dans un contexte où les budgets des exploitants et des pouvoirs publics en matière de recherche doivent être utilisés au mieux, l'ASN souligne l'intérêt d'une bonne coordination entre les organismes impliqués dans la recherche, de façon à éviter les doublons inutiles en identifiant les travaux susceptibles d'être menés en commun. Le fait que chaque organisme ait connaissance des thématiques de recherche des autres peut faciliter cette coordination. Les collaborations internationales sont aussi un moyen incontournable pour partager les coûts et les savoirs. ■

# La recherche en radiobiologie : le futur de la radioprotection vis-à-vis des faibles doses de rayonnements ionisants

Research in radiation biology: the future of radiation protection regarding the low doses of ionizing radiations

par Michel Bourguignon, directeur général adjoint – Direction générale de la sûreté nucléaire et de la radioprotection.

Que sera demain la radioprotection vis-à-vis des faibles doses de rayonnements ionisants ?

En matière de prédiction scientifique, Denys Gabor, prix Nobel de physique en 1971 pour l'invention de l'holographie, a proposé la piste suivante : "L'Homme ne peut prédire l'avenir, mais il peut l'inventer". C'est une pensée lumineuse, d'une grande simplicité : les découvertes de demain sont en germe dans la recherche d'aujourd'hui. Il ne reste qu'à savoir lire dans les travaux de recherche en cours ! Quels travaux ? Dans quels domaines ?

## La radioprotection aujourd'hui

Avant de tenter de se projeter dans l'avenir, il convient d'abord de faire le bilan de la situation actuelle.

Le risque des expositions aux rayonnements ionisants fait l'objet d'un consensus international. Il est actuellement basé sur les travaux scientifiques approfondis du Comité scientifique des Nations unies sur les effets des radiations atomiques (UNSCEAR) et sur leur interprétation par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR).

L'évaluation des risques sanitaires provoqués par les expositions aux rayonnements ionisants résulte de l'analyse des résultats des expérimentations animales, des irradiations thérapeutiques, des observations effectuées chez les travailleurs exposés professionnellement, des analyses postaccidentelles, et enfin des études épidémiologiques, et en particulier celles de la cohorte des survivants des bombardements de Hiroshima et Nagasaki. Le risque à forte dose et fort débit de dose est quantifié comme proportionnel à la dose reçue dans 3 domaines :

- le risque tératogène (risque de malformation fœtale) est évalué à 50 % par sievert de dose efficace;
- le risque de cancer mortel en excès est évalué à 5 % par sievert de dose efficace ;
- le risque de maladie héréditaire est évalué à 0,5 % par sievert de dose efficace.

L'extension de la relation dose-effet linéaire au domaine des faibles doses et sans seuil d'apparition a été retenue pour la gestion du risque radiologique.

Face à ce consensus international, deux tendances opposées s'expriment : pour certains, le risque d'exposition est plus faible, voire inexistant, aux faibles doses, alors que d'autres estiment que le risque est plus élevé. De nombreux travaux cherchent à conforter l'une et l'autre des 2 positions.

## Le risque surestimé

Des observations conduisent à penser que le risque réel résultant d'expositions aux rayonnements ionisants est plus faible que celui donné par la relation dose-effet linéaire sans seuil :

## Executive Summary

The risk of exposure to ionizing radiations has been evaluated by the International Commission of Radiological Protection on the basis of the results of animal experiments, therapeutic and accidental irradiations, and epidemiologic studies in workers and survivors of Hiroshima and Nagasaki bombing. Aside from this international consensus, there are numerous arguments in favor of the underestimation of the risk and other observations in favor of the overestimation of the risk. Indeed, research in the field of radiation biology will produce the knowledge necessary to build up the future of radiation protection regarding low doses of radiations. The fruitful domains of research concern DNA repair, genes of susceptibility to radiations, bystander effects and genomic instability and the mechanisms of radio-induced carcinogenesis.

- les études épidémiologiques qui ont conduit à l'évaluation du risque ne montrent d'effet significatifs qu'au-delà d'une dose efficace de l'ordre de 100 millisievert. L'évaluation du risque à des niveaux de dose inférieurs résulte de l'application du principe de précaution qui a conduit à extrapoler aux faibles doses et faibles débits de doses les observations effectuées à fortes doses et fort débit de dose ;
- les études épidémiologiques concernant d'une part les expositions naturelles aux rayonnements ionisants dans les régions où l'exposition naturelle est la plus élevée, et d'autre part les expositions des travailleurs de l'industrie nucléaire sont globalement négatives. Aucun effet concernant les faibles doses de rayonnements ionisants n'est observé ;
- de nombreux travaux indiquent l'existence d'un mécanisme de réponse adaptative aux rayonnements ionisants (essentiellement aux rayonnements  $\gamma$ ), des petites doses ayant un effet d'accoutumance vis-à-vis de l'exposition ultérieure à des doses plus fortes ;
- le modèle général de la cancérisation comporte trois grandes étapes successives - l'induction, la promotion et la progression - qui ne sont à l'évidence pas en faveur d'un modèle de risque linéaire.

### Le risque sous-estimé

D'autres études plaident en faveur d'une sous-estimation du risque par le modèle linéaire sans seuil :

- l'effet **bystander** est un effet de voisinage dans lequel des cellules irradiées signalent leur détresse à leurs voisines non irradiées, par contact direct ou par des molécules sécrétées dans le milieu, et y induisent des lésions génotoxiques. Des lésions génotoxiques sont également observées dans des cellules dont le cytoplasme seul a été irradié par des particules  $\alpha$  ;
- l'instabilité génomique est un phénomène d'amplification des lésions de l'ADN dans la descendance de cellules irradiées. Lorsqu'une cellule survit à une irradiation, les mutations qui correspondent à des lésions réparées dans les heures suivantes sont censées être fixes et transmises aux générations de cellules descendantes. En fait, cela n'est pas le cas, et de nouvelles lésions de l'ADN peuvent être observées dans la descendance. Les mécanismes de l'instabilité génomique ne sont pas encore élucidés, mais on connaît déjà la responsabilité de télomères (extrémités des chromosomes) qui n'exercent plus leur fonction d'horloge mito-

tique (le raccourcissement des chromosomes à chaque division cellulaire en constitue un mécanisme de contrôle) et n'empêchent plus la fusion de chromosomes entre eux.

Les nombreux travaux concernant l'effet bystander et l'instabilité génomique, pas plus que ceux concernant la réponse adaptative, ne sont suffisamment avancés pour permettre une réévaluation quantitative du risque lié aux rayonnements ionisants, et en particulier aux faibles doses. Ils indiquent cependant la complexité des mécanismes cellulaires dont nous n'avons encore qu'une faible connaissance et invitent à accueillir avec modestie les résultats des nouvelles recherches.

Ces travaux indiquent aussi que c'est du côté des mécanismes cellulaires et moléculaires, et de leur réponse sous l'effet des rayonnements ionisants, que vont probablement se trouver les réponses qui vont orienter la radioprotection demain.

### La radioprotection demain

Quelques pistes de recherche dans le domaine de la radiobiologie semblent se dégager aujourd'hui. Elles concernent la réparation de l'ADN, les gènes de sensibilité aux rayonnements ionisants, les effets non ciblés et retardés et les mécanismes de la cancérogenèse radio-induite ; les connaissances sont apportées par les nouvelles méthodes d'investigation des mécanismes cellulaires et moléculaires.

### La réparation de l'ADN

On sait depuis de nombreuses années que les effets cellulaires des rayonnements ionisants résultent en grande partie de lésions ciblées de l'ADN. Le mécanisme lésionnel passe par la création de radicaux libres formés lors de la cassure des molécules, et en particulier de la molécule d'eau, sous l'effet des rayonnements. Les radicaux libres sont des espèces chimiques extrêmement réactives qui sont impliquées, en une fraction de seconde, dans des réactions chimiques variées avec les molécules de leur entourage, et parmi celles-ci l'ADN. L'ADN peut être transformé ou même cassé.

Ces radicaux libres radio-induits ne sont pas différents d'autres radicaux libres formés naturellement lors du métabolisme cellulaire ou sous

l'effet d'autres agents génotoxiques. En revanche, la répartition des radicaux libres formés sous l'effet des rayonnements ionisants peut être localement très importante dans la cellule selon la nature du rayonnement ou selon le débit de dose. Une forte densité de radicaux libres peut conduire à la rupture simultanée des 2 brins de l'ADN, qui constitue à l'évidence la lésion la plus grave.

Une nouvelle méthode d'investigation (Rothkamm, 2003) permet de mettre en évidence et de quantifier les lésions des 2 brins de l'ADN avec une sensibilité 100 fois plus forte que les méthodes précédentes. Elle prend en compte l'observation de la phosphorylation<sup>1</sup> de l'histone<sup>2</sup> H2AX au niveau des nouveaux sites de lésions doubles brins de l'ADN qui sont mis en évidence par un anticorps fluorescent spécifique. Le nombre des lésions doubles brins formées dans des fibroblastes<sup>3</sup> humains primaires exposés aux rayons X à faibles doses croît linéairement avec la dose de 1 mGy à 100 Gy. Pour une irradiation aiguë de 1 mGy, 3 % des cellules présentent des lésions double brins qui ne sont pas réparées pendant plusieurs jours.

Quoi qu'il en soit, les cellules ont développé au cours de l'évolution de la vie des mécanismes réparateurs de l'ADN. Ces mécanismes font l'objet d'études rigoureuses tant chez l'homme que dans d'autres espèces animales ou végétales, et même dans les organismes inférieurs. Ces études démontrent que les machineries réparatrices de l'ADN qui impliquent de nombreuses enzymes ont une relative universalité de principe.

Il peut s'agir d'une réparation en une seule étape, la lésion chimique sur un des brins de l'ADN étant réparée selon l'information complémentaire fournie par l'autre brin de l'ADN. En cas de cassure des 2 brins de l'ADN, des mécanismes plus sophistiqués de recombinaison existent ; la réparation peut ne pas être parfaite et on parle alors de réparation fautive.

Une méthodologie très fructueuse d'exploration d'un défaut de réparation de l'ADN est celle du gène knock-out. Cela consiste à fabriquer un clone cellulaire dans lequel le gène codant pour une enzyme impliquée dans la réparation de l'ADN a été détruit ou est empêché de s'exprimer (il est knock-out). On peut alors étudier le comportement cellulaire dans différentes situations

et en particulier sous l'effet des rayonnements ionisants.

### Les gènes de sensibilité aux rayonnements

De très nombreuses maladies génétiques se manifestent par une hypersensibilité aux rayonnements ionisants qui vient s'ajouter à un tableau pathologique particulier. Parmi les dizaines de maladies décrites, les plus connues sont l'ataxie télangiectasie<sup>4</sup>, la maladie de Fanconi<sup>5</sup> ou le rétinoblastome<sup>6</sup>. Ces maladies résultent d'un état homozygote de déficit génétique (les 2 gènes provenant du chromosome du père et de celui de la mère sont touchés).

Par ailleurs, un certain nombre de patients traités par radiothérapie pour un cancer présentent une hypersensibilité et de sérieuses complications en cours de traitement ; en revanche, d'autres patients semblent moins sensibles aux rayonnements, et pourraient bénéficier de doses plus élevées susceptibles de mieux assurer la disparition de leur tumeur cancéreuse. La sensibilité individuelle aux rayonnements ionisants devient ainsi une question critique pour les radiothérapeutes, au point qu'ils testent actuellement de nombreuses méthodes de mesure a priori de cette sensibilité individuelle, en espérant pouvoir à terme en faire bénéficier chacun de leurs patients.

Quel est le profil génétique de ces patients dont la sensibilité individuelle aux rayonnements ionisants est élevée ? Peut-il s'agir de personnes hétérozygotes pour les gènes sus cités (un seul des 2 gènes provenant des parents est atteint) ? Quelle est la proportion de ces personnes dans la population générale ? Autant de questions qui suscitent actuellement de nombreuses recherches.

#### Les puces à ADN

Parmi les méthodes qui permettent l'exploration du fonctionnement des gènes, on peut citer les puces à ADN. Elles permettent de mesurer le niveau d'expression des gènes dont les séquences d'ADN ont été déposées sur des lames de verre ; ces séquences jouent le rôle de sondes génétiques qui peuvent capturer de façon spécifique les fragments d'ADN complémentaires contenus dans un échantillon biologique à tester. On peut imaginer que soient développées bientôt des puces permettant d'analyser en une seule étape l'ensemble du génome humain (environ 30 000 gènes).

Par ailleurs, il existe des états de prédisposition génétique au cancer avec une hypersensibilité aux rayonnements ionisants et un risque plus élevé de second cancer induit par les rayonnements, ce second cancer apparaissant par exemple dans le champ d'irradiation du premier.

### Les effets non ciblés et les effets retardés

Le dogme selon lequel l'énergie des rayonnements ionisants doit être déposée dans le noyau de la cellule pour atteindre l'ADN et générer un effet ciblé ne peut plus être retenu aujourd'hui. L'effet bystander déjà cité constitue un effet non ciblé dont on est encore loin d'avoir compris toutes les composantes.

Par ailleurs, l'instabilité génomique citée ci-dessus, qui a été observée in vitro comme in vivo, constitue un domaine d'investigation prioritaire car les anomalies observées se retrouvent au fil des générations cellulaires et affectent des chromosomes différents.

La survie de cellules dont la machinerie génétique est instable et dont le devenir est incertain (possible cancérisation) conduit à prioriser les études qui concernent les mécanismes de signalisations cellulaires, et en particulier ceux qui contrôlent le cycle de la division cellulaire. Pourquoi ces cellules échappent-elles à l'apoptose, mécanisme puissant de suicide cellulaire programmé qui normalement met fin à la vie de cellules devenues anormales ?

### Les mécanismes de la cancérogenèse radio-induite

Les mécanismes de la cancérogenèse radio-induite ne sont pas encore bien connus ; ils font l'objet de travaux de recherche importants.

Comme pour tous les cancers, la prolifération anarchique des cellules résulte de l'accumulation de mutations de gènes au sein d'une même cellule, et en particulier d'un déséquilibre dans le fonctionnement de gènes aux fonctions antagonistes, les oncogènes et les gènes suppresseurs de tumeurs. Ces gènes sont des gènes normaux des cellules, présents en 2 exemplaires dans la cellule, un sur chaque chromosome parental ; ils commandent la synthèse de protéines participant au métabolisme ou à la si-

gnalisation cellulaire et contrôlent la prolifération des cellules et leur différenciation.

Un oncogène est un gène accélérateur de la prolifération cellulaire qui s'exprime dès lors qu'il est activé par une modification de structure favorable, c'est-à-dire ciblée.

En revanche, le gène suppresseur de tumeur est un gène freinateur de la prolifération cellulaire dont la perte de fonction ne peut résulter que de la suppression des 2 gènes. L'altération d'un seul des 2 gènes n'a habituellement pas de conséquence ; c'est un état potentiellement fréquent car il y a plusieurs façons d'inactiver un gène par une altération moléculaire non ciblée. La personne dont un gène suppresseur de tumeur est inactivé présente donc un état de fragilité car la mutation du second gène conduit à la perte de la fonction.

Parmi ces gènes, certains, comme P53, ont un rôle si déterminant dans le fonctionnement cellulaire que leur mutation conduit presque inévitablement à un cancer (une mutation de la P53 est retrouvée dans la majorité des cancers humains, dont environ 75 % des cancers du poumon).

Par ailleurs, les observations indiquent que le cancer est une maladie du vieillissement cellulaire :

- le risque de cancer est 300 fois plus élevé à 80 ans qu'à 10 ans ;
- 95 % des cancers de la personne âgée sont des carcinomes (cancers de cellules des tissus épithéliaux par opposition aux sarcomes qui sont des cancers des cellules du tissu conjonctif, plus fréquents chez les sujets jeunes) ;
- le vieillissement se caractérise par une accumulation de mutation ; il faut une dizaine de mutations pour créer un cancer et, le nombre de combinaisons étant extrêmement grand, il est probable que chaque cancer est génétiquement unique ;
- des facteurs d'environnement sont impliqués dans l'apparition des cancers, les principaux étant le tabac, une alimentation peu équilibrée, certaines infections et l'alcool, tous facteurs qui contribuent au vieillissement cellulaire.

Ces observations ont conduit les cancérologues à formuler les hypothèses suivantes (Dutrillaux, 2000), compatibles avec les données épidémiologiques concernant les cancers radio-induits :

- les cancers radio-induits sont comparables à ceux de la personne âgée ;

- ils sont en majorité initiés par la perte d'un gène suppresseur de tumeur car la majorité des lésions radio-induites est d'expression récessive du fait de la dispersion aléatoire des mutations ;
- les cancers avec une altération dominante d'un oncogène sont observés à tous âges ;
- il n'y a pas de signature spécifique d'un cancer radio-induit.

De nombreux travaux de recherche sont encore nécessaires pour identifier tous les gènes impliqués dans la cancérogenèse d'une part, et comprendre les mécanismes intimes du processus de cancérisation (et en particulier le rôle des rayonnements ionisants) et de son délai d'expression d'autre part.

### Perspectives

Le risque lié aux expositions aux rayonnements ionisants est-il donc surestimé ou sous-estimé ?

Il n'y a pas de raison de douter des travaux scientifiques publiés dans les revues à comité de lecture ; les mécanismes cellulaires et moléculaires présentés succinctement dans cet article représentent une réalité, limitée au domaine restreint du protocole des études menées. La difficulté réside dans la discrimination des mécanismes les plus importants, et en particulier pour l'organisme dans son entier (quel est l'importance au niveau d'un tissu ou d'un individu d'un mécanisme observé sur des cellules en culture ?); la difficulté est aussi de comprendre l'articulation de tous ces mécanismes entre eux.

En particulier, ce n'est pas parce que nous savons que le cancer résulte d'une combinaison de mutations que la présence d'une mutation de l'ADN est grave en soi. Les études épidémiologiques concernant les faibles doses d'exposition aux rayonnements ionisants, dont on sait qu'elles créent des mutations, ne sont pas conclusives dans le sens où elles ne montrent pas d'excès significatifs de cancers.

Le risque de cancer après exposition aux rayonnements ionisants est significatif à fortes doses et très faible aux faibles doses. Ce n'est pas une raison non plus pour accepter a priori des expositions durables non justifiées aux faibles doses de rayonnements ionisants, comme à tout autre facteur génotoxique.

C'est une problématique à laquelle l'ASN, qui attend de la recherche en radiobiologie des éléments conclusifs pour guider ses futures prises de décision en matière de radioprotection, est confrontée. ■

(1) Phosphorylation : réaction biochimique au cours de laquelle une molécule d'acide phosphorique est fixée sur une autre molécule. Les réactions de phosphorylation sont au cœur du métabolisme énergétique cellulaire

(2) Histones : les histones sont les principales protéines associées à l'ADN ; elles contribuent à la mécanique de l'ADN (enroulement, déroulement, régulation des gènes)

(3) Fibroblastes : cellules fusiformes, disposées en faisceau, qui constituent l'essentiel du tissu conjonctif (tissu de soutien) de l'organisme

(4) Ataxie télangiectasie : maladie héréditaire due à la mutation du gène ATM et caractérisée par l'association de troubles de la coordination des mouvements (ataxie), de dilatation de petits vaisseaux cutanés (télangiectasies) et d'un déficit de l'immunité

(5) Maladie de Fanconi : maladie génétique liée à la mutation des gènes de la famille FANC ; elle est caractérisée par des malformations congénitales, des troubles hématoLOGIQUES et une prédisposition au cancer

(6) Rétinoblastome : tumeur maligne de la rétine liée à une mutation du gène Rb

## RISC-RAD : le premier projet européen intégré de recherche en radiobiologie



Regroupant 29 organisations de 11 pays de l'Union européenne, le projet RISC-RAD (Radio-sensitivity of Individuals and Susceptibility to Cancer induced by ionizing RADiations) est le premier projet intégré retenu par la Commission européenne dans le cadre du 6<sup>e</sup> Programme Cadre de Recherche et Développement - EURATOM, priorité : quantification des risques associés aux expositions prolongées de faible dose. J'assure la coordination de ce projet au nom du CEA.

RISC-RAD fédère les laboratoires de recherche les plus en pointe dans les domaines de l'étude des lésions de l'ADN pouvant conduire au cancer radio-induit, incluant la modélisation informatique des résultats afin de caractériser les facteurs de risques individuels.

L'évaluation actuelle des risques liés aux expositions aux rayonnements ionisants est fondée sur l'extrapolation des effets à haute dose. La radioprotection exige cependant une compréhension approfondie des radiations à faible dose. De plus, les résultats obtenus s'appuient sur la moyenne observée pour une population exposée. Les observations cliniques des différentes réactions à la radiothérapie démontrent pourtant que la radiosensibilité des individus est hétérogène. Il s'avère donc primordial de pouvoir évaluer les particularités individuelles en réponse aux radiations. Une estimation plus fine des risques n'est envisageable qu'au travers de nouveaux paramètres, prenant en compte la diversité des réponses aux radiations, en particulier celles concernant les mécanismes de déclenchement du cancer radio-induit.

Bien au-delà de ce projet de 4 ans, l'ambition à long terme des équipes intégrées dans RISC-RAD est de construire les bases scientifiques qui permettront de répondre à des questions fondamentales :

- Qui fait partie de la population à risque ?
- Quels sont les mécanismes responsables de la sensibilité aux rayonnements ionisants ?
- Quand et pourquoi ces mécanismes sont-ils déclenchés ?
- Y a-t-il un lien de causalité entre la radiosensibilité individuelle et le risque de cancer à long terme ?

sibilité individuelle et le risque de cancer à long terme ?

Les résultats seront essentiels pour l'évolution de la radioprotection ainsi que le développement de nouvelles thérapies. ■

Dr Laure SABATIER, chef du Laboratoire de Radiobiologie & Oncologie, Département de radiobiologie et radiopathologie, Direction des Sciences du Vivant, Commissariat à l'énergie atomique

# Perspectives de la recherche sur la sûreté nucléaire et la radioprotection

Outlooks for research in nuclear safety and radiation protection

par **Bernard Frois**, direction de la Technologie – Ministère de la Recherche

La sûreté des installations nucléaires et la protection contre les risques radiologiques sont des préoccupations fondamentales de la société. Il serait impensable de ne pas faire tout ce qui est possible pour éviter les accidents. Certes, les accidents graves sont devenus de plus en plus rares grâce à la très grande qualité du contrôle et de la sûreté. Mais l'objectif majeur est de pouvoir garantir cette qualité au cours du temps et de préparer l'avenir. Le vieillissement des installations et l'évolution des technologies nécessitent un renouvellement continu des compétences et des connaissances qui ne peut être assuré que par un équilibre judicieux entre recherche et expertise.

L'importance du domaine à couvrir en France doit être soulignée : plus de 100 installations nucléaires importantes dont 58 centrales électro-nucléaires assurant 80 % de la production d'électricité nécessaire aux besoins du pays, mais aussi les multiples usages de la radioactivité dans les hôpitaux ou l'industrie, qui concernent plus de 200 000 travailleurs, sans oublier l'exposition aux rayonnements naturels (radon en particulier) de l'ensemble de la population à des degrés divers.

## Un changement majeur en 2002

À la suite des décisions du gouvernement en 2002, la fonction d'autorité de contrôle repose sur deux organismes :

- La Direction générale de la sûreté nucléaire (DGSNR) assure les autorisations et décisions à caractère réglementaire et a recours à l'IRSN en tant qu'expert ;
- L'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) est en charge de l'expertise technique des dossiers de sûreté.

L'IRSN réalise des recherches, des expertises et des travaux dans les domaines de la sûreté nucléaire, de la protection contre les rayonnements ionisants, du contrôle et de la protection des matières nucléaires, et de la protection contre les

actes de malveillance. La partie publique de son financement est inscrite intégralement au BCRD (budget civil de recherche et développement) sur le budget du ministère de l'Environnement. L'Institut rassemble 1500 experts et chercheurs issus de l'Institut de protection et de sûreté nucléaire (IPSN) et de l'Office de protection contre les rayonnements ionisants (OPRI). L'IRSN est un établissement public industriel et commercial (EPIC), placé sous la tutelle conjointe des ministres chargés de la défense, de l'environnement, de l'industrie, de la recherche et de la santé. L'IRSN assure aussi cette fonction d'expertise pour les activités relevant du haut fonctionnaire de défense. Son rôle est d'apporter aux pouvoirs publics la connaissance et l'expertise dont il leur faut disposer pour faire face aux problèmes de la sûreté nucléaire, de la protection contre les risques radiologiques et de la santé des citoyens.

## Quelle articulation entre les différents acteurs de la recherche ?

L'étendue des recherches dans le domaine de la sûreté est considérable. Comment articuler les différents acteurs de la recherche qui existent à différents niveaux sur les plans national et international ? Chaque tutelle a ici un rôle à jouer pour éclairer la solution à cette question fondamentale. Pour sa part, le ministère de la Recherche souhaite jouer pleinement son rôle de tutelle dans la définition des thèmes de recherche de l'IRSN et le choix de ses objectifs scientifiques et techniques. Assurant à la fois la tutelle du CEA,

## Executive Summary

The protection against nuclear accidents is a major goal in France. The Institute on Research on Nuclear Safety has been created in 2002. This paper gives a brief overview on the importance of research in the light of the new legislative framework. The articulation between the new research organization IRSN and the other research organizations involved in nuclear energy is discussed. The ministry of research believes that nuclear safety requires to develop strong competences and research programs in collaboration with CEA.

CNRS et de l'INSERM, il est en mesure d'assurer l'équilibre et le partage des responsabilités entre ces différents organismes pour maximiser l'efficacité des recherches en collaboration avec les autres ministères. Il détermine avec les autres tutelles la stratégie de l'organisme dans le cadre de l'établissement du contrat pluriannuel avec l'État qui précise à moyen terme (4 ans) les objectifs à atteindre, les ressources nécessaires, les partenariats à l'échelle nationale et internationale. Le financement des activités d'expertise devant être clairement distingué celles de recherche.

La part qui revient au CNRS et à l'INSERM est relativement simple à déterminer, car le domaine de recherche de ces deux organismes est principalement en amont de celui de l'IRSN. Ce n'est pas le cas de la recherche technologique où le CEA, les industriels AREVA et EDF sont des acteurs qui ont également un rôle essentiel à jouer.

Du point de vue du ministère de la recherche, la sûreté nucléaire se place naturellement sur différents plans :

1. le plan scientifique de la connaissance des mécanismes physiques élémentaires (IRSN et CEA) ;
2. le plan de l'intégration qui englobe les différents éléments nécessaires à l'analyse des dossiers de sûreté et une vision "système" (IRSN) ;
3. le plan des responsabilités des industriels (EDF et AREVA) ;
4. le plan de l'Autorité de sûreté nucléaire (DSNR).

Les industriels EDF et AREVA ont un rôle important à jouer, car leurs questions mettent en jeu directement leurs responsabilités d'exploitants et la rentabilité économique de leurs installations. Une partie importante de leurs demandes concerne l'amélioration des combustibles, le vieillissement des matériaux, l'évolution des systèmes. La mission de la DGSNR ne nécessite aucun éclairage particulier, étant parfaitement définie. La mission d'expertise est quant à elle entièrement du domaine de l'IRSN. Les seules questions délicates auxquelles il faut répondre concernent le recouvrement des activités de l'IRSN et celles du CEA.

### Le partage des recherches entre l'IRSN et le CEA

L'IRSN et le CEA sont naturellement complémentaires. Le CEA dispose de compétences dans

de nombreux domaines qui concernent la recherche technologique dans le domaine nucléaire et sur lesquelles l'IRSN pourra s'appuyer. Il faut mentionner les sciences du vivant qui sont l'un des fleurons du CEA, en particulier en ce qui concerne les effets des rayonnements, les phénomènes de vieillissement et la génomique. Les compétences du CEA dans le domaine de la recherche sur les matériaux du nucléaire et la modélisation multi-échelle sont également remarquables. Les laboratoires et les installations du CEA, décrites par D. Iracane dans cette revue, forment un ensemble unique.

Le domaine de recherche du CEA concerne particulièrement la compréhension des phénomènes et mécanismes élémentaires ainsi que les développements technologiques, comme les

Figure 1 - Le réacteur CABRI permet de simuler les effets d'une insertion brutale de réactivité nucléaire sur le combustible.

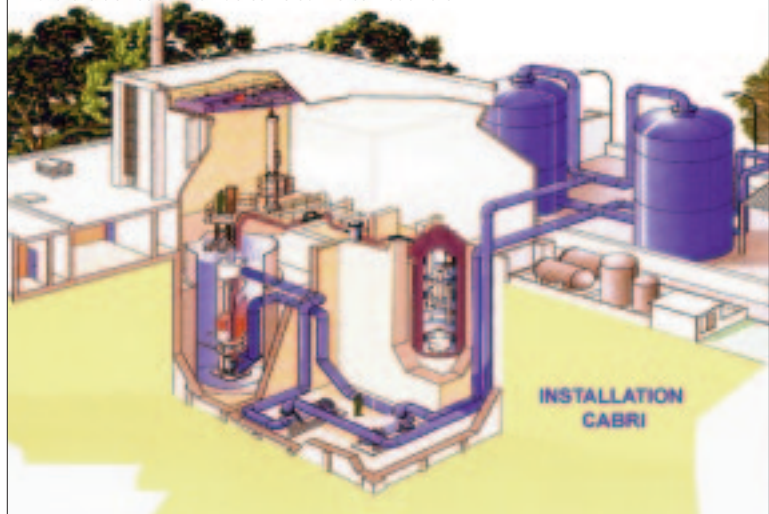
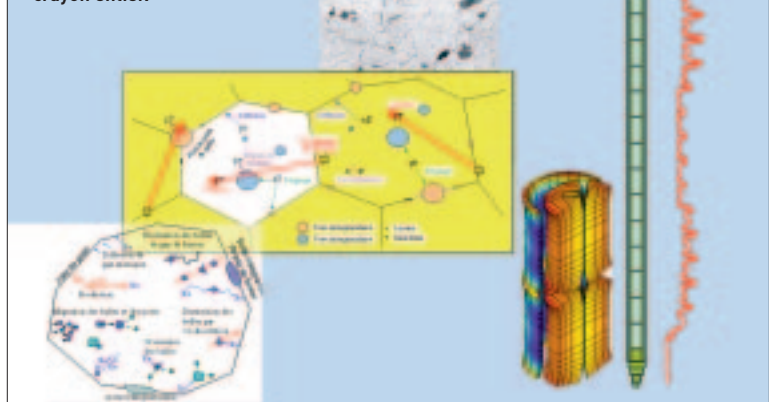


Figure 2 - Comportement du combustible dans des transitoires de puissance ou de température. De gauche à droite, on voit l'effet du relâchement des gaz de fission, l'ouverture des joints de grain dans des transitions rapides, la déformation au niveau de deux pastilles de combustible et l'ensemble des déformations au niveau du crayon entier.



codes de calcul, la robotique, les capteurs, la sûreté des logiciels et leur intégration au niveau des composants.

Ainsi, les recherches sur le combustible concernent à la fois le CEA et l'IRSN. Le CEA explore plus particulièrement les limites du fonctionnement normal et les phénomènes précurseurs, tandis que le domaine de l'IRSN se place davantage au niveau des incidents et des accidents. Les programmes de recherche de l'IRSN utilisant les réacteurs de recherche CABRI et PHÉBUS gérés par le CEA, font l'objet de collaborations internationales d'une grande notoriété. Ces programmes sont fondamentaux pour l'amélioration des taux de combustion et la prévention des accidents de criticité ou de perte de refroidissement (figure 1).

En plaçant le crayon combustible dans des conditions représentatives d'un accident, les expériences permettent aux industriels de valider le bon comportement du combustible (figure 2).

La recherche à l'IRSN est fortement couplée à son expertise pour la sûreté. Si l'on considère par exemple la question des codes de calcul, il est fondamental que l'IRSN soit au meilleur niveau de la recherche dans ce domaine pour être capable d'en maîtriser les incertitudes. L'IRSN doit être en mesure de développer les compétences et les outils qui lui seront nécessaires.

Prévenir tout accident grave dans les installations nucléaires suppose un questionnement permanent face aux évolutions de ces installations (par exemple, augmentation des taux de combustion des assemblages combustibles, mais aussi vieillissement) et aux incidents qui surviennent en France ou à l'étranger, quelquefois en dehors d'installations nucléaires (par exemple, protection contre l'incendie). Les pouvoirs publics doivent être à même d'évaluer les différentes situations envisageables, ce qui suppose le développement des connaissances nécessaires (comportement des installations en situation accidentelle, rejets envisageables, transferts dans l'environnement, dosimétries et études épidémiologiques, traitement des personnes irradiées...).

L'expertise requise par les pouvoirs publics doit être en mesure de mettre en évidence des faiblesses en matière de sûreté ou de radioprotection dans les installations existantes ou futures,

ainsi que d'apporter ses compétences à la gestion de situations concernant les terrains contaminés, les déchets miniers, la présence de radon, etc.

### **L'importance de la recherche au niveau international**

Dans les domaines de la protection de l'homme et de l'environnement, pour lesquels les évolutions sont fixées au niveau international, la création de l'IRSN est une opportunité pour la France de se positionner encore plus solidement. Les experts français participent activement à l'établissement des consensus scientifiques, notamment ceux du Comité scientifique des Nations Unies sur les effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR), en s'appuyant sur les travaux de recherche effectués par les différents organismes de recherche.

L'IRSN a un rôle fondamental à jouer dans l'élaboration des référentiels normatifs, particulièrement à l'échelle internationale, en renforçant la présence de la France dans des cadres comme ceux d'EURATOM, de l'AIEA, de la CIPR aux côtés des autres organismes nationaux.

### **Perspectives au niveau de l'Europe**

Les thèmes de recherche dans le domaine de la sûreté nucléaire que la Commission européenne considère comme devant être financés ont été définis dans les Programmes spécifiques EURATOM, adoptés en 2002.

La recherche sera centrée sur :

- la gestion des installations, y compris les effets du vieillissement et la performance du combustible ;
- la gestion des accidents graves, et notamment la mise au point de codes de simulation numérique avancés ;
- l'intégration des capacités et connaissances européennes résultant de la pratique du démantèlement ;
- l'élaboration de bases scientifiques concernant la sûreté et de meilleures pratiques au niveau européen.

La France a une forte présence au niveau de l'Union européenne dans le domaine de la sûreté

nucléaire (4 coordinations françaises sur 7, dont toutes les coordinations des projets les plus importants). Le projet à ce stade le plus important sur la sûreté est le projet SARNET, porté par l'IRSN.

Les différents projets lancés dans le cadre du 6<sup>e</sup> PCRD EURATOM sont les suivants :

Nom du projet	Type de projet	Coordinateur	Financement UE
SARNET (Sustainable integration of European research on severe accident phenomenology and management)	Réseau d'excellence	IRSN	6 M€
PERFECT (Prediction of Irradiation Damage Effects on reactors components)	Projet intégré	EDF	7.5 M€
HOTLAB (Laboratoires chauds)	Action de coordination	Belgian Nuclear Research Centre	0.2 M€
JHR-CA (RJH)	Action de coordination	CEA	1.5 M€
CND (réseau sur le démantèlement des installations nucléaires)	Action de coordination	Belgoprocess	0.75 M€
NURESIM (Simulations des réacteurs nucléaires)	Projet intégré	CEA	4.5 M€
COVERS (Recherche dans le domaine de la sûreté des VVER)	Action de coordination	Nuclear Research Institute Rez (Rép. tchèque)	1 M€

### Conclusions

La création de l'IRSN assure désormais une expertise indépendante des exploitants nucléaires. L'IRSN, avec un effectif de 1 500 agents, dont 40 % dans le domaine de la recherche, constitue l'un des plus importants instituts de recherche en sûreté nucléaire et en radioprotection dans le monde, avec l'originalité de couvrir l'ensemble des sujets concernés, de la technologie des installations aux effets sur l'environnement et sur l'homme. L'IRSN est l'un des seuls organismes de recherche aujourd'hui capables de monter des programmes internationaux de longue durée (PHÉBUS PF, CABRI...) en fédérant des contributions de la quasi-totalité des pays nucléarisés.

La recherche technologique au CEA se situe en amont de celle de l'IRSN. La collaboration entre le CEA et l'IRSN doit leur permettre de déterminer de façon optimale l'acquisition des connaissances et compétences pour la sûreté, de choisir la

meilleure stratégie et enfin de déterminer comment la mettre en œuvre.

Le ministère de la Recherche est prêt à intervenir naturellement dans la définition et le suivi des actions de recherche de l'IRSN. Partageant avec le ministère de l'Industrie la tutelle du CEA, il s'assurera de la bonne articulation des efforts de recherche des deux établissements dans le cadre de leurs missions respectives. La qualité de l'évaluation scientifique sera fondamentale pour établir la réputation du nouvel organisme sur le plan international. ■

# L'expertise adossée à la recherche : un élément clé de défense en profondeur du dispositif national de sûreté et de radioprotection

Expertise founded on research: a key defence-in-depth aspect of the national nuclear safety and radiation protection system

par Jacques Repussard, directeur général de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN).

## Les apports de la réforme de la sûreté nucléaire et de la radioprotection de février 2002 : renforcement des administrations centrales et création d'un pôle public de recherche et d'expertise

Les décrets de 2002, qui ont réorganisé le dispositif français de sûreté nucléaire et de radioprotection, ont rassemblé d'un côté les compétences régaliennes au sein de deux autorités de sûreté, l'Autorité de sûreté nucléaire en charge des aspects civils et le DSND<sup>1</sup> dédié aux aspects intéressant la Défense, et de l'autre les compétences d'expertise scientifique et de recherche au sein d'un institut unique, doté du statut d'établissement public à caractère industriel et commercial, l'IRSN. Cette dualité d'organisation correspond à une tradition nationale, que l'on retrouve dans d'autres secteurs : par exemple, les administrations de l'État compétentes pour l'équipement et le logement, avec le CSTB<sup>2</sup> comme pôle de recherche et d'expertise scientifique, ou bien les administrations compétentes pour la mise en œuvre du code minier et des politiques publiques de l'exploitation du sous-sol, avec le BRGM<sup>3</sup>.

Dans la période historique récente, les risques technologiques, sanitaires ou environnementaux sont apparus comme une préoccupation grandissante de la société, ce qui a conduit à identifier clairement et à renforcer progressivement les administrations centrales en charge de ces questions. Corrélativement, le besoin d'infrastructures publiques de soutien à ces politiques, alliant les objectifs de recherche finalisée aux objectifs d'expertise en soutien plus direct à l'action de l'État, s'est aussi renforcé. Ce besoin a logiquement donné lieu à la création d'établissements spécialisés, en général de statut public : INRS<sup>4</sup>, Agences de sécurité sanitaire, INERIS<sup>5</sup>, IRSN.

Ce modèle d'organisation se retrouve dans d'autres pays, comme l'Allemagne notamment, mais il n'est pas dominant dans les pays de l'OCDE, qui se sont dotés soit d'agences nationales disposant à la fois de pouvoirs réglementaires centraux (ou fédéraux) et des moyens techniques et scientifiques correspondants (EPA<sup>6</sup>, FDA<sup>7</sup>, NRC<sup>8</sup> aux États-Unis par exemple), soit d'un système relevant davantage d'une logique de marché, dans lequel les administrations recourent ou font recourir à divers organismes pour leurs besoins de recherche et d'expertise. C'est le cas par exemple du TNO aux Pays-Bas ou des universités ou laboratoires privés au Royaume-Uni, pays dans lequel il faut toutefois noter l'exception du HSE<sup>9</sup> ou du NRPB<sup>10</sup> qui ressemblent davantage à une agence de type américain.

## L'adossement nécessaire de l'expertise à la recherche

Dans tous les cas, cependant, on observe que la capacité d'expertise scientifique de référence n'existe pas séparément d'un pôle de recherche. En particulier, une évaluation pertinente de la

## Executive Summary

The development and effective implementation of technical regulations usually require associated R&D and scientific expertise. Different countries maintain specific models, France relying mostly on specialised public institutes, such as IRSN in the nuclear field. But it is to be noted that reference expertise needed for regulatory purposes, at national or international level, is always fully embedded in research. The nuclear and radiological sphere is characterised by the high costs and sophistication of experimental facilities, and the experience of IRSN is that the critical mass of R&D to be maintained, also necessary to attract the best scientists, corresponds to around 50% of available resources, the rest being dedicated to operational needs (expertise, surveillance, training and education,...). The pooling of resources at international and European level, the implementation of an active policy towards scientific excellence, and exemplary human resource management are essential to keep risk related research abreast of evolving technologies and industry practice on one hand, and of the growing expectation of society for the control of nuclear and radiological risks on the other hand.

sûreté ou de la sécurité nucléaire d'une installation, des risques radiologiques au poste de travail ou encore de l'impact de cette installation sur l'environnement et les populations riveraines demande des compétences de haut niveau, et souvent des moyens techniques importants et correspondant à l'état de l'art actuel (métrologie, installations expérimentales de laboratoire ou de terrain, réseaux de surveillance, bases de données, outils de modélisation) dont la disponibilité même suppose leur rattachement à un laboratoire exerçant par ailleurs des missions de recherche.

Il en va de même pour l'élaboration des référentiels normatifs, particulièrement à l'échelle internationale. Un pays ne peut apparaître comme force de proposition crédible que si les délégations qui le représentent dans les travaux scientifiques et techniques préparatoires (qui sont souvent les plus déterminants au regard du résultat, plusieurs années avant l'approbation finale) comportent des experts de très haut niveau, s'appuyant sur des travaux de recherche reconnus à travers des publications scientifiques appropriées. Tel doit bien être dans le domaine nucléaire un des rôles de l'IRSN, dans des cadres comme ceux d'EURATOM, de l'AIEA, de la CIPR ou de l'UNSCEAR, aux côtés des autres organismes nationaux.

De plus, ces compétences ne peuvent être acquises et maintenues au plus haut niveau qu'à travers des liens étroits unissant l'expertise et la recherche, et grâce à des moyens suffisants pour disposer d'une masse critique susceptible de permettre le développement de laboratoires capables d'attirer les meilleurs scientifiques, puis de les fidéliser, en s'appuyant sur eux pour la constitution de pôles reconnus d'expertise scientifique et technique, mobilisables pour les besoins opérationnels des administrations, des entreprises ou d'autres parties prenantes.

### **Une spécificité de la recherche en sûreté nucléaire et radioprotection : son coût élevé**

En matière de sûreté nucléaire et de radioprotection, le coût de fonctionnement de laboratoires constituant une telle masse critique est particulièrement élevé, compte tenu de la sophistication des technologies mises en œuvre, du coût très élevé de l'exploitation de moyens expérimentaux dans le domaine de la radioacti-



Laboratoire IRSN travaillant sur les risques chroniques

tivité (en particulier avec le recours à des réacteurs de recherche), et de la complexité de l'évaluation des expositions aux risques radiologiques et de leurs conséquences possibles ou probables (qui nécessite de recourir à des modèles complexes et à des plateaux expérimentaux de haute technologie). Le niveau des moyens déployés doit aussi être en rapport avec la puissance des développeurs de technologie ou des exploitants nucléaires dont les matériels ou installations doivent être évalués, ainsi qu'avec les attentes légitimes de la société, pour des risques perçus comme significatifs. Dans ces conditions, il paraît évident que la part de ressources qui doit impérativement être consacrée à l'effort amont de R&D au sein d'un organisme comme l'IRSN ne peut descendre en-dessous de la barre des 50 % des ressources budgétaires, c'est-à-dire un budget de l'ordre de 120 à 130 M€. Cet équilibre a été maintenu avant la réforme dans le cadre des missions nationales assurées par le CEA pour la sûreté et la

radioprotection, et l'IRSN doit s'attacher pour l'avenir à maintenir ce niveau relatif d'effort, afin de constituer durablement un pôle de recherche et d'expertise crédible aux plans national et international, au service de l'ensemble des acteurs, publics ou privés, qui ont besoin de recourir à cette expertise pour l'accomplissement de leurs objectifs.

L'exemple qui figure en encadré sur les essais réalisés dans le réacteur de recherche CABRI à Cadarache, sur le comportement du combustible

fortement irradié, pour valider un accroissement du taux de "burn up" sollicité par l'exploitant, illustre parfaitement cette problématique. Dans ce cas, l'IRSN doit non seulement recourir à une compétence pointue de recherche, mais aussi à un grand équipement de recherche, en fait unique au monde, et de ce fait exploité dans le cadre d'accords de coopération internationaux intéressant de nombreuses Autorités de sûreté, et plusieurs industriels concernés par la performance des combustibles (et qui contribuent au financement du programme). ►

### Les apports du programme de recherche CABRI REP-Na pour l'expertise de sûreté des combustibles fortement irradiés

Le projet d'EDF d'augmenter le taux de combustion à décharge des assemblages de combustible  $UO_2$  à 52 GWj/t (gigawatts jour par tonne en moyenne sur un assemblage), et d'utiliser des assemblages combustibles MOX, a conduit à initier dans les années 90 le programme CABRI REP-Na. Ce programme était dédié à l'étude du comportement de crayons de combustible fortement irradié lors d'un accident de réactivité pouvant résulter de l'éjection d'une grappe de commande, en vue notamment de conforter le fondement de l'autorisation d'exploitation du combustible dans ces nouvelles conditions.

L'objectif principal du programme était l'acquisition de connaissances pour vérifier, et si besoin adapter, les critères de sûreté pour les crayons de combustible fortement irradié et cyclé, critères fondés antérieurement sur des essais réalisés avec des crayons de combustible vierge ou peu irradié (32 GWj/t au maximum).

Le programme a été réalisé par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire dans la boucle sodium du réacteur CABRI, en coopération avec EDF et avec le support de la NRC. Les objectifs étaient d'identifier les phénomènes physiques pouvant conduire à la rupture des crayons et à l'éjection de combustible. Huit essais ont été réalisés avec des crayons de combustible  $UO_2$  irradié et quatre essais avec des crayons de combustible MOX ; l'influence de plusieurs paramètres a été étudiée : taux de combustion, niveaux et état de corrosion de la gaine, injection d'énergie (cinétique et énergie totale).

Les ruptures de certains crayons, obtenues pour

des valeurs d'enthalpie du combustible comprises entre 30 et 113 cal/g, très au dessous des critères établis pour des combustibles peu irradiés (220 cal/g), ont démontré le besoin d'évolution des critères de sûreté actuels.

L'interprétation détaillée des essais a permis de déduire les principaux enseignements suivants :

- le chargement mécanique de la gaine est principalement dû à l'expansion thermique du combustible et au gonflement induit par les gaz de fission présents dans celui-ci ;
- la forte corrosion du gainage avec présence de concentrations d'hydrures a un effet nocif sur la tenue mécanique des gaines (ductilité fortement réduite); ces concentrations d'hydrures se développent notamment lorsque la couche de zircone, formée à l'extérieur de la gaine durant le fonctionnement normal, a été partiellement desquamée ;
- une grande vitesse d'injection d'énergie accroît le risque de rupture des crayons et de dispersion du combustible solide dans le réfrigérant ;
- lors du transitoire, la couche d'oxyde peut se desquamer suite à la déformation de la gaine, accroissant les échanges thermiques entre la gaine et le fluide ;
- les gaz de fission présents aux joints de grain, en quantité importante dans la zone du "rim" en périphérie des pastilles  $UO_2$  et dans les amas riches en Pu du combustible MOX, conduisent à la fragmentation fine du combustible et à un fort relâchement des gaz de fission. ■

L'ensemble des résultats du programme a été utilisé durant l'année 1997, pour l'instruction du "dossier 52 GWj/t" présenté par EDF. Ils ont permis notamment d'établir :

- que dès lors qu'il n'y a pas de desquamation de la couche de zircone, un crayon représentatif de la gestion concernée peut subir sans rupture un dépôt d'énergie correspondant à une enthalpie de 90 cal/g à comparer à une enthalpie maximale estimée par EDF de 70 cal/g au cours d'un accident ;
- qu'il n'y a pas de dispersion du combustible en cas de rupture de la gaine, dans le cas de vitesses d'injection d'énergie représentatives ;
- qu'il est impératif de limiter à 100 mm l'épaisseur de zircone formée lors du fonctionnement, afin d'éviter sa desquamation.

Pour confirmation, il est apparu néanmoins important de compléter la base expérimentale par des essais en conditions de refroidissement représentatives du cas réacteur (eau sous pression), permettant notamment l'étude des phénomènes postrupture. Ceci a conduit à l'élaboration du programme international CABRI CIP et à la rénovation de l'installation CABRI, ce programme fournira notamment les connaissances relatives au comportement des combustibles avancés à fort taux de combustion envisagées par EDF dans les futures gestions de cœur de REP.

### **Les clés d'une politique de R&D efficace**

Au-delà de ce raisonnement d'ensemble, l'effort de R&D d'un organisme comme l'IRSN n'est cependant pas une fin en soi, bien sûr. D'abord parce que la somme des connaissances nécessaires à l'expertise dépasse largement le potentiel de recherche d'un organisme donné, même doté de moyens considérables. Ensuite parce que le besoin de recherche varie d'un domaine à l'autre, et dans un domaine donné d'une période à l'autre, rendant nécessaire un pilotage clair des grandes priorités thématiques en fonction des besoins. Enfin parce que, si la recherche ne peut être astreinte à une obligation de résultat, elle doit, lorsque sa vocation principale (comme c'est le cas pour l'IRSN) est de venir en support à l'expertise ou aux missions de service public confiées à l'organisme, assurer son excellence scientifique et veiller à sa valorisation effective au profit de la capacité d'expertise. Et ce dans des délais compatibles avec les attentes des acteurs qui ont des problèmes opérationnels à ré-

soudre, qu'il s'agisse des régulateurs, des industriels, en particulier lorsqu'ils assurent un cofinancement de programmes de recherche, ou des acteurs de l'expertise scientifique au sein de l'IRSN lui-même.

Ces observations donnent les clés essentielles de conduite de la politique de recherche en matière de risques nucléaires et radiologiques, pour optimiser l'efficacité des actions entreprises.

### **L'importance de la coopération internationale**

On constate une proximité marquée des réflexions des principaux organismes à l'échelle internationale en matière de détermination des priorités de recherche. Cette proximité facilite d'ailleurs le développement d'actions à coût partagé au niveau international, par exemple dans le cadre des programmes-cadres de recherche communautaire (PCRD) de l'Union européenne, dans le cadre de l'OCDE, ou dans un cadre bilatéral (avec les USA et l'Allemagne notamment). Ainsi, dans le domaine de la sûreté, et plus précisément des accidents graves, un réseau européen d'excellence, dénommé SARNET, rassemble désormais la quasi-totalité des ressources scientifiques européennes sous la coordination de l'IRSN, avec la perspective de développer en coopération un ensemble de codes de calcul ayant vocation à devenir la référence européenne dans ce domaine. Il est désormais clair que la politique de l'IRSN en matière de grands équipements expérimentaux (notamment en ce qui concerne les réacteurs de recherche dédiés aux programmes de sûreté) tiendra compte des perspectives de coopération internationale, même si les aspects nationaux doivent continuer à fonder les décisions en dernier ressort, sur les sujets les plus stratégiques. Le développement de la coopération scientifique permet aussi de faciliter le rapprochement des objectifs réglementaires et l'harmonisation des pratiques d'expertise. Ce rapprochement pourra devenir un atout significatif au plan européen, pour le développement optimal d'une politique harmonisée de sûreté nucléaire.

### **L'insertion dans le cadre plus large de la politique française de recherche**

Il existe aussi des facteurs d'efficacité communs à l'ensemble des organismes de recherche. La recherche sur les risques réalisée au sein d'un établissement spécialisé chargé également

d'une mission d'expertise doit à ce titre être conduite et mise en œuvre avec la même exigence d'excellence scientifique que dans les organismes à vocation plus générale, et en faisant appel aux mêmes approches.

L'IRSN s'est donc engagé dans une perspective de coopération affirmée avec les universités et centres hospitaliers universitaires, les grandes écoles, le CEA, le CNRS<sup>11</sup> et l'INSERM<sup>12</sup> et leurs écoles doctorales, soutenue par un accroissement du nombre de chercheurs habilités à diriger des recherches, de doctorants et postdoctorants, et un développement de la contribution de l'Institut à l'enseignement. Dans cette même logique, l'évaluation des programmes scientifiques, des équipes et de leurs résultats va être progressivement renforcée, avec le soutien du Conseil scientifique de l'Institut dont la composition a été récemment fixée par les ministres de tutelle (JO du 6 juillet 2004).

Ce renforcement implique notamment de mettre en œuvre une politique pertinente de gestion des ressources humaines attractive pour les meilleurs scientifiques, sachant valoriser la dimension scientifique de ces personnels à travers le système de rémunération et aussi à travers le potentiel de mobilité existant avec le CEA et quelques autres établissements faisant appel à des métiers proches de ceux de l'IRSN. Les implantations géographiques de l'IRSN doivent permettre une exploitation optimale de ces proximités, avec le CEA bien entendu, mais aussi avec certains grands pôles régionaux de recherche en développement, par exemple dans le domaine de la biologie et des sciences de l'environnement.

### Valoriser au mieux les résultats de recherche

De même, l'IRSN doit conduire une politique affirmée de valorisation de ses résultats de recherche, au-delà des publications scientifiques, une politique de transparence des activités de recherche et enfin une politique de transfert de savoir-faire, d'outils et de méthodes vers les cercles d'expertise scientifique, vers l'Administration et vers les entreprises. L'IRSN doit par exemple, comme le ferait une entreprise, gérer son portefeuille de propriété industrielle, se préoccuper de la valorisation de ses connaissances au-delà de la problématique des risques nucléaires ou radiologiques (par exemple les mé-

thodes d'évaluation probabiliste de sûreté, ou la métrologie des rayonnements ionisants).

### Conclusion

La réforme en cours du mode de gestion du budget de l'État, qui va définir les grands programmes d'intervention en fonction des objectifs poursuivis au bénéfice de la société, va faire apparaître au sein de la "mission interministérielle" portant sur la recherche un "programme" dédié à la recherche sur les risques, et dans le cadre de ce programme, une "action" consacrée au risque nucléaire et radiologique, dont la réalisation est confiée à l'IRSN. Cette organisation consacre le pilier "recherche et expertise" du dispositif national de sûreté nucléaire et de radioprotection, dont l'Institut constitue un élément clé de défense en profondeur, avec sa triple dimension scientifique, prospective, et réactive. ■

(1) Délégué à la sûreté nucléaire pour les installations concernant la défense

(2) Centre scientifique et technique du bâtiment

(3) Bureau de recherches géologiques et minières

(4) Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles

(5) Institut national de l'environnement industriel et des risques

(6) Environmental Protection Agency

(7) Food and Drug Administration

(8) Nuclear Regulatory Commission

(9) Health and Safety Executive

(10) National Radiological Protection Board

(11) Centre national de la recherche scientifique

(12) Institut national de la santé et de la recherche médicale

# La recherche : un composant essentiel du contrôle du nucléaire

Research: an essential component of nuclear regulation

par Nils Diaz, président de la Nuclear Regulatory Commission (NRC)<sup>1</sup>.

## Introduction

La recherche au sein de la Nuclear Regulatory Commission a pour vocation principale de permettre des prises de décisions réglementaires judicieuses, en cohérence avec la mission de l'Agence qui est de protéger la santé et la sécurité de la population, l'environnement et, enfin, la sécurité et la défense communes. Les décisions auxquelles l'Agence fait ou fera face influent considérablement sur la planification, l'exécution, la finalisation des travaux de recherche et la communication de leurs résultats. Il est essentiel que la NRC ait conscience de ce que l'on sait, de ce que l'on ne sait pas et de ce que l'on a besoin de savoir si elle veut être en mesure de traiter des questions importantes pour la sûreté. Les activités de recherche que la NRC mène ont pour but de la préparer aux défis et aux décisions d'aujourd'hui, de demain et d'après-demain dans les domaines de la réglementation et de la sûreté.

## Les débuts du programme de recherche

L'importance de la recherche dans les activités de contrôle exercées par la NRC en matière de réglementation a été reconnue dès la création de l'Agence. La loi de 1974 sur la réorganisation dans le domaine de l'énergie (Energy Reorganization Act) a scindé les activités régaliennes de recherche et développement de la Commission à l'énergie atomique américaine

(Atomic Energy Commission : AEC) et exigé que la NRC, appelée à remplacer l'AEC pour la partie régaliennne, établisse un bureau de recherche en réglementation nucléaire, l'Office of Nuclear Regulatory Research (RES), investi des responsabilités suivantes :

- présenter des recommandations à la NRC quant aux travaux de recherche qu'il est nécessaire qu'elle mène pour s'acquitter au mieux de ses fonctions de délivrance d'autorisations et fonctions réglementaires connexes ;
- effectuer lui-même ou sous-traiter les travaux de recherche dont la NRC a jugé avoir besoin pour s'acquitter de ses fonctions de délivrance d'autorisations et fonctions réglementaires connexes.

Par ailleurs, l'exigence, imposée par la loi, d'un Office of Nuclear Regulatory Research (RES) distinct constituait une reconnaissance implicite de la nécessité d'une recherche indépendante de celle bénéficiant du parrainage des acteurs de l'industrie nucléaire ou conduite pour leur venir en appui. Ces deux aspects du programme de recherche de la NRC, à savoir rigueur technique et indépendance, ont toujours caractérisé les travaux du RES.

Les activités de recherche menées par la NRC appartiennent à deux grandes catégories. Certains travaux traitent de besoins réglementaires immédiats ou de besoins auxquels l'Agence pourrait être confrontée dans un futur proche. Ce sont généralement les services de la NRC chargés de la réglementation, à savoir l'Office of Nuclear Reactor Regulation (bureau de réglementation des réacteurs nucléaires), l'Office of Nuclear Material Safety and Safeguards (bureau de sécurité des matières nucléaires) ou, plus récemment, l'Office of Nuclear Security and Incident Response (bureau de sécurité nucléaire et d'intervention en cas d'incident) qui identifient ces besoins. D'autres programmes de recherche sont consacrés aux besoins anticipés ou ont pour vocation de préparer la NRC à traiter des questions réglemen-

## Executive Summary

Since its establishment, the United States Nuclear Regulatory Commission (NRC) has maintained a vigorous, broad-based research program to complement its regulatory activities. The purpose of the research program is to provide technical bases for NRC decision-making by providing support to the development and implementation of the NRC's regulations and its oversight of the nuclear industry. The NRC research program has provided critical support to the agency's activities for nearly thirty years and will continue to do so in the future as the NRC addresses new challenges in the twenty-first century.



taires qui se poseront à l'avenir. Ces questions peuvent être identifiées par les chercheurs de la NRC, les services chargés de la réglementation ou l'Agence dans son ensemble. Avec le temps, ces programmes de recherche pourraient bien devenir un élément constitutif des réglementations édictées par la NRC. Le regroupement des activités de recherche au sein de ces deux grandes catégories ne remet pas en question le fait que l'ensemble des travaux de recherche effectués au sein de la NRC visent à améliorer le processus de prise de décisions, c'est-à-dire à le rendre plus réaliste, moins soumis aux incertitudes et davantage centré sur la sûreté. La recherche menée à la NRC nous aide pour les décisions que nous avons à prendre aujourd'hui, mais nous prépare également à prendre de meilleures décisions à l'avenir. Le succès des programmes de recherche de la NRC se mesure à leur capacité à fournir de l'information et des méthodes qui permettent de prendre des décisions techniquement défendables dans des délais opportuns.

### La recherche dans les années 80 et 90

Le champ d'application des programmes de recherche de la NRC a été considérablement développé et étendu suite à l'accident de Three Mile Island (TMI). À mesure que l'on prenait la mesure de l'ampleur des dégâts du cœur de TMI, le besoin de comprendre les phénomènes à l'intérieur de la cuve, associés aux accidents graves, déboucha sur la mise en place d'un vaste éventail de programmes de recherche, aux États-Unis ou dans le cadre de coopérations internationales. Ces programmes avaient pour but d'accroître les données disponibles ou de mettre au point des modèles. L'accident de TMI a également souligné l'importance de l'enclaustrage de confinement en tant que barrière ultime à la propagation de la radioactivité dans l'environnement, et des recherches

furent menées pour étudier le comportement de l'enclaustrage dans le cadre de divers scénarios d'accidents graves.

L'intérêt de ces programmes axés sur l'étude de la phénoménologie des accidents graves va au-delà d'une compréhension accrue du comportement du réacteur et de la centrale lors de ces événements. La décision d'entreprendre ces recherches était une façon de reconnaître implicitement que l'évaluation de la sûreté des centrales nucléaires ne pouvait se limiter au domaine de dimensionnement. En outre, en 1986, la NRC a entrepris d'élaborer un document, le Safety Goal Policy Statement, dans lequel elle précisait ses exigences minimales en matière de sûreté au regard du risque présenté par le recours à l'énergie nucléaire pour la santé et la sécurité de la population. Pour évaluer ce risque, il est nécessaire de disposer de données d'exploitation, de codes de calcul réalistes qui modélisent une grande variété de transitoires et d'accidents, ainsi que de modèles réalistes concernant les conséquences liées aux doses.

Les résultats concluants des études probabilistes de sûreté (EPS) et des programmes de recherche concernant les accidents graves conduisirent à actualiser les études de risques plus anciennes afin d'affiner les estimations des risques présentés par les centrales nucléaires. D'autres progrès effectués en matière d'évaluation des risques au début des années 90 amenèrent la NRC à estimer que les techniques avaient désormais atteint un stade de maturité suffisant pour éclairer, aux côtés d'autres éléments, les prises de décisions réglementaires. Les initiatives de la NRC en matière de réglementation fondée sur les études probabilistes ("risk-informed regulation") s'appuient sur des aperçus des risques ainsi que sur les considérations déterministes et la philosophie de la défense en profondeur traditionnellement utilisées en matière de réglementation nucléaire et de contrôle. Les études probabilistes sont utilisées pour déterminer l'acceptabilité des modifications proposées aux autorisations, pour évaluer l'importance d'incidents et de constatations faites à l'occasion d'inspections de centrales et, enfin, pour modifier les réglementations existantes afin de les recentrer sur la sûreté.

Même si les efforts menés par la NRC en matière d'études probabilistes de sûreté et dans le domaine de la recherche concernant les accidents graves ont représenté une part importante des

programmes de la RES, d'autres programmes de recherche ont été entrepris pour éclairer la prise de décisions réglementaires. Ainsi, les recherches sur les matériaux du réacteur et le comportement des composants, y compris les fissurations de tuyauterie, la technologie des aciers de forte épaisseur, la résistance des vannes et les effets du vieillissement ont débuté dans les années 70 et leurs résultats ont fini par être utilisés pour l'élaboration de la réglementation de la NRC relative au renouvellement des autorisations. Ces recherches, pour le moins clairvoyantes, ont fourni une partie des critères techniques utilisés pour évaluer la capacité des centrales nucléaires à être exploitées au-delà des 40 années prévues par leur autorisation initiale et elles ont amélioré la qualité des décisions réglementaires ayant trait au renouvellement des autorisations. Les recherches sur le comportement du tube de générateur de vapeur ont été utilisées par la NRC pour évaluer les programmes de l'industrie visant à préserver l'intégrité du générateur de vapeur. La compréhension accrue des phénomènes à l'œuvre dans les accidents graves a contribué à la définition de termes sources plus réalistes qui peuvent être utilisés par nos exploitants et qui réduisent leurs contraintes réglementaires sans pour autant réduire la sûreté offerte par les centrales nucléaires. Il convient de signaler que ce travail de recherche, à l'instar d'ailleurs de nombreux travaux de recherche entrepris par la NRC au fil des années, s'est inscrit dans le cadre d'une coopération internationale de grande envergure. Ainsi, des expériences menées sur les installations de PHÉBUS-FP en France en collaboration avec l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire sont en partie à l'origine de nombreuses décisions réglementaires qui ont fait date dans ce domaine. La participation de la NRC à des projets de recherche faisant l'objet d'une coopération internationale est source d'efficacité accrue d'un triple point de vue : elle permet de mutualiser les moyens, de limiter la répétition inutile d'activités et de bénéficier des enseignements de nos collègues étrangers. La solution de la coopération internationale continuera d'être recherchée pour les programmes de recherche qui amélioreront le processus de prise de décisions de la NRC.

### **Les initiatives actuelles et l'avenir de la recherche réglementaire**

Au milieu des années 90, l'état du programme de recherche de la NRC était le reflet de l'état global du programme électronucléaire américain. La déréglementation économique du secteur de la

production d'électricité fit naître le sentiment que de nombreuses centrales nucléaires allaient être définitivement fermées pour cause de compétitivité insuffisante par rapport aux centrales à charbon et à gaz naturel, relativement peu coûteuses à exploiter. Les questions liées à la mise hors service anticipée de centrales étaient alors une grande source d'inquiétude.

En dépit de ce contexte, la NRC a bien senti qu'il était nécessaire de continuer de développer et de mettre en œuvre une approche réglementaire fondée sur des études probabilistes. De plus, les améliorations apportées au cours des années 90 par les industriels du secteur en matière de sûreté et de capacités des centrales ont rendu les coûts de production d'électricité nucléaire compétitifs, ce qui s'est traduit non seulement par la poursuite de l'exploitation des centrales, mais aussi par une forte augmentation de l'intérêt manifesté par les exploitants pour le renouvellement de leur autorisation. De fait, à ce jour, des renouvellements ont été accordés pour 26 réacteurs de puissance, des demandes ont été déposées pour 16 réacteurs de puissance supplémentaires, et des demandes de renouvellement devraient être sollicitées pour la plupart des autres réacteurs composant le parc électronucléaire américain. La survenue d'événements liés à la dégradation des centrales, elle-même liée à la prolongation de leur durée d'exploitation, a fait naître la nécessité de mener des recherches supplémentaires pour s'assurer que les mécanismes impliqués dans le comportement des matériaux sont parfaitement maîtrisés. Nombre de ces projets de recherche s'inscrivent dans le cadre de coopérations avec des organisations internationales. Ils portent par exemple sur la fragilisation de la cuve du réacteur, la fissuration en milieu ambiant (telle que la fissuration par corrosion sous contrainte du circuit d'eau primaire), le vieillissement des câbles électriques et la mise au point d'une technique d'évaluation préventive de la dégradation des matériaux qui permette d'identifier les problèmes de matériaux susceptibles de se poser à l'avenir.

L'augmentation du prix des combustibles fossiles et la préoccupation croissante suscitée par les émissions de gaz à effet de serre ont également contribué à renouveler l'intérêt porté à l'énergie nucléaire en tant qu'alternative non émettrice de CO<sub>2</sub>. La conception d'un centre de stockage pour déchets de haute activité et l'évaluation de la vulnérabilité des centrales nucléaires à des at-

taques terroristes ont mis en lumière de nouveaux défis techniques auxquels la NRC doit désormais s'intéresser et qui ont donné naissance à de nouveaux programmes de recherche.

L'approche réglementaire fondée sur les études probabilistes reste l'un des principaux axes des travaux de recherche de la NRC. La mise en œuvre d'un processus amélioré de contrôle des réacteurs en exploitation, fondé sur des études probabilistes, a nécessité la mise au point d'indicateurs de performance objectifs ainsi qu'une méthodologie permettant d'évaluer l'impact, pour la sûreté, des constatations faites lors d'inspections. La mise au point des fondements techniques permettant de justifier l'introduction de nouvelles approches réglementaires fondées sur les études probabilistes en remplacement des règles existantes, y compris celles qui régissent le contrôle de gaz combustibles, les critères d'acceptation du système de refroidissement du cœur utilisé en cas d'urgence et le choc thermique pressurisé, a représenté un défi pour nos programmes de recherche. La formulation de normes consensuelles relatives à la mise au point d'études probabilistes des risques et à leur utilisation par les acteurs de l'industrie dans des applications "risk-informed" a elle aussi représenté un défi. Plus globalement, il est apparu que l'adoption d'une approche réglementaire fondée sur les études probabilistes nécessite d'être capable de fournir une évaluation réaliste des risques et de comprendre les incertitudes inhérentes à ce type d'estimations. L'application d'un niveau approprié de prudence pour expliquer ces incertitudes et pour déterminer les marges de sécurité nécessaires, allée à des estimations de risques réalistes, caractérise ce que j'appellerai une attitude de "prudence réaliste". La mise au point de méthodes réalistes d'évaluation probabiliste des risques et le développement de capacités de modélisation des accidents graves viennent directement en appui à cette philosophie de la réglementation.

La réglementation actuelle de la NRC reflète quelque 40 années d'expérience acquise avec les réacteurs conventionnels refroidis à l'eau légère. Toutefois, de nouvelles conceptions de réacteurs sont en train d'être développées qui soit font appel à un système de sûreté radicalement différent des précédents, soit utilisent un liquide de refroidissement autre que l'eau. Un travail a été entrepris pour mettre au point les fondements techniques qui justifieraient l'introduction d'un

ensemble nouveau, intégré, cohérent et technologiquement neutre d'exigences de sécurité fondées sur des études probabilistes et les performances d'exploitation. Ces exigences s'appuieront sur l'expérience d'exploitation ainsi que sur des analyses réalistes et seront totalement compatibles avec la philosophie de la NRC en matière de défense en profondeur et de marges de conception. Une réglementation fondée sur des études probabilistes et les performances d'exploitation est susceptible de clarifier et d'accentuer les relations d'interdépendance entre la sûreté du réacteur, la sécurité, la qualité de l'organisation de crise, tout en garantissant une gestion adéquate des incertitudes. Cela est de bon augure pour la mise en place d'un dispositif réglementaire logique, cohérent et réaliste tout en étant prudent.

L'expérience d'exploitation et les événements récents ont nécessité la prise d'un certain nombre de décisions réglementaires difficiles et ont placé nos programmes de recherche face à de nouveaux défis. Les programmes de recherche doivent évoluer au gré de l'évolution des besoins de la NRC. La capacité à évaluer de façon réaliste les conséquences possibles, pour les installations nucléaires, d'attaques terroristes ou de sabotages est devenue l'un des besoins prioritaires de l'agence. Les techniques d'évaluation des risques, les outils d'analyse des accidents et la disponibilité de modélisations réalistes des conséquences radiologiques jouent un rôle important dans ce contexte.

Au cours des années qui viennent, la NRC va devoir s'atteler à la tâche difficile qui consiste à évaluer le centre de stockage de Yucca Mountain, réservé aux déchets de forte activité. Les aspects qui devront être étudiés dans ce cadre vont des conséquences du transport de radioéléments à l'air libre aux performances des châteaux de transport utilisés pour acheminer le combustible usé des sites des réacteurs de puissance jusqu'au centre de stockage.

### Conclusion

En dernière analyse, le bénéficiaire des activités de recherche de la NRC et des décisions prises au vu de leurs conclusions est la population. La NRC se concentre sur les questions qui influent le plus sur la sûreté. Afin de préparer l'Agence à répondre aux défis d'aujourd'hui et de demain, il y a nécessité d'un important effort de recherche,

prioritairement axé sur la sûreté et la prise de décisions, autorisant une “prudence réaliste” et l’application d’un savoir-faire de pointe. Le programme de recherche de la NRC, qui est tout à la fois fiable, complet et vaste dans sa portée, est depuis longtemps reconnu comme une composante essentielle des activités régaliennes de l’Agence. Les programmes actuels de la NRC et ceux qui seront mis en œuvre à l’avenir continueront de dépendre d’un programme de recherche indépendant visant à garantir la capacité de la NRC à remplir sa mission, qui est de fournir des assurances raisonnables sur une protection adéquate de la santé et de la sécurité de la population dans le cadre de l’utilisation des technologies nucléaires. ■

(1) La NRC est l’autorité de sûreté américaine.

# Peut-on, doit-on mener des recherches dans le domaine du nucléaire ?

Can we, or indeed should we carry out nuclear research?

par Monique et Raymond Sené, Groupement de scientifiques pour l'information sur l'énergie nucléaire.

Cette question peut et même doit s'envisager sous des angles différents.

**L'un d'eux est la place** du nucléaire dans un plan énergétique diversifié, respectueux de l'environnement et soucieux de la santé des humains. Il est alors évident que les réacteurs actuels ne sont pas du tout optimisés dans cette optique. Si la filière des REP a donné des engins satisfaisant les cahiers des charges militaires, elle conduit à des impasses dans le cadre d'une utilisation à des fins électrogènes civiles. Leur production de déchets (en particulier les actinides dont le plutonium) est trop importante et leur rendement pas spécialement glorieux (33 % d'où un rejet thermique très important). Considérer que l'EPR est l'aboutissement de recherches sur la fission est une aberration. Ce réacteur est exactement de la même veine que les 58 déjà construits. Certes, sur les 1300 MW, on a amélioré l'épaisseur des enceintes devenues doubles, mais leur mise au point peine à se finaliser : le revêtement de la paroi interne par une couche de résine, effectué après coup, va tenter de remplacer la peau métallique des 900 MW. L'EPR, cette énième déclinaison des REP, aura donc une peau interne métallique et sera dotée de systèmes de refroidissement plus performants, de recombineurs hydrogène. Mais ce ne sont que des gadgets : le rendement et la problématique des déchets sont toujours à revoir.

Si le choix est fait de continuer d'utiliser cette source d'énergie, **des recherches sont indispensables**, mais dans d'autres directions. Il est donc indispensable, sinon inéluctable, de pousser les recherches sur les réacteurs de la quatrième génération. Sinon, la situation des années 60 va se reproduire c'est-à-dire qu'après avoir peaufiné les graphites gaz, mis en place des combustibles nouveaux, etc., il a fallu acheter la licence Westinghouse. Si la logique industrielle à courte vue d'une firme est de rentabiliser au maximum les études (achetées) consacrées à un modèle, il est du devoir des pouvoirs publics, grâce à leurs services de recherches (CEA, CNRS, Universités),

de préparer le futur (qui est malheureusement bien proche) et de lancer l'étude et la réalisation d'un démonstrateur d'une nouvelle génération de réacteurs dont l'EPR vieillot et ringard ne fait pas partie.

Les outils existent encore, mais les équipes des années 60 ont disparu et avec elles tous les savoirs accumulés. Au point que le CEA a écrit récemment dans un numéro des *Défis du CEA* qu'il fallait faire de la "réacquisition" des connaissances pour retrouver les données des années 60. Heureux temps où le CEA "cherchait" ! Mais à cette époque des pans entiers de



## Executive Summary

Doing research in nuclear matters ? If it is to be carried on, nuclear should be only one energy source among all other possible. The French situation is particular enough that it should allow not to get bogged down in the current class of reactors (to which EPR belongs) and go straight through to generation IV reactors.

This cannot be achieved without an important research effort, which should be broadened to all energy forms. But EPR and its financial needs are not compatible with this new research. Taking into account the size of the current nuclear program, research concerning safety and radiation protection cannot be bypassed. Cette question peut et même doit s'envisager sous des angles différents.

recherche ont été démantelés, de la même façon que sont pratiquées les destructions actuelles de secteurs entiers de recherche.

De nombreux travaux, ainsi que les études menées sur PHÉBUS, sont indispensables au maintien des REP actuels, car, avec un tel parc, il ne faut pas baisser la garde au point de vue sûreté. Mais il n'est pas raisonnable d'avoir un champ aussi étroit. Pourquoi ne pas lancer dès maintenant les projets de 4<sup>e</sup> génération ?

Quant aux réacteurs dédiés destinés au traitement de déchets ou aux réacteurs sous critiques couplés avec un accélérateur, ils représentent des séances de "brainstorming", mais il vaut mieux se lancer d'abord dans la réalisation de réacteurs où l'on pourra travailler à plus haute température, mieux extraire la chaleur et in fine, pour la même production d'électricité, avoir moins de déchets. Selon les résultats, il serait alors possible d'orienter les recherches pour garantir la sûreté, et la protection des humains et de leur environnement.

Le champ de recherche est totalement ouvert. Il est encore temps de mettre en œuvre des réalisations car le programme des 58 réacteurs est largement suffisant pour les besoins français (et même européens) jusqu'en 2020 au moins. Dans les années 60, il y avait une "prolifération" de projets mettant en œuvre des idées (plus ou moins) géniales. L'esprit inventif était au pouvoir. Les esprits brillants qui bouillonnaient à cette époque sont aujourd'hui à la retraite, s'ils sont encore vivants. Ils ont manifestement été remplacés par des gestionnaires ou des communicants. Si l'on souhaite repartir de l'avant, il faut le vouloir et le décider. Et prôner l'EPR est une "non-décision", pire, c'est une erreur car les moyens financiers et humains sont "finis" et les choix sont binaires : c'est OU et non pas ET. Certes, c'est l'erreur de notre système industriel, mais le niveau politique en porte aussi la responsabilité car il ne sait pas mener un débat pour le long terme. L'EPR pèsera aussi lourd sur notre futur que les graphites gaz ont pesé sur les décisions qui ont conditionné les 30 ans qui viennent de s'écouler. Dans les années 80, la dette d'EDF a atteint le cinquième du budget de la France en partie à cause du paiement de la licence achetée aux États-Unis. L'histoire bégaie...

La nouvelle génération de réacteurs et le programme énergétique diversifié ne verront pas le

jour si l'EPR est l'option retenue. En effet, répétons-le, les moyens humains et financiers sont finis : l'EPR et ses besoins financiers couperont toutes les voies de recherches aussi bien pour le nucléaire nouveau que pour le renouvelable. Dommage...

### **Un autre angle est celui de l'arrêt du nucléaire.**

N'en déplaise aux ardents partisans du nucléaire, une telle option est la seule approche obligeant à réfléchir. En effet, dépendre d'une seule source pour la production d'électricité fragilise tout le système et ne permet pas de construire un plan énergétique respectueux de l'homme et de son environnement. C'est ce qu'est en train de réussir l'Allemagne. Par contre, l'exemple de la Suède, qui en 1980 a voté un tel arrêt sans mettre en place de plan alternatif, incite à la prudence. Pour aboutir à une situation viable, un tel arrêt devrait s'accompagner :

- d'un solide plan de recherches pour réaliser une reprise des déchets, un suivi des installations en démantèlement ;
- d'une réflexion approfondie et d'un plan de recherches appropriées pour construire une nouvelle vision énergétique plus diversifiée, faisant appel aux économies d'énergie, s'appuyant sur des procédés industriels économes et sur d'autres approvisionnements possibles ou à trouver ;
- d'un arrêt des rêves, telle la transmutation, pour se lancer dans une véritable analyse de la problématique déchets allant de la composition chimique et radioactive du déchet en passant par son conditionnement, son "conteneurage" pour finir à l'entreposage et finalement au stockage si la réversibilité devient un vrai concept et ne reste pas une utopie.

C'est pourquoi envisager un arrêt a pour vertu de forcer à la réflexion et d'arrêter les discours stériles et sans la moindre volonté d'aboutir, sur la nécessité de recourir aux énergies renouvelables. Depuis 1974, date du décollage du nucléaire, les rapports réclamant la prudence dans le recours au nucléaire et la mise en place d'énergies de substitution se sont régulièrement succédé (au moins une dizaine) et ont tous été enterrés. Pourquoi cette constance dans l'erreur ?

Et l'arrêt du recours aux centrales nucléaires ne sonnerait pas l'arrêt du nucléaire. Ce dernier ne se fera pas oublier d'un claquement des doigts. Les recherches devront se poursuivre activement

pour gérer les déchets et tout notre passé radioactif. Simplement une telle décision nous permettrait de mieux cerner nos besoins et les moyens pour y répondre. Peut-être que la place d'un nucléaire plus propre et plus respectueux de l'environnement pourrait être envisagé. Peut-être aussi que d'autres préoccupations, la prolifération des armes par exemple, obligerait à conclure que le recours au nucléaire ne peut être envisagé en l'état actuel du monde. De toute façon, remettre un tel dossier à plat serait vraiment une avancée importante pour la définition d'un plan énergétique et pour une relance des recherches.

**L'aspect radioprotection est quant à lui toujours omniprésent.** En effet, réacteurs ou arrêt des réacteurs n'empêchera pas l'utilisation de radionucléides en médecine. La radioprotection restera donc domaine sensible. Ce domaine est largement dominé par une ignorance qui, pour partie, provient de la complexité du sujet, pour une autre de l'intime conviction de certains que le nucléaire ne peut être que bénéfique.

De larges incertitudes persistent sur les effets des radiations sur la matière vivante. En particulier les risques pour la santé associés à de faibles niveaux d'exposition restent un sujet de controverses. Au moins trois thèses s'affrontent :

- ceux qui estiment qu'il n'y a aucune preuve de l'effet des faibles doses et qu'en conséquence, la législation actuelle est correcte ;
- ceux qui proposent une relation "linéaire sans seuil" des effets en fonction de la dose permettant d'estimer une probabilité de cancer extrapolée à partir des domaines où l'existence d'effets est certaine ;
- ceux qui contestent cette relation sans seuil à la lumière d'études récentes et affirment que les effets aux faibles doses peuvent être beaucoup plus importants que ceux estimés jusqu'à l'aube du XXI<sup>e</sup> siècle.

En l'état de nos connaissances, il n'est pas possible de départager les trois visions. C'est pourquoi des programmes de recherches sur les effets des rayonnements doivent être réalisés de toute urgence. Ces programmes doivent inclure aussi la forme physicochimique des corps radioactifs. À cette occasion, il conviendrait de développer une approche radiotoxicologique qui fait cruellement défaut actuellement.

Associés à ces recherches fondamentales, il faut

ajouter des grands programmes de suivi des travailleurs, de rationalisation des postes de travail, de mesures correctes de l'exposition aux neutrons, et dans le domaine médical, d'évaluation des effets des doses d'exposition des patients en vue de leur réduction.

Il faut aussi systématiser les recherches sur les transferts dans l'environnement via les végétaux et les chaînes alimentaires pour pouvoir mieux gérer les effets potentiels sur les humains.

### Et pour conclure

Des pans entiers de recherche se sont perdus depuis les années 60. Il convient de les réactiver pour répondre correctement à l'alternative : nucléaire ou arrêt du nucléaire.

L'EPR n'est pas une réponse mais un artefact visant à satisfaire les ambitions à courte vue d'un industriel. Par contre, il faut lancer des recherches pour des réacteurs plus sûrs, à meilleur rendement et minimisant les déchets. La mise en œuvre de l'EPR va obérer tout l'avenir ; il n'est pas possible de mener de front au plan humain et financier la construction de cette machine et les recherches sur les nouveaux réacteurs. Il est encore moins envisageable d'y ajouter des recherches sur les énergies renouvelables. Cette option EPR ferme le futur. Elle brouille aussi le présent car les recherches en matière de sûreté sont toujours aussi nécessaires, et le construire risque d'amoindrir des programmes déjà insuffisants.

Une chose est sûre, arrêt ou non du nucléaire, il faut continuer d'analyser les paramètres de vieillissement des installations et faire des avancées dans le domaine de la sûreté.

De plus, nous avons un besoin impératif d'une radioprotection de qualité. Des recherches dans ce domaine sont indispensables et cruciales pour mieux connaître les effets sur le vivant et son environnement, et par voie de conséquences les risques encourus. ■

# À la recherche d'un second souffle pour les facteurs humains et organisationnels

In search of a new direction for organizational and human factors

par Mathilde Bourrier, maître de conférences en sociologie – Université de Technologie de Compiègne

## Une recherche d'abord initiée à la suite de grands accidents

Dans cette note, il était illusoire de tenter de broser un panorama exhaustif des travaux réalisés dans le monde du nucléaire. Nous avons préféré donner notre vision de la philosophie générale qui a jusqu'à présent nourri le développement des recherches dans le domaine.

La question des facteurs humains et organisationnels, comme on le sait, a bénéficié d'une attention relativement soutenue à la faveur d'accidents exceptionnels. Dans le monde nucléaire, il s'agit en particulier de Three Mile Island d'abord, puis de Tchernobyl.

À la suite de ces deux accidents, des services "facteurs humains" se sont étoffés chez les industriels comme chez les organismes de contrôle ou leurs appuis techniques. C'est le cas en France. Cette préoccupation en interne a aussi permis à des chercheurs de développer des questionnements en collaboration ou en parallèle avec des spécialistes recrutés par les entreprises.

L'étude des accidents majeurs et les recherches développées dans le domaine de la sécurité ont souvent partie liée. De grands noms de la psychologie, de la sociologie ou de la science politique sont attachés à l'étude d'accidents majeurs. Précisons tout de même que cette ren-

contre a, jusqu'à présent, essentiellement eu lieu dans le monde anglo-saxon où les enquêtes indépendantes se distinguent par l'adoption de plusieurs points de vue, y compris celui des sciences humaines et sociales.

À titre d'exemple, on rappelle que la commission d'enquête initiée par le Président Carter à la suite de Three Mile Island en 1979, a été le berceau de grandes théories. Ainsi Todd La Porte, politologue, fondateur du groupe "High Reliability Organizations Project" à Berkeley, Charles Perrow, sociologue, fondateur de la théorie de l'"accident normal" à Yale, Dorothy Nelkin ou Paul Slovic, sociologues également - pour ne citer que ceux-là - avaient tous participé à la commission d'enquête de Three Mile Island (pour une présentation de leurs contributions respectives, voir Sills, Wolf & Shelanski, 1981). C'est également à la suite de son étude de l'accident de Tchernobyl que le psychologue Jim Reason a forgé la catégorie des "violations nécessaires" (1987). Enfin, tout récemment, la sociologue Diane Vaughan, analyste de l'accident de la navette Challenger (1996), a collaboré étroitement et largement inspiré les membres de la commission Gehman dans le cadre de l'investigation de l'accident de la navette Columbia.

Engagés à la suite des accidents des années 80, les travaux conduits dans le nucléaire se sont concentrés sur plusieurs thèmes. En premier lieu, la cible concernait les fonctions de conduite, la conception des procédures de conduite et des procédures d'urgence et le design des salles de commandes. En second lieu, elle s'est élargie aux questions d'organisation des activités de conduite.

L'arrière-plan théorique à ces deux premières voies était bien sûr constitué par les travaux abordant les erreurs humaines avec une perspective non plus seulement normative mais également positive. Ils ont permis d'offrir une catégorisation aux erreurs, qui à son tour ouvrit la voie à une interprétation beaucoup plus riche des

## Executive Summary

This paper provides an update on the current situation in the field of organizational and human factors and in particular to sound a warning on what seems to be a decline in interest for the subject. This lack of enthusiasm is all the more paradoxical, given that there are very important challenges within the field which today still remain under-researched.

A brief history of the philosophy behind the existing approaches to research in this area is provided. This is followed by a review of the reasons which could explain the declining interest in the subject. Should this trend continue, it is likely to cause problems for all parties concerned whether industry, the regulatory bodies or researchers.

écarts (Rasmussen, Duncan & Leplat, 1987 ; Reason, 1993 ; Amalberti, 1996).

Avec le recul, on constate que les études initiées à la suite de Three Mile Island ont porté leurs fruits, notamment dans l'ergonomie de conception. Il faut bien sûr encore gagner la bataille de la systématisation du recours aux facteurs humains et à l'ergonomie dans les nouveaux projets, mais comme en témoigne le thème de la réunion du Groupe permanent d'experts pour les réacteurs nucléaires du 3 juin 2004 "Examen de la méthodologie d'intégration des facteurs humains dans les modifications techniques et documentaires des réacteurs à eau sous pression", la prise de conscience est là.

Un peu plus tard, l'accident de Tchernobyl a également apporté son lot de nouvelles préoccupations. La "culture de sûreté", cheval de bataille de l'Agence internationale de l'énergie atomique de Vienne, a été et demeure la notion-clé issue des réflexions sur les modalités organisationnelles de cet accident. Des chercheurs universitaires dans de nombreux pays (Suisse, États-Unis, Allemagne, Finlande, Japon) continuent d'être associés à l'identification des conditions favorables au développement de cultures de sûreté (Misumi, Wilpert & Miller, 1999).

Cependant, en dépit du succès rencontré par la notion de "culture de sûreté", après Tchernobyl, les avancées en matière de facteurs humains et organisationnels ont été plus maigres que dans le cas de Three Mile Island. Il nous semble, par exemple, que l'on a insuffisamment réfléchi à la place des autorités de sûreté dans le scénario catastrophe de Tchernobyl. Ainsi, l'objectivation de la contribution des régulateurs à la fiabilité organisationnelle des installations à risque reste à ce jour une question non instruite, notamment dans notre pays.

Plus fondamentalement, les questions de design organisationnel des industries à risque, auxquelles appartiennent les installations nucléaires, n'ont pas été posées. On a préféré s'intéresser aux comportements sans comprendre qu'ils étaient largement induits par les structures organisationnelles à l'abri desquelles ils s'épanouissaient. Ces structures se sont compliquées à mesure que le nombre de participants au fonctionnement des installations a augmenté et qu'il s'est diversifié. La sous-traitance des activités de maintenance en est un exemple.

Comme on l'a souvent rappelé (Bourrier, 1999), il ne s'agit pas de promouvoir un modèle unique d'organisation, mais de se donner les moyens de comparer et d'objectiver les implications de tel ou tel choix organisationnel afin d'en mesurer les coûts induits au sens large (psychologiques, ergonomiques, sociologiques, économiques, politiques...). À ce jour, un tel investissement de connaissances n'a pas encore eu lieu. Voici quelques éléments qui permettent de comprendre pourquoi les recherches dans ces domaines accusent une forme de déclin, essentiellement dans les pays européens (France et Allemagne en tête).

### Un essoufflement préoccupant

En effet, malgré des connaissances de plus en plus solides dans les domaines du facteur humain et organisationnel, les spécialistes de ces questions sont plutôt dans une mauvaise passe. La recherche associée, produite en ergonomie, en psychologie ou en sociologie, en souffre.

Il faut d'emblée le dire, c'est bien davantage une optique d'études que de recherche qui a été choisie sur ces sujets. Le monde nucléaire français ne finance pas de programmes universitaires sur la question des facteurs humains et organisationnels. Il négocie au cas par cas avec certains laboratoires le financement de thèses sur des sujets précis. Il contracte avec des experts et des sociétés de conseils pour des études plus ciblées. Il n'existe donc pas à proprement parler de recherche, ni a fortiori de politique de recherche sur les facteurs humains et organisationnels en France.

En partie, cette absence de stratégie qui, on s'empresse de le dire, n'est pas propre à l'industrie nucléaire, provient directement de la situation qui est faite aux cellules facteurs humains au sein de l'industrie. En dépit de l'importance donnée dans les discours aux facteurs humains et organisationnels (Bourrier, 2003), on constate que les forces sont maigres et dispersées. Ces spécialistes, généralement ergonomes ou psychologues, plus rarement sociologues, de formation universitaire, peuplent les sections "facteurs humains" des services centraux des entreprises concernées. Dans des entreprises très techniciennes, où les ingénieurs tiennent le haut du pavé, ces universitaires ne sont pas placés dans des positions hiérarchiques favorables, qui leur permettraient d'échapper aux questions

lancinantes de légitimité. Ils n'ont guère de poids.

Ces services sont chargés de fournir une expertise ciblée aux services opérationnels sur les composants "humains" d'un dossier technique. Une expertise qui doit être généralement sollicitée par les services opérationnels. Les spécialistes facteurs humains peinent à défendre leur territoire professionnel et soulignent de façon récurrente leurs difficultés à aborder "le terrain", c'est-à-dire en général le niveau des usines, des lieux de production, des laboratoires, ou des chantiers. Ils y sont rarement les bienvenus. Leurs compétences sont peu valorisées. Dans le meilleur des cas, ils ne trouvent une place qu'en répondant strictement à la demande interne qui leur est faite. Cette situation peut être constatée ailleurs qu'en France (cf. l'article de Kirwan sur ce point, 2002).

Leur position fragile dans le jeu les conduit à livrer sans cesse des batailles internes épuisantes qui les empêchent de faire avancer des programmes d'études et recherche susceptibles d'informer efficacement les différentes directions opérationnelles dont ils dépendent sur d'éventuelles dérives des processus décisionnels. Ils n'ont par exemple à ce jour pas les moyens de fournir une évaluation des réformes de structures régulièrement mises en place au sein de leurs propres entreprises. C'est pourtant sur ces sujets que leur rôle serait le plus utile.

En conséquence, les spécialistes de ces domaines ont fini par délaisser tout lien avec le monde universitaire à quelques rares exceptions près. Ils sont presque invisibles dans les sphères de la recherche, qu'elle soit nationale ou internationale.

Certains membres de la communauté "Facteurs Humains" en viennent à douter de leurs propres pratiques. Ils suggèrent que tant qu'ils n'auront pas adopté des méthodes d'ingénierie sociale formatées de telle façon que les ingénieurs les utilisent, les comprennent et les jugent, il n'y aura pas de progrès.

Cette perspective nous semble réductrice et dangereuse. Il serait tout aussi préjudiciable à cette profession d'ignorer les exigences de crédibilité et de manquer sans cesse la bataille de la persuasion que de tomber dans le piège qui consisterait à singer les sciences de l'ingénieur et pré-

tendre fournir des programmes clés en main, dont les résultats seraient quantifiables simplement. On sait par ailleurs que les sciences de l'ingénieur, contrairement à ce qu'elles prétendent, n'opèrent pas de cette façon, comme l'ont amplement montré les travaux de sociologie des sciences et des techniques.

Au contraire de ce que redoutent certains, il nous semble que le foisonnement des modèles pour comprendre l'activité humaine ne gêne pas le développement mature des facteurs humains dans l'entreprise. L'apport des approches en termes de facteurs humains et organisationnels est de fournir, de façon plus inductive que déductive, des représentations de ce qu'il se passe dans l'organisation. De ce point de vue, plus les systèmes seront observés sous des angles différents et par des acteurs divers et plus il y aura de chances d'anticiper et de prévenir le développement d'équilibres pathologiques.

Aujourd'hui, la recherche souffre d'un manque d'appropriation, par les milieux concernés, des notions, théories et concepts qu'elle développe, parfois dans d'autres univers industriels. Ces concepts obéissent à des canons académiques précis et réclament une traduction opérationnelle qui jusqu'à présent fait défaut. Elle manque de relais à l'intérieur des milieux industriels et réglementaires concernés.

### **Conclusion : des questions à instruire, des programmes à bâtir**

Lors des enquêtes menées à la suite des deux accidents de la NASA, les facteurs contributifs - dans toute leur hétérogénéité (psychologique, sociale, économique, politique...) - à la progressive dérive d'acteurs clés dans un espace de choix décisionnels dangereux ont été clairement identifiés. Il importe désormais de se donner les moyens de repérer en amont ces évolutions pathologiques. Comment ? En n'ayant pas seulement à cœur de sophistication un peu plus les systèmes de retour d'expériences, mais en favorisant la mise à plat des pratiques de travail et de décision à l'œuvre dans ces systèmes socio-techniques.

C'est à cette tâche que souhaitent contribuer les recherches que nous développons en France (Bourrier, 2001). Elles portent sur les fondations sociologiques de la fiabilité organisationnelle. Elles focalisent l'attention en premier lieu sur la

prise de décision et ses critères dans les organisations à risque, deuxièmement sur l'attention accordée à la conception organisationnelle et enfin sur les effets systémiques des jeux d'acteurs sur la fiabilité de l'ensemble.

Aujourd'hui, les sciences sociales sont capables avec leurs méthodes de proposer des diagnostics, fers de lance d'une prospective utile. Il est temps d'inverser la vapeur et de réfléchir aux axes prioritaires d'une recherche, qui ne serait pas purement instrumentalisée mais qui aurait à cœur, dans un dialogue avec les industriels et les Autorités de sûreté, de proposer des éléments de veille sur l'état des organisations concernées. C'est à ce prix qu'une expertise indépendante sur ces questions pourra naître. ■

[1] Les titres des chapitres 5 à 8 du rapport d'enquête témoignent de son empreinte : "From Challenger to Columbia" (chap. 5), "Decision Making at NASA" (chap. 6), "The Accident's Organizational Causes" (chap. 7) et "History as Cause : Columbia and Challenger" (chap.8) (cf. CAIB, 2003, vol. I et Vaughan, 2003).

### Bibliographie :

Amalberti R. **La Conduite des systèmes à risque**, Coll. Le Travail Humain, Paris, Presses Universitaires de France, 1996.

Bourrier M. **Le nucléaire à l'épreuve de l'organisation**, Coll. Le Travail Humain, Paris, Presses Universitaires de France, 1999.

Bourrier M. (Ed). **Organiser la fiabilité**, Coll. Risques Collectifs et Situations de Crise, Paris, l'Harmattan, 2001.

Bourrier M. Facteurs Organisationnels : Du neuf avec du vieux, **Réalités industrielles, Revue Annales des Mines, N° spécial Sciences et génie des activités à risque**, Mai, 19-22, 2003.

Columbia Accident Investigation Board, Report vol. 1, Août 2003.

Kirwan B. Soft Systems, Hard Lessons - Strategies and Tactical Approaches for the Integration of Human Factors into Industrial Organizations, in *System Safety Challenges and Pitfalls of Intervention*, B. Wilpert and B. Fahlbruch, Eds, Elsevier, Pergamon, 2002, 17-68.

Rasmussen J., Duncan K., & Leplat J. (Eds.). *New Technology and Human Error*. Chichester, UK: John Wiley and Sons, 1987.

Reason J. The Chernobyl Errors. *Bulletin of the British Psychological Society*, 40, 201-206, 1987.

Reason J. *L'Erreur Humaine* (J.-M. Hoc, Trad.), Coll. Le Travail Humain, Paris, Presses Universitaires de France, 1993 (Edition originale Human Error, 1990)

Sills D.L., Wolf C. P., & Shelanski V. B. *Accident at Three Mile Island, the Human Dimensions*. Boulder, CO: Westview Press, 1981.

Vaughan D. *The Challenger Launch Decision*, Chicago : The University of Chicago Press, 1996.

Vaughan D. *How Theory Travels : A Most Public Sociology*, *The American Sociological Association's Footnotes*, Nov/Dec issue, 2003.

# Recherche en sûreté nucléaire et radioprotection : aperçu de quelques enjeux majeurs pour le groupe AREVA

Research in nuclear safety and radiation protection: overview of some major stakes for AREVA group

par **Philippe Garderet**, directeur de la recherche et de l'innovation, et **Véronique Decobert**, directeur de l'inspection générale et de la sûreté nucléaire - AREVA

## Description synthétique du Groupe AREVA et de ses activités

Né en septembre 2001 du rapprochement de CEA-Industrie, de Cogema et de Framatome, AREVA constitue un groupe industriel présent sur 2 métiers : l'énergie et la connectique. Avec une implantation industrielle dans plus de 40 pays et un réseau commercial couvrant plus de 100 pays, AREVA propose à ses clients des solutions technologiques pour produire l'énergie nucléaire et acheminer l'électricité.

Dans l'énergie nucléaire, le groupe couvre l'ensemble des activités du cycle.

- Amont : AREVA procède à l'extraction du minerai d'uranium, à sa concentration, sa conversion et son enrichissement, étapes indispensables pour fabriquer le combustible nucléaire.
- Réacteurs et services : AREVA conçoit et construit des réacteurs nucléaires. Il apporte également les prestations de services permettant aux exploitants d'en assurer le fonctionnement et la maintenance dans les meilleures conditions de fiabilité.
- Aval : AREVA développe des technologies per-

mettant de traiter et de recycler 96 % du combustible usé. Il propose également des solutions à ses clients qui ont fait le choix d'entreposer leurs combustibles usés.

En janvier 2004, AREVA a intégré un nouveau pôle: Transmission & Distribution. Il fournit des produits et services pour transmettre et distribuer l'électricité.

En tenant compte de ce nouveau périmètre, les activités Énergie du groupe ont représenté pour 2003 un chiffre d'affaire de 9 689 M€ pour un effectif de 55 317 personnes.

## La place de la R&D dans les activités Énergie nucléaire du groupe

Les dépenses de R&D en relation avec les activités nucléaires du groupe s'élèvent en 2003 à 200 M€, ce qui représente 70 % des dépenses totales de R&D d'AREVA pour cette même année.

Les programmes de R&D sont d'abord orientés pour répondre toujours mieux aux besoins des clients. Pour cela, ils mettent l'accent sur la sûreté, la réduction des coûts, la minimisation des déchets ultimes et l'économie des ressources naturelles. Au-delà des travaux concernant spécifiquement la sûreté et la radioprotection qui font l'objet d'une description plus détaillée dans les paragraphes suivants, il est néanmoins intéressant de donner un rapide aperçu des enjeux globaux des travaux de recherche et d'indiquer la nature des principaux objectifs poursuivis. Ne serait-ce que pour montrer qu'aucun d'entre eux n'est jamais très éloigné d'une préoccupation relative à la sûreté : dans le développement des technologies nucléaires, la recherche de la performance et le souci de l'efficacité économique marchent toujours de pair avec l'exigence de sûreté.

## Executive Summary

AREVA is an international industrial group operating manufacturing facilities in over 40 countries and with a sales network in over 100. AREVA offers customers technological solutions for nuclear power generation and electricity transmission and distribution. The business covers every sector in the nuclear power cycle. Therefore R&D is chiefly customer oriented; but nuclear technologies safety requirements are evident throughout every development. This paper gives some examples of key issues mainly in the fuel-cycle domain where AREVA (essentially COGEMA) has also responsibilities in exploiting industrial nuclear sites.

## Quels sont donc aujourd'hui pour AREVA les enjeux majeurs en matière de recherche nucléaire ?

- *Optimiser les performances économiques des réacteurs* : ce qui veut notamment dire accroître les performances des combustibles, améliorer les outils et méthodes de conception (en particulier les codes de calcul) pour s'assurer des marges de fonctionnement accrues, mieux comprendre les phénomènes de vieillissement des matériaux, proposer des solutions innovantes en matière de contrôle-commande et de systèmes de conduite.

- *Développer les solutions les plus performantes pour la fin de cycle du combustible* : ceci passe par exemple par la bonne évaluation des marges vis-à-vis de la criticité, en prenant en compte l'absorption neutronique des produits de fission dans les combustibles usés (crédit burn-up) et la recherche de solutions innovantes pour diminuer le volume des déchets ultimes.

- *Préparer les prochaines générations de réacteurs et d'usines associées* : se rattachent à ces enjeux tous les travaux liés au développement de réacteurs à haute température et à l'évaluation des verrous technologiques propres à chaque filière de réacteurs dits de quatrième génération et qui seront vraisemblablement à spectres rapides ; les réflexions sur les réacteurs du futur ne peuvent par ailleurs se concevoir sans une analyse simultanée de l'ensemble du cycle du combustible, l'optimisation globale du système intégrant des gains potentiels à la fois sur l'amont (bonne utilisation des ressources naturelles) et sur l'aval (minimisation des déchets via un recyclage plus poussé).

## Les enjeux de R&D spécifiquement liés à la sûreté nucléaire et à la radioprotection

Du fait du large périmètre des activités nucléaires du groupe AREVA, les travaux de recherche concernent aussi bien la conception, la réalisation et le suivi en exploitation des réacteurs que l'ensemble des opérations relatives au cycle du combustible.

En France, de façon générale, et dans le cadre de la réglementation actuellement en vigueur, ce sont les exploitants qui sont responsables de la sûreté de leurs installations et sont les interlo-

cuteurs directs de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). Ils s'appuient en tant que de besoin sur leurs fournisseurs pour constituer les dossiers ad hoc de sûreté.

En ce qui concerne les réacteurs électronucléaires, EDF est responsable de la sûreté de l'ensemble de ses installations, à l'exception de la construction du circuit primaire principal de la chaudière dont la responsabilité relève du constructeur Framatome ANP.

Dans ce contexte, Framatome ANP est sollicité pour fournir à l'exploitant une partie des éléments constitutifs des dossiers de sûreté. Pour les enceintes sous pression du circuit primaire principal, Framatome ANP élabore les dossiers d'analyse de comportement (DAC).

A cette responsabilité est associée une R&D propre qui est mise en œuvre par Framatome ANP. De plus, Framatome ANP suit les programmes coopératifs effectués dans le cadre de l'accord de R&D tripartite sûreté (CEA-EDF-IRSN). Ces travaux lui permettent de se situer en permanence au meilleur niveau de l'état de l'art en ce qui concerne la conception et la sûreté des réacteurs.

Les thématiques principales qui sont traitées concernent les analyses d'accidents avec les codes et méthodes associés : accidents de réactivité, accidents par perte de réfrigérant primaire (APRP), accidents graves, interaction pastille-gaine (IPG), etc. Elles concernent également l'intégrité mécanique des composants : matériaux, fatigue, mécanique de la rupture, contrôle, soudage, etc.

Dans la suite de ce court exposé, nous avons choisi de nous focaliser sur les objectifs relatifs au cycle du combustible et aux usines associées pour lesquelles AREVA (essentiellement Cogema) assume une responsabilité d'exploitant.

## Enjeux relatifs à la sûreté et à la radioprotection dans les activités du cycle du combustible

En ce qui concerne le cycle du combustible, une grande partie des travaux de R&D relatifs à la sûreté et à la radioprotection s'effectuent dans le cadre d'un accord entre Cogema et l'IRSN, renouvelé en 2004.

### EN MATIÈRE DE SÛRETÉ

Les programmes sont organisés autour de quatre grands thèmes de recherche : criticité, feux, tenue thermomécanique des gaines, aérocontamination.

#### *Criticité*

L'optimisation des conditions d'exploitation des usines du cycle du combustible prend obligatoirement en compte les contraintes de criticité. L'accroissement des taux de combustion entraîne une augmentation de l'enrichissement des combustibles à l'uranium et de la teneur en plutonium des combustibles à oxyde mixte (MOX). Cela s'accompagne d'une évolution des méthodologies d'étude de criticité afin de tirer parti des absorptions induites dans les combustibles irradiés par la masse accrue d'actinides mineurs et de produits de fission. Les méthodes et les logiciels utilisés à cette fin font l'objet d'une qualification qui s'appuie sur un important programme expérimental effectué principalement sur les installations du CEA à VALDUC. Ces travaux ont permis l'élaboration du formulaire de calcul CRISTAL, dont une version qualifiée est prévue courant 2004.

#### *Feux*

Ce programme porte sur l'étude des feux d'armoires électriques, à cinétique lente et non stationnaire et de leurs conséquences pour des configurations à plusieurs locaux.

Il englobe des essais de feux de solides permettant la qualification des logiciels et des études de comportement des équipements de sectorisation et de confinement, l'analyse des conditions de remise en suspension de particules et l'efficacité ou le bouchage des filtres, et enfin la conduite des équipements de ventilation.

#### *Tenue thermomécanique des gaines de combustible irradié en piscine*

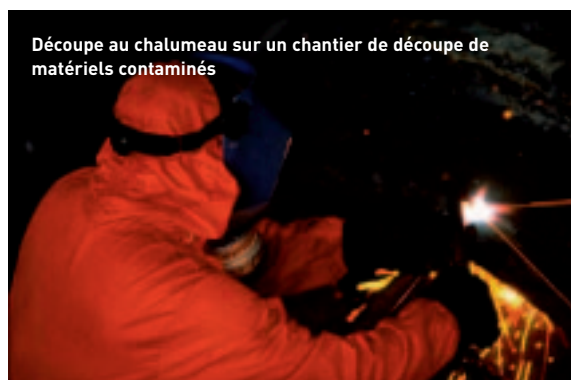
L'évacuation de la puissance résiduelle des combustibles irradiés entreposés en piscine a fait l'objet, depuis la mise en service de La Hague, d'études exhaustives en situations accidentelles. Les programmes actuels ont pour but de compléter ces données, notamment sur le comportement des gaines des combustibles irradiés soumises à des conditions de température comprise entre 450 et 700 °C. Les travaux impliquent des essais de

fluage et des examens métallographiques sur des échantillons de gaines de zircaloy irradié.

#### *Aérocontamination*

L'objectif de ces études est la détermination, en situation dégradée (accident ou démantèlement), des coefficients de remise en suspension de matières radioactives dans les locaux des installations du cycle de combustible.

L'IRSN a ainsi développé, en collaboration avec Cogema, une banque de données, appelée BADIMIS, sur la caractérisation des aérosols générés en situations accidentelles ou lors des opérations de découpe d'objets. Ces données sont destinées à faciliter l'estimation des conséquences radiologiques de telles situations accidentelles dans les ateliers de retraitement et de recyclage des combustibles. Elles permettent l'optimisation des moyens de protection à mettre en œuvre. Dans le cadre des opérations de démantèlement en cours dans son établissement d'Annecy, SICN a ainsi été conduit à évaluer, en collaboration avec STMI, la situation radiologique d'un chantier de découpe de matériels contaminés. L'utilisation de la base de données BADIMIS a permis de déterminer l'activité et la granulométrie des aérosols susceptibles d'être émis et d'étudier les protections individuelles et collectives les mieux adaptées aux opérations prévues (collecte à la source des poussières, masques isolants, tenues d'intervention...).



### EN MATIÈRE DE RADIOPROTECTION

La R&D dans le domaine de la santé et de la radioprotection comporte trois volets : connaissance des risques associés aux rayonnements ionisants, surveillance de l'état de santé des salariés par l'épidémiologie, connaissance des comportements biologiques des radiocontaminants.

*DOSINTER (détermination des doses efficaces engagées)*

Les DPUI (dose efficace engagée par unité d'incorporation), associées aux installations de conversion de l'uranium du groupe AREVA, ont fait l'objet d'une campagne de détermination spécifique. Les résultats de ce travail commun à Cogema, CEA et IRSN vont permettre aux médecins du travail de disposer en cas de besoin de valeurs plus réalistes des doses engagées.

Les recherches sur ce thème se poursuivent avec pour objectifs de :

- comparer la biocinétique de composés uranifères solubles inhalés ;
- développer un système de détection silicium fonctionnant à température ambiante, adapté à la mesure de plaies contaminées ;
- améliorer les étalonnages réalisés en anthroporadiométrie grâce à l'utilisation de fantômes numériques reconstruits à partir d'images scanner ou IRM et associés à un code de calcul Monte-Carlo ;
- modéliser le transfert dans le sang suite à une plaie contaminée.

### *Epidémiologie*

Ce programme vise à acquérir de nouvelles connaissances en matière d'épidémiologie relative aux effets d'expositions de longue durée et de faible débit.

Cette action de recherche concerne collectivement tous les acteurs de la filière nucléaire. Elle inclut en particulier une étude d'estimation des conséquences sanitaires de l'exposition au radon (étude de la cohorte des mineurs d'uranium) et une analyse systématique des causes de mortalité chez les travailleurs du nucléaire (estimation du risque associé à la dose externe et à la dose interne).

### *Toxicologie MOX*

Ce programme est directement lié à l'exploitation de l'usine Melox et concerne :

- l'évaluation de la taille des particules atmosphériques à partir des filtres de balises de surveillance ;
- l'évaluation des paramètres de dissolution permettant de déterminer les cinétiques de passage du poumon vers les urines et les fèces ;
- la cancérogenèse expérimentale après inhalation de MOX chez le rat ;

- le calcul des paramètres intervenant dans le calcul de dose : taille des particules, paramètres de dissolution.

## **Conclusion**

Ce bref panorama de quelques sujets de recherche spécifiques en matière de sûreté et de radioprotection à l'intérieur du groupe AREVA illustre la diversité des thématiques abordées ; il montre bien comment des préoccupations très opérationnelles, essentiellement orientées par la satisfaction des besoins des clients, conduisent assez vite à des questionnements faisant appel aux dernières avancées de la science (physique, chimie, biologie). Cela souligne aussi l'importance qu'attache le groupe AREVA aux préoccupations de sûreté aussi bien dans la conception de ses produits que dans l'exploitation de ses installations. ■

## Développement de résines neutrophages pour les emballages de transport de matières radioactives

Accroître la souplesse d'exploitation et les performances des éléments combustibles de réacteurs électrogènes est un objectif permanent des électriciens. L'augmentation des teneurs en matières fissiles et des taux de combustion, la réduction des durées d'entreposage en piscine sur le site des réacteurs sont des exigences qui imposent au transporteur de combustibles irradiés des offres de services toujours plus performantes : faire face à des puissances thermiques résiduelles plus élevées et à des sources de rayonnement plus intenses.

Cogema Logistics, concepteur d'emballages et opérateur de transport du groupe AREVA, développe dans ce but des résines neutrophages destinées à maintenir les débits de dose autour des colis (emballage + contenu radioactif) dans les limites réglementaires tout en améliorant les capacités de ses matériels à répondre aux spécifications de ses clients.

Le dernier produit mis en œuvre dans les nouveaux concepts d'emballage est la résine TN™ Vyal. Il a fait l'objet d'un brevet et a subi une qualification complète. Il se compose d'une résine thermodurcissable (résine vinylester en solution

dans du styrène) et de deux charges minérales (hydrate d'alumine et borate de zinc).

Sa capacité de protection contre les rayonnements neutroniques est obtenue grâce à une importante concentration d'atomes d'hydrogène (pour ralentir des neutrons) et un haut taux de bore (pour absorber des neutrons). L'hydrogène est contenu dans la matrice organique (résine) et l'hydrate d'alumine ; le bore est apporté par du borate de zinc. Sa résistance à la chaleur a été accrue pour assurer la fonction de protection radiologique dans les conditions de dissipation maximale de la puissance résiduelle du contenu radioactif par l'emballage. Le gain en température maximale admissible par rapport aux produits précédents est de 10 °C en régime continu (160 °C).

En complément, le caractère antifeu des différentes charges permet au produit final de posséder une excellente résistance au feu (autoextinguibilité). Cette qualité est requise à la fois pour résister à la température importante induite lors de l'épreuve réglementaire de feu à laquelle sont soumis les emballages de transport de matières radioactives (800 °C durant 30 minutes) et pour ne pas propager les flammes en cas d'exposition directe.

Le processus industriel de mise en œuvre de ce produit est simple. Il consiste à mélanger les différents composés et à couler in situ dans des compartiments aménagés sur l'emballage. La polymérisation s'effectue à température ambiante. La densité du produit ainsi obtenu est de 1,8. La coulée dans des moules est aussi possible pour réaliser des pièces particulières.

D'autres résines, développées aussi par Cogema Logistics, sont employées à des finalités différentes telles que la maîtrise de la sous-criticité des colis. Les travaux de recherche se poursuivent afin d'améliorer certaines caractéristiques permettant d'accroître les performances et d'élargir les conditions d'utilisation des emballages de demain. ■

# Recherche et développement en sûreté et radioprotection à EDF

## Nuclear Safety and Radiation Protection R&D at EDF

par **Jean-Pierre Hutin**, directeur des programmes production, et **Gérard Labadie**, responsable des domaines sûreté et radioprotection - EDF Recherche & Développement

### Introduction

Exploitant 58 réacteurs, EDF met la sûreté et la radioprotection au premier rang de ses préoccupations et y consacre des efforts permanents en s'appuyant sur la vigilance et l'attitude interrogative de tous les acteurs.

La R&D accompagne ces processus en mettant la connaissance scientifique au service des objectifs de sûreté. Le but n'est pas d'approfondir indéfiniment la connaissance - il faut savoir arrêter un programme de recherche - mais de maintenir en permanence une appréciation rationnelle des risques permettant de prendre les meilleures décisions.

Aujourd'hui, EDF consacre à peu près la moitié de son budget de R&D nucléaire à des activités touchant à la sûreté des installations et à la radioprotection, soit environ cent millions d'euros par an. Une grande partie de ces activités sont menées avec des partenaires, au premier rang desquels le CEA, l'IRSN, AREVA et l'EPRI (Electrical Power Research Institute - USA), sans oublier une forte participation aux projets et réseaux d'excellence européens.

### Les programmes

La R&D en matière de sûreté et de radioprotection à EDF est très variée. Elle s'intéresse à la conception des réacteurs et à leur exploitation aussi bien qu'à l'aval du cycle. Elle recouvre des problématiques très diverses telles que les méthodes d'études d'accidents, les méthodes d'évaluation et de gestion des risques, le combustible, l'anticipation des problèmes génériques, la durée de vie des composants importants pour la sûreté, les agressions externes, les accidents graves et, bien sûr, la radioprotection. Il ne faut pas oublier non plus les aspects moins techniques comme l'interaction homme-machine ou le management de la sûreté.

Pour être plus concrets, nous nous focaliserons sur quelques sujets.

### Situations climatiques extrêmes

Les événements climatiques récents (tempête de fin 1999, canicule de 2003) nous ont conduits à réexaminer la protection des sites vis-à-vis des agressions externes d'origine climatique, et en tout premier lieu sur la caractérisation de l'aléa : une révision de la méthodologie de calcul des cotes majorées de sûreté a ainsi été entreprise pour vérifier, et le cas échéant renforcer, la protection des sites contre l'inondation. Des études de R&D ont été nécessaires, compte tenu de la complexité des phénomènes rencontrés. Des méthodes de prévision ont aussi été développées pour l'alerte inondation sur les sites côtiers.

Pendant la canicule de 2003, les connaissances acquises depuis de nombreuses années dans le cadre des programmes "hydrauliques" ont été mises à profit pour montrer que la température des eaux rejetés ne pouvait avoir de conséquences négatives sur la faune et la flore. Le plan "aléa climatique" d'EDF permettra d'être prêt en cas de retour d'une telle situation.

### Accidents graves

Même si le risque d'un accident grave reste très faible, la démarche "accidents graves" est une étape supplémentaire de la défense en profondeur, qui vise à évaluer le risque au-delà de la fusion du cœur, et à le réduire si nécessaire.

## Executive Summary

Operating 58 reactors, EDF is devoting important efforts to R&D in the field of safety and radioprotection, with many french and international partners. Programs are dealing with risk assessment and management, accident simulation and methodologies, fuel safety, generic issue anticipation, life management, external hazards, human performance, dose reduction, environmental impact, etc. Strict procedures are used to make sure that programs remain in line with actual needs.

D'importants progrès ont été réalisés dans la connaissance des phénomènes physiques, dans les programmes coopératifs français ou dans des projets européens. Il reste toutefois quelques sujets de recherche pour lever les incertitudes les plus critiques, par exemple le comportement de l'iode qui impacte la teneur des rejets. Cette R&D repose sur des études expérimentales qui per-

mettent la mise au point de modèles, intégrés ensuite dans un logiciel de simulation de scénarios. Elle est réalisée pour une large part, dans le cadre des programmes de R&D tripartites (EDF-CEA-IRSN, et EDF-CEA-Framatome-ANP).

Les calculs de scénarios sont utilisés dans une étude probabiliste de sûreté qui permet d'évaluer les risques de rejets (probabilité, conséquence), et de juger de leur caractère acceptable ou, le cas échéant, de mettre en évidence les actions les plus efficaces pour réduire le risque.

### Problèmes à caractère générique

Un chapitre important de la R&D concerne l'anticipation des problèmes à caractère générique et la contribution à leur traitement : "fretting" des assemblages combustibles, fatigue thermique des zones de mélange, corrosion des composants en alliage de nickel, etc. Dans tous les cas, la R&D a pour ambition de comprendre l'origine des phénomènes et de les simuler pour pouvoir tester l'efficacité des solutions curatives.

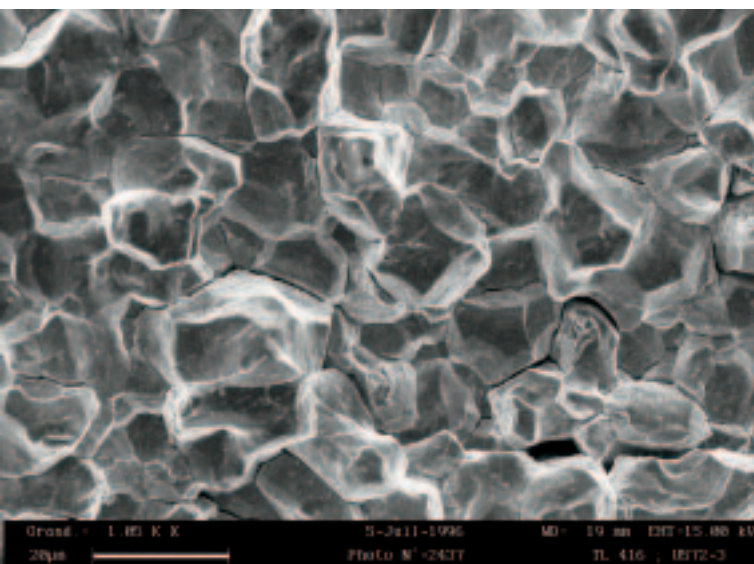
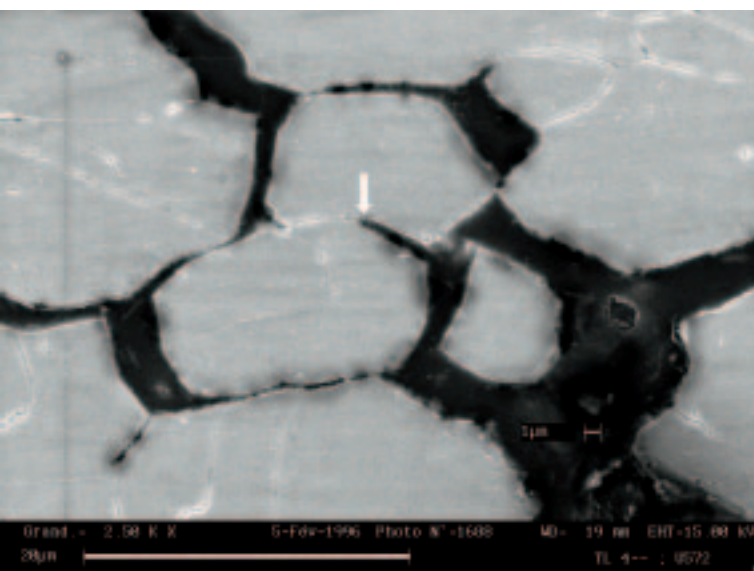
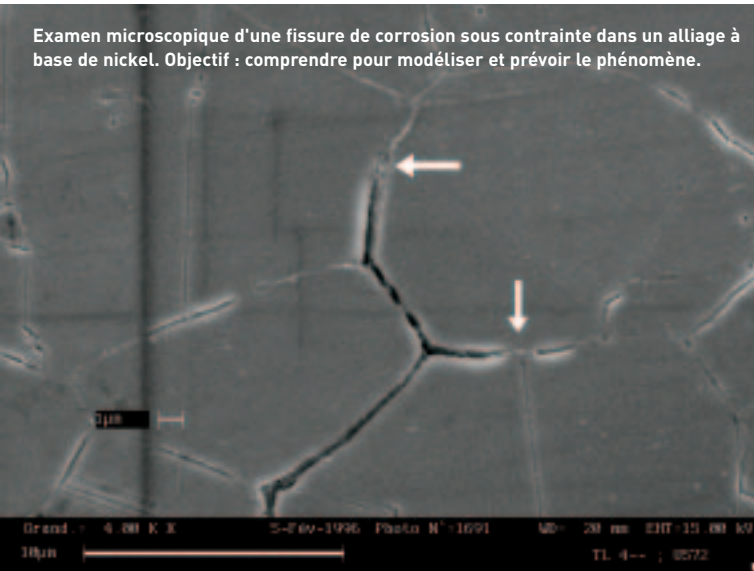
Un bon exemple concerne la corrosion sous contrainte des alliages de nickel qui a d'abord touché les tubes de générateurs de vapeur. Sur la base des résultats de laboratoires et du retour d'expérience français et étranger, des travaux de recherche considérables ont permis d'approfondir la compréhension des mécanismes et de déterminer les paramètres importants et les conditions d'évolution de la "maladie".

Les conséquences de cette corrosion ont également été étudiées, en combinant approches expérimentales (essais de fuite et d'éclatement sur boucle) et simulation numérique. Ainsi, la boucle Perfide a permis de mieux comprendre l'influence des défauts, des conditions de fonctionnement et de la chimie du primaire sur les fuites primaire-secondaire.

Progressivement, les travaux se sont étendus aux autres composants fabriqués en alliage de nickel (pénétrations de couvercles de cuve, plaques de partition des GV, etc.) pour définir des stratégies d'exploitation et de maintenance qui répondent à la fois aux objectifs de sûreté, de disponibilité et de maîtrise des dépenses.

Dans le cas des générateurs de vapeur (GV), les résultats sont intégrés dans un modèle numérique qui évalue la probabilité de rupture d'un

Examen microscopique d'une fissure de corrosion sous contrainte dans un alliage à base de nickel. Objectif : comprendre pour modéliser et prévoir le phénomène.



tube en fonction de son état et de la stratégie de maintenance, ce qui permet d'optimiser celle-ci. Au passage, ceci illustre d'une part l'apport des approches probabilistes pour améliorer simultanément la sûreté et la compétitivité et, d'autre part, l'intérêt de la modélisation numérique comme moyen de capitaliser la connaissance. On retrouve ce bénéfice, par exemple dans Code\_Aster développé par EDF pour la mécanique ou dans les logiciels de mécanique des fluides, de neutronique ou de thermomécanique du combustible codéveloppés avec le CEA.

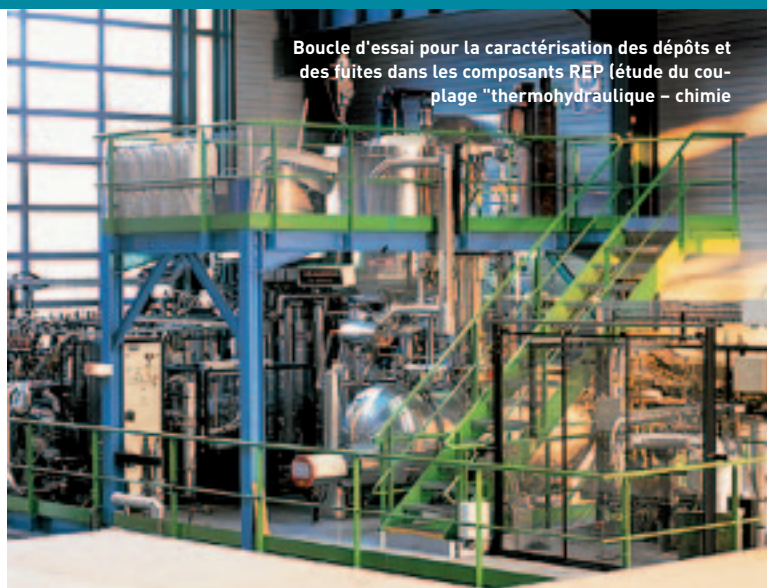
### Etudes probabilistes de sûreté

Après la conception initiale des tranches actuellement en exploitation, dimensionnées sur la base d'une approche dite "déterministe", sont apparues les études probabilistes de sûreté (EPS). Une EPS permet de hiérarchiser en fonction du risque les actions possibles pour la sûreté, par exemple les actions de maintenance, ou les modifications de tranche lors d'un réexamen de sûreté, et donc d'adapter les efforts en fonction du risque. La R&D sur les EPS vise à développer les méthodes afin d'en permettre la consolidation et l'extension, mais aussi à en explorer les usages possibles : analyse du retour d'expérience, optimisation de la maintenance, etc.

L'utilisation des approches probabilistes pour optimiser la maintenance est un bel exemple de développement qui permet d'améliorer à la fois la sûreté, la disponibilité et la compétitivité. Le principe consiste à "peser" la probabilité de défaillance des équipements et les conséquences de cette défaillance, pour choisir la stratégie de maintenance la plus pertinente. La démarche s'appuie sur de nombreux travaux de recherche, réalisés en étroite collaboration avec les exploitants : méthodes d'étude fiabiliste, comportement des matériels, analyse fonctionnelle, analyse du retour d'expérience, etc. En focalisant les efforts de maintenance sur les composants qui le méritent, on accroît la sûreté tout en minimisant les dépenses.

### Radioprotection

L'enjeu principal de la radioprotection, porté par le projet "ALARA" de la division production nucléaire, est bien évidemment de diminuer les doses reçues par le personnel. EDF s'est donné, en la matière, des objectifs ambitieux. Si leur atteinte impose des contraintes, il faut toutefois



Boucle d'essai pour la caractérisation des dépôts et des fuites dans les composants REP (étude du couplage thermohydraulique - chimie)

noter que, dans beaucoup de cas, radioprotection et efficacité économique vont de pair : ainsi la diminution des volumes de maintenance peut conduire simultanément à des réductions de coût, de durées d'arrêt, et de dosimétrie. De même, la maîtrise de la propreté des circuits permet tout à la fois une réduction du "terme source" donc de la dosimétrie, mais aussi des rejets, et conduit à terme, lors de la déconstruction, à une diminution de la dosimétrie ainsi qu'à une meilleure maîtrise des dépenses, par une diminution de volume ou d'activité des déchets.

Les axes de R&D en radioprotection sont multiples : il s'agit tout d'abord de contribuer à maîtriser la contamination des circuits, qui semble l'une des voies de progrès les plus prometteuses. Pour cela, un projet a pour but de développer les connaissances sur les phénomènes influençant la contamination des circuits, en cours de cycle et lors des phases d'arrêt et de redémarrage, de manière à optimiser les moyens d'actions tels que le conditionnement chimique du primaire, les spécifications chimiques de mise à l'arrêt, la purification.

Ces connaissances sont capitalisées dans un outil prédictif permettant de simuler la physique et de tester les moyens d'actions envisagés. Ce projet inclut les développements réalisés avec le CEA et Framatome. Un autre champ de R&D concerne le développement des procédés de décontamination nécessaires à l'ingénierie d'assainissement, et des procédés ou outillages visant à minimiser l'exposition des travailleurs. Citons, par exemple, un système de dépose du presse-joint du trou d'homme des générateurs de vapeur, qui permet de réduire l'exposition des opérateurs. Enfin, EDF accompagne la recherche sur l'effet des rayonnements ionisants

sur l'homme, quelles qu'en soient les doses et les échelles de temps. Un programme de recherche, réalisé par le CEA et l'IRSN, est mené autour de deux thèmes : la mise au point de traitements pour des doses accidentelles (radiopathologie, dosimétrie physique et biologique, bio-indicateurs de pronostic...) et la recherche fondamentale concernant les faibles doses (effets sur la cellule...).

### Facteurs humains

Les réflexions sur la sûreté (au niveau international) ont progressivement mis en évidence l'importance du rôle de l'homme, depuis son interaction avec le process dans les activités de conduite jusqu'au concept de "management de la sûreté".

EDF a consenti des efforts importants pour définir une nouvelle approche de la conduite accidentelle (approche dite "par états") et pour améliorer le système de conduite des paliers N4 et EPR. La R&D a accompagné ces efforts et les prolonge par des actions de fond sur la compréhension des pratiques réelles et sur la fiabilité humaine afin de mieux cerner les conditions d'efficacité des opérateurs, de mieux interpréter les exercices sur simulateur et de juger des évolutions envisagées. Plus généralement, la R&D apporte ses compétences pour intégrer les aspects facteurs humains dans la conception des moyens de conduite.

Le management de la sûreté et de la radioprotection fait l'objet d'efforts constants. Le rôle de la R&D est de fournir des connaissances ou des méthodes permettant de mieux appréhender la réalité des situations de travail et de comprendre les facteurs favorables ou les freins à la mise en œuvre des actions de progrès. Un exemple : l'étude des difficultés engendrées par l'évolution des exigences en radioprotection et la recherche des conditions de bonne coopération entre les acteurs concernés, chargés de maintenance et spécialistes en radioprotection. Ou bien le développement d'un questionnaire de perception de la sûreté, pour aider au diagnostic sur un site et "mesurer" les effets d'un plan d'action.

### Le pilotage des programmes de R&D

Pour chaque domaine de R&D - dont le nucléaire - des orientations triennales sont définies sur la base des enjeux et des objectifs de l'entreprise.

Chaque année, un processus d'analyse et d'arbitrage conduit à décider la poursuite (ou non) des projets en cours et le lancement de nouveaux. Ceux-ci font l'objet d'une étude d'opportunité qui inclut, en particulier, une évaluation de la contribution aux enjeux et aux objectifs de l'entreprise.

Pour garantir que ce processus ne privilégie pas une R&D trop "applicative", la R&D long terme est structurée autour de 14 grands défis, dont 5 concernent directement le nucléaire (combustible, impacts environnementaux, durée de vie, maîtrise du vieillissement, bouquet énergétique).

### Les coopérations

Les coopérations en R&D sont nombreuses et se développent. Elles répondent d'abord à la nécessité de partager les coûts et les risques. Elles permettent aussi de conforter la pertinence des programmes. De plus, dans le domaine de la sûreté et de la radioprotection, elles ne sont pas freinées par des considérations liées à la concurrence pour l'exploitation industrielle des résultats.

Avec les grands partenaires traditionnels que sont le CEA, Framatome-ANP, l'ANDRA, l'IRSN, des accords ont été signés. Ils portent sur quasiment tous les sujets cités plus haut et incluent le co-développement des grands logiciels. La collaboration avec l'IRSN porte sur des connaissances "amont" (criticité, comportement du combustible en accident, accidents graves, radioprotection), connaissances que chaque organisme utilise ensuite de manière indépendante.

Le partenariat avec l'EPRI (Electrical Power Research Institute) permet à EDF d'accéder à la R&D menée pour les exploitants américains et d'intervenir dans leur choix de programmes. Il permet aussi de conduire des projets en commun, en détachant des chercheurs EDF dans les équipes EPRI (par exemple sur la sûreté des contrôle-commandes numériques ou sur la fiabilité des composants).

EDF attache aussi une importance particulière aux projets ou réseaux d'excellence européens, et participe au réseau SARNET pour les accidents graves, piloté par l'IRSN, aux projets NURESIM pour les logiciels de simulation physique et PERFECT pour la simulation dans le domaine

des matériaux. Au-delà de l'Europe, EDF est membre du projet HALDEN de l'OCDE (comportement du combustible, fiabilité humaine et interface homme machine, etc.).

Enfin, EDF mène une politique active de coopération scientifique avec la Chine sur le nucléaire, comme en témoignent les accords avec le "ministry of science and technology", la China National Nuclear Corporation, l'INET<sup>1</sup> de Tsinghua University, sur des sujets comme les études probabilistes de sûreté, l'utilisation des logiciels classés, la gestion du combustible.

### Conclusions

Imaginer que le changement de statut d'EDF et les évolutions du marché de l'électricité pourraient conduire à une réduction drastique des budgets de R&D dédiés à la sûreté n'est pas raisonnable : le parc nucléaire d'EDF est un actif précieux qui ne saurait être exploité durablement sans une sûreté irréprochable. D'ailleurs, comme l'ont montré plusieurs exemples, les recherches qui visent l'amélioration des connaissances et la compréhension des phénomènes, servent aussi bien la sûreté que la disponibilité ou la maîtrise des dépenses.

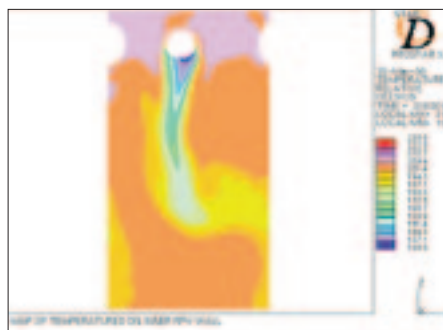
La R&D a une carte importante à jouer car, aujourd'hui, les acteurs s'intéressent moins au respect de règles arbitraires qu'à une véritable évaluation des risques. Les "outils" classiques de l'ingénierie ne suffisent plus, méthodes et modèles sont à "inventer". Dans ce secteur, le développement des outils de simulation numérique avec couplage multi-échelles et multi-physiques représente un progrès important.

Bien sûr, les incertitudes associées à ces études "réalistes" doivent être prises en compte. D'où l'intérêt du développement des approches probabilistes et/ou statistiques qui fournissent ainsi des évaluations pertinentes pour optimiser les décisions.

Finalement, le challenge le plus difficile reste de savoir arrêter les programmes de recherche quand la connaissance acquise est suffisante. Suivant en cela les recommandations de l'OCDE, c'est à la communauté scientifique elle-même de se montrer raisonnable. ■

[1] Institute of nuclear and new energy technology

## Recherche et développement sur la durée de vie



Pour EDF, la maîtrise de la durée de vie des installations nucléaires est évidemment un enjeu industriel et financier considérable. Environ 50 millions d'euros sont consacrés chaque année à ce sujet, en recherche et développement.

Le premier thème de travail est la maîtrise des phénomènes de vieillissement, tant du point de vue des causes que des conséquences. L'un des principaux sujets techniques est évidemment la fragilisation de l'acier des cuves du fait de l'irradiation et l'effet que cela peut avoir sur la sûreté de l'appareil. Les connaissances acquises dans le monde depuis des années sur le sujet sont déjà très importantes et permettent de construire des démonstrations de sûreté probantes. Mais il restait à acquérir la connaissance fine de tous les phénomènes en jeu et à être capable de les modéliser pour réaliser des prévisions fiables. C'est l'objet du projet européen Perfect, dont EDF a pris le leadership. Ce projet entend modéliser l'ensemble des mécanismes physiques d'endommagement, depuis le niveau atomique jusqu'à la structure complète. Il s'agit donc de développer des modèles multi-échelles et multi-physiques qui supposent évidemment une compréhension préalable des mécanismes et, donc, des travaux expérimentaux utilisant les technologies ►

les plus sophistiquées. Un tel programme est un bel exemple du fait que la connaissance et la compréhension des phénomènes permettent d'améliorer simultanément la sûreté et la maîtrise de la durée de vie.

Bien sûr, la démonstration de sûreté des cuves passe par de nombreuses autres étapes qui font également l'objet d'avancées significatives : propriétés mécaniques à haut niveau d'irradiation, modélisation fine 3-D des écoulements thermohydrauliques en situation normale ou accidentelle, modèle et critère pour l'étude de la stabilité des défauts, évaluation non destructive de la fragilisation par effet PTE (pouvoir thermo-électrique).

Même si les programmes n'ont pas toujours la même ampleur, tous les composants sensibles font l'objet de travaux qui permettent d'évaluer les risques de vieillissement et de proposer des mesures éventuelles. Les résultats permettent d'évaluer une espérance de vie des composants, mais également d'optimiser les stratégies de maintenance et de rénovation. Le cas de la fatigue thermique dans les zones de mélange en est une bonne illustration. Par ailleurs, un des défis qui structurent la R&D "long terme", a pour ambition de travailler, en amont, sur la compréhension et la modélisation de l'ensemble des mécanismes de vieillissement des matériaux, ce qui consolidera la base scientifique des évaluations d'ingénierie.

Ceci ne doit pas faire oublier que les menaces qui pèsent sur la durée de vie ne touchent pas que les matériels : préservation de la documentation, entretien de la culture de sûreté, maintien des compétences sont des thèmes qui doivent être traités sans attendre le dernier moment et pour lesquels la R&D effectue un important travail d'anticipation. Ainsi, les technologies de "laser-mapping" combiné à des logiciels de CAO permettent de reconstituer la modélisation 3-D et les plans 2-D d'une installation existante. Par ailleurs, une méthodologie a été mise au point pour évaluer la culture de sûreté des exploitants et en suivre l'évolution.

La plupart de ces programmes sont partagés avec d'autres exploitants et d'autres organisations, et sont conformes aux orientations fixées par l'AIEA pour un management efficace et cohérent de la sûreté et de la durée de vie.

Enfin, le grand nombre de dossiers "matériels" auxquels cela conduit, ne permet pas de se faire fa-

cilement une idée de la durabilité des installations prises dans leur ensemble. C'est pourquoi EDF R&D s'est engagé dans la modélisation de la durée de vie d'une tranche vue comme un tout et dans le développement d'une méthode permettant d'en faire une évaluation technique et économique au travers d'indicateurs pertinents qui aideront les décideurs à faire des choix, au fur et à mesure de son exploitation. ■

Jean-Pierre Hutin, directeur des programmes production, et Bernard Monnier, responsable du domaine maintenance et comportement des matériels, EDF R&D.

# Les grandes installations de recherche pour l'énergie nucléaire

The major nuclear power research installations

par Daniel Iracane, direction de l'énergie nucléaire – Commissariat à l'énergie atomique (CEA)

## Introduction

Dans le domaine de l'énergie nucléaire, le CEA conduit des recherches et développements en support aux systèmes réacteurs et cycles du combustible existants et pour la préparation des systèmes futurs.

Ceci nécessite de grandes infrastructures de recherche qui font l'objet d'une politique qui associe l'optimisation de ces moyens, notamment par l'ouverture internationale et la stratégie de jouvence ou de renouvellement.

Associée avec les capacités de modélisation et de simulation numérique, la capacité expérimentale procurée par ces infrastructures est un élément essentiel de la recherche en sûreté, de la compétitivité et de la faculté d'innovation et de développement technologique dans le domaine nucléaire où la France a une position de leadership mondial.

## Les infrastructures pour l'étude des matériaux et combustibles sous irradiation

Le comportement des matériaux de structure et des combustibles nucléaires soumis au flux des neutrons d'un réacteur de puissance est un domaine de R&D central pour l'énergie nucléaire.

Les enjeux techniques sont typiquement les suivants :

- maîtrise du vieillissement des matériaux de structure sous irradiation pour les réacteurs de deuxième et troisième génération ;
- soutien aux évolutions de conception dans la durée pour les réacteurs de troisième génération (amélioration des performances, évolutions technologiques à l'occasion du renouvellement des outils industriels pour le cycle du combustible) ;
- amélioration des performances et maîtrise des marges de sûreté du combustible ; il s'agira pour les réacteurs de troisième génération, comme aujourd'hui pour les réacteurs de gé-

nération 2, d'un élément continu important d'amélioration du coût et de la sûreté des réacteurs et du cycle du combustible ;

- validation du comportement du crayon combustible en situation incidentelle (transitoire de puissance) ou dans certaines situations accidentelles ;
- optimisation des combustibles fonctionnant à haute température pour les réacteurs à haute température (HTR) ;
- évaluation des matériaux et combustibles pour les systèmes de quatrième génération. Il apparaît clairement que les matériaux et combustibles constituent l'un des principaux sinon le principal verrou technologique dans presque tous les concepts proposés : recyclage des actinides mineurs dans le combustible, très haute température (VHTR<sup>1</sup>), couplage à un flux de neutrons rapides (GFR<sup>2</sup>), environnement potentiellement corrosif (SCWR<sup>3</sup> ou LFR<sup>4</sup>). Après leur évaluation, il s'agira d'améliorer les performances des matériaux et combustibles sélectionnés, par exemple en utilisant les matériaux céramiques.

Ce domaine nécessite un ensemble cohérent d'infrastructures constitué :

- d'un réacteur d'irradiation, pour mener les ex-

## Executive Summary

Large research infrastructures are of key importance to improve the efficiency and the safety of nuclear energy production. To support present and coming power reactors and fuel cycle facilities and to develop future systems, it is necessary to optimise these infrastructures by taking into account the networking and access improvement of existing facilities at the European level, and the creation of new installations when facing ageing issues.

As a major nuclear country, France offers a consistent set of research facilities.

This includes material testing reactor and hot laboratories for material and fuel under irradiation studies and fuel cycle researches.

Because present European material testing reactors are ageing, renewing the irradiation capability is an important and structuring stake for the fission research in Europe in order to continue safe and optimised operations of existing reactors, to support Generation 4 RTD and to keep alive competences. The Jules Horowitz construction project meet this context.

périences instrumentées permettant l'étude du comportement des matériaux de structure et des combustibles nucléaires (à l'échelle d'un ou quelques crayons) sous irradiation. Actuellement, le CEA utilise le réacteur OSIRIS à Saclay ;

- et de laboratoires chauds associés, ensemble de cellules blindées nécessaires pour l'expérimentation chimique, physique ou mécanique de matières radioactives ou irradiées. Complétant les irradiations expérimentales, ces laboratoires permettent de préparer les matériaux et combustibles à expérimenter et de réaliser les examens postirradiation des échantillons. Le CEA utilise le laboratoire LECl à Saclay pour les matériaux et les laboratoires LEFCA et LECA/STAR à Cadarache pour les combustibles.

Cet ensemble constitue un outil central permettant de mener, simultanément pour différentes générations et technologies de réacteur de puissance, des programmes sur le vieillissement des matériaux de structure, sur l'amélioration des performances, et de la sûreté des combustibles nucléaires, sur l'évaluation et le développement de matériaux et combustibles pour les systèmes futurs.

Le couplage entre les expériences de plus en plus instrumentées menées sur ces outils, la modélisation et la simulation numérique est un enjeu important pour disposer d'une compréhension des phénomènes physicochimiques responsables de l'évolution des matériaux et combustibles sous irradiation. Cette capacité de prédiction, crédible au-delà des résultats expérimentaux disponibles est, par exemple, nécessaire pour explorer des régimes inaccessibles à l'expérience directe pour les études de sûreté ou encore pour évaluer la grande variété des matériaux requis par les différents concepts de génération IV.

### Les laboratoires chauds

Les activités d'études de matériaux irradiés sont regroupées au laboratoire LECl à Saclay. Elles contribuent à la détermination de la durée d'utilisation des combustibles dans les réacteurs et de la durée de vie des centrales nucléaires par la prévision du comportement dans la durée de la cuve et des structures internes des réacteurs. Elles contribuent de même à l'évaluation des matériaux à utiliser pour les réacteurs futurs. En



Le laboratoire LECl permet l'étude du comportement mécanique sous irradiation des matériaux de structure et des matériaux assurant le confinement des combustibles. Les expériences portent sur des échantillons de petites tailles, ce qui permet de limiter l'inventaire radiologique de Saclay.



Le LECA/STAR regroupe l'ensemble des moyens permettant de caractériser et de tester les combustibles irradiés, depuis la réception des crayons entiers (longueur 4 m 50) jusqu'aux analyses fines à l'échelle micronique et submicronique.

associant sur le même site les équipes à la pointe de l'état de l'art dans la science des matériaux sous irradiation et la capacité expérimentale du LECl, Saclay offre un pôle de compétence matériaux à l'échelle européenne.

Les études menées dans les laboratoires LEFCA et LECA/STAR de Cadarache contribuent à améliorer les performances et la sûreté des combustibles. Le LEFCA permet la fabrication de combustibles expérimentaux pour irradiation, et le LECA réalise les examens des combustibles irradiés à l'aval d'irradiations menées en réacteurs industriels, en réacteur de recherche comme OSIRIS et demain RJH et en réacteurs dédiés à l'étude de situations accidentelles. Associées à la modélisation et à la simulation numérique, ces installations font de Cadarache un centre de compétence combustible à l'échelle internationale.

### Les réacteurs d'irradiation

Ce type de réacteur doit posséder une large flexibilité d'expérimentation :

- niveau de flux neutronique élevé pour tester et

anticiper l'endommagement par irradiation dans les réacteurs de puissance en récréant des conditions de flux adaptées en intensité et en spectre ;

- instrumentation importante permettant d'analyser le comportement des matériaux et combustibles dans des expériences simulant des situations normales, mais aussi incidentelles et accidentelles. Couplée à la modélisation, cette instrumentation permet d'extrapoler les résultats pour les situations inaccessibles à l'expérimentation directe, ce qui est particulièrement nécessaire pour les études relatives à la sûreté ;
- possibilité de représenter localement les conditions d'environnement des différentes filières de réacteurs de puissance par l'utilisation de dispositifs ou boucles d'essai (en eau pressurisée, en conditions bouillantes, en gaz, en sodium).

L'analyse du besoin en réacteurs de recherche pour l'études des matériaux et combustibles a été menée par la Commission européenne dans le cadre du 5<sup>e</sup> PCRD EURATOM ("FEUNMARR - Future European Union Needs in Material Research Reactors", Oct. 2002).

Cette étude a répondu à deux questions clé : est-il encore nécessaire de mener des recherches dans ce domaine, et si oui dispose-t-on des outils nécessaires ?

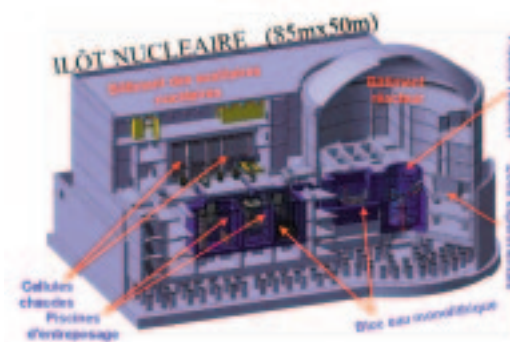
À la suite du travail des experts et d'un colloque rassemblant une cinquantaine de représentants de l'industrie et des instituts de recherche, les points suivants ont été retenus dans la conclusion :

- "Le besoin demeurera manifeste aussi longtemps que le nucléaire restera une source de production énergétique prépondérante."
- "Du fait de l'ancienneté des réacteurs MTR actuellement en service, il apparaît primordial de renouveler les réacteurs MTR présents en Europe, afin que dans une dizaine d'années, il y ait au moins un nouveau MTR en exploitation."

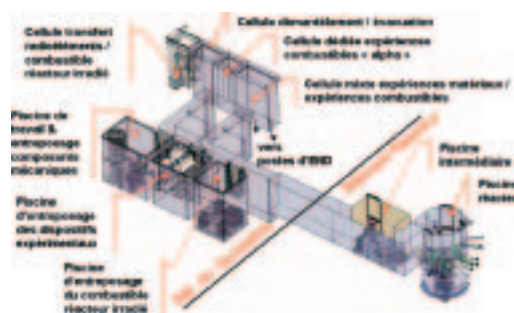
Ces conclusions ont été reprises par la Commission européenne qui a souligné la nécessité de lancer un projet de nouveau réacteur de recherche en Europe, compte tenu 1) de la pérennité du besoin en capacité d'irradiations expérimentales, 2) du vieillissement des réacteurs MTR actuels en Europe, 3) du délai de 10 ans nécessaire pour construire un réacteur de recherche.

Le projet de construction du réacteur Jules Horowitz (RJH) répond à ce contexte européen en pérennisant la capacité en irradiation expérimentale pour mener les études de combustibles et de matériaux sous irradiation.

Le RJH sera construit sur le centre de Cadarache qui offrira ainsi une plate-forme expérimentale cohérente et unique associant le RJH et les laboratoires LEFCA et LECA/STAR. De plus, en tant que plate-forme expérimentale moderne, le RJH contribuera à la vitalité des recherches dans le domaine des applications nucléaires. L'apport d'une telle infrastructure à la formation des futurs cadres de l'industrie et de la recherche nucléaires est largement reconnu en Europe.



Avec une puissance thermique de 100 MW, le RJH permet une vingtaine d'expériences simultanées dans le cœur et le réflecteur et un flux de neutron 2,5 fois celui d'OSIRIS (16 dpa/an). Localement seront reconstituées les conditions d'environnement des différentes filières de réacteurs de puissance, en situations normales mais aussi incidentelles et accidentelles, par l'utilisation de dispositifs ou boucles d'essai (en eau pressurisée, en conditions bouillantes, en gaz, en sodium...)



Des moyens expérimentaux complètent le processus d'irradiation, tels que le laboratoire de mesure en ligne des produits de fission ou la cellule chaude dite "alpha" pour gérer les charges expérimentales ruptées.

Le RJH contribuera à la production européenne de radio-isotopes pour les applications médicales, répondant ainsi à un besoin stratégique de santé public en sécurisant l'approvisionnement en radio-isotopes à usage médical en Europe.

Le planning du projet RJH conduit à sa mise en service en 2014 :

- études de définition de 2003 à 2005 pour figer les solutions techniques ;
- études de développement 2006-2007 au niveau de détail permettant de lancer la construction ;
- rapport préliminaire de sûreté en 2006 et rapport provisoire de sûreté en 2010 ;
- réalisation des travaux d'aménagement du site en 2007, premier béton mi-2009 et bâtiment réacteur hors eau début 2012.

### Les autres réacteurs de recherche

#### Les réacteurs dédiés à l'étude de certaines situations accidentelles

Le CEA exploite les réacteurs expérimentaux CABRI et PHÉBUS dans lesquels il réalise, en coopération étroite avec l'IRSN, des essais de sûreté globaux. Ces programmes pilotés par l'IRSN sont généralement menés dans le cadre de collaborations internationales associant des utilisateurs, électriciens notamment, et des instituts spécialisés dans les études de sûreté.

#### Les maquettes critiques

Le CEA utilise des maquettes critiques, réacteurs de puissance nulle, pour la qualification des données nucléaires et des schémas de calcul neutronique : Éole-Minerve et Masurca situées à Cadarache.

La mise à niveau de sûreté de Masurca, engagée en 2004, va se poursuivre jusqu'en 2007.

#### ATALANTE, laboratoire pour l'étude du cycle du combustible et de la gestion des déchets

Le laboratoire ATALANTE a été construit sur Marcoule pour regrouper les activités de recherche et développement du CEA sur le traitement du combustible usé et sur la gestion des déchets de haute activité. Ces études étaient réparties jusqu'aux années 90 sur les sites de Grenoble, Fontenay-aux-Roses et Marcoule.

Utilisé pour le soutien à l'industriel AREVA, et notamment aux usines de traitement de La Hague, le laboratoire ATALANTE est le pilier des



Le réacteur expérimental PHÉBUS permet de simuler un accident grave de perte de réfrigérant avec fusion du cœur dans un réacteur à eau. L'expérience porte sur la dégradation contrôlée d'une vingtaine de crayons avec le suivi des produits libérés dans une maquette du circuit primaire.



Le réacteur expérimental CABRI permet de simuler avec une bonne représentativité, notamment thermohydraulique et neutronique, les phases caractéristiques d'un accident de dimensionnement correspondant à l'insertion brutale de réactivité et donc de puissance dans un crayon combustible



Installation récente, le laboratoire ATALANTE, dont la mise en service actif a commencé en 1992, est un capital unique en Europe.

recherches sur la séparation poussée, avec le développement de nouvelles molécules extractantes et le génie chimique associé, pour la séparation des actinides mineurs en vue de leur recyclage en réacteur. Le laboratoire ATALANTE contribue aussi aux études de développement de nouveaux combustibles permettant le recyclage des actinides.

Enfin, le laboratoire ATALANTE permet de mener les recherches sur le comportement à long terme des déchets à vie longue et à haute activité ; ceci concerne notamment les recherches sur le comportement à long terme des verres. Les connaissances produites ont un impact direct sur les études de sûreté d'un stockage en formation géologique.

Pour valoriser ce capital, le laboratoire ATALANTE est ouvert sur la recherche académique, fédérant ainsi les meilleurs scientifiques sur des programmes menés dans l'installation. Une coopération forte avec l'Université et le CNRS se met en place avec la création d'un Institut de chimie. Par ailleurs, le laboratoire ATALANTE est au centre du réseau d'excellence européen ACTINET, lancé dans le cadre du 6<sup>e</sup> PCRD EURATOM dans le domaine de la physico-chimie des actinides, élément clé pour le futur de l'énergie nucléaire (combustible nucléaire, cycle du combustible, géochimie). L'objectif du réseau ACTINET est le développement de l'expertise et l'intégration de la recherche de base en Europe dans ce domaine stratégique.

### **Conclusion**

Héritant d'installations pour la plupart construites dans les années 60 à Fontenay-aux-Roses, Saclay, Grenoble et Cadarache, le CEA met en œuvre une politique de localisation des infrastructures sur ses centres. L'objectif est de disposer d'un ensemble réduit et optimisé d'installations pérennes.

Avec le futur réacteur d'irradiation Jules Horowitz, avec l'installation récente ATALANTE et les laboratoires LECl, LEFCA, LECA, rénovés ou en cours de rénovation, le CEA disposera dans la prochaine décennie de la capacité expérimentale pour le soutien et le développement de l'énergie nucléaire. ■

# Rôle de l'EPRI dans la promotion de la coopération internationale entre producteurs d'électricité pour la recherche en sûreté nucléaire et radioprotection

EPRI role in fostering international cooperation among utilities for research in nuclear safety and radiation protection

par Jean-Pierre Sursock, directeur du service "Développement international" - Electrical Power Research Institute (EPRI), et David J. Modeen, vice-président - EPRI

## Bref rappel historique

En 2004, plus de 321 centrales (sur 438) participent déjà au programme nucléaire international de l'EPRI, et ce nombre augmente chaque année. Deux tiers des participants à nos programmes viennent de pays autres que les États-Unis.

Cependant, la coopération internationale au sein de l'EPRI est presque aussi ancienne que l'organisation elle-même. La coopération dans le domaine du nucléaire avec EDF et le CEA a débuté dans les années 1975-1976. À cette époque, les questions relatives à la sûreté des réacteurs nucléaires constituaient une priorité de la R&D, notamment dans les domaines de la thermohydraulique, de la neutronique, de l'intégrité des matériaux et de la résistance à la corrosion. L'étendue de la coopération est toutefois restée faible pendant les années 1970, se limitant à l'étude comparative de codes informatiques et à l'échange de données expérimentales.

Après l'accident de Three Miles Island, la coopération internationale s'est intensifiée pour assurer une large utilisation des données opérationnelles. Par ailleurs, les études et les colloques qui ont fait suite à l'accident ont définitivement

rapproché les acteurs internationaux de la R&D nucléaire. Un nombre considérable de données et d'informations a été échangé librement pendant plus de vingt ans par-delà toutes considérations d'ordre commercial.

## Raison d'être du programme de R&D international

De nos jours, le désir d'avoir accès à un large ensemble de données opérationnelles et expérimentales demeure l'un des principaux moteurs de la coopération internationale, mais d'autres raisons entrent également en ligne de compte : la conscience de partager un certain nombre de préoccupations similaires, les tensions qui s'exercent sur les budgets de R&D en raison de l'éventail de plus en plus large des questions techniques et scientifiques à traiter et la recherche de la meilleure expertise et des meilleures installations expérimentales, où qu'elles se trouvent. Le fantastique développement des moyens de communication et de transport, par rapport à la période 1976-1980, a placé la coopération internationale au cœur de la stratégie de l'EPRI.

Cet article présente la contribution de l'EPRI à l'élargissement de la coopération internationale, notamment dans les domaines de la sûreté nucléaire et de la radioprotection, ainsi que les avantages importants qui en découlent pour l'ensemble des participants.

## Comment l'EPRI construit-il ses programmes de R&D internationaux ?

La première chose à souligner est qu'il s'agit de programmes de coopération. Cela signifie que les participants en partagent les risques au même titre que les bénéficiaires.

## Executive Summary

This paper describes EPRI's effort of expanding international collaboration, particularly in the areas of nuclear safety and radiation protection, and the substantial benefits accrued by all participants. We briefly review the history of international cooperation at EPRI and we describe the process by which international projects come into being. The bulk of the paper provides examples of international cooperation on projects of critical importance to nuclear power plants worldwide. These examples include projects related to material and fuel performance, non-destructive examination, corrosion, and Low Level Waste management. Both the stakes and the benefits associated with these collaborative projects are shown to be very high.

Généralement, les objectifs d'un projet technique émergent spontanément des nombreuses discussions au cours desquelles les producteurs d'électricité membres de l'EPRI sont invités à exprimer leurs besoins, de l'organisation et de la participation à des ateliers internationaux, et des impératifs particuliers en matière de sûreté ou de réglementation identifiés par les Autorités de sûreté.

L'EPRI commence généralement par définir un champ d'étude préliminaire, un calendrier et les résultats attendus, puis les affine à la lumière des principales observations émises par l'ensemble des participants au projet. En délimitant le champ d'étude, l'EPRI s'efforce d'adopter une approche équilibrée tenant compte des besoins et des priorités de chacun des participants. Enfin, pour la mise en œuvre du projet, l'EPRI choisit les meilleurs experts, installations expérimentales et données et logiciels disponibles, où qu'ils se trouvent. Comme nous l'avons déjà mentionné, l'éloignement géographique et la barrière de la langue ne sont plus des obstacles insurmontables. Pour recourir aux services du meilleur expert, il suffit de décrocher son téléphone ou d'envoyer un message électronique.

Les exemples ci-dessous illustrent la façon dont l'EPRI élabore et dirige un programme de R&D international.

### Exemples de programmes internationaux

#### Programme de fiabilité du combustible

Les producteurs d'électricité cherchent à augmenter le taux de combustion du combustible au-delà des limites actuelles (62 GWj/t aux États-Unis). Toutefois, cette augmentation n'est possible que si le combustible peut supporter sans danger des transitoires accidentels, tels que des accidents de perte de réfrigérant primaire (APRP) ou des accidents de réactivité. Des travaux sont en cours à l'EPRI, dans un cadre international, pour traiter le cas des APRP. Parallèlement, EDF a déjà fourni à l'EPRI des données très précieuses concernant des simulations d'accidents de réactivité, qui ont été utilisées pour élaborer les critères réglementaires relatifs aux accidents de réactivité actuellement examinés par la Nuclear Regulatory Commission (NRC).

La compagnie d'électricité suédoise Vattenfall a fourni des résultats d'analyse en cellule chaude des alliages de gaines de combustible à haut taux de combustion, connus sous les noms de Zirlo et M5, notamment des résultats concernant deux crayons combustibles en alliage Zirlo provenant des REP Ringhals-2 et -3 avec un taux de combustion allant jusqu'à 57 GWj/t. Un programme comparable est actuellement en cours à Studsvik pour procéder à l'examen destructif d'un alliage de gainage M5 Framatome exposé à des taux de combustion similaires.

L'UNESA (groupement d'électriciens espagnols) et l'ENUSA (fabricant espagnol de combustible) ont mis en place il y a plusieurs années un dispositif expérimental à Studsvik dans le but de mettre en évidence le mécanisme de décroissance du bore incriminé dans les cas d'anomalie du déséquilibre axial de puissance. Ils ont communiqué leurs résultats d'essais dans le cadre du programme de fiabilité du combustible et permis à l'EPRI d'apporter sa contribution aux expérimentations conduites dans leur centre.

L'EPRI collabore étroitement avec EDF pour modéliser les effets neutroniques sur l'anomalie du déséquilibre axial de puissance. La mise en commun des capacités de modélisation des effets neutroniques d'EDF (avec le code COCCINELLE) et des modèles de chimie et de dépôt développés par l'EPRI permet de mieux appréhender et de mieux quantifier l'impact du dépôt d'impuretés et celui de la décroissance du bore sur la réduction localisée du flux.

De plus, l'EPRI coopère avec EDF et le CEA pour développer un programme expérimental ambitieux visant à mesurer le coefficient de transfert de chaleur à travers la gaine du combustible et la couche d'oxyde dans des conditions d'anomalie du déséquilibre axial de puissance. Le programme expérimental, intitulé NESTOR, a débuté fin 2003 et se poursuivra jusqu'en 2005. Ses résultats devraient permettre d'améliorer le code de modélisation du risque d'anomalie du déséquilibre axial de puissance.

Depuis 1982, l'EPRI préside et dirige le groupe "Nuclear Fuel Industry Research" (NFIR), un groupement industriel international de producteurs d'électricité, de fabricants de combustible et de laboratoires de recherche comprenant plus de 25 membres. Le programme de recherche du NFIR s'attache à comprendre le comportement

en réacteur du combustible, des gaines, des grappes de commande et d'autres composants du cœur et de partager ces connaissances avec tous les représentants du secteur.

### Examens non destructifs (END)

Le programme d'END de l'EPRI cherche à améliorer les performances des procédés d'END en matière de détection de la fissuration par corrosion sous contrainte dans les traversées de tuyauteries et de couvercles de cuve. La fissuration par corrosion sous contrainte en présence d'eau du circuit primaire, par exemple, qui échappe à la détection par END du fait de capacités limitées ou de la mauvaise utilisation de ces procédés, a de fortes chances d'entraîner une fuite. Les fissures circulaires peuvent avoir de graves conséquences si elles ne sont pas détectées à temps et si on les laisse se propager. C'est pourquoi les END doivent être capables de détecter et de caractériser avec précision toute dégradation active. Douze producteurs d'électricité du monde entier participent à ce programme qui comprend des activités de R&D, de formation du personnel et de qualification des procédés d'END. Ainsi, la collaboration entre EDF et l'EPRI a permis de développer, d'évaluer et de mettre en œuvre une nouvelle technique multiéléments à ultrasons pour les inspections. EDF a également fourni de précieuses informations sur les technologies en matière d'inspection des soudures des couvercles de cuve et de l'alliage 182/82 et sur l'expérience acquise à cet égard en cours d'exploitation.

L'EPRI joue un rôle pionnier dans le développement et l'application du concept d'inspection en service fondée sur une analyse probabiliste des risques. L'objectif est de concentrer des ressources limitées sur les tuyauteries et composants sur lesquels des fuites sont le plus susceptibles de survenir ou sur lesquels les conséquences de telles fuites peuvent être graves. Dans les centrales américaines, l'application de cette méthode a entraîné une amélioration de la sûreté et une réduction significative des doses de rayonnement (50 à 80 % de réduction par rapport aux programmes précédents). En Europe cependant, cette méthode a d'abord été perçue comme visant principalement une réduction des coûts et elle a donc été assez mal accueillie. Toutefois, de récentes expériences pilotes en Suisse et en République tchèque sont en cours d'achèvement et devraient permettre de démontrer l'utilité de

cette méthode en termes de sûreté. Le succès de ces programmes internationaux a contribué à renforcer la confiance dans les méthodes fondées sur une analyse probabiliste des risques.

### Programme de fiabilité des matériaux

L'EPRI a mis en place le programme international Joint Owners Baffle Bolt (JOB) pour travailler en collaboration avec EDF et étudier les effets des rayonnements sur les internes de cuve des REP. Des études ont été menées à la fois en France (EDF - site des Renardières) et aux États-Unis. Le programme prévoyait de nombreux essais et des simulations analytiques destinés à mettre en évidence les conditions dans lesquelles la dégradation de la visserie du cloisonnement de cœur est susceptible de survenir. Ce programme étudiait également les méthodes d'inspection, les matériaux nouveaux plus performants et les effets mécaniques et corrosifs sur les composants irradiés. Ces études ont abouti à la rédaction de lignes directrices et de rapports très complets destinés à aider les producteurs d'électricité à évaluer l'état de leurs centrales et à prendre d'éventuelles mesures correctives.

Récemment, plusieurs centrales nucléaires américaines utilisant l'alliage Inconel 600 pour les adaptateurs de traversées de couvercle permettant le passage des tiges des grappes de commande ont mis en évidence d'importantes fissures et dégradations sur le couvercle de la cuve. Au début des années 90, EDF avait été largement confrontée à ce phénomène. Elle a ainsi pu fournir à l'EPRI de précieuses informations concernant l'exploitation et l'inspection, et transmettre son expertise en matière d'évaluation et de prise de mesures appropriées. Plus récemment, le problème a été repéré dans des REP en Espagne et au Japon. Un programme international abordant cette question a donc été mis sur pied **de facto**, dans lequel les échanges de données et d'informations jouent un rôle primordial.

### Programme de gestion du générateur de vapeur

Huit pays d'Europe et d'Asie, ainsi que tous les producteurs d'électricité des États-Unis, participent à ce programme. Ce dernier vise à assurer la sûreté du réacteur en réduisant ou en éliminant la probabilité d'une rupture de tube et à contrôler, ou à atténuer, les effets des fuites afin

de diminuer encore le nombre d'arrêts forcés. Cette approche passe par une amélioration des méthodes d'inspection, de réparation et de remplacement ainsi que des méthodes analytiques de caractérisation de la fissuration par corrosion sous contrainte et des autres phénomènes à l'origine des fissurations.

Les participants échangent des données détaillées et l'expérience acquise en cours d'exploitation. Les données sont intégrées à la version révisée des règles relatives à l'inspection des générateurs de vapeur des REP, qui proposent des instructions pratiques pour optimiser les conditions d'exploitation, la chimie et les intervalles d'inspection. Ce document, révisé tous les deux ans lors de la publication des nouvelles données, est d'une aide inestimable pour tous les producteurs d'électricité concernés.

### **Fissuration par corrosion sous contrainte dans les réacteurs à eau bouillante**

Le soudage de matériaux irradiés est problématique du fait des bulles d'hélium qui se forment dans l'acier au fur et à mesure que la fluence s'accumule. La libération de l'hélium au cours des opérations de soudage induit des phénomènes de porosité et de fissuration. Dans certains cas, le soudage est la solution optimale ou l'unique moyen de réparer ou de remplacer la structure endommagée à l'intérieur de la cuve du réacteur.

L'EPRI a reçu des informations particulièrement intéressantes du Japanese Owners Group (JOG) sur les techniques de soudage des matériaux irradiés, notamment les résultats d'expériences menées afin de définir la concentration maximale d'hélium en présence de laquelle la technique de soudage traditionnelle peut être utilisée, ainsi que des résultats d'expériences impliquant des techniques permettant de souder du métal renfermant des concentrations d'hélium plus importantes. Les informations communiquées par le JOG ont permis au programme sur les internes de cuve de REB d'élaborer une série de lignes directrices sur la réparation par soudage des composants irradiés des REB.

### **Recherche sur la corrosion**

La corrosion des tuyauteries, dans des conditions normales d'exploitation du réacteur, n'est pas encore une science exacte et prévisible. Le code

informatique CHECWORKS, largement utilisé par l'industrie nucléaire dans le monde entier, est construit à partir d'une série de corrélations empiriques qui visent à caractériser le degré d'amincissement des parois dû à la corrosion accélérée par le débit dans différentes conditions de géométrie et d'exploitation. Ces corrélations empiriques résultent de la compilation d'une importante quantité de données opérationnelles provenant du monde entier. Six pays ont participé et continuent de participer à ce projet dans le cadre du CHECWORKS Users Group.

La corrosion accélérée par le débit fait actuellement l'objet d'une étude conjointe de l'EPRI et d'EDF sur le site de recherche des Renardières. Cette étude s'attache plus particulièrement à élucider le rôle joué par l'hydrazine et l'oxygène dans la corrosion accélérée par le débit en conditions d'exploitation, ainsi que l'influence de faibles quantités de chrome sur cette même corrosion. La première phase du projet a permis de conclure que l'hydrazine n'avait aucun effet sur la corrosion accélérée par le débit à la température de 180 °C. Cette conclusion est importante car l'hydrazine, qui est utilisée pour contrôler la corrosion dans les générateurs de vapeur, avait d'abord été accusée d'aggraver la corrosion accélérée par le débit. Les travaux se poursuivent à des températures plus élevées et à des pH différents afin de continuer de quantifier les effets de l'hydrazine sur les taux de corrosion accélérée par le débit. Après la clôture de ces travaux, d'autres études en laboratoire seront menées pour déterminer le rôle joué par de faibles quantités de chrome.

### **Gestion des déchets de faible activité et contrôle des radiations**

L'EPRI travaille en étroite collaboration avec tous ses membres pour contrôler les champs de rayonnement et l'exposition professionnelle, notamment par l'application de techniques de nettoyage et de procédés chimiques de décontamination qui ont donné lieu à l'octroi de licences dans plusieurs pays. Le commissariat à l'énergie atomique britannique (United Kingdom Atomic Energy Authority – UKAEA), avec son centre de Dounreay, dans le nord de l'Écosse, participe au programme de déclassement de l'EPRI, de même que plusieurs organismes en Italie, en France, au Japon, en Espagne et à Taiwan. Les ingénieurs de Dounreay ont commencé à utiliser WasteLogic, le logiciel de gestion des déchets de

faible activité développé par l'EPRI, ce qui leur a permis de réaliser plusieurs millions de dollars d'économies annuelles. Dans le cadre de ce projet, l'UKAEA a participé au développement du module de gestion multisites, faisant progresser de manière significative les activités d'élaboration de logiciels prévues pour 2004. L'un des objectifs du programme de déclassement est de faire bénéficier tous les membres de l'EPRI des enseignements tirés de l'expérience américaine. A cette fin, l'EPRI organise chaque année un atelier international sur le déclassement et une conférence internationale sur les déchets de faible activité.

Le Programme d'évaluation des déchets de faible activité de l'EPRI, appliqué avec succès par tous les membres américains de l'EPRI au cours des dix dernières années, a récemment été mis en œuvre par plusieurs autres membres de l'EPRI. Des évaluations des déchets de faible activité ont été réalisées au Canada, au Royaume-Uni, au Japon et au Brésil, et vont bientôt être entreprises en Espagne, à Taïwan et en France.

### Conclusions

Il est difficile d'estimer la valeur globale des contributions apportées ces dernières décennies au programme nucléaire de l'EPRI par les producteurs d'électricité du monde entier. Les contributions financières, notamment les financements directs et les données/résultats de recherches pour les seules quatre dernières années sont estimés à environ 140 millions de dollars, ce qui représente un pourcentage considérable du budget global de R&D nucléaire de l'EPRI.

Toutefois, la contribution des exploitants du monde entier ne se résume pas à cela : sa véritable valeur réside dans l'échange d'idées ouvert et dans le type de coopération qui ont été instaurés entre plus des trois quarts des centrales nucléaires en exploitation dans le monde, dans la capacité à obtenir les informations et l'expertise où qu'elles se trouvent, et dans la réponse quasi instantanée rendue possible par un langage, une technologie, une culture de la sûreté, des valeurs et un sens des responsabilités mutuelles partagés par tous. ■

# Collaboration Autorités de sûreté-industrie pour la recherche en sûreté nucléaire : synthèse des travaux menés par le groupe de travail international (GRIC)

Cooperation between safety authorities and industry in the field of nuclear safety research

par **Philippe Jamet**, directeur adjoint de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN),  
Président du GRIC (Group on regulators and industry cooperation) - OCDE-AEN

## Introduction

La collaboration entre différents acteurs nationaux est un mode d'organisation courant pour la réalisation de recherches en sûreté. À cet égard, la collaboration entre les Autorités de sûreté et l'industrie présente des avantages, mais peut aussi avoir des inconvénients.

Un groupe de travail a été créé en 2002 par l'Agence pour l'énergie atomique de l'OCDE pour identifier les avantages et inconvénients d'une collaboration entre les Autorités de sûreté et l'industrie nucléaire dans le domaine de la recherche en sûreté, et formuler des recommandations permettant d'instaurer des collaborations efficaces, tout en respectant les exigences d'indépendance auxquelles les Autorités doivent satisfaire. Le contexte dans lequel le groupe a été créé, sa composition et son fonctionnement, ainsi que la synthèse de ses recommandations sont présentés dans les paragraphes suivants.

## Contexte général

Les réflexions menées depuis plusieurs années par l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE ont clairement mis en évidence une réduction significative des budgets consacrés par l'industrie nucléaire à la recherche. L'accroissement de la pression économique lié à la déréglementation et à la mise en concurrence des compagnies productrices d'électricité explique très largement cette tendance.

Au cours de la même période, les financements publics alloués à la recherche ont également subi une diminution progressive, mais notable, dans de nombreux pays de l'OCDE.

Ces restrictions n'épargnent pas la recherche en

sûreté. Si elles persistaient, elles pourraient conduire à ce que les industriels et les Autorités ne disposent plus à terme des connaissances nécessaires à l'exercice de leurs responsabilités. Il apparaît donc indispensable de conserver des équipes compétentes, ainsi que les installations et laboratoires nécessaires à l'obtention des connaissances nouvelles qui permettront aux industriels et aux Autorités de prendre des décisions reposant sur des bases techniques solides.

La collaboration entre industriels et autorités dans le domaine de la recherche en sûreté est déjà largement pratiquée dans de nombreux pays de l'OCDE. Elle permet une économie des moyens significative et contribue à éviter les redondances inutiles. Son renforcement pourrait contribuer à maintenir la recherche en sûreté au niveau voulu.

Par ailleurs, l'indépendance de jugement des Autorités de sûreté est une exigence fondamentale. La collaboration avec les industriels doit donc être organisée de façon à préserver cette indépendance, notamment lorsqu'il s'agit de tirer

## Executive Summary

A group constituted by senior research manager was set up in December 2001 by the Nuclear Energy Agency of the OECD, with the mandate to identify and review the issues which hinder closer co-operation on research between regulators and industry and to propose possible ways for resolving such issues while maintaining regulatory independence in decision-making.

The Group has analysed the potential advantages and disadvantages of regulator-industry collaboration in safety research and concludes that effective collaboration is both feasible and beneficial provided that regulatory independence is maintained.

The group has proposed recommendations, based on best practises in OECD countries, in order to promote effective regulator-industry collaboration, while maintaining regulatory independence in decision-making and its ability to demonstrate this independence to the public.

les conclusions d'une recherche pour fonder des décisions réglementaires. En outre, l'indépendance des autorités de sûreté est très importante pour le public. À cet égard, il ne suffit pas que l'Autorité soit objectivement indépendante, il faut également qu'elle soit en mesure de démontrer cette indépendance aux yeux du public.

Les considérations précédentes ont été largement développées lors du colloque organisé par l'agence de l'énergie atomique de l'OCDE à Paris en juin 2001, sur le "rôle de la recherche dans le contexte de la réglementation nucléaire". Il a alors été décidé de créer un groupe de travail international (GRIC), formé de responsables de haut niveau en matière de recherche, dont la mission était de mettre en évidence et d'examiner les obstacles à une collaboration plus étroite dans le domaine de la recherche entre les Autorités de sûreté et l'industrie nucléaire, et de proposer des solutions permettant de surmonter ces obstacles, tout en préservant l'indépendance des autorités.

### Constitution et fonctionnement du GRIC

La composition du GRIC, par pays et par organisme, était la suivante :

- |               |                    |
|---------------|--------------------|
| • Allemagne   | GRS                |
| • Canada      | CANDU Owners Group |
| • États-Unis  | EPRI - NRC         |
| • France      | EDF - IRSN         |
| • Japon       | NSC                |
| • Royaume Uni | HSE                |
| • OCDE        | AEN                |

On notera que les pays disposant des plus vastes programmes de recherche étaient représentés dans le groupe.

Les travaux du GRIC se sont déroulés entre décembre 2001 et novembre 2002. Trois réunions plénières ont été organisées. Le groupe a également procédé à de nombreux échanges d'informations et consultations. Il a également réalisé une enquête, par le biais d'un questionnaire, auprès des pays membres de l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE, dans le but de recueillir leurs points de vue, leurs expériences et leurs propositions, s'agissant de la collaboration dans le domaine de la recherche en sûreté.

Les travaux du GRIC ont donné lieu à la publication d'un rapport public de l'Agence

(Coopérations autorités de sûreté industrie pour la recherche en sûreté nucléaire – Défis et potentialités – ISBN 92-6-02127-2).

### Intérêt de la collaboration entre les Autorités et l'industrie

Les travaux préliminaires du groupe ont clairement confirmé que la recherche restera nécessaire pour maintenir dans l'avenir un haut niveau de sûreté. En effet, les industriels et les Autorités seront inévitablement confrontés à de nouvelles questions relatives à l'exploitation des centrales nucléaires, à l'utilisation de nouveaux matériaux ou de nouvelles technologies, et à des évolutions réglementaires qui nécessiteront des connaissances nouvelles pour trouver des réponses satisfaisantes. Dans cette perspective, et dans le contexte des restrictions de crédits de recherche déjà évoquées, il apparaît effectivement utile d'examiner les avantages et inconvénients éventuels d'une collaboration dans le domaine de la recherche entre l'industrie et les Autorités de sûreté, en prenant spécifiquement en compte la nécessité de préserver l'indépendance de jugement des Autorités et leur capacité à démontrer cette indépendance.

L'analyse du groupe a permis d'identifier des avantages importants à la collaboration, notamment :

- l'amélioration de la communication, de la compréhension mutuelle sur le plan technique, de la clarté des engagements pris par les deux parties ; les recherches menées en collaboration permettent des échanges se situant dans un contexte différent des confrontations habituelles entre l'Autorité et l'industrie et contribuent à ce que chacun des participants ait une perception plus large et approfondie des questions importantes ;
- la mise en commun des compétences permettant de mieux exploiter l'ensemble des connaissances détenues par les diverses organisations pour planifier et réaliser des programmes ;
- un meilleur accès à des échantillons de matériaux et aux données d'exploitation ainsi qu'une certitude accrue du réalisme et de la pertinence des programmes de recherche, s'agissant en particulier des événements de faible probabilité ;
- un meilleur rapport coût-efficacité, grâce au partage des coûts, associé à un moindre risque de duplication inutile des travaux ;

- une capacité accrue de préserver les installations et les compétences indispensables pour la recherche sur la sûreté et de développer l'utilisation des installations nationales et internationales grâce à des programmes communs.

Au regard des inconvénients éventuels de la collaboration, le groupe s'est surtout attaché à formuler des recommandations permettant d'organiser une collaboration efficace, tout en préservant la transparence et l'indépendance du processus de décision des Autorités.

### **Recommandations pour la mise en place d'une collaboration efficace**

Après analyse des meilleures pratiques mises en œuvre dans les pays membres de l'OCDE, le groupe de travail a formulé les principales recommandations suivantes, destinées à favoriser une collaboration efficace entre les Autorités de sûreté et l'industrie :

- il est souhaitable que l'industrie nucléaire et les Autorités de sûreté entreprennent chacune pour leur part un examen approfondi de leurs propres priorités et objectifs avant de les confronter et de déterminer s'il est préférable de mener des travaux de recherche conjointement ou indépendamment ; une telle démarche a pour but d'éviter des confrontations stériles sur des projets qui ne peuvent être conclus faute d'un accord préalable sur les objectifs et la portée du programme ; ce cas peut par exemple être rencontré lorsqu'un industriel ne souhaite faire qu'un nombre limité d'essais pour démontrer le bon comportement d'un matériel dans des conditions données, alors que l'Autorité souhaite explorer une gamme plus large de conditions, pour évaluer les marges par rapport à un effet redouté ; des discussions approfondies avant d'engager un programme contribuent également à éviter de découvrir que des divergences sur les objectifs existent alors que des travaux sont déjà largement engagés et qu'un éventuel changement de leur orientation suscite des difficultés considérables ;
- lors de la phase de définition d'un projet de recherche, l'industrie et les Autorités de sûreté devraient préciser explicitement leurs objectifs mutuels, spécifier les résultats qu'ils attendent et indiquer clairement l'étendue, le calendrier, les produits et les coûts de façon à minimiser la probabilité d'un conflit ultérieur ;

- un accord sur la propriété des données et la diffusion des résultats doit être formalisé avant l'engagement des travaux de recherche ;
- de bonnes pratiques en matière de gestion technique et administrative des projets doivent être suivies ;
- la collaboration internationale doit être favorisée dans la mesure où elle est une voie privilégiée pour garantir la pertinence des programmes et la qualité de leurs résultats.

### **Recommandations pour la mise en place d'une collaboration préservant l'indépendance de jugement des Autorités**

Le groupe de travail n'a pas cherché à préciser l'ensemble des conditions permettant de préserver l'indépendance des Autorités. Une telle réflexion aurait fait appel à des considérations générales de natures politique, institutionnelle et économique qui auraient très largement dépassé le mandat du GRIC. En revanche, le groupe s'est interrogé sur les conditions dans lesquelles la recherche collaborative peut être effectuée, sans nuire à l'indépendance de jugement des Autorités.

Dans cette optique, il a été considéré qu'une condition indispensable à l'indépendance de jugement des Autorités est leur compétence propre ou la possibilité qui leur est donnée de s'appuyer sur une expertise technique indépendante des industriels, pour prendre leurs décisions. Par ailleurs, le groupe s'est interrogé sur la possibilité que les collaborations en matière de recherche brouillent la frontière entre le rôle de l'Autorité et celui des industriels, en particulier dans le cas d'un financement partagé. À cet égard, il ressort du questionnaire du GRIC que, dans les pays membres de l'OCDE, le public ne s'est jusqu'ici pas particulièrement inquiété du risque de perte d'indépendance que les partenariats de recherche pourraient faire courir aux autorités. Néanmoins, ce sujet est apparu suffisamment sensible pour que le groupe de travail le prenne en compte dans ses travaux.

Le GRIC a émis les recommandations suivantes pour la mise en place de collaborations permettant de préserver l'indépendance de jugement des Autorités, et de démontrer cette indépendance aux yeux du public :

- les recherches collaboratives devraient être effectuées dans le cadre d'accords qui explicitent

clairement les rôles respectifs des Autorités et des industriels, et qui prévoient un accès adapté du public aux objectifs de la recherche, aux moyens mis en œuvre et aux résultats obtenus ; à cet égard, le groupe a souligné l'intérêt d'établir un accord général précisant de façon transparente les motivations et les principes de la collaboration ;

- au moment du lancement d'un projet particulier, un accord précisant le contexte, les bases techniques, les objectifs, les produits visés, le calendrier, les coûts, les modalités de diffusion de l'information et de gestion du projet devrait être rédigé pour favoriser la transparence : les transactions financières intervenant au cours du projet doivent se dérouler en suivant des règles bien définies et être accompagnées de pièces justificatives ;
- il a déjà été précisé au chapitre consacré à l'efficacité des collaborations que les Autorités et l'industrie devraient définir séparément leurs priorités et objectifs respectifs avant d'engager les discussions nécessaires à l'organisation d'éventuelles collaborations ; à l'issue de cette phase de réflexion interne, les Autorités devraient conserver la possibilité de réaliser pour leur propre compte des recherches qu'elles ne souhaitent pas effectuer en collaboration ; par ailleurs, si les discussions visant à organiser une collaboration échouent, les Autorités devraient également conserver la possibilité de réaliser, seules ou avec d'autres partenaires, les travaux qu'elles jugent indispensables ;
- la collaboration devrait, en règle générale, se limiter à l'obtention de données objectives ; l'interprétation des données devrait de préférence être effectuée indépendamment, et les Autorités de sûreté devraient, dans tous les cas, tirer leurs propres conclusions des recherches communes ; la mise au point des modèles et des codes de calcul devrait faire l'objet d'une attention particulière, pour préserver l'indépendance de l'Autorité ;
- un contrôle indépendant des travaux menés en collaboration devrait être envisagé, dans la mesure où le recours à des avis indépendants (par exemple, examen par des pairs ou confrontation à des résultats internationaux) contribue à renforcer l'indépendance.

### Conclusion

De façon générale, les travaux menés par le GRIC ont mis en évidence que la collaboration entre les Autorités et l'industrie pour la recherche en sû-

reté présente des avantages très significatifs. Le groupe a également examiné les difficultés qui peuvent naître de telles collaborations. À cet égard, il a formulé des recommandations opérationnelles, fondées sur les meilleures pratiques mises en œuvre dans les pays membres de l'OCDE, pour instaurer une collaboration efficace tout en préservant l'indépendance des Autorités de sûreté et leur capacité à démontrer cette indépendance aux yeux du public. ■

# Coopération Euratom en recherche sur la sûreté nucléaire et la radioprotection : vers une véritable intégration européenne ?

Euratom cooperation in research into nuclear safety and radiation protection: a step towards true european integration?

par Hans Forsström, et Georges van Goethem, Direction générale de la recherche, Direction J : Énergie, Unité J.4 : Fission nucléaire et radioprotection – Commission européenne

## Introduction

Au sommet de Lisbonne, en 2000, l'Union européenne s'est proposé un but stratégique : "devenir l'économie de la connaissance la plus compétitive, avec plus d'emplois et plus de cohésion sociale avant 2010". Cette proposition a été bien accueillie par le monde de la recherche en général, et en particulier par les acteurs principaux de la fission nucléaire. Ces acteurs principaux sont naturellement les "fournisseurs" et les "utilisateurs" de connaissances nucléaires, c'est-à-dire les instituts de recherche (que ce soit avec financement public et/ou privé), les fabricants d'équipement, les exploitants d'installations nucléaires, les Autorités de sûreté nucléaire (ou leurs organismes de support technique) et le monde académique.

Le but de la recherche communautaire dans le domaine de la sûreté nucléaire et de la radioprotection est double. D'une part, elle devrait fournir des résultats utiles en support aux réglementations dans ces domaines et à la poursuite du fonctionnement sûr des installations nucléaires. D'autre part, elle devrait améliorer la coopération entre les acteurs principaux afin de mieux utiliser les rares ressources et de développer une base commune de connaissance pour prendre des décisions. Ceci est en ligne avec la stratégie de l' "Espace européen de la recherche" (EER).

## Sûreté des réacteurs

La recherche sur la sûreté des réacteurs nucléaires est focalisée sur 3 domaines spécifiques : gestion de la durée de vie des installations, accidents graves et concepts de sûreté évolutionnaires. Au total, plus de 70 projets ont été soutenus par la Commission dans le 5<sup>e</sup> PCRD,



avec un financement communautaire de près de 45 M€. Quelques exemples de ces projets sont présentés dans cet article. De plus, la Commission soutient des projets sur les réacteurs innovants, tels que les réacteurs de génération IV: ceci n'est pas décrit dans cet article.

## Gestion de la durée de vie des installations nucléaires existantes

Dans le domaine de l'intégrité des structures et équipements, la recherche communautaire se concentre sur les effets des rayonnements sur les propriétés mécaniques des structures, en

## Executive Summary

This article describes the research being supported by the European Commission in the areas of safety of existing reactors and radiation protection. The main topics for reactor safety are plant life management, severe accident management and evolutionary safety concepts. In radiation protection much of the research is devoted to the understanding of risks of low and protracted exposures, but also to more applied radiation protection like radioecology, dosimetry and radiation protection in connection with medical uses of radiation. One topic of common interest is the knowledge management, an issue of importance in connection with the creation of the "European Research Area".

particulier la ténacité des aciers de cuve, ainsi que sur le vieillissement des équipements importants pour la sûreté.

En ce qui concerne la température de transition ductile-fragile des aciers de cuve, plusieurs projets de recherche communautaire travaillent sur de nouvelles méthodes prédictives de type indirect ("Charpy") ou direct ("master curve"). Une attention particulière est portée sur la ségrégation de phosphore sur les bords des grains, sur l'évolution des contraintes internes et sur la corrosion.

Un projet communautaire a également étudié les synergies possibles entre les réacteurs d'essai de matériaux (qui en Europe approchent en général de l'âge de 40 ans) et les besoins futurs dans ce domaine. Un réacteur d'essai virtuel est également en cours de développement : ce projet très ambitieux devrait produire un outil puissant de simulation numérique pour l'impact des irradiations sur les propriétés des matériaux, fondé sur une modélisation multiéchelle.

En ce qui concerne la fracture par corrosion sous contrainte et sous irradiation (IASCC), plusieurs projets se concentrent sur les soudures bimétalliques. Une série de recommandations ont été proposées aux industriels (pour réduire les coûts de maintenance) et aux Autorités de sûreté (pour améliorer le dossier de sûreté).

Quant aux techniques de surveillance en ligne, la recherche communautaire étudie le circuit de refroidissement (par exemple : méthodes ultrasoniques pour la détection de fissures ou électrode de référence pour mesurer le potentiel électrochimique) et l'enceinte de confinement (par exemple : optimisation du suivi des dommages subis par le béton au cours de la vie de la centrale). Pour la maintenance et l'inspection des centrales, on a de plus en plus recours à l'approche dite "risk-informed". Ceci est étudié dans le réseau ENIQ qui a produit des standards "de facto", acceptés par tous les acteurs nucléaires, pour une meilleure stratégie d'inspection tout en garantissant le maximum de sûreté aux structures et aux équipements.

Plusieurs projets, faisant appel aux sciences "douces", étudient les chaînes de responsabilité et le contrôle qualité dans la gestion de l'installation ainsi que les techniques de documentation, dans le but d'optimiser l'interface homme/machine/société.

L'Union européenne, élargie à 25 États membres (UE-25), dispose de 16 VVER sur un total de 155 réacteurs nucléaires. L'harmonisation des normes et procédures de fonctionnement des VVER a fait l'objet de quelques projets de recherche, rassemblant électriciens, chercheurs et organismes de sûreté, principalement dans les nouveaux États membres.

### Étude des accidents graves

L'étude du terme source radiologique nécessite de grosses installations expérimentales, telles que le réacteur français PHÉBUS, et de gros moyens de calcul. Ce thème fait l'objet de nombreux projets communautaires, en coopération avec d'autres organisations internationales. Certains projets s'intéressent à la phénoménologie des accidents graves : Quelles sont les sollicitations extérieures sur les barrières de protection (par exemple : thermique, mécanique et/ou irradiation) ? Quelle est alors la réponse de ces barrières (par exemple : contraintes et déformations, perforation, dégradation des propriétés mécaniques) ?

Le programme communautaire se concentre sur la dégradation du cœur du réacteur, le comportement du corium (matériaux du cœur en fusion), l'interaction du corium avec le réfrigérant et avec la cuve du réacteur, la production d'hydrogène et, enfin, la dispersion des produits de fission sous forme gazeuse, liquide ou solide. Le but de ces études est de développer un code de simulation numérique pour pouvoir extrapoler de l'échelle du laboratoire à la réalité réacteur et ainsi mettre au point des mesures d'intervention actives ou passives.

Dans le domaine de la réduction des conséquences d'accidents graves (mesures de mitigation), le but de la recherche communautaire est d'éliminer "en pratique" certains phénomènes d'accidents graves et de développer des mesures de mitigation pour les autres phénomènes. Pour les réacteurs à eau sous pression et REB, deux techniques de refroidissement du corium sont proposées : noyage du puits du réacteur et/ou injection de réfrigérant sur le cœur en fusion. Pour les réacteurs à eau bouillante, en particulier, des mesures de mitigation sont proposées pour réduire l'impact d'un éventuel retour en criticité. Pour la mitigation du risque hydrogène, la recherche communautaire s'est concentrée sur les recombineurs autocatalytiques passifs.

### Concepts évolutionnaires

Le but de la recherche communautaire est de simplifier la conception du réacteur et d'améliorer l'interface homme/machine, tout en réduisant fortement tout risque d'accident grave. Les systèmes passifs d'évacuation de la chaleur résiduelle sont au centre de ces études. Cela exige, en particulier, de nombreux développements en mécanique des fluides numérique. De bonnes pratiques ont ainsi été développées (certifiées ISO 9001-2000) qui permettent de gérer efficacement de grandes masses de données expérimentales et de modules de calcul. Les industriels, intéressés par ces concepts innovants, ont d'ailleurs formé un réseau, Michelangelo, dont le but est de développer une stratégie de recherche commune.

### Gestion des connaissances

Un "réseau européen d'enseignement nucléaire" (ENEN/NEPTUNO) est en développement, dont le but est la création d'un diplôme Euromaster, fondé sur les mécanismes d'accréditation de Bologne (1999) et contenant une obligation de suivre une partie de sa formation à l'étranger. Un autre projet (STRESA/SINTER) a mis au point une base de données distribuée sur Internet : chaque membre de ce "laboratoire virtuel" a accès aux données expérimentales des autres sans passer par un serveur central.

### Radioprotection

La recherche en radioprotection a deux composantes principales : la compréhension des risques aux doses faibles et prolongées et une application plus pratique de la radioprotection.

La recherche sur les effets des faibles doses inclut la recherche fondamentale en radiobiologie au niveau des cellules ou des molécules d'ADN pour comprendre les mécanismes mis en jeu et les études épidémiologiques des populations exposées pour établir les limites supérieures des risques. Des exemples de telles populations sont les travailleurs de l'industrie nucléaire, les travailleurs des mines souterraines d'uranium, les habitants et les travailleurs proches des complexes nucléaires russes dans le sud de l'Oural, les personnes habitant près de Tchernobyl et les personnes exposées au radon dans les habitations.

La recherche sur les applications pratiques comprend la gestion de risque et crise, la dosimétrie, la radioécologie, les conséquences du rayonnement naturel et les utilisations médicales des rayonnements.

### Gestion de risque et crise

La recherche communautaire dans ce domaine répond à une politique claire, établie après l'accident de Tchernobyl (1986) : améliorer l'efficacité et la cohérence de la gestion de crise post-accidentelle en Europe. Une série de projets, auxquels participent une dizaine de pays de l'Union européenne et une dizaine de pays d'Europe centrale et orientale, ont développé, en particulier, un système d'aide à la décision pour la gestion de crise en dehors du site de l'installation nucléaire.

Dans la région contaminée par l'accident de Tchernobyl, une approche décentralisée a été proposée et testée pour redonner confiance aux agriculteurs et les rendre responsables de la réhabilitation des terres contaminées.

Un réseau d'échange d'informations est également développé autour de l'approche ALARA en collaboration avec l'AIEA. Enfin, des recherches sont conduites sur la gouvernance du risque (TRUSTNET) en incluant tous les acteurs, depuis les industriels jusqu'à l'homme de la rue.

### Dosimétrie

En dosimétrie interne, des modèles physiologiques ont été développés pour les systèmes respiratoire et gastro-intestinal de l'homme dans les cas d'inhalation, d'ingestion ou d'absorption de matières radioactives. En dosimétrie externe, l'accent est mis sur la mesure d'expositions neutroniques sous rayonnement mixte (par exemple neutronique, gamma, etc.) tels que ceux auxquels sont soumis les travailleurs du nucléaire.

### Protection de l'environnement et radioécologie

En ce qui concerne la protection de l'environnement, la recherche communautaire porte sur les différences qui existent entre effets sur l'homme et l'environnement ainsi que sur les spécificités des irradiations, comparées à d'autres polluants. Ce type de recherche - en avance par rapport au

reste du monde - est directement applicable aux nouvelles normes et recommandations (par exemple CIPR, AIEA et OECD/AEN), qu'exige la protection de l'environnement soumis aux rayonnements.

Cette recherche fait l'objet de plusieurs projets sur la radioécologie des systèmes terrestres ou aquatiques contaminés.

### Rayonnement naturel

La recherche concerne le radon dans les habitations (un réseau d'échange d'informations a proposé des améliorations des techniques de construction), l'exposition des pilotes d'avion aux rayonnements cosmiques (des nouveaux modèles de prédiction ont été développés dans le but de mieux déterminer l'exposition de l'équipage des avions), et les matériaux radioactifs présents dans la nature qui ont été concentrés à la suite d'opérations techniques.

### Utilisations médicales des rayonnements

La recherche dans ce domaine est en support de la Directive du Conseil sur les expositions médicales (sortie en 1997, mise en œuvre en 2000). Une série de "critères de qualité" ont été publiés pour les images de diagnostic radiographique, la mammographie et la tomographie digitale. Ce type de recherche se limite en réalité à l'optimisation de l'information radiologique et à la protection du patient. Certains projets s'intéressent également à l'usage d'images radiologiques comme aide à certaines interventions chirurgicales.

### Conclusion

Ce rapide aperçu de la recherche communautaire Euratom en sûreté nucléaire et radioprotection a montré que la coopération scientifique en Europe existe bien et est bénéfique pour l'ensemble des acteurs principaux.

Si l'on veut cependant améliorer l'efficacité et diminuer le coût de cette recherche communautaire Euratom, il faut passer à l'étape suivante, c'est-à-dire à une véritable intégration au niveau européen dans une stratégie commune qui implique et engage directement les décideurs politiques, industriels et réglementaires. C'est là l'un des défis majeurs de l'"Espace européen de la recherche" nucléaire, et en particulier du 6<sup>e</sup> PCRD (2002-2006). ■

**C O N T R Ô L E .**  
la revue de l'Autorité de sûreté nucléaire,  
est publiée conjointement par  
le ministère de l'économie, des finances et de l'industrie  
ministère délégué à l'industrie,  
le ministère de la santé et de la protection sociale  
et le ministère de l'écologie et du développement durable

6, place du Colonel Bourgoin, 75572 Paris Cedex 12  
Diffusion : Tél. : 33 (0)1.40.19.88.16 – Fax : 33 (0)1.40.19.87.31  
E-mail : DGSNR.PUBLICATIONS@asn.minefi.gouv.fr

Directeur de la publication : André-Claude LACOSTE,  
Directeur général de la sûreté nucléaire et de la radioprotection  
Directeur de publication délégué : Alain DELMESTRE

Rédactrice en chef : Agnès HUGUET  
Secrétaire de rédaction : Gérard DUVERT  
Coordinateur du dossier : Olivier GUPTA

Photos : ASN, AREVA, CEA, EDF, IRSN, Loup, ministère de la Recherche, NRC,  
Médiathèque centrale de la Commission européenne  
Photo de couverture : T. Foulon/CEA

ISSN : 1254-8146 – Commission paritaire : 1294 AD  
Réalisation : ARTYG – Imprimerie : ROLLIN, 41913 Blois Cedex 9

### ERRATUM

Dans *Contrôle* n° 158 intitulé "La radioprotection des travailleurs", l'affectation de M. Patrick Fracas, auteur de l'article "Décret travailleurs" au CEA : de l'intégration des exigences à l'optimisation des pratiques" (p. 63), est erronée. M. Fracas travaille bien au Commissariat à l'énergie atomique (CEA) et non pour le compte du groupe AREVA, comme mentionné en tête de l'article. La rédaction de *Contrôle* prie l'auteur et les lecteurs d'accepter ses excuses pour cette erreur.