

# Projet EPR : rôle et point de vue de l'Autorité de sûreté nucléaire

Role and point of view of the French Nuclear Safety Authority on EPR

par Philippe Dupuy, Olivier Gupta, Jean-Renaud Perez, DGSNR – Sous-direction des réacteurs de puissance

C'est à la demande du gouvernement que l'ASN a commencé, dès les années 90, à examiner la sûreté des futurs réacteurs nucléaires. Cette implication précoce a ainsi permis à l'ASN de fixer en lien avec l'Autorité de sûreté allemande des objectifs de sûreté ambitieux et de peser très en amont sur les options de sûreté du projet EPR.

Il est essentiel de souligner qu'en aucun cas l'ASN n'a compétence pour se prononcer sur l'opportunité politique ou économique du projet : son rôle consiste à examiner l'acceptabilité du niveau de sûreté du réacteur et d'instruire le cas échéant une demande d'autorisation de création.

## Les objectifs de sûreté

L'ASN juge globalement satisfaisante, tant sur le plan de la conception que de l'exploitation, la sûreté des réacteurs aujourd'hui en exploitation en France. Toutefois, elle considère que tout projet de nouvelle génération de réacteur électronucléaire doit atteindre un niveau de sûreté supérieur.

En 1993, les Autorités de sûreté nucléaire française et allemande ont donc fixé conjointement pour le projet de réacteur EPR des objectifs de sûreté ambitieux, dans le cadre d'une conception évolutive permettant de tirer bénéfice du retour d'expérience des réacteurs en exploitation en Allemagne et en France.

Ces objectifs de sûreté, déclinés selon le principe de la défense en profondeur, sont les suivants :

1. Fiabiliser le fonctionnement normal de l'installation pour éviter les incidents :

– par rapport aux réacteurs existants, le nombre des incidents doit diminuer, notamment par l'amélioration de la fiabilité des systèmes et par une meilleure prise en compte des aspects liés aux facteurs humains.

2. En cas d'incident, l'installation doit être suffisamment robuste pour limiter le risque que la si-

tuation puisse conduire à un accident grave :

– par rapport aux réacteurs existants, une réduction significative de la probabilité globale du risque de fusion du cœur doit être obtenue en tenant compte de tous les types possibles de défaillances et d'agressions.

3. Si malgré tout un accident arrivait, des dispositions prises à la conception doivent permettre d'en limiter au maximum les conséquences :

– les rejets radioactifs pouvant résulter de tous les accidents concevables doivent être minimisés :

– pour les accidents sans fusion du cœur, des mesures de protection des populations vivant dans le voisinage de la centrale endommagée ne doivent pas être nécessaires (pas d'évacuation ni de mise à l'abri),

– pour les accidents avec fusion du cœur à basse pression, les mesures de protection des populations doivent être très limitées en termes d'étendue et de durée (pas de relogement permanent, pas d'évacuation d'urgence au-delà du voisinage immédiat de l'installation, mise à l'abri limitée, pas de restriction à long terme de la consommation de produits alimentaires),

## Executive Summary

ASN involvement in the safety of the next generation of nuclear reactors began in the early 90's, on request by the Government. This early involvement gave ASN an opportunity to influence EPR safety options.

ASN has set ambitious safety objectives together with the German safety Authority. Then ASN assessed the technical solutions proposed by the designers in cooperation with foreign nuclear safety Authorities involved in the examination, and recognized at the end of 2004 that EPR design options globally met the safety objectives set.

Now, depending on EDF's decision that should follow the national public debate on "Flamanville 3" project, ASN may have to deal in a near future with the authorisation decree application procedure of the first French EPR.

Whatever this decision could be, in its permanent safety improvement policy, ASN is already seeking that existing plants take benefit in terms of safety from the EPR project.

– les accidents susceptibles de conduire à des rejets radioactifs précoces importants, en particulier les accidents avec fusion du cœur à pression élevée, doivent quant à eux être "pratiquement éliminés".

Enfin, du fait de l'expérience d'exploitation acquise sur les réacteurs en service, l'ASN a également demandé que les contraintes d'exploitation et les aspects liés aux facteurs humains soient pris en compte dès la conception, dans le but notamment d'améliorer la radioprotection des travailleurs, de limiter les rejets radioactifs, la quantité et l'activité des déchets produits.

C'est par rapport au respect de ces grands objectifs que l'ASN se prononcera sur l'acceptabilité du niveau de sûreté du projet EPR en cas de demande officielle d'autorisation de création.

### Exemples d'améliorations apportées par le réacteur EPR

Pour répondre aux objectifs de sûreté fixés au projet, les concepteurs du réacteur EPR ont proposé un certain nombre d'améliorations, parmi lesquelles on peut citer à titre d'exemples :

- concernant la réduction des risques d'accidents, un renforcement significatif du génie civil de l'îlot nucléaire pour une meilleure protection contre les agressions externes, dont les séismes, les explosions industrielles et les chutes d'avion ;
- concernant la prise en compte de la gestion des accidents graves dès la conception, la mise en place sous la cuve du réacteur d'un dispositif spécialement conçu pour récupérer, contenir et refroidir le cœur en fusion ;
- concernant la prise en compte du facteur humain dans la gestion des accidents, des délais plus importants laissés, par conception, aux opérateurs avant que leur intervention ne devienne nécessaire.

L'examen réalisé sur ces deux derniers points est présenté par l'IRSN dans l'article "L'évaluation par l'IRSN de la sûreté du réacteur EPR".

### L'examen des options de sûreté du projet

Bien avant qu'un exploitant transmette une demande officielle d'autorisation de création d'un réacteur nucléaire, il est d'usage que l'ASN en

examine, avec l'appui de l'IRSN, les principales caractéristiques de conception.

Cela s'est traduit dans le cas d'EPR par l'examen d'un avant-projet sommaire, puis d'un avant-projet détaillé, établissant les options de sûreté d'un projet de réacteur EPR "standard", au sens où les aspects de conception dépendant spécifiquement du site d'implantation d'un éventuel réacteur n'ont pas été abordés.

Cet examen a été mené de manière approfondie à partir de 1993, d'abord à parité par les organismes de sûreté français et allemands jusqu'à la fin de l'année 1998, date de la décision du gouvernement allemand d'abandonner le nucléaire, puis par les organismes de sûreté français avec la participation d'experts allemands à compter de cette date.

Il s'est conclu au mois d'octobre 2000 par l'adoption par le Groupe permanent d'experts pour les réacteurs nucléaires placé auprès de l'ASN d'un document intitulé "Directives techniques pour la conception et la construction de la nouvelle génération de réacteurs nucléaires à eau sous pression". Ce document reprend de manière structurée et ordonnée l'ensemble des recommandations techniques élaborées par les experts français et allemands et entérinées par l'ASN durant cette phase. Parallèlement, la Commission centrale des appareils à pression a établi au mois d'octobre 1999, pour le compte de l'ASN, un document intitulé "Règles techniques relatives à la construction des circuits primaires et secondaires principaux des réacteurs nucléaires à eau sous pression".

Sur la base de cet examen préparatoire, les pouvoirs publics considèrent que les options de sûreté retenues satisfont à l'objectif d'amélioration de la sûreté par rapport aux réacteurs actuels et demandent à Electricité de France de se conformer aux deux recueils de règles techniques mentionnés ci-dessus (voir la lettre du 28 septembre 2004 disponible sur le site Internet de l'ASN : [www.asn.gouv.fr](http://www.asn.gouv.fr)).

Cette position doit être confirmée par l'examen de certaines études de conception détaillée et ne constitue en aucune manière une autorisation de construction d'un réacteur EPR. Une telle autorisation relève de la procédure instituée par le décret du 11 décembre 1963 relatif aux installations nucléaires décrite plus loin.

### Le choix du site

Le 21 octobre 2004, Electricité de France a annoncé retenir le site de Flamanville, comportant déjà deux réacteurs électronucléaires en exploitation, pour son projet d'implantation d'un réacteur de type EPR.

A la suite de cette annonce, la Commission Nationale du Débat Public a été saisie par EDF, conformément aux textes en vigueur qui stipulent que, pour les ouvrages et infrastructures importants, un débat public national doit être mené sur le choix d'implantation en tenant compte des différents aspects du projet (socio-économique, environnementaux...).

Au vu des conclusions de ce débat, EDF déposera un dossier de demande d'autorisation de création d'un réacteur EPR.

L'ASN examinera alors les questions de sûreté liées au site d'implantation du réacteur EPR, notamment en s'assurant que les contraintes spécifiques du site (risque d'inondation, risque sismique, aléa climatiques...) seront correctement prises en compte au niveau de la conception et du dimensionnement de l'installation pour en assurer la sûreté.

### L'instruction de la demande d'autorisation de création

Le décret du 11 décembre 1963 relatif aux installations nucléaires spécifie notamment qu'à l'appui d'une demande d'autorisation de création transmise aux ministres chargés de la sûreté nucléaire, le pétitionnaire doit :

- transmettre pour examen à l'ASN un Rapport Préliminaire de Sûreté (RPS) comportant la description de l'installation et des opérations qui y seront effectuées, l'inventaire des risques de toutes origines qu'elle présente, l'analyse des dispositions prises pour prévenir ces risques et des mesures propres à réduire la probabilité des accidents et leurs effets.

Dans le cadre de la préparation d'une demande d'autorisation, Electricité de France a transmis à l'ASN début 2004 une première version projet du RPS, dite version "standard", car ne comportant aucun élément spécifique lié au choix du site.

L'examen en cours par l'ASN de ce projet de rapport devrait permettre de faciliter l'instruction ultérieure d'une éventuelle demande.

- présenter un dossier qui sera soumis à enquête publique, comportant divers plans de l'installation

ainsi que, sur la base du contenu du RPS, une étude de danger et une étude d'impact. Ce dossier doit préciser également les dispositions destinées à faciliter le démantèlement ultérieur de l'installation.

L'objet de cette enquête, ouverte par le préfet du département dans lequel doit être implanté l'installation, est d'informer le public et de recueillir ses appréciations, suggestions et contre-propositions, afin de permettre aux pouvoirs publics de disposer de tous les éléments nécessaires à leur information. Aussi toute personne intéressée, quel que soit son lieu de domicile ou sa nationalité, est invitée à s'exprimer.

Sur la base des résultats de l'enquête publique et de l'analyse du Rapport Préliminaire de Sûreté, l'ASN préparera alors le cas échéant un projet de décret autorisant la création de l'installation.

Le décret d'autorisation de création fixe le périmètre et les caractéristiques de l'installation, ainsi que les prescriptions particulières auxquelles doit se conformer l'exploitant. Il précise également les justifications que ce dernier devra fournir en complément à l'achèvement des travaux pour obtenir l'autorisation d'exploitation de son installation.

Ce projet de décret sera alors transmis pour avis à la Commission interministérielle des installations nucléaires de base (CIINB), puis soumis au Ministre chargé de la santé, avant d'être présenté à la signature du Premier ministre.

### La coopération avec les Autorités de sûreté nucléaire étrangères concernées par l'EPR

#### Avec l'Allemagne

Dès l'origine du projet, les Autorités de sûreté nucléaire française et allemande, leurs appuis techniques, ainsi que les groupes d'experts placés auprès d'elles, ont travaillé en étroite collaboration pour déterminer les exigences de sûreté du projet et examiner les options de conception proposées.

Cette collaboration, bien que réduite depuis la décision en 1998 du gouvernement allemand d'abandonner la filière nucléaire, a été maintenue et certains experts allemands continuent à participer à l'instruction technique du projet.

### Avec la Finlande

L'entreprise de production d'électricité finlandaise TVO a déposé en janvier 2004 une demande de permis de construire pour un réacteur EPR sur laquelle l'Autorité de sûreté finlandaise (STUK) a rendu, après une année d'examen du projet, un avis favorable au gouvernement qui en a ainsi autorisé la construction début 2005.

Dans ce contexte, les Autorités de sûreté nucléaire finlandaise et française ont renforcé leur collaboration sur ce sujet : ainsi, outre la transmission à STUK de l'ensemble des rapports concernant l'évaluation déjà menée en France sur le réacteur EPR, plusieurs réunions techniques communes se sont tenues courant 2004 afin de se tenir informé de l'avancement des instructions réalisées par chacune des parties.

Au delà d'une simple information réciproque, ces échanges permettent d'examiner l'opportunité d'harmoniser certaines dispositions de conception, en tenant compte des différences d'approche de sûreté dont elles sont issues.

Dans cet esprit de coopération et d'échange des points de vue sur le projet EPR, l'ASN a également nommé un expert finlandais de STUK au sein du Groupe permanent d'experts pour les réacteurs nucléaires.

Avec la perspective du début du chantier de construction du premier réacteur EPR en Finlande, de nouvelles modalités de coopération entre les Autorités de sûreté nucléaire finlandaise et française sont en cours de discussion.

### Avec la Chine

A la suite de l'appel d'offre récent pour la réalisation de centrales nucléaires en Chine, l'Autorité de sûreté chinoise (NNSA) a souhaité faire un point avec les Autorités de sûreté des pays ayant déjà réalisé une analyse de sûreté sur les réacteurs candidats, parmi lesquels l'EPR d'AREVA.

L'ASN a donc présenté à NNSA, courant mars 2005, un bilan de l'instruction technique réalisée jusqu'à ce jour en France sur le projet EPR.

### Les progrès en sûreté du projet EPR appliqués aux réacteurs en exploitation en France

Afin de répondre aux objectifs de sûreté renforcés

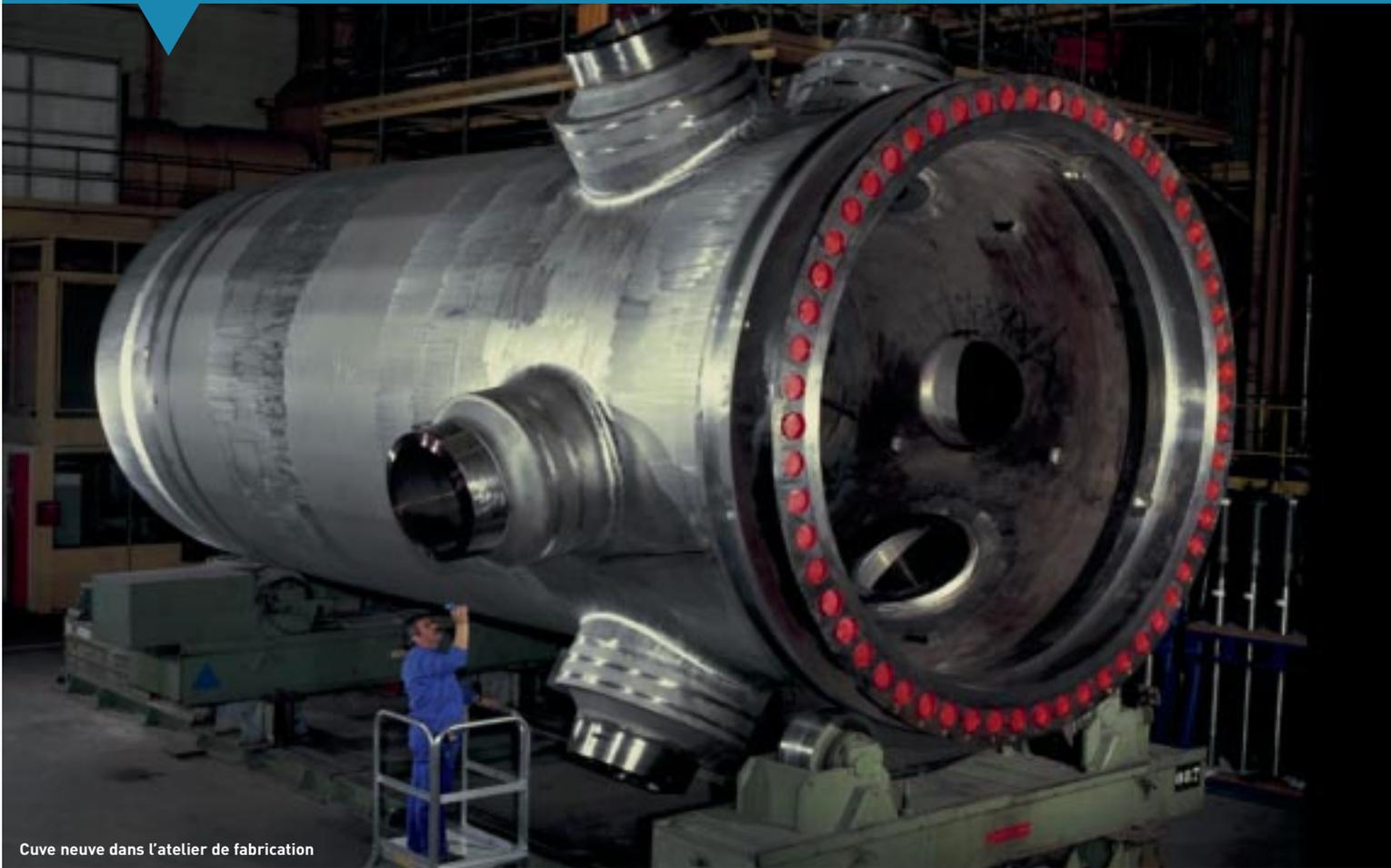
du projet EPR, de nombreux programmes de recherche et développement ont été réalisés, en particulier concernant la connaissance des phénomènes liés aux accidents graves (interaction entre le combustible en fusion et le béton, évaluation du risque de production d'hydrogène par corrosion des gaines du combustible, etc...).

Cette amélioration des connaissances est exploitée dans le cadre des réévaluations de sûreté des réacteurs existants, notamment pour estimer le niveau de résistance du confinement (enceinte et radier) en situation d'accident avec fusion du cœur, situation extrêmement peu probable et non initialement traitée à la conception pour les réacteurs actuels.

L'ASN a également demandé à EDF, dans la perspective des troisièmes visites décennales des réacteurs de 900 MWe, d'évaluer l'intérêt et la possibilité de transposer certaines dispositions de conception de l'EPR sur les réacteurs existants. Il ne s'agit toutefois pas, en raison des évolutions significatives de conceptions concernées, d'aligner le référentiel des exigences de sûreté des réacteurs en exploitation sur le référentiel EPR.

A titre d'exemple, on peut citer la modification, inspirée des choix de conception d'EPR et demandée pour les réacteurs de 900MWe, concernant les dispositions de gestion des accidents de rupture de tubes de générateurs de vapeurs permettant de limiter significativement les rejets potentiels de ce type d'accident .

Du point de vue de l'Autorité de sûreté nucléaire, on peut donc conclure, sans préjuger de la construction future ou non de réacteurs EPR en France, que le projet EPR a déjà participé à l'amélioration de la sûreté nucléaire dans notre pays. ■



Cuve neuve dans l'atelier de fabrication

## Le contrôle de la conception et de la fabrication du réacteur EPR par l'Autorité de sûreté nucléaire

Control of design and manufacturing of EPR by the French Nuclear Safety Authority

par David Emond, responsable de la sous-direction "Équipements sous pression nucléaires", DGSNR

La sûreté d'une installation nucléaire dépend de la qualité de sa conception et de sa fabrication. Il s'agit en premier lieu de concevoir et de fabriquer une installation en prenant en compte les modalités futures de fonctionnement, que ce soit en situation normale ou en situation incidentelle. De plus, l'enjeu consiste à prendre, dès le stade de la conception et de la fabrication, les mesures propres à réduire l'impact sur la sûreté et la radioprotection des contraintes de l'exploitation. Par exemple, l'anticipation des phénomènes de dégradation qui peuvent survenir en service doit influencer sur le choix des matériaux tandis que la géométrie des composants doit être conçue pour réduire l'exposition des travailleurs qui seront chargés de leur surveillance.

### Executive Summary

The safety of a nuclear facility relies upon the quality of the design and the manufacturing. The French nuclear safety authority (ASN) controls these stages with a deep involvement regarding the pressure equipment.

The ASN is achieving the revision of the regulation concerning the design and manufacturing of nuclear pressure equipment.

The ASN has anticipated the control on the French reactor EPR. They have asked since 1999 explanations on the main evolutions of the EPR design compared to the current French nuclear power plants and they have worked together with the Finnish safety authority in the frame of the earlier manufacturing of an EPR reactor in Finland.

These actions have prepared the ASN for the control of the design and the manufacturing of the EPR pressure equipment which will start from summer 2005.

La conception et la fabrication d'une installation nucléaire nécessitent donc une réflexion en profondeur sur la manière dont l'installation sera exploitée. Une fois que les choix de conception et de fabrication sont faits, il importe également de vérifier que les composants fabriqués se conforment à ces choix.

L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) accorde une attention particulière à la conception et la fabrication des composants des centrales nucléaires, et en particulier des équipements sous pression de la chaudière nucléaire, composants qui jouent un rôle majeur dans la sûreté de l'installation. L'objet de cet article est de présenter le rôle que l'ASN joue dans le contrôle de la conception et de la fabrication de ces composants.

### Le référentiel réglementaire

La première mission de l'ASN est de définir le référentiel réglementaire applicable aux équipements sous pression.

Dans ce cadre, l'ASN a entrepris une refonte importante de ce référentiel : un projet d'arrêté ministériel est en cours de finalisation et il a vocation à s'appliquer au réacteur EPR.

Cette refonte ne remettra pas en cause un principe bien établi selon lequel c'est le fabricant qui est le premier responsable de la conception et de la fabrication des équipements. C'est en particulier lui qui garantit la conformité aux exigences techniques réglementaires. L'une des avancées du nouveau référentiel est que le fabricant devra faire évaluer cette conformité par un organisme indépendant. Pour les équipements les plus importants, ceux qui constituent les circuits primaires et secondaires principaux, cette évaluation sera conduite par l'ASN.

Comme il a été dit plus haut, il est essentiel que les modalités de l'exploitation soient considérées dès la conception. C'est pourquoi la réglementation prévoit qu'un dialogue s'instaure entre le futur exploitant de l'installation et le fabricant du composant avant que la conception ne soit entreprise. De plus, certaines des exigences techniques réglementaires visent à garantir la prise en compte des conditions d'exploitation dès la conception et la fabrication. Parmi ces exigences, on trouve en guise d'exemples :

- la limitation du nombre de soudures,

- la limitation du nombre de zones à géométrie complexe,
- le choix de procédés de fabrication limitant les contraintes résiduelles,
- la limitation des phénomènes de vibration et de fatigue,
- le choix de matériaux suffisamment ductiles, facilement contrôlables et dont l'éventuelle activation ne conduit pas une exposition excessive des intervenants,
- le choix de matériaux ne s'activant pas,
- la prise en compte des phénomènes de vieillissement.

Ces principes, qui figureront dans le référentiel réglementaire de demain, ont été notifiés à EDF et à Framatome dès 1999 afin qu'ils puissent être pris en compte dans la conception du réacteur EPR. Ils ont été rappelés à EDF dans la lettre de l'ASN sur les options de sûreté du projet de réacteur EPR du 28 septembre 2004.

### Le rôle de l'ASN

Une fois le référentiel établi, le rôle de l'ASN est de vérifier qu'il est bien respecté. Pour le contrôle de la conception et de la fabrication des équipements sous pression, c'est la sous-direction "Équipements sous pression nucléaires" qui est chargée de cette mission. 5 inspecteurs sur les 20 que compte la sous-direction en sont plus particulièrement chargés. Ils mènent leur action en usant de deux outils.

En premier lieu, ils instruisent les dossiers justifiant le respect de la réglementation. L'une des caractéristiques de la conception et de la fabrication pour le nucléaire est une exigence poussée de constitution d'une documentation et d'établissement de preuves. A chaque exigence de la réglementation doit correspondre une ou plusieurs opérations du fabricant ainsi qu'une ou plusieurs opérations permettant de vérifier que l'exigence a été respectée. Prenons un exemple concret : le soudage de deux composants constituant la cuve de la centrale nucléaire est une opération très importante pour la tenue de la cuve en service et elle ne doit pas générer de défauts métallurgiques. A cette fin, le fabricant utilise des procédés industriellement reconnus et pour lesquels la probabilité de créer des défauts est très faible. Toutefois, afin de garantir l'absence de défauts, le fabricant va :

- qualifier le procédé, c'est-à-dire réaliser des tests pour vérifier que le procédé ne crée pas de défauts,



Arrivée d'un générateur vapeur neuf dans un bâtiment réacteur

– réaliser des contrôles de la soudure une fois réalisée afin de vérifier qu'aucun défaut n'a été créé. Il va de soi que la découverte d'un défaut nécessitera un traitement dépendant de la nature, de la taille et de l'emplacement du défaut et pouvant aller de la réparation localisée à la reprise complète de la soudure.

Cette association permanente d'opérations permettant le respect des exigences et d'opérations en permettant la vérification est indispensable pour assurer le niveau de sécurité élevé que la conception et la fabrication nucléaires requièrent.

Le rôle de l'ASN est de vérifier l'existence de cette association et de juger l'efficacité des opérations qui sont mises en œuvre dans ce cadre.

Le deuxième outil dont l'ASN dispose est l'inspection des ateliers où les composants sont fabri-

qués. L'inspection des ateliers permet d'évaluer la capacité du fabricant à assumer la responsabilité première qui lui est conférée par la réglementation. Elle permet de constater si les actions de surveillance du fabricant sur ses sous-traitants existent, si elles sont efficaces et si elles sont suivies d'effet. En 2004, l'ASN a conduit 45 inspections, principalement dans le cadre de la fabrication des pièces de rechange des centrales nucléaires d'EDF.

Nous allons maintenant voir les actions menées dans le cadre de la construction du futur réacteur EPR.

### **L'examen des choix de conception et de fabrication**

La conception du réacteur EPR est dans la continuité de la conception des réacteurs français les

plus récents, ceux de la série N4. Toutefois, certaines évolutions importantes ont été apportées et nécessitent d'être examinées par l'ASN.

L'ASN a souhaité anticiper les discussions sur ces évolutions le plus possible, et en tout cas avant que les choix de conception et de fabrication ne soient figés par le concepteur.

C'est pourquoi dès 2000, mais sans préjuger de la décision de construction d'un réacteur EPR en France, l'ASN a demandé à examiner les évolutions les plus importantes et notamment les évolutions suivantes :

- remplacement de la bride de la cuve et de la virole porte-tubulures de la cuve par une seule grosse pièce forgée,
- transfert de l'implantation de l'instrumentation du cœur depuis le fond de la cuve vers le couvercle,
- changement du matériau constitutif des enceintes de mécanismes de commande de grappes,
- changement du système d'aspersion du pressuriseur.

Etant donné l'ampleur et l'enjeu de l'instruction, l'ASN a souhaité saisir la Section permanente nucléaire (SPN) de la Commission centrale des appareils à pression de ces évolutions et elle s'est adjointe les services des experts de l'Institut de radio-protection et de sûreté nucléaire.

Depuis, 3 séances de la SPN se sont tenues :

- le 2 juillet 2003, elle a examiné la conception de la virole porte-tubulures de la cuve,
- le 17 décembre 2004, elle a évalué les choix de conception et de fabrication du pressuriseur,
- le 26 avril 2005, elle a débattu du changement du matériau constitutif des enceintes de mécanismes de commande de grappes.

D'autres séances sont prévues en 2005 afin de continuer l'examen des évolutions que le réacteur EPR présente par rapport aux centrales nucléaires existantes.

### L'examen des dossiers

Au-delà de l'examen des grands choix de conception et de fabrication, la décision de construire un réacteur EPR entraîne la constitution par le fabricant des dossiers justifiant le respect de la réglementation relative aux équipements sous pression. Dans les mois qui viennent, les premiers dossiers vont être soumis à l'ASN qui va donc pouvoir commencer l'instruction réglementaire de ces dossiers.

Des dossiers similaires ont toutefois déjà été constitués dans le cadre de la fabrication, en cours, d'un réacteur EPR pour la Finlande. C'est pourquoi l'ASN a d'ores et déjà mené deux types d'actions.

Tout d'abord, les discussions avec le fabricant ont commencé afin d'examiner en quoi le travail réalisé pour la Finlande peut être utilisé pour le réacteur français. Par exemple, les qualifications des procédés de fabrication réalisées pour le réacteur finlandais apportent des informations précieuses puisque les procédés devraient être les mêmes pour le réacteur français. Bien entendu, même si ces informations sont précieuses, l'ASN est vigilante sur les conditions de transposition de résultats qui ont été obtenus dans un autre contexte, notamment réglementaire.

Ensuite, l'ASN a engagé une collaboration avec son homologue finlandais, le STUK, afin d'échanger tant sur les modalités de contrôle que sur les conclusions importantes qui en découlent. La participation croisée à des actions d'inspection a également été initiée.

### Les visites d'usine

Les fabrications des gros composants sous pression du réacteur EPR sont, au moment de la parution de ce numéro de Contrôle, sur le point de commencer.

Toutefois, comme pour l'instruction des dossiers, l'ASN a tiré parti de la fabrication d'un réacteur EPR pour la Finlande en échangeant avec le STUK et en anticipant ses actions par une participation à des inspections. Ainsi 3 inspections ont été conduites fin 2003 et début 2004 chez le forgeron japonais qui a fabriqué les composants principaux de la cuve et des générateurs de vapeur pour l'EPR finlandais, tandis que d'autres inspections ont été menées chez un forgeron français dans le cadre de la fabrication de pièces de rechange les centrales nucléaires existantes. A l'heure où ces lignes sont écrites, le choix des fournisseurs du réacteur français n'est pas arrêté. Par les actions d'inspection qu'elle a déjà menées chez différents forgerons, l'ASN est prête à assurer un contrôle efficace quels que soient les fournisseurs retenus.

### Conclusion

Le contrôle de la conception et de la fabrication des équipements sous pression du réacteur EPR va être une tâche importante de l'ASN à partir de 2005 et dans les années qui viennent.

Même si l'ASN a contrôlé depuis 1973 la construction des 58 réacteurs EDF existant, un tel contrôle nécessite une préparation soignée, ce d'autant plus qu'aucun réacteur n'a été construit en France depuis 1999, année de démarrage du réacteur n°2 de Civaux.

C'est pourquoi l'ASN a entrepris la modernisation de la réglementation et qu'elle a anticipé les actions de contrôle, qu'il s'agisse de l'instruction de dossiers ou de la réalisation d'inspections.

A l'été 2005, elle est donc prête à commencer le contrôle réglementaire de la conception et la fabrication des équipements sous pression du réacteur EPR, dans un souci de sécurité des équipements sous pression, de sûreté nucléaire et de prise en compte de la radioprotection. ■

# L'évaluation par l'IRSN de la sûreté du réacteur EPR

Assessment by IRSN of EPR safety

par Gérard Cénérimo, Jean-Marie Rousseau, François Jeffroy et Jean-Michel Evrard,

Direction de la sûreté des réacteurs - Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire

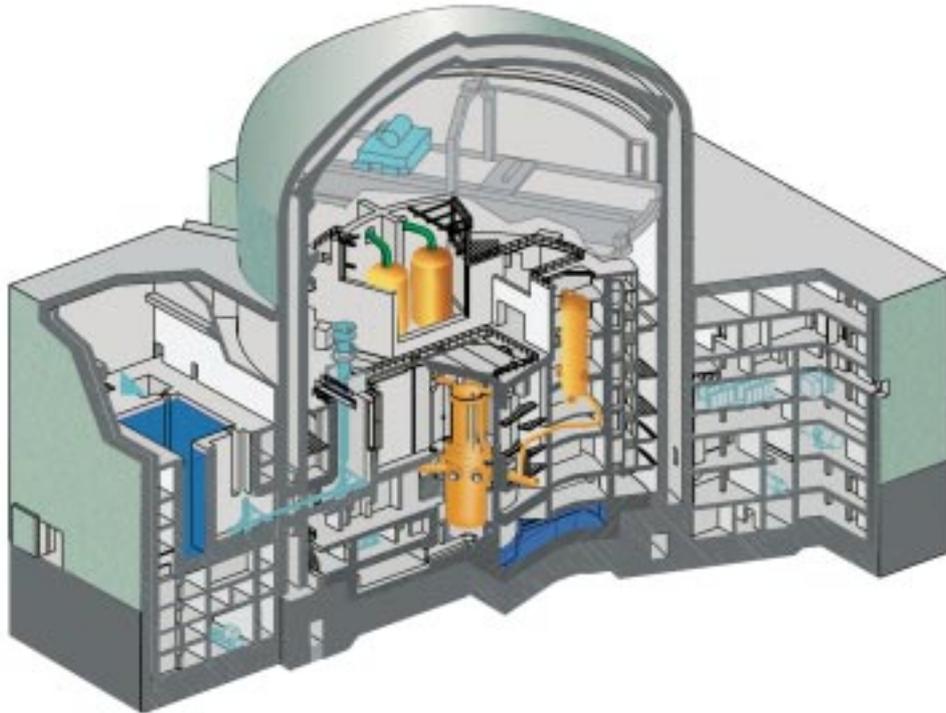


Figure 1 - Vue générale du réacteur EPR

## Introduction

Depuis l'origine du projet EPR, au début des années 1990, l'IRSN a contribué à définir les objectifs de sûreté attendus pour les réacteurs nucléaires de cette génération et à examiner les solutions techniques proposées par le concepteur pour les atteindre, dans le cadre d'une étroite collaboration avec l'organisme de sûreté allemand GRS.

## Executive Summary

From the early stages of the EPR project, IRSN has been involved in the definition of the safety objectives and in the assessment of the technical solutions implemented to achieve these objectives. This analysis is illustrated through two examples : the design of the core catcher, that is a key means coping with the severe accident management on the EPR reactor, and the principles of the computerized operation, from a human factor perspective.

Deux étapes ont marqué l'évaluation de la sûreté du projet EPR menée par l'IRSN : la publication des objectifs généraux de sûreté en 1993 et celle des directives techniques, approuvées par le Groupe Permanent chargé des Réacteurs en 2000, qui constituent une approbation au plan technique des principales options de sûreté du projet.

Depuis cette date, l'IRSN poursuit son analyse technique du projet EPR afin d'approfondir les dossiers les plus importants vis-à-vis des objectifs généraux de sûreté, caractérisés par l'utilisation de solutions techniques innovantes ou ayant fait l'objet d'évolutions depuis 2000.

Cet article illustre ce travail d'analyse de l'IRSN à travers deux sujets : le récupérateur de corium, qui constitue le dispositif de conception clé pour la maîtrise des accidents graves dans EPR, et l'analyse des principes de la conduite informatisée qui sera mise

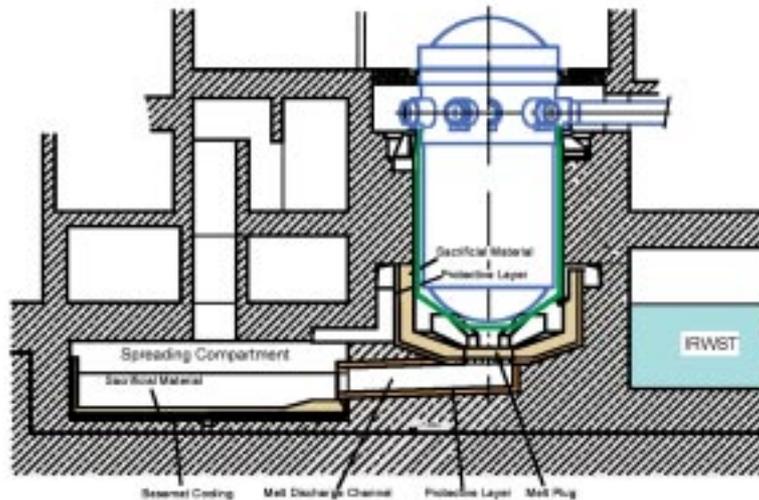


Figure 2 - Schéma du puits de cuve, du canal de transfert et de la chambre d'étalement du corium

en œuvre pour EPR, sous l'angle de l'intégration des facteurs humains dans la démarche de conception.

L'étape suivante pour l'IRSN sera l'examen formel du rapport préliminaire de sûreté dans le cadre de la procédure d'autorisation de création du réacteur EPR.

## La conception du récupérateur de corium

### Introduction

Les objectifs de sûreté généraux pour le réacteur EPR concernant les situations accidentelles conduisant à la fusion du cœur se déclinent en deux grands principes :

- les situations susceptibles d'induire des rejets précoces importants doivent être "pratiquement éliminées",
- pour les autres situations, des dispositions nouvelles doivent permettre de respecter les objectifs radiologiques. Parmi ces dispositions, le récupérateur de corium permet la collecte et le refroidissement des matériaux fondus (corium) s'écoulant de la cuve après sa rupture.

### Description du récupérateur de corium

Le concept du récupérateur de corium de l'EPR a été élaboré à partir de deux constatations :

- une masse en fusion bien étalée est plus facilement et rapidement refroidie qu'une masse compacte,
- le refroidissement simultané des surfaces supérieure et inférieure d'une masse en fusion étalée est le plus efficace.

Le récupérateur de corium est donc constitué d'une chambre d'étalement de 170 m<sup>2</sup> comportant un système d'injection d'eau permettant de refroidir le plancher métallique de cette chambre et de recouvrir d'eau le corium étalé.

La chambre d'étalement n'est pas située directement sous la cuve, pour éviter tout risque de destruction en cas de percée de la cuve, mais le puits de cuve de l'EPR communique avec elle au moyen d'un canal d'écoulement dont les parois en zirconite facilitent l'écoulement du corium.

### Historique

Les analyses menées par l'IRSN en 1999 et 2000 sur le récupérateur de corium ont conduit à donner un accord de principe quant à la mise en œuvre de celui-ci. Cependant, en 2004, une modification du concept initial du récupérateur de corium est proposée par le concepteur, modification dont l'analyse a été présentée par l'IRSN lors de la réunion du Groupe Permanent d'experts pour les Réacteurs nucléaires de novembre 2004.

### Principe de fonctionnement du récupérateur de corium

#### Collecte du corium dans le fond du puits de cuve et ouverture de la "porte fusible"

Avant de s'écouler dans le canal d'écoulement, le corium issu de la dégradation du cœur est collecté dans le fond du puits de cuve.

Après avoir érodé verticalement 50 cm de béton, ce corium rencontre une "porte fusible" donnant accès au canal d'écoulement. Cette dernière est actuellement constituée d'une plaque en acier de 2,4 m<sup>2</sup> et 4 cm d'épaisseur.

L'écoulement du corium dans le canal puis dans la chambre d'étalement n'est assuré que si la totalité du corium disponible est relocalisé en amont de la porte avant son ouverture. En effet, étant donné que le calcul de l'étalement d'un corium "sous eau" n'est pas réalisable en l'état actuel des connaissances, il est nécessaire, pour garantir le bon fonctionnement du récupérateur de corium, de s'assurer qu'aucune masse supplémentaire de corium ne s'écoule dans la chambre d'étalement une fois l'eau recouvrant le corium étalé. Si la chambre d'étalement ne contient pas d'eau, l'analyse de l'IRSN a confirmé que la première coulée de corium s'étale en quelques dizaines de secondes après l'apparition d'une brèche dans la "porte fusible" et active alors le système d'injection d'eau. Durant ce laps de temps, il est probable que la totalité du corium ne s'est pas écoulée hors du puits de cuve et il est alors nécessaire de vérifier que la masse restante s'écoule dans la chambre d'étalement avant l'arrivée de l'eau de refroidissement sur le corium qui survient 5 mn environ après l'activation de l'injection. A cet égard, l'IRSN a évalué la taille minimale de brèche de la "porte fusible" permettant l'écoulement de toute la masse de corium dans la chambre d'étalement et a conclu que compte tenu des caractéristiques actuelles de cette "porte fusible", les efforts doivent être poursuivis pour assurer une telle taille de brèche.

De plus, l'analyse menée par l'IRSN, s'appuyant pour partie sur des calculs d'interaction corium-béton, a permis de vérifier que l'épaisseur de béton "sacrificiel" composant le fond du puits de cuve était suffisante pour permettre la collecte de tout le corium contenu dans la cuve en amont de la "porte fusible" avant que celle-ci ne fonde, et ce même en cas de coulées multiples de corium et pour des scénarios accidentels à basse puissance résiduelle.

En revanche, l'IRSN s'interroge sur la gestion des appoints d'eau une fois la cuve percée et estime nécessaire d'examiner la pertinence d'un maintien en service du système d'injection de sécurité, si ce moyen d'injection d'eau en cuve est redevenu disponible. A cet égard, la mise en œuvre d'une instrumentation permettant de détecter l'instant de percée de la cuve sera sans doute nécessaire à la gestion de la progression de l'accident.

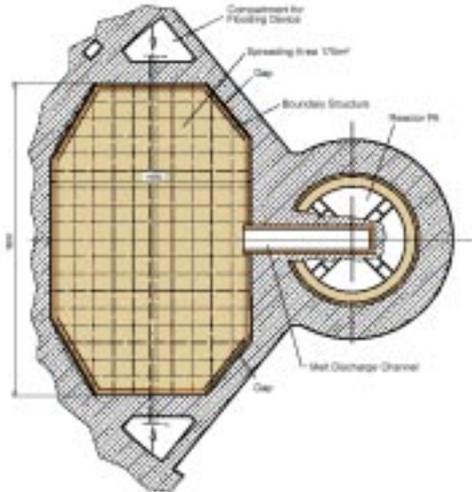


Figure 3 - Vue de la chambre d'étalement du corium

### Refroidissement du corium dans la chambre d'étalement

Dans le concept de récupérateur de corium, une couche de béton sacrificiel recouvre le plancher métallique de la chambre d'étalement. L'IRSN a vérifié si, en prenant en compte les incertitudes actuelles sur l'érosion du béton par le corium, le plancher métallique n'était atteint par le corium qu'une fois l'eau présente dans les canaux dédiés au refroidissement de ce plancher. A cet égard, l'IRSN a préconisé une augmentation de l'épaisseur de la couche de béton présente sur le plancher métallique de manière à disposer de marges de sûreté supplémentaires.

Le concepteur a vérifié expérimentalement la bonne extraction, dans un seul canal, des flux de chaleur libérés par le corium. Sur la base de ces essais, l'IRSN a estimé que, dans son principe et en fonctionnement stable, le système de refroidissement du plancher du récupérateur de corium par des canaux remplis d'eau permettait l'extraction

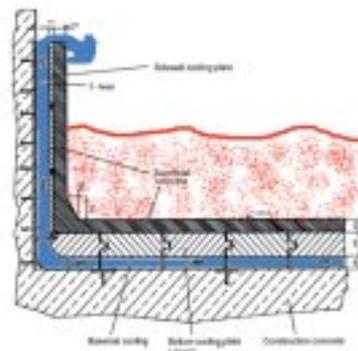


Figure 4 - Coupe de la chambre d'étalement du corium

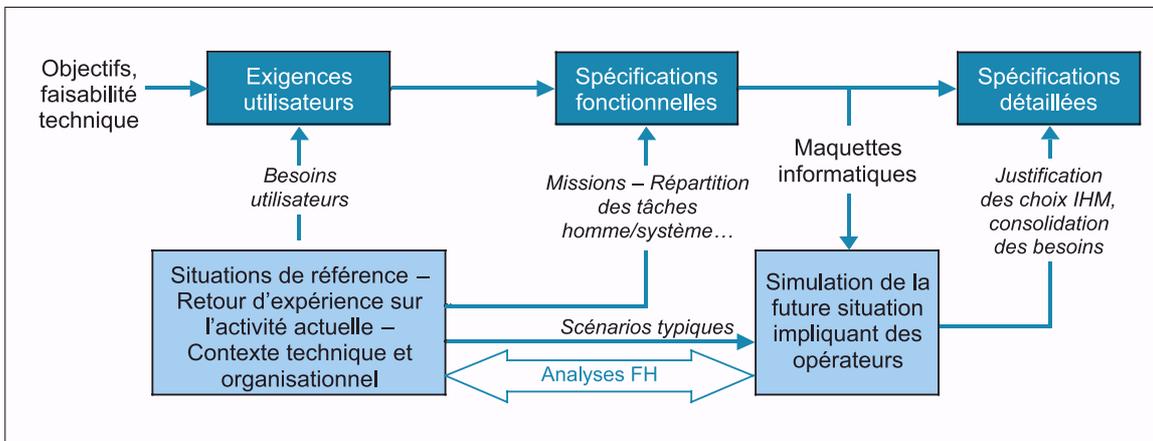


Figure 5 - Processus de référence pour l'intégration des facteurs humains en conception

des flux de chaleur maximaux attendus. L'IRSN estime cependant que la stabilité de l'écoulement dans le réseau de canaux et par conséquent son aptitude à mener à bien sa fonction de refroidissement doivent être confirmés.

### Conclusions

En conclusion, l'analyse menée sur le récupérateur de corium n'a pas remis en cause le bien fondé de ce concept. Toutefois un approfondissement de certaines études doit encore être mené pour en confirmer l'efficacité.

## Conduite informatisée pour EPR : la question des facteurs humains

### EPR et les facteurs humains

La manière dont les "facteurs humains" sont pris en compte par le projet EPR fait l'objet d'analyses de l'IRSN depuis 1997. Trois réunions du Groupe Permanent chargé des Réacteurs ont d'ailleurs donné lieu à des évaluations spécifiques sur ce thème en 1998, 2000 et 2003. L'objectif était de vérifier qu'un "programme d'intégration des facteurs humains" avait bien été défini.

Un tel programme doit permettre de donner une visibilité et une cohérence aux différentes analyses relatives aux facteurs humains mises en œuvre dans le processus de conception du futur système. Ces analyses prennent toute leur importance pour la conception des interfaces homme-machine, pour la définition des procédures de conduite, pour l'aménagement de la salle de commande et pour l'identification des contraintes liées aux interventions de maintenance lors de la conception de l'installation.

Pour ce qui concerne les interfaces homme-machine (IHM), le programme d'intégration des facteurs humains du projet EPR prévoit un processus de spécification itératif impliquant les opérateurs.

Les besoins des utilisateurs du futur système de supervision EPR ont fait l'objet d'une première analyse par une équipe de la Direction du Parc Nucléaire (DPN) intégrée au projet. Ces besoins, intégrant largement l'expérience d'exploitation du palier N4, ont été traduits en exigences de conception. Partant de ces exigences, une première maquette de la future IHM a été développée permettant la simulation de scénarios opérationnels. Sur la base de cette maquette, EDF a conduit en 2003 et 2004 une campagne de tests qui a permis d'approfondir l'analyse des besoins et de consolider les principes de conception.

### Les grandes orientations de la conduite informatisée EPR

Les lignes directrices ayant guidé la formulation des exigences peuvent se résumer de la manière suivante :

#### Un système de contrôle-commande du marché supportant une conduite informatisée

La solution du développement d'un logiciel propriétaire, retenue lors de la conception du palier N4 n'a pas été reconduite sur EPR. Ce choix, qui est avant tout industriel, a conduit à la rédaction d'un cahier des charges identifiant précisément les futures fonctions que l'interface devra proposer aux opérateurs, dans un souci de faisabilité technique. Dans ce contexte, les analyses relatives aux facteurs humains ont contribué à l'identification du périmètre du futur système.

### Une interface homme-machine modulaire pour en faciliter la maintenance évolutive

Les difficultés liées aux mises à jour des IHM des réacteurs du palier N4 ont fortement influencé les orientations de conception retenues pour EPR. Ces difficultés sont en partie dues au fait que les images de conduite des réacteurs N4 contiennent à la fois des éléments textuels fixes et des valeurs de paramètre dont l'actualisation est assurée en temps réel par des processus informatiques. Dans le réacteur EPR, pour éviter cette interdépendance, les modes opératoires et les fiches d'alarmes seront présentés sur des images d'écran ne présentant aucune information d'état en provenance des équipements (capteurs, actionneurs...), celles-ci étant présentées sur d'autres images.

### Des informations structurées et affichées selon leur pertinence vis-à-vis des tâches des opérateurs

Une typologie d'images a été définie pour coller au plus près de l'activité de conduite, selon le principe d'une IHM "orientée tâches". Des images "d'état" seront dédiées aux tâches de surveillance, des images "de commandes" regrouperont les actionneurs disponibles sur un sous-système donné, des images spécialisées répondront aux besoins des autres métiers que la conduite (essais, maintenance...) ayant à interagir avec la supervision.

### Des opérateurs plus "responsabilisés" pour une activité moins "procéduralisée"

Cette orientation préconise un partage des tâches entre l'opérateur et le système fondé sur le critère de la "responsabilité" de l'homme. En d'autres termes, le niveau de guidage des opérateurs retenu pour EPR doit toujours permettre à l'équipe de conserver la maîtrise de l'installation. La conséquence est que le système informatisé est vu



Figure 6 - Salle de commande du palier N4

comme une aide à la décision de l'équipe et doit proposer des fonctions d'assistance nouvelles. Il est par exemple prévu dans EPR une fonction de "diagnostic automatique" fournissant aux opérateurs l'ensemble des informations pertinentes pour l'orientation en conduite incidentelle. De même, la conception d'images d'état et la présentation d'informations de synthèse s'insèrent dans cette logique.

## L'analyse effectuée par l'IRSN

### Objectifs de l'analyse

L'évaluation présentée par l'IRSN lors de la réunion du groupe permanent de novembre 2004 portait sur le processus de développement des IHM incluant les tests ergonomiques, ainsi que les orientations de conception issues de l'analyse de ces tests. Trois questions principales ont dirigé l'analyse de l'IRSN :

### Principaux résultats

Pour ce qui concerne les exigences initiales, l'analyse a fait ressortir les éléments suivants :

- une prise en compte satisfaisante de l'état de l'art en matière d'ergonomie des IHM,
- bien que l'analyse de l'expérience d'exploitation sur laquelle s'appuie les choix et l'identification des besoins soit peu formalisée, son utilisation est apparue suffisante à ce stade du projet. Il s'agira en phase de spécification détaillée, d'apporter une vision plus précise sur des sujets spécifiques tels que l'utilisation du synoptique mural, la gestion des alarmes, l'utilisation des consignes de conduite incidentelle, l'utilisation du panneau auxiliaire...
- un problème de structuration des exigences et d'hétérogénéité dans leur formulation. Le risque sous-jacent à ce constat réside dans l'absence de vision globale du besoin des opérateurs. EDF a engagé une réflexion afin de corriger ce problème en "outillant" le processus d'élaboration et de gestion des exigences sur la base de travaux relatifs au "requirement engineering" et la modélisation des tâches.

S'agissant des **expérimentations ergonomiques**, le projet EPR a démontré une maîtrise méthodologique satisfaisante dans la conduite des essais. Ce point a été mentionné comme un facteur de succès dans le cadre de la mise en œuvre effective d'une approche participative qui constitue l'un des fondements majeurs du programme d'intégration des facteurs humains.

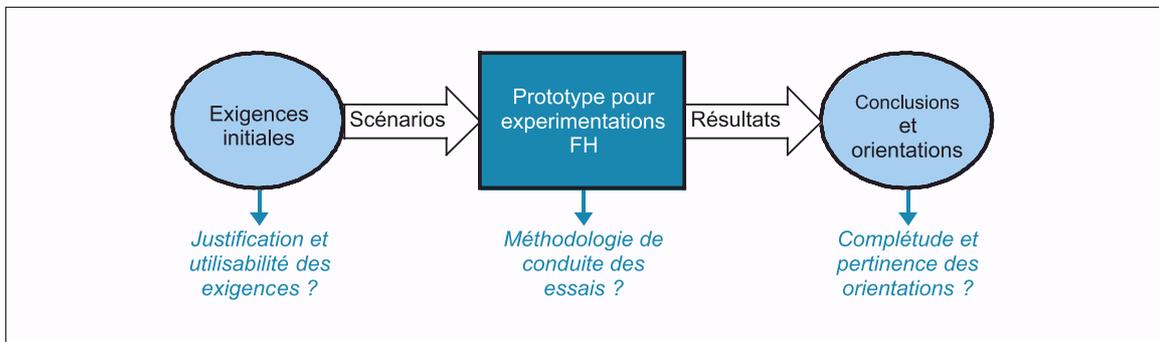


Figure 7 - Les étapes de la démarche d'analyse

Concernant les **orientations de conception résultantes**, l'IRSN a jugé positive l'évolution consistant à donner plus de responsabilités aux opérateurs. Ceci est cohérent avec les connaissances disponibles concernant notamment la prise de décision, l'adaptation aux situations imprévues, etc. Cette orientation nécessitera une attention particulière lors de la conception détaillée de manière à ce que la notion "d'assistance informatisée" sous-jacente à cette évolution soit déclinée de manière cohérente et homogène dans l'ensemble des fonctionnalités du système de supervision.

### Conclusions

Le projet EPR a démontré une certaine maturité quant à l'intégration des facteurs humains dans le processus de conception, même si des efforts restent à fournir en matière d'outillage méthodologique pour en améliorer l'efficacité.

Si les orientations proposées par le projet ont été jugées positives par l'IRSN, elles n'en feront pas moins l'objet d'une attention particulière. L'enjeu consiste à laisser plus de responsabilités aux opérateurs sans laisser plus de place à l'erreur humaine.

Sur le plan de la sûreté, l'acceptabilité de cette orientation résidera dans un compromis constant entre la flexibilité du système et le niveau de guidage qu'il convient d'apporter selon la situation de conduite considérée. L'analyse approfondie de l'expérience d'exploitation sur les paliers existants, voire de celui issu d'autres domaines que le nucléaire, sera une nécessité absolue pour construire ce compromis.

### Et maintenant...

En septembre 2005 aura lieu une nouvelle campagne d'essais ergonomiques qui permettra de

franchir un nouveau pas dans la spécification détaillée des interfaces de supervision.

Au-delà de la salle de commande, les problématiques relatives aux interventions locales et à la maintenance devraient prochainement faire l'objet d'analyses spécifiques. ■

# La R&D en appui de l'EPR

Research and development in support of EPR

par **Jean-Marie Seiler**, Directeur de Recherche au CEA/DEN/DTN/Cadarache, **Garo Azarian**, Ingénieur au Service Sûreté – FRAMATOME/ANP La Défense, **Bernard Chaumont**, DSR, Chef du Service d'Évaluation des accidents graves et des rejets radioactifs – IRSN/Fontenay-aux-Roses, **Alain Dubail**, Responsable du Programme Nucléaire à EDF/Chatou, **Manfred Fischer**, FRAMATOME/ANP/GmbH/Allemagne

L'EPR est le fruit d'environ 10 ans de collaboration entre Framatome et Siemens. Les deux industriels ont conçu un réacteur qui reprend les meilleures technologies des réacteurs N4 français et des KONVOI allemands. La conception de l'EPR a été dictée par deux objectifs essentiels :

- **l'amélioration de la sûreté** en général et plus particulièrement la prise en compte des accidents graves en minimisant autant que faire se peut l'impact radiologique à l'extérieur de l'enceinte de confinement,
- **la compétitivité** par rapport aux réacteurs existants et par rapport aux autres sources d'énergie.

Pour atteindre ces objectifs, les grands acteurs du nucléaire français ont déployé des efforts de R&D significatifs, souvent menés en collaboration avec les grands acteurs allemands et quelquefois aussi dans le cadre de contrats financés en partie par la Communauté européenne. Dans le domaine de la sûreté, l'innovation principale réside dans la prise en compte de la **gestion des accidents graves avec notamment l'implantation d'un récupérateur de matériaux fondus (corium)** dans l'enceinte de confinement. Pour ce qui concerne la compétitivité par rapport aux réacteurs existants, des efforts importants ont été faits au niveau des **composants et du cœur du réacteur**. Il faut noter que la R&D de fond conduite pour les besoins du nucléaire en général (notam-

ment pour ce qui concerne les matériaux) a été intégrée dans le processus de mise au point de l'EPR.

Cette présentation ne prétend pas couvrir toute la R&D ayant servi à la conception du réacteur. Elle illustre simplement les principaux travaux propres à l'EPR conduits chez les grands acteurs du nucléaire français et allemands dans le **domaine de la sûreté**. Pour ce qui concerne le combustible, l'effort de R&D entrepris pour les réacteurs actuels sera poursuivi suivant la tendance actuelle d'accroissement des taux de combustion, d'une plus grande manoeuvrabilité et de la mise au point de produits nouveaux. De plus, quelques informations sont données sur les travaux de R&D faits par un exploitant potentiel (EDF) relatifs à l'évolution des méthodes de spécification et de qualification de matériels ou systèmes.

## Le domaine des accidents sans dégradation du combustible

Pour ce qui concerne la thermohydraulique accidentelle, le **code CATHARE** (Fig. 1) [1] a été l'outil de base pour les études. Du point de vue expérimental, quatre essais de type "EPR" ont été conduits sur la **boucle BETHSY** [2] pour évaluer l'efficacité de certaines options de conception vis-à-vis des transitoires accidentels suivants : (1) perte totale d'eau alimentaire, (2) brèche 3 pouces en branche froide, (3) rupture de Tubes de Générateur de Vapeur (2 tubes) et (4) perte totale des alimentations électriques. Les résultats ont été comparés aux essais similaires en configuration de palier de 900 MW.

Les principaux paramètres pris en compte sur l'installation BETHSY ont concerné la capacité des organes de décharge (pressuriseur et secondaire des générateurs de vapeur), les seuils de déclenchement des injections de secours et les procédures accidentelles. Ces travaux relatifs à la thermohydraulique accidentelle ont permis de confirmer le bien fondé des principaux choix de conception des systèmes de sauvegarde et d'identifier quelques pistes potentielles d'amélioration vis-à-

## Executive Summary

The European Pressurizer Reactor is a result of about 10 years of collaboration between Framatome and Siemens. The two companies have developed a reactor which took the best features of the french N4 and the german KONVOI plants. The EPR developers chose an evolutionary path with an emphasis on active safety features in keeping with the fleet of currently operating reactors. The net result of this design approach is a plant that is economically competitive while achieving a high level of safety. For the design process a lot of R&D work has been performed both in France and in Germany. The main focuss was directed towards safety and economics. The present paper depicts above all the R&D devoted to severe accidents and to fuel performance in terms of manoeuvrability. Obviously, all other R&D works performed for the current reactors have been used by the EPR developers.

vis des phénomènes thermohydrauliques mis en jeu dans le code CATHARE.

Le code CATHARE dans sa version V2.5 diffusée en fin 2003 (possibilité de modélisation de la cuve en 3 Dimensions) sera l'outil de référence pour les études EPR.

### Le domaine des accidents graves

Le traitement des conséquences d'un accident grave se place dans le cadre de la démarche de **sûreté de défense en profondeur et des recommandations communes émises par les Autorités de sûreté française et allemande publiées en 1993**. L'approche mise en place dès les études de conception selon une voie déterministe complétée par des études probabilistes a visé les objectifs suivants :

- élimination en pratique des conditions accidentelles pouvant conduire à des rejets importants de produits de fission à court terme,
- élimination du besoin de déplacement de population en situations d'accidents graves, sans évacuation d'urgence du proche voisinage et sans limitation à long terme pour la consommation de produits alimentaires.

En situations d'accidents graves sur l'EPR, les objectifs ci-dessus peuvent être atteints au moyen d'une stratégie de mitigation permettant d'assurer **l'intégrité de l'enceinte de confinement**. La stratégie repose essentiellement sur la possibilité de dépressuriser de manière fiable le circuit primaire, sur l'implantation de recombineurs d'hydrogène dans l'enceinte, sur la mise en place d'une double enceinte avec filtration pour réduire les risques de fuite radiologiques et in fine sur la conception d'un récupérateur de corium chargé d'assurer une stabilisation du corium sur le long terme.

### Stratégie de dépressurisation du circuit primaire

L'objectif consiste à éviter toute éventuelle rupture de cuve à pression élevée, excluant ainsi la dispersion de corium dans l'enceinte susceptible de provoquer une forte montée en pression. La capacité de décharge du circuit primaire a fait l'objet de nombreuses études qui ont permis de qualifier les vannes dédiées à la dépressurisation. Le code **MAAP-4 (EDF et Framatome ANP)** a été utilisé pour les études de scénarios accidentels les plus probables. Du point de vue expérimental, les **essais DISCO (géométrie du puits de cuve)** réalisés à FzK (Forschungszentrum Karlsruhe – Allemagne) ont permis de justifier la capacité de rétention des débris de corium au moment de la rup-

ture de cuve en géométrie EPR avec incidence géométrique au niveau de l'enceinte.

### Mitigation du risque hydrogène

Sur ce point de première importance, la R&D a couvert quatre thèmes, à savoir (1) la production d'hydrogène, (2) la répartition de l'hydrogène et des températures dans l'enceinte, (3) la définition des critères d'accélération de flammes et des calculs de risque de détonation et (4) in fine le développement de moyens de mitigation.

**Sur le thème de l'hydrogène, tant pour les codes de calcul que pour les expérimentations, des approches fines pour la description des phénomènes physiques et des approches de comportement global ont été conduites.** Pour le point particulier des recombineurs catalytiques d'hydrogène développés par Framatome ANP, des essais ont été réalisés sur les installations KALI (CEA-EDF) et H2PAR (IRSN-EDF) pour des tests de performance en situations accidentelles avec présence ou non de produits de fission susceptibles de dégrader l'efficacité des recombineurs. Des outils de calcul en géométrie tri-dimensionnelle très performants, GASFLOW [3], COM3D (Framatome ANP-FzK) ont permis de justifier l'implantation des recombineurs dans l'enceinte. L'IRSN et le CEA ont développé un outil semblable, le logiciel TONUS [4].

### Rejets radioactifs (Terme Source de Produits de Fission)

Vu l'objectif poursuivi **visant à minimiser au mieux la quantité de produits radioactifs pouvant se retrouver hors de l'enceinte de confinement**, de nombreux programmes expérimentaux sur les produits de fission ont été utilisés pour les besoins de l'EPR. Notons par exemple le programme VERCORS (IRSN, EDF) pour le relâchement de produits de fission du combustible, le programme intégral PHEBUS PF (IRSN, CE) pour le relâchement et le transport, le programme CAIMAN (CEA, EDF, IRSN) pour le comportement de l'iode. **Le code ASTEC (IRSN, GRS), et actuellement code européen de référence (projet SARNET)**, est fortement utilisé pour l'interprétation des essais traitant des produits de fission.

### Stabilisation et récupération du corium

Une solution de rétention du corium en cuve ne pouvant pas être justifiée à cause des flux thermiques trop élevés, **Framatome ANP a conçu un récupérateur de corium hors cuve basé sur un concept d'éta-**

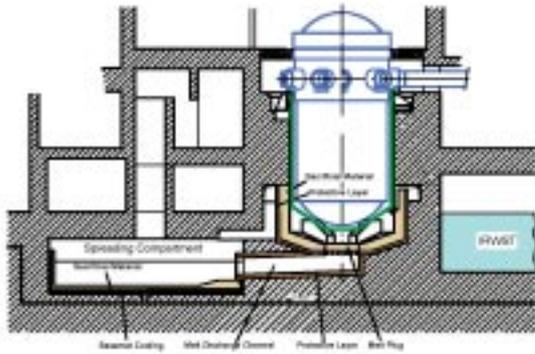


Figure 2 - Le récupérateur de corium

lement [Fig. 2] [5] sur une grande surface avec refroidissement et stabilisation du corium sur le long terme. Le récupérateur est situé dans un compartiment dédié dans l'enceinte pour ne pas subir des sollicitations importantes lors de la rupture de cuve.

Ce compartiment est séparé du puits de cuve par une porte fusible. Pour faire face à la situation long terme, il faut pouvoir évacuer la puissance résiduelle (de l'ordre de 35 MW) pour une masse de corium d'environ 200 tonnes.

**- Comportement du corium dans le puits de cuve**

Les études consacrées au comportement du corium dans le puits de cuve ont visé à couvrir les incertitudes liées aux transitoires de déversement gravitaire du corium de la cuve en collectant toute la matière afin de permettre un étalement "en une seule fois" sur le récupérateur, après fusion de la porte. La rétention temporaire est assurée par le choix et la mise en place dans le puits de cuve d'un béton sacrificiel dont l'ablation doit s'effectuer suffisamment lentement pour garantir l'accumulation de la plus grande partie du corium dans le puits de cuve avant coulée. Les conditions de sortie du corium de la cuve ont été évaluées à l'aide du logiciel MAAP-4. Pour ce qui est de la cinétique d'ablation du béton sacrificiel, les grands programmes tant en "simulants" (ARTEMIS - IRSN-EDF-CEA et BETA - FzK) qu'en matériaux réels (ACE, MACE- ANL ; VULCANO - CEA-EDF-IRSN ; CORESA - Framatome ANP) ont été utilisés comme base expérimentale.

**- Etalement du corium sur le récupérateur**

Pour obtenir une répartition complète et homogène du corium sur le récupérateur, l'étalement rapide du corium collecté dans le puits de cuve nécessite une rupture rapide de la porte de séparation des compartiments (section de 2,4 m²). Les conditions de la rupture ont fait l'objet des essais KAPOOL (FzK).

L'étalement du corium est décrit par les logiciels THEMA (CEA), CORFLOW (Framatome ANP) et CROCO (IRSN). Ces outils sont validés sur les expériences CORINE (IRSN) et KATS (FzK) en matériaux simulants et VULCANO-E (CEA-EDF-IRSN) ou COMAS (Siempelkamp) en matériaux réels. Des essais d'étalement à grande échelle ont également été réalisés par FZK dans le cadre du programme européen ECOSTAR.

**- Refroidissement et stabilisation du corium sur le long terme [6]**

Cette phase est essentielle pour la gestion de l'accident. Il faut noter que le récupérateur a une surface de 170 m² pour une épaisseur de matériaux de 30 cm environ.

Le récupérateur est constitué (Fig. 3) d'une structure métallique (refroidie aussi en partie inférieure) protégée par une couche de béton sacrificiel (10 cm). Le délai d'ablation de la couche de béton sacrificiel sera suffisant pour garantir le noyage passif de la structure. L'interaction corium-béton sacrificiel dans la zone d'étalement achève la stratification du corium, la partie oxyde se trouvant au-dessus de la partie métallique.

L'efficacité du refroidissement - en partie supérieure grâce au noyage du corium, et en partie inférieure grâce à la structure métallique de refroidissement - permettra une stabilisation en quelques heures et une solidification de tout le corium en quelques jours. A noter que la suppression du matériau réfractaire prévu sur le

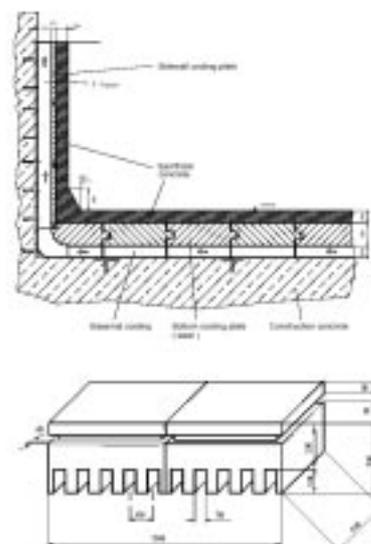


Figure 3 - Refroidissement du corium (dimensions sujettes à modifications)

concept initial sur le récupérateur permet cette solidification rapide en quelques jours au lieu d'un mois environ.

Les flux de chaleur maximaux à évacuer vers le bas par la structure métallique munie d'ailettes massives sont inférieurs à 80 kW/m<sup>2</sup>. L'efficacité de ce dispositif de refroidissement a été vérifiée à l'aide d'essais à l'échelle 1 réalisés par Framatome ANP à Erlangen.

### **Mitigation du risque d'explosion de vapeur suite à une interaction corium-eau (en- et hors-cuve)**

La mitigation du risque repose sur deux approches complémentaires :

- l'évaluation du risque par une analyse déterministe des conséquences d'une explosion de vapeur. Cette analyse s'appuie sur une modélisation détaillée des phénomènes physiques. Le logiciel **MC3D (IRSN, CEA)** permet la réalisation de calculs de séquences accidentelles réacteurs. Il conduit à l'évaluation de l'énergie mécanique résultant d'une interaction corium-eau. Du point de vue expérimental, en utilisant les **résultats d'essais BERDA (FzK)** sur l'énergie mécanique acceptable au niveau d'un couvercle de cuve, l'état de l'art confirme que le risque de perte d'étanchéité d'une enceinte suite à une explosion vapeur en cuve est très faible,
- l'analyse des conditions de mise en contact, qui permet de limiter les situations à risques (lorsque, par exemple, les masses de corium sont trop faibles ou le confinement peu important). Cette analyse est réalisée sur la base de calculs de scénarios de progression du corium, Pour la partie hors cuve, Framatome ANP a pris **des dispositions constructives pour éviter des interactions de masses significatives eau-corium** en évitant des accumulations importantes d'eau dans le puits de cuve et dans la zone d'étalement avant le noyage du corium.

### **R&D en appui de l'ingénierie d'EDF pour les méthodes de spécification et qualification**

Ces travaux menés par EDF-R&D ont concerné notamment le contrôle-commande, la prise en compte de la maintenance à la conception et les méthodes de qualification.

#### **Contrôle-commande**

Deux projets ont mobilisé l'essentiel des efforts à savoir :

- le projet SFR (Spécification Fonctionnelle

Robuste) visant à fournir aux concepteurs du contrôle-commande des règles de conception et des modèles permettant la saisie des spécifications fonctionnelles par systèmes élémentaires,

- le projet Contrôle-Commande EPR qui a fourni un appui au Centre d'Équipement Nucléaire pour d'une part l'établissement des cahiers des charges aux fournisseurs et, d'autre part, l'évaluation de différents systèmes vis-à-vis des enjeux de sûreté et de compétitivité.

Par ailleurs, la R&D a contribué à mettre au point la démarche de prise en compte des facteurs humains pour la conduite informatisée.

#### **Prise en compte de la maintenance à la conception**

Le thème, relativement novateur à l'époque, de la prise en compte de la maintenance lors de la conception a été abordé dès 1993 et a donné lieu à l'élaboration d'une démarche "CIDEM" (comme Conception Intégrant la Disponibilité, le retour d'Expérience et la Maintenance).

L'objectif principal était de proposer et de concevoir des méthodes et des outils d'ingénierie permettant d'optimiser le coût global de possession de l'installation en déclinant, systèmes par systèmes puis matériels par matériels, les objectifs initiaux de disponibilité, de coûts de maintenance et de dosimétrie, ceci en s'appuyant sur le REX du parc actuel. La R&D a contribué à cette démarche en mettant au point des guides et des outils pour spécifier des exigences et clauses FMD (Fiabilité, Maintenabilité, Disponibilité) des Cahiers de Spécifications Techniques des matériels.

#### **Qualification de matériels**

Différents travaux visant également à la réduction des coûts sont à signaler dans le domaine de la qualification de matériels. Ils ont, de façon générale, fourni les éléments permettant d'envisager de remplacer une méthode de qualification basée intégralement sur des essais (comme cela avait été le cas pour les paliers précédents) par une approche mixte combinant calculs numériques, retour d'expérience sur des matériels analogues et essais en nombre limité.

En conclusion de cette revue sur les principaux travaux de R&D mis en jeu pour l'EPR dans le domaine de la sûreté, il faut mentionner que du fait du caractère évolutif du réacteur, le projet a profité pleinement des travaux de R&D réalisés pour accompagner l'évolution des réacteurs

actuels. Des travaux spécifiques importants ont cependant dû être conduits pour les composants nouveaux tels certains systèmes de sûreté, principalement le récupérateur de corium. Par ailleurs, il faut aussi noter que tous les travaux de R&D ainsi que les moyens expérimentaux mis en place dans les organismes français et allemands utilisés pour la conception de l'EPR seront disponibles si nécessaire pour fournir un appui à l'exploitation du réacteur. ■

### Références :

[1] Methodology, status and plans for development and assessment of CATHARE code - OECD/CSNI workshop on transient thermalhydraulic and neutronic codes requirements - Annapolis, USA, November 1996 - *D. Bestion et al.*

[2] PWR accident management related tests: some BETHSY results. NURETH 6 international conference - Grenoble, France, October 1993 - *P. Clement et al.*

[3] Analyses of containment experiments with GASFLOW II. 10th International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics, Seoul, Korea, October 2003 - *P. Royl.*

[4] On the use of the MISTRA coupled effect test facility for the validation of containment thermalhydraulics codes. 10th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Seoul, Korea, October, 2003 - *E. Studer et al.*

[5] Analysis of corium recovery by the EUROCORE group. Nuclear Engineering and Design 2757 (2002) 1-18, *JM. Seiler et al.*

[6] Demonstration of the heat removing capabilities of the EPR core. 3rd International symposium on two-phase flow modelling and experimentation Pisa, Italy, September 2004 - *M. Fischer et al.*

# Présentation de l'analyse sur la sûreté de la conception du réacteur EPR effectuée par STUK

STUK's safety review of EPR design

par **Petteri Tiippana** et **Juhani Hyvärinen**, STUK – Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection – Finlande

L'Autorité finlandaise de radioprotection et de sûreté nucléaire (STUK) a commencé à évaluer la conception de l'EPR à la fin des années 90, au moment où l'électricien TVO (Teollisuuden Voima Ltd) lançait une étude sur la faisabilité de la construction d'une nouvelle centrale nucléaire. A l'automne 2000, TVO a soumis une demande de décision de principe relative à la construction d'une centrale de 1000 à 1600 MWe soit sur le site de Olkiluoto, soit sur celui de Loviisa. En février 2001, STUK a remis au gouvernement finlandais les conclusions de son évaluation préliminaire de sûreté demandée pour statuer sur la décision de principe. Six concepts différents de réacteurs à eau légère, parmi lesquels l'EPR, ont été étudiés dans ce cadre par STUK. Chaque concept nécessitait des modifications pour satisfaire à toutes les exigences de sûreté en vigueur en Finlande. Le gouvernement finlandais a pris sa décision de principe le 17 janvier 2002 et cette décision a été ratifiée par le parlement finlandais le 24 mai 2002.

Après l'obtention de la décision de principe, TVO a lancé un appel d'offres auprès des principaux constructeurs de centrales nucléaires et a retenu la conception EPR proposée par le consortium réunissant Framatome ANP et Siemens AG (CFS). TVO a déposé une demande d'autorisation de construction d'un réacteur de type EPR à Olkiluoto (Olkiluoto 3) auprès du ministère finlandais du commerce et de l'industrie au début de 2004.

Pour juger de l'opportunité de délivrer l'autorisation, le ministère du commerce et de l'industrie a demandé à STUK de prendre officiellement position sur la sûreté de la conception du réacteur Olkiluoto 3. La validation de la conception par STUK constituait en effet l'un des préalables à la délivrance de l'autorisation de construction. TVO a soumis son dossier à l'autorité de sûreté en janvier 2004. Il se composait de documents relatifs à la conception et notamment du rapport préliminaire de sûreté, d'un document relatif au classement de sûreté, d'une étude probabiliste de sûreté, ainsi que de documents ayant trait au contrôle de la qualité au cours de la conception et de la construction, aux plans préliminaires d'inter-

vention en cas d'urgence, à la protection physique et aux dispositifs de sauvegarde ainsi qu'aux possibilités d'intervention de l'autorité de sûreté pendant la phase de construction.

STUK a communiqué sa position ainsi qu'un rapport d'évaluation de la sûreté au ministère du commerce et de l'industrie en janvier 2005. L'autorité finlandaise n'a pas anticipé d'obstacles liés à la sûreté de nature à s'opposer à la délivrance de l'autorisation de construction. Pour parvenir à cette conclusion, une étude intensive de la conception du réacteur Olkiluoto 3 s'est révélée nécessaire. Elle a duré toute l'année 2004 et s'est prolongée jusqu'au début de 2005. Des modifications ont dû être apportées à la conception afin de satisfaire aux exigences finlandaises en matière de sûreté. Le gouvernement a accordé l'autorisation le 17 février 2005.

## L'analyse de sûreté de la conception effectuée par STUK

Cette étude s'est concentrée sur la conception générale de la centrale, l'analyse des conditions de fonctionnement transitoires, incidentelles et accidentelles et des conséquences radiologiques associées ainsi que l'impact radiologique des conditions d'exploitation. En outre, la mise en oeuvre des principes de redondance, de diversification et de séparation requis pour les systèmes importants pour la sûreté afin de respecter les critères de défaillance associés aux conditions de fonctionnement dégradés de l'installation a été examinée avec attention. Une attention particulière a été portée aux questions relatives aux accidents graves et aux chutes d'avions de ligne.

## Executive Summary

A permit to construct a new nuclear power plant in Finland was granted to Teollisuuden Voima Ltd by the Government in February 2005. The permit was granted after STUK (Radiation and Nuclear Safety Authority in Finland) had issued its statement on the safety of the new plant. In its statement STUK concluded that the Olkiluoto 3 unit which is based on the EPR design can be considered as being safe for construction.

Afin de compléter sa propre étude et d'obtenir une évaluation de la conception réalisée de manière indépendante, STUK s'est adressé à des organismes et experts extérieurs pour l'étude de différents sujets précis. Ainsi, STUK a demandé à des organismes de recherche finlandais (le centre technique de recherche finlandais, VTT) et allemand (l'institut pour la sûreté et la fiabilité, ISaR), d'analyser les situations de fonctionnement transitoires incidentelles et accidentelles sur quelques scénarios pénalisants. L'ISaR a également donné son avis, en tant qu'expert, sur la conception du système d'injection de sûreté. Les résultats des analyses des situations de fonctionnement transitoires, incidentelles et accidentelles auxquels sont parvenus les organismes indépendants en utilisant différents outils et modèles d'analyse, ont montré le caractère effectivement conservatif des hypothèses prises par le concepteur pour réaliser ses études.

STUK a également demandé à l'organisme de recherche allemand GRS (*Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit*) d'étudier la protection de la centrale contre les chutes d'avions et d'évaluer le concept d'exclusion de rupture appliqué aux circuits primaire et secondaire. STUK a demandé à des chercheurs de l'université de technologie de Lappeenranta d'étudier la fonctionnalité du système de refroidissement de l'aire d'étalement du cœur fondu. En outre, l'Autorité de sûreté a demandé de l'assistance sur des sujets qui sortaient de ses domaines de compétence : étude des systèmes numériques programmables, protection contre les interférences électromagnétiques et les impulsions électromagnétiques puissantes, analyse des facteurs humains et étude des phénomènes météorologiques, entre autres. Les résultats de ces diagnostics, tests et avis d'experts ont été intégrés dans l'instruction réalisée par STUK.

L'instruction a donné lieu à de nombreuses réunions entre STUK, TVO et le consortium CFS sur différents thèmes. Ces réunions et les audits des processus de conception mis en œuvre par CFS ont permis à STUK de se faire une idée assez précise de la capacité du consortium et de TVO à assurer la gestion du projet. Réalisés principalement par TVO avec la participation de STUK en tant qu'observateur, les audits ont conduit à formuler plusieurs remarques. CFS est parvenu à trouver une solution pour les plus significatives d'entre elles avant que STUK fasse connaître sa position.

### Les modifications apportées à la conception

L'instruction a montré la nécessité d'apporter certaines modifications à la conception. Les exemples ci-dessous indiquent que les modifications demandées par STUK ont porté principalement sur l'amélioration de la fiabilité des systèmes importants pour la sûreté, en introduisant plus de diversification, de redondance ou de séparation.

L'une des modifications a concerné la prise en compte de l'accident de perte de réfrigérant primaire par grosse brèche dans le dimensionnement de la centrale. STUK a exigé la mise en place de dispositifs anti-débattement sur le circuit primaire en plus de l'application du concept d'exclusion de rupture. En outre, les conséquences d'un accident de perte de réfrigérant primaire avec rupture guillotine doublement débattue sur le refroidissement du cœur du réacteur et le contrôle de sa criticité devaient être analysées. Les dispositifs de protection contre les accidents graves ont dû être améliorés par le dédoublement des valves de dépressurisation dédiées et par la simplification de la conception de l'aire d'étalement du cœur en fusion. Le problème du contrôle de l'hydrogène dans l'enceinte de confinement à double compartiment s'est lui aussi révélé complexe. Les analyses relatives à la distribution de l'hydrogène et aux marges de protection contre les explosions d'hydrogène dans l'enceinte de confinement ont conduit à installer des sas supplémentaires au dessus des compartiments du générateur de vapeur afin de garantir une bonne distribution de l'hydrogène dans l'enceinte. En ce qui concerne la protection contre les chutes d'avions, il était impératif que la conception soit capable de résister à la chute d'un avion de ligne ou d'un avion militaire sans provoquer de rejets radioactifs directs dans l'atmosphère. Certaines modifications ont été apportées à la conception au cours de l'étude afin d'accroître l'épaisseur des parois ainsi que l'espace entre les parois interne et externe des bâtiments de sûreté et du bâtiment combustible et de protéger les prises d'air contre la pénétration du combustible.

En ce qui concerne l'analyse des accidents, la gestion des ruptures de tubes du générateur de vapeur a été modifiée afin de réduire le plus possible les rejets directs à l'atmosphère. STUK s'est également intéressé à la conception des puisards et a exigé la présence d'un dispositif de recirculation inverse pour le nettoyage du filtre. Sur ce sujet STUK a également suivi de près les tests de vérification de

la conception proposée. En ce qui concerne les automatismes, l'étude s'est concentrée sur l'architecture des différents systèmes de contrôle-commande et leurs fonctions, notamment sur l'application au système de protection des principes de diversification et de séparation. STUK a également exigé l'intégration d'un système automatique de secours, simple, en technologie cablée, pour faire face à une éventuelle perte totale du contrôle-commande numérique.

Par ailleurs, il a été exigé que les câbles électriques classés de sûreté soient physiquement séparés des câbles non classés. La séparation des alimentations électriques des systèmes de sûreté utilisés pour la gestion des accidents de référence de ceux utilisés pour les accidents graves a été renforcée. En outre, une turbine à gaz sera construite sur le site afin de disposer d'une source indépendante d'alimentation en courant alternatif pour toutes les tranches. Il est également prévu de construire des parois coupe-feu supplémentaires dans l'espace annulaire du bâtiment réacteur afin d'assurer une meilleure séparation physique des systèmes redondants. Certaines modifications ont dû être apportées pour faire face aux phénomènes météorologiques observés en Finlande. Par exemple, les prises d'air des groupes électrogènes de secours et des systèmes de refroidissement ont dû être protégés contre le risque d'obstruction par la neige.

### **La coopération étroite entre l'Autorité de sûreté française et STUK**

STUK a travaillé en coopération étroite avec l'ASN et son appui technique l'IRSN. Cette coopération a pris la forme de réunions et d'échanges d'informations sur les résultats de l'étude relatifs à des aspects précis de la conception (accidents graves, automatisation, chutes d'avions, etc.). Ces réunions et échanges d'informations étaient importants dans le cadre d'une recherche de positions communes. Par ailleurs, un représentant de STUK a été nommé membre du Groupe permanent d'experts pour les réacteurs nucléaires (GPR). L'ASN a également communiqué à STUK les conclusions des travaux menés conjointement par les autorités de sûreté française et allemande dans les années 90 pour définir les critères fondamentaux auxquels devait répondre la conception de l'EPR. Des réunions ont aussi été organisées avec le bureau en charge du contrôle des équipements sous pression (BCCN) au sein de la DGSNR afin d'échanger des informations sur la conception et la fabrication des composants

du circuit primaire. STUK estime que cette coopération avec l'ASN et l'IRSN a été des plus utiles pour lui permettre d'évaluer la sûreté de la conception de l'EPR et entend la poursuivre pendant la phase de construction.

### **Les résultats de l'analyse de sûreté de la conception**

STUK a estimé que l'instruction n'a fait apparaître aucun problème de sûreté de nature à s'opposer à la délivrance d'une autorisation de construction. L'évaluation de la sûreté menée par l'Autorité finlandaise conclut que, sous réserve que les dispositions et les engagements pris dans le rapport préliminaire de sûreté soient respectés, l'exploitation du réacteur Olkiluoto 3 est sans danger pour les travailleurs, les personnes du public et l'environnement. STUK a par ailleurs indiqué que la conception de l'EPR présente une sûreté améliorée par rapport aux générations actuelles de centrales. Cette amélioration est due à la redondance des systèmes de sûreté, à la séparation systématique des sous-systèmes et à la forte diversification fonctionnelle. La prise en compte à la conception de la protection de l'enceinte de confinement et d'autres bâtiments importants pour la sûreté contre les accidents graves et les chutes d'avions constitue également une avancée.

Dans sa prise de position, STUK a néanmoins posé certaines conditions. Ainsi, dans la mesure où la conception détaillée de la centrale sera affinée tout au long de la phase de construction, l'autorité finlandaise demande à pouvoir effectuer un suivi adéquat du projet. Par ailleurs, le calendrier de construction très ambitieux doit lui ménager des plages de temps suffisantes pour lui permettre de s'acquitter de ses tâches (approbation de la conception détaillée). Concernant la gestion des déchets, STUK demande que les projets en la matière soient davantage précisés et, en l'espèce, intègrent les conséquences de la mise en service de la nouvelle tranche sur les plans actuels de gestion des déchets. L'Autorité de sûreté a insisté sur le fait que TVO devra développer des compétences appropriées et les maintenir à niveau lors des phases de construction et d'exploitation de la nouvelle tranche. Enfin, STUK a fait remarquer qu'il est nécessaire, vis-à-vis de la population finlandaise, de s'engager à ce que l'infrastructure assurant la sûreté nucléaire soit maintenue, le niveau de qualification des intervenants soit suffisant et que les activités de recherche fondamentale dans le domaine de la technologie nucléaire soient poursuivies.

### La poursuite des travaux

L'instruction du projet a représenté un challenge important pour les équipes de STUK. En 2004, STUK a ainsi consacré à cette tâche près de 30 personnes-an. La conception de la centrale n'est pas encore finalisée. Le processus de contrôle et d'approbation, axé à la fois sur les aspects mise en œuvre et gestion de projet, se poursuivra pendant la construction. STUK examinera, puis approuvera, la conception détaillée des systèmes, structures et composants (SSC) importants pour la sûreté. Leur fabrication ne pourra débuter qu'après approbation par STUK, ce qui n'est pas sans poser de difficultés pour le projet eu égard au fait que le calendrier de construction est des plus serré. Outre l'approbation de la documentation sur la conception détaillée, STUK devra également agréer les fabricants des principaux équipements sous pression, valider les procédures d'installation et de mise en service des équipements et soumettre les processus de fabrication à des inspections. Des inspections portant sur la construction des principales infrastructures civiles sont également prévues. S'agissant des systèmes électriques et de contrôle-commande, STUK contrôle les processus de conception et de fabrication des équipements, de vérification et de validation des logiciels et des systèmes et, enfin, les tests effectués hors site ainsi que l'installation et la mise en service sur site.

STUK a mis au point un programme d'inspections de la construction qui porte sur la gestion de projet assurée par TVO et les procédures de travail de ce dernier. Le cadre des inspections couvre la phase de construction et des programmes d'inspection détaillés seront définis tous les semestres. A titre d'exemple, les inspections prévues par le programme porteront sur la gestion de projet assurée par TVO, l'utilisation qu'il fait des ressources, son approche des questions de sûreté, ses procédures de prise de décision, de gestion et de contrôle de la qualité et sa politique de formation.

Une fois la construction achevée, aux alentours d'août 2007, TVO devra soumettre une demande d'autorisation d'exploitation. Après la délivrance de cette autorisation, qui devrait intervenir en août 2008, le premier chargement du combustible et les essais de démarrage pourront débuter. Au cours de la phase d'instruction de la demande d'autorisation d'exploitation, TVO soumettra la documentation réglementaire à STUK aux fins d'examen et d'appro-

bation. Avant que le gouvernement puisse délivrer l'autorisation d'exploitation, l'Autorité de sûreté devra une nouvelle fois communiquer au ministère du commerce et de l'industrie sa position sur la sûreté de la conception. ■

# Point de vue sur l'EPR

## Standpoint on EPR

par **C. Pierre Zaleski, Sophie Meritet**, Centre de géopolitique de l'énergie et des matières premières (CGEMP)  
– Université Paris-Dauphine

### Introduction

Pour se prononcer sur les qualités de l'EPR, il est souhaitable de comparer les coûts de production de kilowatt-heure (kWh) de l'EPR et de ses concurrents potentiels. Nous nous bornerons à comparer l'EPR pour un fonctionnement en "base" avec le coût du kWh produit par les centrales à charbon et à gaz, et cela pour des raisons explicitées dans la référence 1. Toutefois, avant de passer à cette comparaison dans la 2<sup>e</sup> partie de notre article, nous présenterons dans une première partie la comparaison de l'EPR avec ses concurrents potentiels nucléaires. Dans les deux cas, nous effectuerons la comparaison en tenant compte d'un marché donné. En effet, comme nous l'avons indiqué précédemment (voir réf. 1 et 2) les conditions du marché peuvent influencer ces comparaisons. Notamment, le prix du gaz ou du charbon varie avec la localisation de la centrale. Cela peut aussi être vrai pour les conditions financières (coût de l'argent, fiscalité, etc.). Par conséquent, nous considérerons à titre d'exemple quelques zones géographiques où la construction de nouvelles centrales nucléaires est engagée ou envisagée: la Finlande, la Chine, les Etats-Unis, et la France. Bien entendu, dans nos réflexions, nous sommes tributaires des informations disponibles concernant les centrales nucléaires au stade de projet, données fournies en général par le constructeur et éventuellement par l'électricien client.

### Comparaison de l'EPR avec ses concurrents nucléaires potentiels

Nous pensons que dans l'état actuel des choses, les principaux concurrents sont :

- le modèle de Westinghouse AP1000 de 1175 MWe
- le modèle de General Electric ESBWR de 1500 MWe et peut-être le modèle ABWR de 1300 à 1600 MWe
- le modèle de l'industrie russe (Atomstroyexport) AES 92, un VVER de 1050 MWe.

Nous n'examinerons pas d'autres concurrents théoriques possibles, notamment le PBMR (petit réacteur à combustible boulets et refroidi à gaz) et

le ACR 700 canadien, qui à notre avis ont moins de chances de s'imposer dans les 20 prochaines années et tout particulièrement dans les marchés que nous allons considérer.

Pour les comparaisons entre les centrales nucléaires, il suffit en première approximation de s'intéresser aux "coûts instantanés" (coût "overnight") de construction. En effet, les conditions financières – coût de capital, système fiscal, intérêts intercalaires – ne dépendent pas du type de la centrale, sauf peut-être par le biais de la durée de construction (mais qui devrait être voisine (5 ans) pour les différents concurrents). Notons tout de même que Westinghouse prétend pour l'AP1000 pouvoir le construire en trois à quatre ans, et que l'ABWR était construit au Japon en quatre ans. Par conséquent, l'EPR, pour lequel on prévoit une durée de construction légèrement inférieure à cinq ans, devrait en toute rigueur être légèrement pénalisé.

Par ailleurs, la disponibilité de la centrale, ainsi que le coût de l'exploitation (fonctionnement, maintenance et combustible) nous semblent difficilement départager les différents concurrents. En effet, les objectifs annoncés sont similaires : pour la disponibilité, l'EPR affiche 91 % (réf. 3), l'ESBWR 92 % (réf. 4), et l'AP1000 93 % (réf. 5). Pour le coût d'exploitation, Electricité de France prévoit 12,4 € (hors taxes) par MWh, tandis que Westinghouse prévoit pour l'AP1000 11,5 \$/MWh<sup>1</sup>. On note ici que le coût prévisionnel pour l'exploitation de l'EPR est sensiblement supérieur à celui prévu pour l'AP1000, mais ceci pourrait être dû à l'hypothèse du cycle de combustible fermé utilisée par l'EDF, contre le cycle ouvert utilisé par les Américains<sup>2</sup>.

## Executive Summary

In this paper we discuss the competitiveness of EPR vis-à-vis its closest nuclear competitors, as well as coal- and gas-fired power plants operating in baseload mode. As pure economy is not the only criterion of competitiveness, we also discuss some industrial and political considerations, for some significant geographical regions, since this analysis cannot be done without referring to specific markets.

Tableau 1 : coût instantané de construction en \$ 2004 par KWe

EPR	ESBWR	AP1000	ABWR	AES 92
1540-170	1190-1250	1100-1260	1270-1500	1000-1100

Ajoutons que la disponibilité, comme le coût d'exploitation, dépendent bien plus de l'électricien gérant la centrale et des conditions du pays que du modèle choisi parmi les divers réacteurs à eau légère. On peut en effet constater de très grandes variations entre les meilleurs et les moins bons électriciens américains, utilisant pourtant des centrales de technologie et d'âge voisins. De même, pour la disponibilité, Duke Power, un des "meilleurs" électriciens américains, a atteint 95 % dans les années récentes, le Finlandais TVO a dépassé 90 %, tandis que EDF, opérant dans d'autres conditions et ayant un parc bien plus important, n'arrive pas pour le moment à dépasser 85 %.

En ce qui concerne le concurrent russe nous ne connaissons pas la prévision précise de la disponibilité ni du coût de l'exploitation, mais même si ces paramètres sont moins performants, comme nous le pensons, par rapport aux paramètres correspondants européens ou américains, cela ne devrait pas suffire pour annuler les différences des coûts de construction.

Finalement, nous pensons que la compétitivité sur le plan purement économique entre l'EPR et ses concurrents peut être suffisamment bien résumée par le tableau 1.

Le tableau ci-dessus nécessite quelques commentaires:

- pour comparer les coûts évalués en euros et en dollars, il faut choisir un taux de change réaliste, entreprise difficile. En 2003 (réf. 1), nous avons suggéré un taux de 1,15 \$ pour 1 euro, en espérant qu'il n'était pas trop optimiste pour l'EPR. Aujourd'hui le taux du marché dépasse 1,3 \$ pour 1 euro, et il n'est pas impossible que le dollar baisse encore. Toutefois, le taux de marché peut ne pas représenter correctement les rapports de coûts d'études et de construction entre deux pays, dans ce cas la France et les USA. Nous avons donc décidé d'utiliser la fourchette d'1,15 \$ à 1,3 \$ par euro. C'est de cette façon qu'a été obtenue la fourchette pour l'EPR, où nous avons déduit le coût instantané du KWe des études de l'EDF pour Flamanville-3 (réf. 4), qui se monte à 1,339 €,
- les données de l'AP1000 et de l'ABWR datant de 2002, nous avons actualisé ces chiffres en dollars de 2004,

- les données de l'EPR, appuyées sur un marché clés en mains (Finlande) et un marché en cours (Flamanville) nous paraissent plus assurées que celles de ses concurrents. De plus, la technologie de l'EPR dérivant directement du N4 et du Konvoy, sans grande rupture, les coûts prévus peuvent être plus facilement tenus, que ceux de l'ESBWR et de l'AP1000 faisant appel à une technologie innovante de sûreté passive,

- l'ABWR, seul concurrent dont plusieurs exemplaires ont été construits ou sont en construction (au Japon et au Taiwan) a probablement la meilleure base pour l'estimation des coûts. La victoire de l'EPR sur l'ABWR en Finlande, quoique importante, doit être considérée avec une certaine prudence (voir plus loin au sujet de la Finlande). Par contre, ce qui nous semble significatif, c'est qu'en principe General Electric semble abandonner l'ABWR, seul concept de troisième génération bien éprouvé, au bénéfice d'un modèle plus innovant, l'ESBWR, qui reste encore à être certifié par la Nuclear Regulatory Commission, avec un objectif de fin 2008 (voir plus loin au sujet des Etats-Unis),
- pour l'AES 92, nous possédons peu d'informations récentes. C'est un modèle de technologie éprouvée, dont la puissance est limitée actuellement à environ 1100 MWe, mais des études sont en cours pour une extrapolation à 1500 MWe. Le coût de construction semble être bien plus faible que celui des réacteurs occidentaux, grâce notamment au coût de la main d'oeuvre russe (réf. 1). Par contre, certains considèrent que la technologie et l'assurance qualité ne sont pas toujours au niveau de celles de leurs concurrents occidentaux,

- les données de l'EPR, tirées de l'étude de l'EDF pour Flamanville, concernent une centrale de 1750 MWe. Les autres concurrents donnent des chiffres pour des centrales de puissance bien moindre. La grande puissance unitaire de l'EPR peut être un avantage - ce qui a été le cas en Finlande - mais si les clients souhaitent limiter la puissance unitaire à par exemple 1200 MWe, le coût du KWe de l'EPR serait significativement supérieur à celui donné dans le tableau 1,

- dans ce tableau, nous donnons des coûts excluant les coûts de tête de série, qui peuvent être très importants, mais qui à notre avis doivent être traités séparément de cette comparaison.

### Zones géographiques (marchés)

Nous considérerons tout d'abord le marché chinois, où trois réponses à un appel d'offre ont été reçues le 28 février et où le choix de l'îlot nucléaire devrait intervenir vers la fin de l'année. Notons que cet appel d'offres porte sur quatre unités de 1000 MWe ou plus, deux à installer sur un site dans le Guandong et deux à Sanmen près de Shanghai.

Ensuite, nous allons considérer le marché américain, pour lequel l'industrie nucléaire américaine espère obtenir des commandes vers l'année 2010. Puis, nous nous intéresserons au marché français, dans lequel, à notre avis, en dehors de la commande du premier EPR, il ne devrait pas y avoir de nouvelle commande avant 2015 ou même 2020. Finalement, nous ferons quelques commentaires sur le cas de la Finlande.

### Le marché chinois

Trois industriels ont répondu au récent appel d'offres pour quatre îlots nucléaires, à savoir Framatome ANP pour l'EPR, le consortium Westinghouse-Mitsubishi pour AP1000, et Atomstroyexport pour l'AES 92. General Electric n'a pas été invité, car les Chinois limitent cet appel d'offres aux réacteurs à eau pressurisée; néanmoins, GE espère être présent dans la compétition pour les prochaines étapes du programme nucléaire chinois. Il semblerait que l'EPR soit le plus cher à construire: en supposant que Framatome ANP propose le coût moyen d'une série de 10 tranches, une tranche EPR devrait coûter entre 1540 \$ et 1740 \$ par KWe (voir tableau 1).

Le coût instantané de l'AP1000 annoncé par Westinghouse, 1100-1260 \$ par KWe, s'applique à la quatrième tranche de série et suppose qu'il y a deux tranches identiques sur le même site (réf. 5). Westinghouse indique aussi que le premier AP1000 devrait coûter 1570 \$/KWe. Il nous paraît raisonnable de considérer que pour l'offre chinoise, la fourchette pour l'ensemble des quatre réacteurs devrait se situer entre 1300 \$ et 1400 \$/KWe, donc nettement inférieur à celui de l'EPR.

Le facteur pays (construction en Chine par rapport à la France ou aux Etats-Unis) et des imprévus ne sont pas inclus dans toutes ces estimations.

De nombreux autres facteurs peuvent entrer en jeu pour départager l'EPR et l'AP1000, notamment:

- *l'influence politique*. Les Chinois peuvent être ten-

tés d'ouvrir leur marché à l'industrie américano-nipponne, compte tenu de leurs relations majeures commerciales et politiques avec ces deux pays,

- *la confiance qu'ils ont dans la technologie proposée*. L'AP 1000 est une technique bien plus innovante que l'EPR, dont la technologie dérive des centrales en fonctionnement; de plus, deux unités EPR sont en cours de réalisation. De tout ceci résulte un certain avantage pour l'EPR,

- *la relation existant entre les Chinois et l'industriel en question*. Framatome ANP est certainement très bien placé compte tenu des très bonnes performances des centrales Framatome construites en Chine ainsi que des programmes de transfert de technologie et de formation des spécialistes chinois très réussis,

- *l'intérêt d'une technologie avancée*. Même si elle présente plus d'incertitudes pour les réalisations immédiates, une technologie plus innovante peut être une meilleure base pour les programmes futurs, et les Chinois envisagent un très important programme nucléaire,

- *les conditions de financement* peuvent varier selon l'appui que l'industriel obtient des autorités de son état et des banques,

- *le dynamisme commercial de l'industriel* peut varier selon la confiance qu'il a dans son produit, et donc avoir des conséquences sur le montant des imprévus qu'il décidera d'intégrer dans son offre.

En ce qui concerne l'offre russe, elle serait vraisemblablement encore moins chère que celle de Westinghouse, mais nous n'avons de données précises à ce sujet. Par contre, l'offre russe pourrait souffrir de l'image de son industrie; de même, les deux tranches que les russes construisent en Chine ont rencontré certains problèmes techniques qui ont retardé leur mise en service.

### Le marché américain

Cinq groupements d'électriciens ou électriciens individuels envisagent de commander des centrales nucléaires d'ici 2010. Ces commandes dépendront de l'aide que pourra apporter le gouvernement américain. En effet il n'y a pas eu de commandes de réacteurs aux Etats-Unis depuis plus de 30 ans, et les dernières constructions de réacteurs étaient assez catastrophiques, avec des délais de construction de plus de 10 ans et des coûts dépassant largement les coûts européens. L'industrie est donc méfiante et a besoin d'assurance gouvernementale, sinon les risques paraissent très élevés, engendrant des frais financiers aussi très élevés qui rendent ces centrales non compétitives.

Ces électriciens s'intéressent à trois modèles de réacteur : l'AP1000, l'ESBWR et l'ABWR. Très récemment, Duke Power – déjà engagé dans NuStart, groupement travaillant sur l'AP1000 et l'ESBWR, a manifesté de l'intérêt pour l'EPR en plus de ces deux modèles américains dans le cas d'un projet à part, mais il n'a pas encore fait son choix. Pour être présent sur le marché américain, il lui faut un sponsor électricien et que sa conception soit certifiée par la NRC. Cette certification prenant en principe entre 42 et 60 mois à partir de la déposition officielle de la candidature, et la procédure n'étant pas entamée par la NRC tant qu'un sponsor électricien n'est pas connu, Framatome ANP ne doit pas perdre du temps s'il veut être prêt à construire en 2010.

L'AP1000 devrait être certifié à la fin de cette année. Par contre, GE doit formellement déposer la demande de certification de l'ESBWR en juin 2005, en espérant une procédure accélérée compte tenu de ses contacts préliminaires avec la NRC, ce qui devrait aboutir à une certification en décembre 2008. L'ESBWR a de nombreux sponsors et l'ABWR, qui intéresse TVA, est déjà certifié.

En ce qui concerne les coûts, Monsieur A. White, président de General Electric Nuclear Energy, donne pour l'ESBWR entre 1190 \$ et 1260 \$ par KWe (réf. 7). Les chiffres donnés pour le marché chinois restent valables ici: 1100-1260 \$/KWe pour l'AP1000 à partir du quatrième exemplaire, et 1540-1740 \$ pour l'EPR (coût moyen d'une tranche d'une série de 10).

Il ne faut pas exclure une certaine préférence, non dite, pour l'industrie américaine, c'est-à-dire General Electric ou Westinghouse, même si le premier est allié aux japonais Hitachi et Toshiba et le deuxième est propriété de BNFL et allié à Mitsubishi Heavy Industries. Nous voyons donc que dans le cas américain le surcoût prévisible de l'EPR par rapport à ses concurrents paraît difficilement surmontable. Toutefois, si l'EPR réussit à s'imposer sur le marché chinois et si la construction en Finlande et en France se déroule bien, cela pourrait augmenter les chances d'EPR surtout si Westinghouse et General Electric ne montrent pas un dynamisme industriel très fort, en acceptant de prendre une partie des risques.

Notons que General Electric semble être décidé à pousser l'ESBWR, réacteur innovant faisant appel largement à la sûreté passive, au détriment de l'ABWR qui est pourtant un réacteur de troisième génération dont plusieurs tranches fonctionnent avec succès.

Sur le marché américain, l'EPR se trouve en face d'un modèle "évolutionnaire" qui n'a plus le vent en poupe et deux modèles innovants qui, d'après les prévisions, devraient être moins chers.

### Le marché français

EDF souhaitant une centrale de très grande puissance (1600-1750 MWe), a décidé de passer un contrat de gré à gré pour l'îlot nucléaire de Flamanville-3 avec Framatome ANP, sans faire appel à la concurrence qu'elle considérerait vraisemblablement comme incapable de fournir un réacteur de cette taille. La grande puissance unitaire de l'EPR, comme dans le cas de la Finlande, était là un argument favorable.

Les futures commandes françaises ne devraient pas intervenir avant 2015-2020. A cette époque, quel sera l'électricien client : EDF? Suez...? Probablement EDF, mais cela n'est point sûr. De toute façon, ce client voudra-t-il et pourra-t-il (compte tenu des règles internationales et européennes) passer des marchés de gré à gré pour l'îlot nucléaire? Si tel n'était le cas et si entre-temps l'AP1000, l'ESBWR ou l'AES 92 avaient fait leurs preuves, alors l'EPR pourrait connaître une concurrence certaine, même si la construction et l'exploitation de l'EPR de Flamanville, propriété de l'EDF, devraient jouer en sa faveur.

### L'expérience finlandaise

Le résultat de l'appel d'offres pour Olkiluoto-3 est très encourageant pour l'EPR mais il ne faut peut-être pas en tirer de conclusions définitives pour l'avenir. Selon nos informations, l'offre russe a été la moins chère, mais la taille du réacteur jouait contre les Russes, car les Finlandais souhaitaient la plus grande taille possible pour ce réacteur, seul autorisé pour le moment. Il semble que l'offre de General Electric pour l'ABWR était voisine de celle pour l'EPR, c'est-à-dire, un coût overnight d'un peu plus de 2000 \$/KWe. Le choix des Finlandais semble être lié notamment à la grande confiance qu'ils ont dans la technologie EPR et dans l'industrie franco-allemande.

General Electric paraissait moins dynamique et moins assurée dans sa volonté de construire le réacteur. Ce qui peut paraître étonnant, ce sont les 2000 \$/KWe que General Electric a semblé-t-il proposer tandis qu'il y a deux ans, un haut responsable de la société indiquait un coût de 1200-1400 \$/KWe pour la construction d'un seul ABWR aux USA (réf. 9).

**Tableau 2 : coûts prévisionnels de production d'électricité de divers types de centrales nouvelles (€ 2004/MWh)**

Charbon pulvérisé	Cycle combiné à gaz (gaz à € 3,6/MMBtu)	Cycle combiné à gaz (gaz à € 4/MMBtu)	Tête de série EPR	Tranche EPR de série de 10
37	39	42	41	33

Cette différence peut toutefois s'expliquer par certaines modifications concernant la sûreté de l'ABWR exigée par les Finlandais, ainsi que par une grande prudence commerciale de la part de General Electric. En effet, cette société semble avoir voulu répercuter complètement les coûts de ces modifications, les coûts d'extrapolation de la puissance jusqu'à 1600 MWe, ainsi que les coûts d'études correspondants à l'offre finlandaise.

Du côté Areva-Siemens, il semblerait, en comparant les coûts de l'offre Olkiluoto-3 avec les coûts prévisionnels d'EDF, que la proposition finlandaise ne comprenait pas tous les coûts imputables à la tête de série, mais représentait plutôt le coût moyen de la série de 10 unités, en ajoutant des imprévus raisonnables. Il serait donc à notre avis imprudent de considérer que l'EPR soit moins cher que ses concurrents américains ou russes, en se basant sur le résultat heureux de l'appel d'offre finlandais.

## Comparaison de l'EPR avec les centrales au charbon et au gaz

### Marché français

Le tableau 2 (tiré de la référence 3) montre clairement que, même sans tenir compte des pénalités pour l'émission de CO<sub>2</sub>, un EPR de série produirait de l'électricité en base moins chère que ses concurrents.

Pour que ces prévisions se réalisent, il faut encore que les hypothèses utilisées pour le calcul du coût de l'EPR soient validées. Mais compte tenu de la grande et très bonne expérience de EDF dans la production d'énergie nucléaire, cela semble très probable. La seule question qui pourrait se présenter, c'est de savoir si le taux d'actualisation de 8% en monnaie constante représente bien les conditions de finance-

ment futures des centrales nucléaires en France. Cela nous semble bien le cas, et cela est fortement conforté par l'exemple finlandais cité plus loin.

De plus, il faut que les coûts réels du charbon et du gaz sur la vie de la centrale soient supérieurs ou égaux aux prévisions d'EDF. Il est toujours difficile de faire ce genre de prévisions sur plusieurs dizaines d'années. Mais il nous semble que les prévisions de EDF sont suffisamment optimistes pour le gaz et le charbon, et qu'en conséquence la compétitivité de l'EPR par rapport aux combustibles fossiles devrait être assurée, et cela sans faire appel aux pénalités pour l'émission de CO<sub>2</sub>, qui pourtant ne manqueront pas d'être imposées en Europe.

### Marché finlandais

Les professeurs Risto Tarjanne et Kari Luostarinen, de l'Université Lappeenranta de Technologie (réf. 6) sont même plus optimistes pour le nucléaire, et en fait pour l'EPR, que EDF. Ils prennent pour le coût total de construction par KWe 1900 €, ce qui correspond bien au contrat finlandais de l'EPR, et obtiennent les valeurs du tableau 3 (ci-dessous).

Cette étude suppose une disponibilité de la centrale de 91 %, comme pour EDF, mais un coût d'exploitation de 10,2 €/MWh, sensiblement moins que ce que prévoit EDF. La différence majeure entre les deux études est le taux d'actualisation, qui est de 8 % pour EDF et de 5 % pour les Finlandais. Ce taux paraît dans le cas de la Finlande tout à fait justifié, car l'électricien TVO a obtenu, semble-t-il, un prêt pour financer le projet Olkiluoto-3 d'un montant d'1,950 millions d'euros, représentant presque les deux tiers du coût total, à un taux de 2,6 %/an. Cette évaluation montre bien la compétitivité de l'EPR par rapport à ces concurrents fossiles, même sans aucune pénalité pour l'émission de CO<sub>2</sub>.

**Tableau 3 : coûts prévisionnels de production d'électricité de divers types de centrales nouvelles (€ mars 2003/MWh)**

Nucléaire	Charbon	Gaz
23,7	28,1	32,2

### Marché américain

De nombreuses études examinant la compétitivité du nucléaire par rapport aux énergies fossiles ont été récemment publiées aux Etats-Unis. Citons celle de l'Université de Chicago de 2004 (réf. 10) et celle du Massachusetts Institute of Technology de 2003 (réf. 4). Cette dernière étude, menée par une équipe de très haut niveau, peut être considérée comme assez représentative des réflexions menées aux Etats-Unis sur ce sujet. Elle est marquée par une grande prudence vis-à-vis des prévisions de l'industrie nucléaire. Son cas de référence est caractérisé par les hypothèses suivantes : un coût instantané de construction de 2000 \$/KWe, contre 1200-1300 \$ prévu par l'industrie; une disponibilité de 85 %, pour 92-93 % pour l'industrie; un coût d'exploitation de 16,6 \$/MWh, contre 11,5 \$ pour l'industrie. De plus, MIT prévoit des conditions de financement pénalisées de 3 % par rapport à celles s'appliquant aux centrales à charbon ou à gaz. Avec ces hypothèses, et en amortissant la centrale sur 40 ans, MIT trouve un coût d'électricité produite de 67 \$/MWh.

L'attitude prudente de MIT s'explique, à notre avis, par la traumatisante expérience de construction de centrales nucléaires aux USA il y a 30 ans, et par une certaine méfiance vis-à-vis des expériences étrangères, notamment l'expérience française (réf. 2). De plus, cette étude s'intéresse plutôt aux quelques prochaines centrales à construire à partir de 2010 qui devraient tester de nouveaux concepts et une nouvelle réglementation américaine, et non aux séries de centrales qui seraient éventuellement construites ensuite.

Avec les hypothèses de l'EPR (1339 €/KWe, 91 % de disponibilité, et 12,4 €/MWh pour l'exploitation) et le système de financement utilisé par le MIT, mais en abandonnant la pénalité de 3 % par rapport au charbon, on obtient 44 \$/MWh, en prenant 1 €=1,15 \$, et 50 \$/MWh, en prenant 1 €=1,3 \$. Ces résultats sont à comparer avec le coût de kWh obtenu par MIT pour le charbon, égal à 42 \$/MWh, et pour les centrales à cycle combiné à gaz, qui sont à 38-56 \$/MWh suivant la prévision du prix du gaz. Notons que EDF prévoit 43-48 \$/MWh pour le charbon suivant le taux de change euro-dollar; la différence d'avec MIT s'explique assez bien par les différences de prix du charbon.

En ce qui concerne le prix du gaz, EDF se situe en haut de la fourchette américaine, avec 45-55 \$/MWh.

En regardant ces résultats, on peut penser que l'EPR ne serait pas compétitif avec le charbon aux USA sans pénalité pour l'émission de CO<sub>2</sub>, et ne pourrait être compétitif avec le gaz qu'avec des scénarios de prix du gaz haut, toujours sans pénalité pour le CO<sub>2</sub>. Notons aussi que les réacteurs américains (AP1000 et ESBWR) seraient largement compétitifs avec les combustibles fossiles, sans pénalité pour le CO<sub>2</sub>, si les objectifs prévus par l'industrie sont réalisés. Par exemple, l'AP1000, compte tenu des objectifs prévues par Westinghouse et avec les conditions de financement prévues par MIT mais sans pénalité CO<sub>2</sub>, produirait l'électricité à un coût de 33 \$/MWh. ■

#### Références :

1. Zaleski, C.P. et Meritet, Sophie. *L'Energie nucléaire face à la déréglementation des marchés de l'électricité*. Revue de l'Energie N° 547, juin 2003.
2. Zaleski, C. Pierre. *The future of nuclear power in France, the EU and the world for the next quarter-century*. Etude préparée pour le Nonproliferation Policy Education Center, Washington, D.C., février 2005.
3. Dupraz, Bernard et Joudon, Laurent. *Le développement de l'EPR dans le marché électrique européen*. Revue Générale Nucléaire Année 2004 N° 6, décembre 2004.
4. Deutch, John et Moniz, Ernest J., co-présidents; Beckjord, Eric S., Directeur exécutif. *The Future of Nuclear Power: An Interdisciplinary MIT Study*. Massachusetts Institute of Technology, 2003.
5. Paulson, K. *AP1000 said to compete*. Nuclear Engineering International, octobre 2002.
6. Tarjanne, Risto et Luostarinen, Kari. *Competitiveness Comparison of the Electricity Production Alternatives*. Research report, Lappeenranta University of Technology, 2004.
7. *Statistiques du Nuclear Energy Institute, Washington, D.C.*, concernant le fonctionnement des centrales nucléaires américaines, publiées dans Nuclear News mars 2003.
8. *Nucleonics Week*, 3 mars 2005, page 5.
9. Redding, John. *Cost schedule and risk management - the building blocks of a U.S. nuclear project*. Nuclear News, mai 2003.
10. *The Economic Future of Nuclear Power: A study conducted at the University of Chicago*. Chicago, août 2004.

(1) La référence 5 prévoit 10 \$/MWh, auquel nous avons ajouté 5 % pour passer du dollar 2002 au dollar 2004, et 1 \$/MWh pour le paiement des charges pour reprise du combustible usé au Department of Energy.

(2) On peut voir aussi à ce sujet l'étude du professeur finlandais Risto Tarjanne (réf. 6), qui prévoit un coût d'exploitation de 10,2 € par MWh pour un nouveau réacteur en Finlande, à cycle ouvert.

(3) Le Nuclear Energy Institute indique par exemple pour la période 1998-2000 13 \$/MWh pour le 25 % supérieurs et 24,6 \$ pour les moins bons cas (réf. 7).

# La place de l'EPR dans la politique énergétique de la France

The place of EPR in the French energy policy

par Francis Iglesias et Cyrille Vincent, sous-direction de l'industrie nucléaire – Direction générale de l'énergie et des matières premières (DGEMP)

Dans l'immédiat après-guerre, la production d'énergie en France reposait essentiellement sur le charbon. Cependant, durant les "30 glorieuses", notre pays connut un fort développement économique d'où des besoins accrus en énergie. Le pétrole, du fait de son faible coût d'extraction et de sa facilité d'utilisation, est devenu une énergie incontournable. Mais la France, qui disposait de ressources pétrolières négligeables, fut dans l'obligation d'importer la quasi-totalité de sa consommation.

Ainsi, en 1973, la France dépendait à 70 % du pétrole pour sa consommation d'énergie, contre 46 % en moyenne dans le monde. Elle a donc subi de plein fouet le triplement des prix du brut décidé à l'époque par l'Organisation des pays exportateurs de pétrole (OPEP).

L'Etat a alors décidé de lancer un ambitieux programme électronucléaire. Le 5 mars 1974, le gouvernement annonçait la fabrication de 16 tranches nucléaires de 900 MW. Par la suite, 34 tranches 900 MW seront finalement construites, suivies par des réacteurs de 1300 MW, puis de 1450 MW. En fin de compte, le parc nucléaire français a représenté un investissement de 70 Md€, comprenant 58 réacteurs à eau pressurisée qui ont produit 427 TWh en 2004, soit 78 % de la production totale d'électricité.

## Les avantages de l'énergie nucléaire

En 1973, la France importait 76 % de ses ressources énergétiques. En grande partie grâce au nucléaire, cette part est aujourd'hui tombée à 50 %. L'économie réalisée sur les importations d'énergie fossile a pu être estimée à 22 Md€ en 2002. En outre, l'essentiel de la valeur ajoutée de la production nucléaire est réalisée en France. C'est ainsi que le minerai d'uranium, extrait à l'étranger, ne représente que 5 % du coût de la filière (contre 60 à 75 % pour le gaz). Le nucléaire voit par ailleurs l'essentiel de ses emplois localisés en France, les en-

treprises du secteur employant directement environ 100 000 personnes.

L'énergie nucléaire présente aussi l'avantage de générer très peu de gaz à effet de serre (6 g pour 1 kWh d'origine nucléaire contre 430 g pour le gaz en cycle combiné et entre 800 et 1050 g pour le charbon). Grâce à son parc nucléaire, la France est aujourd'hui l'un des pays d'Europe qui émet le moins de gaz à effet de serre par habitant.

Enfin, les faibles coûts de production du nucléaire, grâce à un parc amorti à 50 % et à la forte densité énergétique du combustible, font que cette énergie reste très compétitive. Du fait de l'attractivité de ses tarifs, la France a ainsi pu dégager un solde exportateur de 77 TWh en 2002. Cette compétitivité joue aussi un rôle conséquent sur le plan économique, grâce à une facture amoindrie pour les entreprises françaises.

## Les objectifs actuels de la politique énergétique française

A l'aube du XXI<sup>e</sup> siècle, les questions énergétiques représentent toujours un enjeu majeur pour notre pays. Les tensions sur les prix du pétrole ou le réchauffement climatique témoignent de l'implication de la problématique énergétique dans notre quotidien.

## Executive Summary

After a long period of high dependence to oil, France turned in 1973 to nuclear energy in order to improve its energy supply security. Today's French nuclear power plants deliver a competitive energy and do not produce greenhouse effect gases. These advantages were taken into account in the current reflections carried out regarding the French energy policy. Energy demand control and renewable energy development are two major axis of this policy. They will nonetheless not be sufficient to cope with the growing demand for energy, especially after the closure of the current nuclear power plants in 2020. The EPR, matured under an exemplary collaboration between the industrials and the safety authorities at the European level, will enable France to keep the nuclear way open and to achieve new environmental, economical and industrial challenges.

C'est pourquoi le Premier ministre a lancé en 2003 un grand débat sur les énergies suivi d'un projet de loi d'orientation. Ce débat a permis aux représentants de toutes les sensibilités de s'y exprimer. Le gouvernement a synthétisé l'ensemble des réflexions et arrêté des propositions qui ont fait l'objet d'un livre blanc, resté ouvert à la concertation jusqu'à la fin de l'année 2003.

Cette phase d'échanges et d'écoute a permis au Parlement de débattre en toute connaissance de cause sur les orientations de notre politique énergétique et de voter en première lecture un projet de loi d'orientation sur l'énergie en juin 2004.

Ces orientations doivent concilier deux impératifs : d'une part l'approvisionnement et l'indépendance énergétique du pays, d'autre part le respect de l'environnement. Dans cette perspective, les propositions du gouvernement s'articulent autour de trois axes forts, consensuels, déclinés en nombreuses mesures très concrètes : la relance de la maîtrise de l'énergie, la diversification de notre bouquet énergétique grâce au développement des énergies renouvelables et la préparation de l'horizon 2020, en respectant nos engagements internationaux, et notamment le protocole de Kyoto.

La relance de la maîtrise de l'énergie et le développement des énergies renouvelables s'appuieront sur une mobilisation de toutes les politiques : renforcement des réglementations, aides fiscales et budgétaires, simplification des procédures, développement des programmes de recherche, sensibilisation des Français et mesures incitatives. Ces mesures doivent concourir aux objectifs définis par le projet de loi, qui précisent que la part des énergies renouvelables pour la production intérieure d'électricité devra atteindre le seuil de 21 % avant le 31 décembre 2010 et que la production de chaleur d'origine renouvelable devra augmenter de 50 % dans les mêmes délais.

Le Débat national a toutefois fait clairement apparaître que, malgré des efforts très importants de maîtrise de l'énergie, les énergies renouvelables ne pourront constituer qu'un complément appréciable aux autres sources d'énergie.

En effet, la demande nationale en électricité devrait connaître une croissance continue d'ici à 2020 et ce, malgré les efforts accrus en matière de maîtrise de la consommation énergétique. Ainsi, les besoins nationaux d'électricité en base (correspondant à la demande journalière minimale, hors périodes de forte

consommation) devraient augmenter d'ici à 2020 d'un quart par rapport au niveau constaté en 2001.

Les centrales nucléaires devraient encore pouvoir répondre à la demande d'électricité en base vers 2020, à condition de supprimer toute exportation. Cependant, pour les périodes de forte consommation, l'offre restera insuffisante. Ce déficit ne pourra que s'accroître très rapidement dans la mesure où les centrales nucléaires les plus anciennes commenceront à arriver en fin de vie. En effet, la capacité du parc nucléaire français devrait diminuer brusquement de près de 50 % entre 2017 et 2025 (avec une hypothèse de durée de vie des réacteurs actuels de 40 ans).

Dans ces conditions et sans renouvellement du parc nucléaire à cet horizon, un développement important de centrales fonctionnant au gaz naturel serait nécessaire. Toutefois, ce choix aurait des conséquences dommageables non seulement du point de vue économique mais aussi environnemental.

En effet, l'étude des *"Coûts de référence de la production électrique"* réalisée en 2003 par la Direction générale de l'énergie et des matières premières du ministère de l'économie, des finances et de l'industrie montre que le coût moyen de production d'une centrale fonctionnant au gaz naturel est supérieur à celui d'un réacteur nucléaire, dès lors qu'on bénéficie d'un effet de série. Dans ces conditions et en supposant un remplacement exhaustif du parc nucléaire actuel par des centrales fonctionnant au gaz naturel, le surcoût de production pourrait atteindre selon les calculs entre 5 à 8 Mds€ (avec une valorisation de la tonne de CO<sub>2</sub> à 20 €/tonne), impliquant également une dégradation de la balance des paiements.

Par ailleurs, un développement massif de cycles combinés augmenterait nos émissions de gaz à effet de serre et ne permettrait pas à la France de respecter ses engagements internationaux. En effet, les objectifs affichés par le Plan national de lutte contre le changement climatique (PNLCC) conduisent à une émission maximale annuelle à hauteur de 9,1 millions de tonnes de carbone contenu pour la production électrique d'ici à 2010. Un tel niveau maintenu en 2020 serait compatible avec un développement des cycles combinés fonctionnant au gaz naturel à hauteur de 87 TWh, alors que la demande nationale oscillera entre 450 et 600 TWh. Il est donc indispensable de disposer en parallèle d'importantes sources d'énergies non émettrices en gaz à effet de serre.

Dans ces conditions, il est apparu indispensable de s'assurer que des technologies nucléaires modernes et compétitives, répondant à des critères de sûreté renforcés seront disponibles à l'horizon de 2020. C'est pourquoi le gouvernement a proposé de garder l'option nucléaire ouverte et de construire en France le réacteur à eau pressurisé européen (EPR), réacteur de nouvelle génération, bénéficiant d'une compétitivité et d'une efficacité encore améliorées par rapport aux réacteurs du parc actuel.

### Le choix de l'EPR

Les acteurs du secteur nucléaire (EDF, FRAMATOME-ANP et les établissements de recherche concernés comme le CEA), estiment que le parc actuel devrait atteindre une durée de vie moyenne de 40 ans. Toutefois, la réglementation française en matière de sûreté ne prévoit pas explicitement une durée de vie maximale pour une installation nucléaire et l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) ne s'est pas aujourd'hui prononcée à ce sujet. Ces différents éléments réclament une approche prudente, ce qui conduit à envisager les premiers déclassements de réacteurs à l'horizon 2020.

A cette échéance, les nouveaux réacteurs nucléaires disponibles, dont l'EPR, seront dans la lignée des réacteurs actuels mais présenteront des améliorations notables sur les plans de la compétitivité, de la sûreté, de la radioprotection et des performances environnementales. Ils appartiendront à la troisième génération (par comparaison au parc actuel dit de deuxième génération).

Il semble en revanche illusoire d'attendre la maturité d'une technologie plus innovante (quatrième génération de réacteurs) pour renouveler le parc actuel. En effet, de tels réacteurs, qui ne constituent que des concepts sur le papier aujourd'hui, ne devraient pas être disponibles avant 2035-2040 (ce qui reste au demeurant un objectif très optimiste). Selon des simulations réalisées par EDF, attendre 2035 pour renouveler le parc devrait conduire à une durée de vie de 57 ans pour les réacteurs actuels, ce qui ne semble pas raisonnable.

L'EPR est donc le candidat mis en avant par EDF pour être le démonstrateur attendu au début de la prochaine décennie. Ce réacteur est le fruit d'une coopération européenne exemplaire, qui a regroupé FRAMATOME-ANP, EDF, les électriciens allemands et les autorités de sûreté française et allemande.

Un tel choix permet de capitaliser les investissements importants de recherche et développement déjà consentis par les différents acteurs (aujourd'hui chiffrés à 300 M€). A ce sujet, le rapport établi par les députés BIRRAUX et BATAILLE dans le cadre de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques précise ainsi *"qu'il s'agit non seulement d'un actif qui ne saurait être dilapidé sans d'excellentes raisons, mais aussi d'un atout par rapport à la concurrence mondiale, dans la mesure où les concepteurs de l'EPR ont une avance importante sur les autres compétiteurs"*.

Par ailleurs, l'EPR a d'ores et déjà donné lieu à un important travail d'instruction par l'Autorité de sûreté française, ce qui constitue un avantage certain par rapport à ses concurrents éventuels en terme de délai nécessaire pour l'obtention des autorisations réglementaires.

Enfin, la construction d'un démonstrateur EPR reste un élément important pour le maintien des compétences de l'industrie nucléaire française.

En conclusion, l'EPR doit permettre à EDF de tirer les retours d'expérience suffisants pour remplacer la capacité de production des centrales arrivées en fin de vie. Ce n'est donc que vers 2015 que la décision de lancer une série de réacteurs devra être prise. D'ici là, il est de la responsabilité du gouvernement de rendre disponibles toutes les technologies utiles. Cette proposition est un choix de prudence qui préserve toutes nos potentialités en matière de maîtrise de l'énergie, de développement des énergies renouvelables et de maintien d'une filière industrielle innovante et sûre dans le domaine nucléaire. ■

# La place d'EPR dans la stratégie d'EDF

The place of EPR in EDF's strategy

par **Serge Massart**, directeur de la Division Ingénierie Nucléaire - EDF, **Goulven Graillat**, directeur du service "Economie du Producteur et Stratégie Industrielle" - EDF

## Le renouvellement des capacités de production, enjeu majeur du secteur électrique européen

Les investissements en moyens de production jouent un rôle capital dans les performances économiques et environnementales du secteur électrique, ce que deux chiffres suffisent à illustrer, sans même invoquer le poids du risque de défaillance ni les soucis d'indépendance énergétique : la production représente jusqu'à deux tiers des coûts d'un électricien intégré (production, réseaux, commercialisation) ; elle engendre 40 % des émissions de CO<sub>2</sub> des pays de l'OCDE (contre 25 % pour les transports).

Cette réalité a été quelque peu voilée en Europe durant les années 1990 au moment de la libéralisation des marchés de l'électricité : les capacités de production étant suffisantes, voire excédentaires, les préoccupations se sont tournées vers l'efficacité de court terme, la difficulté à remplacer la gestion technico-économique des plans de production par un marché, la volatilité des prix et la question du pouvoir de marché dont peut disposer un acteur, même petit.

Avec la crise californienne de 2000-2001, la chute en 2002 des producteurs indépendants qui suivaient un modèle de "merchant plants", les défaillances apparues des deux côtés de l'Atlantique en 2003 et l'envolée du prix des combustibles fossiles, l'enjeu de la performance dans la durée est redevenu premier. Il s'agit de sélectionner les in-

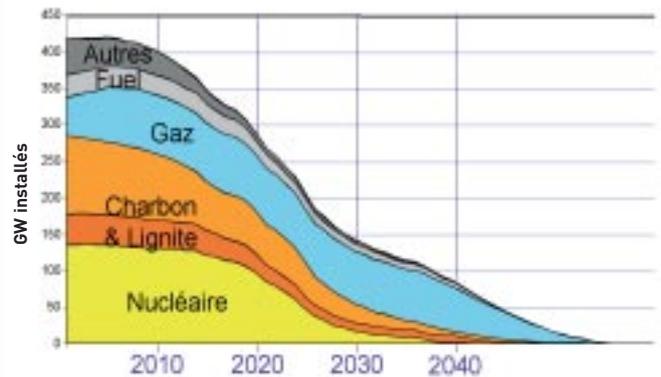


Figure 1 - Dynamique de déclassement du parc électrique européen, thermique et nucléaire

vestissements les plus efficaces ... et donc d'abord de les déclencher quand ils sont nécessaires. Le besoin, de plus en plus proche, de nouvelles capacités de production, vient renforcer ce changement de paradigme.

Le parc européen actuel, majoritairement thermique à flamme, est vieillissant et exposé aux contraintes environnementales. D'ici 2020, plus de 100 GWe d'installations de production thermiques et nucléaires seront à remplacer (dont la moitié du charbon-lignite installé aujourd'hui), comme le montre la figure n° 1. La croissance des besoins, même modeste et freinée par un effort de maîtrise de la demande, même couverte en partie par un développement d'énergies renouvelables, devrait imposer l'équipement d'environ 100 GWe supplémentaires dans ces vingt années.

Ces perspectives sont évidemment lourdes d'implications stratégiques pour les acteurs européens, qui sont à la veille de choix de long terme, structurants pour leur compétitivité. Dans ce contexte, le nucléaire, dès lors qu'il est industriellement maîtrisé dans sa conception et son exploitation, et qu'il s'inscrit dans une vision de long terme, s'avère une option robuste face à un avenir énergétique rendu de plus en plus incertain par le risque-prix des matières premières fossiles et par l'évolution des normes environnementales.

## Executive Summary

The large renewal of the electricity generation mix built during the period 1960-1970 will be the main issue for the European electricity sector for the next twenty years. In the context of increasing environmental constraints and fossil fuel procurement risks, this leads to reconsider the place of nuclear generation in the future energy mix. Thus, the choice to launch from now on a first realisation of the competitive model EPR will provide EDF with the necessary industrial mastership of procurement and construction in view of a series for the renewal of its own mix.

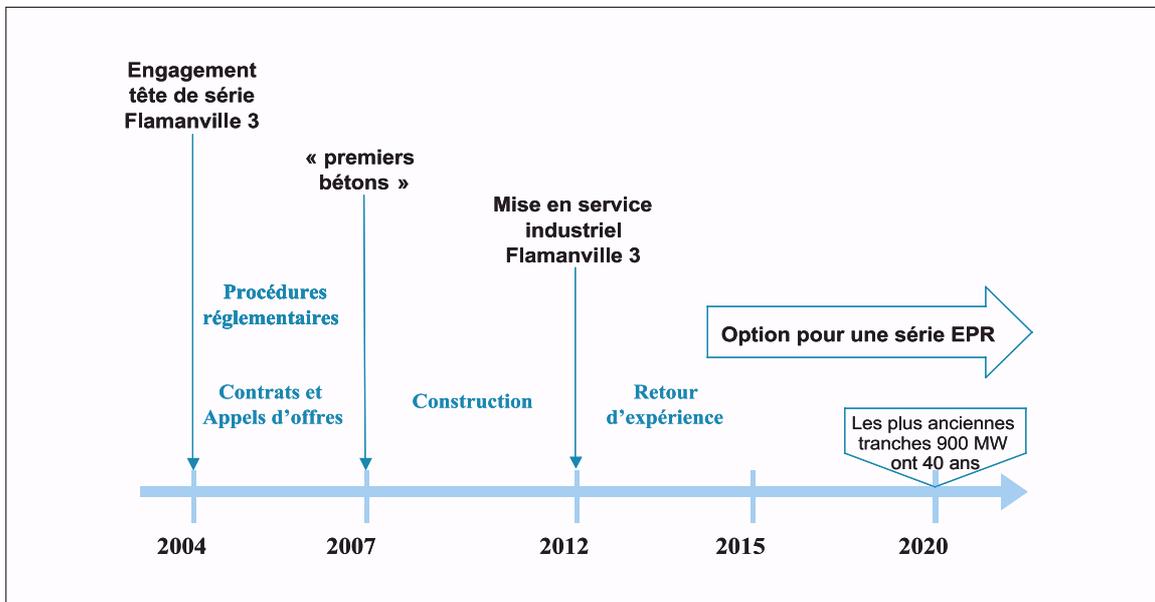


Figure 2 - Schéma d'enclenchement Flammanville 3 / Série EPR

Pour EDF, être en mesure, au moment du renouvellement de son parc nucléaire, de reconstruire un tel avantage compétitif, constitue donc un enjeu majeur.

### EPR et l'échelle des temps : une question de maîtrise industrielle

Le parc nucléaire actuel assure aujourd'hui 80 % de la production d'EDF. Il a été pour l'essentiel mis en service en dix ans entre 1980 et 1990. Une durée de vie de 40 ans pour l'ensemble des centrales qui le composent, apparaît aujourd'hui atteignable. EDF ambitionne bien sûr une durée de vie moyenne de son parc supérieure à 40 ans (modulée et différenciée selon les différentes centrales), mais l'Autorité de sûreté ne se prononcera pas sur ce point avant 2012/2015, la pratique française étant fondée sur un réexamen de sûreté décennal.

Or, pour une durée de vie de 40 ans, l'arrêt des centrales actuelles commencerait avant 2020, à un rythme de 5 GWe/an pendant 10 ans. De façon prudente, EDF doit donc considérer, aujourd'hui, la perspective de début de déclassement de son parc nucléaire à l'horizon 2020-2030 et se mettre en capacité de pouvoir engager aux alentours de 2015 (date de mise en chantier) son renouvellement par une filière nucléaire industriellement maîtrisée.

Ceci implique que l'on dispose à cet horizon d'un réacteur qui ait déjà été éprouvé. L'analyse des conditions de développement des paliers en exploi-

tation : 900 MW, 1300 MW et particulièrement N4, établit la nécessité d'un retour d'expérience significatif sur le réacteur tête de série, avant le lancement de la série industrielle. Une période de quelques années entre la date de mise en service de la tête de série et le début de construction des premières tranches de la série industrielle est donc indispensable pour éviter le risque d'être confronté à des difficultés très lourdes au début du renouvellement du parc. La dynamique d'enclenchement tête de série, retour d'expérience, début de la série (cf. figure 2) montre dès lors clairement le bien-fondé d'engager dès maintenant la tête de série.

C'est là raison pour laquelle, dans le cadre du projet de loi d'orientation énergétique, adopté en première lecture par l'Assemblée nationale en juin dernier, EDF a décidé d'engager, sur le site de Flammanville, les procédures permettant la construction d'une centrale EPR, tête de série d'un palier qui pourra être ultérieurement développé. Sa mise en service est prévue pour 2012, horizon à partir duquel la plupart des scénarios plausibles situent le besoin de nouveaux moyens de production en base.

Le choix de la compagnie électrique TVO, fin 2003, de construire un tel modèle en Finlande vient conforter cette décision et permettra un partage d'expérience utile entre électriciens pendant la phase de construction puis pendant la phase d'exploitation. Ceci ne dispense cependant pas EDF de construire sa propre tête de série, de façon à ac-

quérir la pleine maîtrise industrielle de la conception détaillée et de la construction d'un tel modèle, garantie indispensable pour le lancement éventuel d'une future série.

S'agissant du rythme de renouvellement des centrales actuelles, les considérations industrielles et financières militent pour étaler dans le temps, le plus possible, la construction du parc futur, qui sera en service pendant l'essentiel du 21<sup>e</sup> siècle. Il s'agit notamment de favoriser la flexibilité des choix successifs pour lui permettre d'accueillir, le moment venu, des modèles dits de Génération IV, pour lesquels la communauté scientifique internationale s'accorde aujourd'hui sur une date réaliste d'arrivée à maturité industrielle à partir de 2040<sup>2</sup>. La figure 3 fournit, à titre illustratif, un scénario de renouvellement possible du parc nucléaire basé sur durée de vie moyenne de 50 ans pour le parc actuel, conduisant à la construction d'un réacteur EPR par an pendant 20 ans, puis à l'incorporation de réacteurs de Génération IV<sup>3</sup> au sein du parc, à partir de leur arrivée à maturité industrielle.

### EPR : les objectifs de sûreté et de performance

Issu d'une coopération franco-allemande continue depuis le début des années 1990, EPR concrétise l'expérience des filières électronucléaires des deux pays. L'approche évolutionnaire retenue permet de tirer tout le fruit des connaissances technologiques

et de l'expérience d'exploitation accumulée sur les parcs des deux pays (environ 1300 annéesréacteurs cumulées), offrant ainsi une bonne sécurité pour l'investisseur. Le référentiel de sûreté a été approuvé dans son principe par les autorités de sûreté des deux pays et a fait l'objet d'un accord formel de l'Autorité de sûreté nucléaire française en octobre 2004.

La conception du réacteur permet de viser les objectifs de sûreté suivants :

- une probabilité globale de fusion du cœur inférieure à  $10^{-6}$ /réacteur.an, toutes incertitudes et tous types de défaillances et d'agressions pris en compte,
- des mesures de protection pour les populations riveraines extrêmement limitées (pas d'évacuation, ni de confinement) en cas d'accident sans fusion du combustible,
- en cas d'accident avec fusion du combustible, la conception du réacteur permet de pratiquement éliminer les situations pouvant conduire à des rejets importants.

Un renforcement des objectifs vis-à-vis de la prise en compte des agressions tant d'origine externe que d'origine interne a été également recherché. Les points les plus marquants sont :

- une capacité à supporter, sans dommage majeur au cœur du réacteur, la chute d'avion militaire (type avion de chasse lancé à grande vitesse), ce qui, avec quelques adaptations, procure une

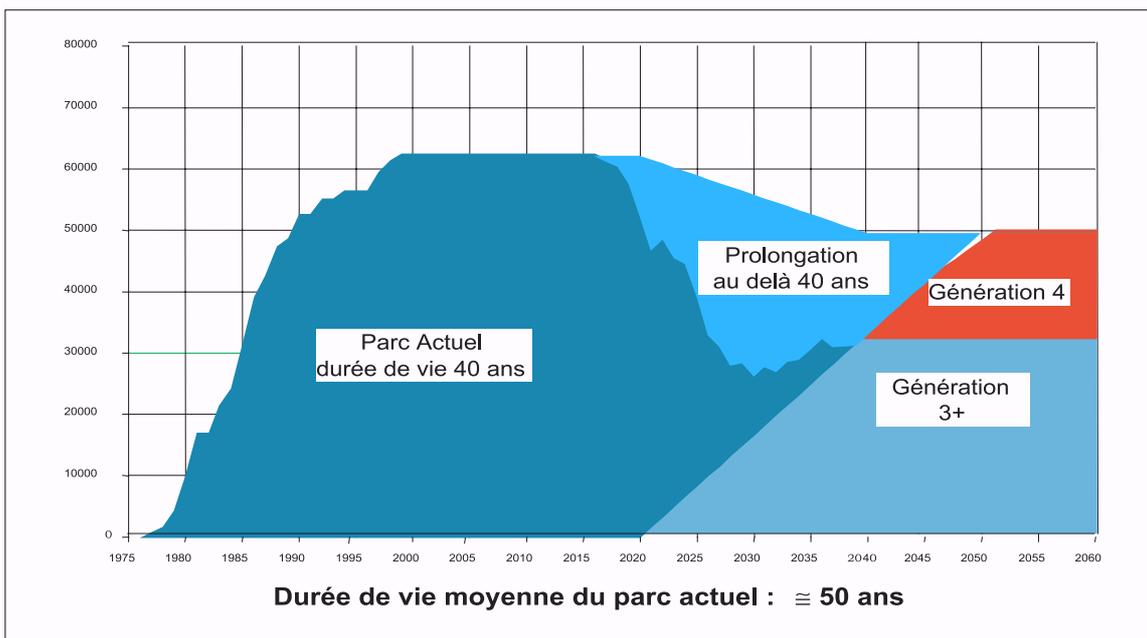


Figure 3 - Un scénario illustratif de renouvellement du parc nucléaire français

Tableau 4 : coûts de développement des moyens de production en base

Coûts en €/MWh	Charbon Pulvérisé	Cycle Combiné Gaz <sup>(3)</sup> (3,6 €/MBtu)	(4 €/MBtu)	Tête de série EPR	Tranche <sup>(4)</sup> Palier EPR
Investissement <sup>(1)</sup>	14	6	6	26	18
Exploitation + Taxes	9	7	7	10	10
Combustible	14	26	29	5	5
<b>Total</b>	<b>37</b>	<b>39</b>	<b>42</b>	<b>41</b>	<b>33</b>
CO <sub>2</sub> <sup>(2)</sup>	12	6	6	-	-
<b>Total avec CO<sub>2</sub></b>	<b>49</b>	<b>45</b>	<b>48</b>	<b>41</b>	<b>33</b>

(1) Avec actualisation à 8 % en monnaie constante : homogène à un CMPC d'environ 6,6 % (nominal, après impôt).

(2) Base de 15 EUR par tonne de CO<sub>2</sub>.

(3) Selon deux scénarios de prix du gaz. Prix actuel en Europe (UK NBP Gas) : > 4,5 €/Mbtu.

(4) Coût moyen actualisé d'une série de 10 tranches (TTS + 9).

grande robustesse vis-à-vis de la chute d'avions commerciaux,

- une protection accrue contre le risque "d'agression interne", par la séparation physique en quatre divisions géographiquement indépendantes des systèmes affectés aux fonctions de sûreté.

Sur le plan des performances, EPR se caractérise par :

- une disponibilité globale de 91 %, obtenue grâce à la possibilité de réaliser une part importante de la maintenance tranche en service,
- la mise en œuvre de gestions performantes du combustible, permettant notamment une réduction de 15 % à 20 % des quantités d'éléments à vie longue produits (plutonium et déchets à vie longue),
- une durée de vie de 60 ans.

## EPR : performance économique et compétitivité

Le tableau n° 4 ci-dessus fournit une comparaison des coûts de développement<sup>4</sup> d'EPR (tête de série et série), d'une centrale à Cycle combiné à gaz (pour deux hypothèses de prix du gaz) et d'une centrale à charbon propre.

Il apparaît que la tête de série EPR, bien que supportant la totalité des frais de développement de la série, possède des coûts du même ordre de grandeur que le cycle combiné à gaz : autour de 40 €/MWh pour la fourchette de prix du gaz considérée. L'équilibre est rompu dès qu'intervient une pénalisation significative du CO<sub>2</sub>. Considérée dans

son ensemble, une série EPR offre dans tous les cas une bonne marge de compétitivité.

## EPR : un modèle compétitif à vocation européenne

Avec la triple perspective d'un nécessaire et proche effort de renouvellement et de développement des capacités de production, d'hydrocarbures durablement chers et de l'enjeu majeur de la lutte contre l'effet de serre, les opinions évoluent et les débats publics se rouvrent.

Renouveler l'appareil de production sans dégrader l'environnement ni dépendre massivement d'un approvisionnement en combustibles fossiles conduit à des interrogations sur les moratoires qu'ont adoptés certains Etats-membres de l'UE (Suède, Allemagne, Belgique). La question de construire une centrale nucléaire est posée dans des pays aussi différents que la Suisse, la Lituanie ou la Slovaquie. Enfin, de récents rapports publics posent la question au Royaume-Uni, où l'électricité a déjà atteint le coût du cycle combiné à gaz, alors même que la ressource de la mer du Nord décline : comment réussir à diminuer de 60 % les émissions de CO<sub>2</sub> d'ici 2050, alors que la part du nucléaire passera de 24 % à 7 % dans les quinze ans qui viennent, si celui-ci n'est pas relancé ?

EPR, de conception européenne, apporte une réponse fiable et compétitive à ces enjeux énergétiques européens. L'engagement, en Finlande puis en France, de centrales de ce modèle par des électriciens en concurrence sur leur marché, en consti-

tué un signe clair. Nécessaire à la stratégie d'EDF pour préparer le renouvellement de son parc dans un marché concurrentiel, EPR peut aussi être demain une composante de référence du mix énergétique européen. ■

[1] On désigne par Génération IV, la génération des réacteurs du futur. Ces systèmes, sur lesquels les travaux de recherche et de développement débutent, devront présenter des innovations technologiques importantes en matière de gestion du combustible et de réduction des volumes de déchets ultimes.

[2] L'expérience de l'ensemble des filières nucléaires existantes dans le monde (Réacteurs à Eau Pressurisée, Réacteurs à Eau Bouillante, Réacteurs à Neutrons Rapides, ...), montre que leur émergence commerciale implique des constantes de temps importantes (réalisation successive de pilotes technologiques, de démonstrateurs électrogènes de taille croissante, puis de séries industrielles).

[3] Faire l'impasse sur les réacteurs du type EPR reviendrait, pour EDF, à faire le pari extrêmement risqué de pouvoir amener la durée de vie du parc actuel au-delà de 60 ans en moyenne, pour attendre l'arrivée à maturité des réacteurs Gén IV.

[4] Les coûts de développement permettent de comparer différentes filières de production d'intensité capitalistique différente. C'est par exemple la méthode employée par la DGEMP pour établir les "coûts de référence".

# EPR, fer de lance de la renaissance du nucléaire

EPR, spearhead of nuclear rebirth

par **Bernard Estève**, Directeur Général Délégué AREVA/Framatome ANP

## L'offre réacteurs d'AREVA

L'offre d'AREVA en matière de réacteurs couvre :

- des activités, dites récurrentes, de soutien aux flottes de réacteurs en exploitation (amélioration des performances, gestion du vieillissement, ré-évaluations de sûreté...),
- des activités de construction neuve de réacteurs de puissance, de la conception à la mise en service, pour la fourniture, selon les clients, de chaudières ou d'îlots nucléaires clés en main.

AREVA propose aujourd'hui deux modèles de réacteur de puissance de génération 3 : l'EPR, réacteur à eau pressurisée d'une puissance d'environ 1600 MWe, et le SWR 1000, réacteur à eau bouillante d'une puissance de l'ordre de 1200 MWe.

AREVA fournit également des versions de génération 2+ adaptées aux besoins spécifiques de certains clients, dans la continuité de leurs programmes nationaux, par exemple en Chine (extension Ling Ao, 1000 MWe), ou au Brésil (Angra 3, 1300 MWe).

AREVA intervient également, en liaison avec leur concepteur russe, sur des projets d'achèvement ou de modernisation de réacteurs VVER (Mochovce, Kozloduy, Dukovany, Bêlène...).

### Le SWR 1000

Le SWR 1000 est un réacteur à eau bouillante de moyenne puissance (1 000 – 1 250 MWe) développé en association avec des compagnies d'électricité allemandes et avec l'assistance de partenaires européens.

Le modèle se fonde, d'une part sur l'expérience issue de l'exploitation de centrales existantes mais fait aussi partiellement appel à des systèmes de sûreté passifs.

Tout comme l'EPR, le SWR 1000 satisfait aux exigences des électriciens européens (European Utility Requirements for LWR Power Plants). Il avait fait l'objet d'une évaluation préliminaire par



Figure 1 - Planche montrant une vue éclatée du SWR 1000

l'Autorité de Sûreté finlandaise (STUK), ce qui avait permis à AREVA de le proposer, au même titre que l'EPR, en réponse à l'appel d'offres finlandais.

### La place particulière de l'EPR

L'EPR, développé depuis le début des années 90 dans le cadre d'une large coopération européenne, occupe tout naturellement la première place dans l'offre de réacteurs d'AREVA.

Il a été l'objet de la collaboration exemplaire que Framatome et Siemens KWU ont su organiser,

## Executive Summary

AREVA is constructing EPR for Teollisuuden Voima Oy in Olkiluoto. This first-ever generation 3 Nuclear Power Plant will be followed by a second project for EDF in Flamanville. Recently AREVA submitted its proposal for four EPR Nuclear Islands for China and also decided to launch a design certification process of the EPR design in the USA. With EPR, AREVA intends to meet markets requirements with an evolutionary and powerful reactor, the design of which achieves the optimal mix between largely proven solutions derived from the largest experience basis and innovative features needed to meet new requirements, while leveraging on the size to improve competitiveness. EPR projects are proving to be structuring for AREVA organization, teams integration as well as for engineering and industrial skills preservation.

**EPR : Une conception évolutionnaire basée sur l'expérience des réacteurs les plus récents**



Figure 2 - Planche illustrant la filiation franco-allemande de l'EPR

dans un premier temps au sein de leur filiale commune Nuclear Power International créée en 1989 pour développer un îlot nucléaire franco-allemand pour l'exportation et, dans un deuxième temps, en fusionnant en 2001 leurs actifs nucléaires pour donner naissance à Framatome ANP, aujourd'hui filiale commune d'AREVA (66 %) et de Siemens (34 %).

Après une phase de développement largement concerté entre les parties prenantes européennes (comprenant, outre les deux chaudiéristes fondateurs, EDF, les principaux électriciens allemands, les Autorités de sûreté françaises et allemandes) et qui a duré une dizaine d'années, l'EPR est maintenant entré dans une phase de réalisation industrielle (projets d'Olkiluoto 3 en Finlande et de Flamanville 3 en France) et est devenu, avec les décisions de le certifier en Amérique du Nord et de l'offrir en Chine, le produit réacteur emblématique d'AREVA.

### Les enjeux actuels d'EPR

#### Le projet Olkiluoto 3

Une fois prise la décision de construire une nouvelle tranche nucléaire en Finlande, le processus de consultation, d'offre, puis de négociation du contrat fut mené dans le respect strict du calendrier : moins de quinze mois séparent en effet l'émission de l'appel d'offre, de la signature du contrat intervenue le 18 décembre 2003.

Les appels d'offres initiaux portaient, d'une part sur un îlot conventionnel et, d'autre part sur un îlot nucléaire, ce dernier incluant l'ensemble du contrôle commande de la centrale.

Au cours de la négociation, le client a d'abord associé à chaque vendeur d'îlot nucléaire un vendeur d'îlot conventionnel (les deux produits d'AREVA ont été associés à Siemens, les produits General Electric et Atomstroyexport à Alstom), puis a suscité la constitution de consortiums afin de contracter les deux îlots clé en main.

C'est donc, in fine, une centrale complète que le consortium livrera, Framatome ANP et Siemens étant chargés, respectivement, de l'îlot nucléaire et de l'îlot conventionnel, Framatome ANP ayant la responsabilité de la coordination générale.

Le planning, très ambitieux pour une première réalisation et dans les conditions finlandaises, prévoit 48 mois entre le premier béton (printemps 2005) et la mise en service au printemps 2009.

Début 2005, conformément au calendrier prévu, STUK a émis un rapport d'évaluation positif concernant la sûreté du projet, ce qui a permis au gouvernement finlandais d'émettre, le 17 février 2005, la "construction licence".

Après les travaux d'excavation et de préparation du site réalisés par TVO, le chantier est passé sous la responsabilité du consortium fin janvier 2005. Les travaux se poursuivent selon le planning prévu.

#### Le projet Flamanville 3

EDF a choisi à l'été 2004 le site de Flamanville pour accueillir la tranche tête de série (FA3) de son futur programme nucléaire.

EDF sera donc bientôt en mesure de passer les marchés de réalisation des études, des fabrications et des travaux de FA3, dans le respect des contraintes liées au déroulement du débat public. Dans le cadre de ce projet, le lotissement des marchés est organisé selon la pratique habituelle d'EDF qui assure à la fois les rôles de maître d'ouvrage et d'architecte ensemble.

Un premier contrat portant sur la fourniture de la chaudière nucléaire est attendu par Framatome ANP au printemps 2005. Le premier béton est prévu en 2007 et la mise en service industrielle en 2012.

#### Les perspectives en Chine

L'appel d'offres international lancé fin septembre 2004 pour des réacteurs de génération 3 porte sur



Figure 3 - Photo récente du site Olkiluoto

la fourniture, clé en main, de quatre îlots nucléaires (incluant le contrôle commande de l'ensemble de la centrale), sur les sites de Sanmen (dans la province du Zhejiang) et de Yangjiang (dans la province du Guangdong). Les premiers cœurs, y compris la matière nucléaire, le plan de localisation, le plan de financement sont inclus. Un transfert de technologie étendu y est associé.

La technologie retenue est destinée à servir de base au développement du programme nucléaire chinois dont les besoins sont à l'échelle du pays (32 GWe de capacité nucléaire devant s'ajouter à l'horizon 2020 aux 8500 MWe actuellement en exploitation ou en construction, pour une capacité électrique totale installée de 400 GWe aujourd'hui.).

Présent en Chine depuis plus de 20 ans, AREVA, qui entend participer au développement du programme nucléaire chinois en valorisant et en développant les partenariats industriels noués au fil des réalisations, a remis le 28 février dernier une offre pour quatre EPR et portera, s'il est retenu, la responsabilité complète de la réalisation.

### L'approche du marché nord américain

AREVA a décidé de s'engager dans un processus de certification de l'EPR aux USA et au Canada afin

d'être en mesure de répondre au redémarrage du nucléaire nord-américain attendu à l'horizon 2010-2015.

### L'EPR, réponse aux besoins du marché

Plus généralement, et au-delà des projets évoqués précédemment, AREVA a la conviction que l'EPR apporte une réponse adaptée aux besoins du marché car c'est un produit :

- évolutionnaire et sûr,
- puissant et compétitif,
- à faible empreinte environnementale.

*Une approche évolutionnaire pour la conception d'un grand réacteur de Génération 3.*

Dans le nucléaire, l'attention portée aux risques de toutes natures (relatifs à la sûreté, à la technologie, et à l'économie) est plus grande que dans d'autres secteurs d'activités, compte tenu :

- de l'extrême sensibilité de la société aux incidents nucléaires, quelle que soit leur gravité réelle. Cela se reflète dans de nombreux pays par de fortes évolutions des prescriptions de sûreté s'appliquant aux nouvelles conceptions de réacteurs ou aux centrales en exploitation,
- de l'importance des enjeux économiques associés.

Pour contrôler ces risques, il importe de tirer profit, autant que possible, de toutes les leçons de l'expérience accumulée. Être prudent et exploiter ces leçons ne doit naturellement pas empêcher les concepteurs d'innover, le défi étant alors de définir le *compromis optimal* entre des solutions largement éprouvées et des caractéristiques novatrices nécessaires pour répondre aux nouvelles exigences. Les concepteurs de l'EPR ont considéré qu'une voie "*évolutionnaire*" correspondait mieux à ce compromis optimal qu'une approche plus "*révolutionnaire*". Cette démarche est également en accord avec les exigences des Autorités de sûreté française et allemande ainsi qu'avec celles des électriciens européens.

*La taille : un facteur essentiel de compétitivité, et qui reste neutre vis-à-vis des contraintes d'implantation.*

Comme cela a été démontré dans de nombreux secteurs industriels, la taille est souvent le principal moyen de diminuer les coûts spécifiques, non seulement le coût du kilowatt électrique installé (kWi), mais surtout le coût du kWh produit (-10 % par rapport aux tranches les plus récentes). Ce critère a été déterminant dans le choix finlandais. De même, quand on s'intéresse à la durée de construction, le paramètre à considérer est le kWi/mois de durée de construction, plutôt que la durée absolue du chantier.

En termes d'empreinte, au sens propre (choix des sites, impact sur l'environnement) comme au sens figuré (procédures administratives, impact sociétal), un réacteur de forte puissance est comparable à un beaucoup plus petit, ce qui est d'autant plus intéressant que les sites nucléaires potentiels se raréfient. A noter également que l'absence de zone d'exclusion, même dans le cas de séquences accidentelles hypothétiques de fusion du cœur, devrait encore contribuer à faciliter le choix des sites pour l'EPR.

*La nécessaire contribution du nucléaire aux bouquets énergétiques de demain.*

Les besoins en électricité continuent à croître partout dans le monde. En Europe, la croissance de la demande reste soutenue (plus de 2 % en France en 2004) et les besoins en capacité nouvelles d'ici à 2020 se traduisent par plusieurs dizaines de tranches nucléaires dans l'Union européenne en supposant que la contribution du nucléaire au bouquet énergétique reste à son niveau actuel.

L'EPR dispose de solides atouts pour s'imposer sur ces futurs marchés.

### **Les conséquences industrielles pour AREVA**

#### **Sur l'organisation des activités réacteurs**

Le choix finlandais en faveur d'AREVA d'abord, de l'EPR au détriment du SWR 1000 ensuite, s'est révélé structurant pour l'activité réacteurs d'AREVA.

Eût-il porté sur le SWR 1000, la tentation aurait été grande de dédier la réalisation du contrat finlandais aux équipes allemandes et de recentrer les activités EPR sur la France.

Avec le choix de l'EPR, au prix sans doute d'une plus grande complexité dans la gestion des interfaces, l'intégration des équipes européennes d'ingénierie, d'une impérieuse nécessité, est maintenant devenue une réalité.

Parallèlement à la stratégie d'AREVA en Amérique du Nord, l'intégration des équipes américaines suivra, grâce à l'EPR, la même démarche.

Ces équipes intégrées auront la tâche de maîtriser, autant que faire se peut, les évolutions du référentiel technique de base, tout en se conformant aux exigences contractuelles, légales et réglementaires des clients et pays concernés.

#### **Sur le maintien des compétences d'ingénierie et de management des grands projets**

Le thème du maintien des connaissances et des compétences n'est pas un sujet nouveau pour l'industrie nucléaire. Si les activités récurrentes menées par AREVA en support à l'exploitation des centrales (combustible, composants de remplacement, services, dont en particulier services d'ingénierie) permettent d'entretenir un ensemble important de connaissances et de compétences nécessaires à l'activité de chaudiériste, elles ne permettent néanmoins pas d'entretenir l'ensemble des métiers qui doivent être mobilisés pour la conception et la réalisation des grands projets de réacteurs.

Si le maintien des *connaissances* (définies comme les méthodes, procédures, codes outils de conception et de réalisation) peut être efficacement organisé, il n'en va pas de même du maintien des *compétences* (définies comme la mise en œuvre opérationnelle de ces connaissances dans le cadre très

contraint des grands projets) que seul "le passage à l'acte" sur des projets réels permet d'entretenir.

De ce point de vue, les projets EPR représentent pour AREVA, et l'ensemble de l'industrie concernée, une formidable opportunité de transmettre l'expérience acquise à des équipes renforcées et rajeunies. En 2004 les équipes d'ingénierie de Framatome ANP en France et en Allemagne auront recruté plus de deux cents ingénieurs et cet effort de recrutement sera poursuivi.

### Sur l'outil industriel

L'opportunité offerte par ces grands projets en matière de maintien des compétences concerne bien sûr également les moyens industriels essentiels pour la fabrication des chaudières nucléaires. Ceux-ci couvrent :

- l'usinage et l'assemblage proprement dit des composants du circuit primaire (cuves de réacteur, générateurs de vapeur, groupes motopompes,...), pour lesquels AREVA bénéficie d'une position historique de premier rang avec les sites français de Chalon St-Marcel et de Jeumont,
- mais aussi la métallurgie amont des pièces approvisionnées (forgés, tubes...) en alliages d'aciers spéciaux, centrée aujourd'hui sur quelques rares intervenants (principalement en France et au Japon) qualifiés pour le nucléaire.

Par ailleurs, se pose désormais la question des capacités globales disponibles, car les moyens de

production dans cette activité ont été, durant la dernière décennie, soit mis à l'arrêt (Etats-Unis), soit consolidés ou réorientés vers d'autres débouchés (Canada, Europe et Asie).

Le démarrage et le développement des projets EPR et d'autres projets de centrales neuves vont impliquer un redéploiement au niveau mondial des moyens de production des chaudiéristes, ainsi que de leurs filières d'approvisionnement.

Le succès de l'EPR offre donc à AREVA deux opportunités majeures :

- le redéveloppement et la modernisation de son outil industriel, avec le lancement de plans de recrutement (près de 200 personnes soit + 20 % depuis 2003) et d'investissement à Chalon St-Marcel et à Jeumont,
- la création (ou l'acquisition) de nouvelles unités de production, là où la taille du programme nucléaire justifiera une production locale de composants : en Chine, voire sur d'autres marchés (Amérique du Nord à moyen terme,...).

### Conclusions

La renaissance du nucléaire dans le monde suppose, pour devenir réalité, que les projets courageusement décidés par quelques électriciens soient des succès.

Ce défi ne pourra être relevé que si l'ensemble des acteurs (clients et Autorités de sûreté) réussissent



L'atelier de Chalon Saint-Moral en février 2004

aussi à mobiliser les compétences requises dans leurs domaines respectifs de responsabilité. La réussite des nouveaux projets de réacteurs suppose en particulier que, dans les pays concernés, soit rebâti dans les meilleurs délais un dialogue constructif et confiant entre Autorités de sûreté, clients et constructeurs, dans le respect des “droits et des devoirs” de chacun.

A l'origine, la conception de l'European Pressurized Reactor a été une entreprise exclusivement européenne. L'EPR, de par sa conception évolutionnaire (avancée et éprouvée) et sa puissance unitaire élevée, est aujourd'hui un produit particulièrement adapté à la demande mondiale. Hors Europe, l'acronyme EPR trouve naturellement une nouvelle signification : Evolutionary Power Reactor. ■

# L'EPR et le débat public

## EPR and the public debate

par Yves Mansillon, Président de la Commission nationale du débat public.

La Commission nationale du débat public a été saisie début novembre 2004 par le Président d'EDF du projet de construction d'un réacteur "tête de série EPR" sur le site de la centrale de Flamanville ; elle a décidé le 1<sup>er</sup> décembre d'organiser elle-même un débat public sur ce projet et d'en confier l'animation à une commission particulière.

Cette décision, importante en elle-même, l'est plus encore si on la replace dans son contexte. Elle est importante parce que ce sera la première fois qu'aura lieu un débat public sur un projet de centrale nucléaire ; cette procédure, qui est récente (elle a été créée par la loi du 2 février 1995 revue par la loi du 27 février 2002), n'a porté jusqu'alors que sur des projets d'équipement "classiques" : infrastructures linéaires (autoroute, ligne ferroviaire à grande vitesse ou ligne électrique à très haute tension) ou équipements ponctuels (port, aéroport ou barrage).

Mais sans doute est-il plus significatif de constater qu'en dix-huit mois plusieurs projets appartenant au secteur nucléaire ont fait l'objet de saisines de la CNDP : le projet international ITER, pour lequel la CNDP a décidé un débat public mais n'a pu encore l'organiser ; Georges Besse II, projet de remplacement de l'usine d'enrichissement d'uranium à Tricastin, qui a fait l'objet à l'automne dernier d'un débat public dont la CNDP avait confié l'organisation au maître d'ouvrage mais qu'elle a suivi attentivement ; le projet de réacteur de recherche Jules Horowitz à Cadarache, pour lequel la CNDP a considéré qu'un débat public n'était pas nécessaire mais a recommandé au Commissariat à l'Energie Atomique de mener une concertation qui se déroulera d'avril à juin prochain.

Enfin, la CNDP vient d'être saisie par le ministre de l'industrie et le ministre de l'écologie du problème de la gestion des déchets nucléaires de haute et moyenne activité et à vie longue ; les ministres ont en effet utilisé pour la première fois une disposition de la loi qui leur permet de saisir la CNDP en vue de l'organisation d'un débat public non pas sur un projet d'équipement mais sur des "options générales en matière d'environnement ou d'aménagement".

Cette conjonction, qui verra la succession ou la simultanéité de plusieurs débats publics sur les divers aspects nucléaires de la politique énergétique française, constitue une rupture avec la situation constatée jusqu'alors et souvent critiquée pour son "opacité". La présentation de ce que sont les objectifs et les modalités du débat public permettra d'en apprécier la portée.

### Quels sont les objectifs du débat public ?

Le débat public a pour but d'assurer la participation du public au processus d'élaboration des projets d'équipement d'intérêt national ; ce n'est pas la seule forme de concertation, mais c'est la plus importante parce qu'elle est prévue par la loi, qu'elle est confiée à une autorité administrative indépendante et qu'elle concerne les plus grands projets d'équipement.

Son premier objectif est d'informer le public sur le projet envisagé ; il doit le faire de façon complète, objective et accessible ; le public visé est divers : c'est le public touché par le projet en tant que futur riverain mais aussi le public concerné ou intéressé en tant que futur utilisateur ou contribuable ; en tout état de cause, c'est bien toute la population qui est visée et non seulement les corps intermédiaires qui la représentent.

Le deuxième objectif est de permettre à ce public de s'exprimer sur le projet : de poser des questions, de

## Executive Summary

The National Commission for public debate decided to organize a public debate on the EPR project; it will be the first public debate on a project of nuclear power station, but by the end of 2005 there will be other public debates on projects in the nuclear field in particular on the question of long life radioactive waste.

It is quite a novation compared to the previous practices. Indeed, the public debate, having assured information of the population, aims at allowing the citizens to express themselves directly on the project, on its opportunity, its stakes, its characteristics and its impacts.

Instrument of participative democracy, the public debate is not the time of the decision, which belongs to the relevant authorities; but it enlightens them, notably on the social acceptability of the project, before they make their final decision.

donner son avis, de formuler des critiques ou des propositions ; ces questions et ces observations peuvent porter sur tous les aspects du projet : sur sa nécessité ou son opportunité d'abord, sur ses enjeux, ses caractéristiques, ses impacts ensuite.

Le troisième objectif enfin est d'apporter au maître d'ouvrage tous les éléments complémentaires d'appréciation, notamment sur l'acceptabilité sociale de son projet, avant qu'il n'arrête sa décision définitive ; en effet dans les deux mois qui suivent le débat, le président de la CNDP doit en rendre publics le compte-rendu et le bilan ; le maître d'ouvrage a alors trois mois pour arrêter sa décision quant au principe et aux conditions de la poursuite du projet et la rendre publique ; cette décision doit être motivée et doit faire référence aux apports du débat public. On le voit, le débat public ne déplace pas la responsabilité de la décision, qui incombe aux autorités légitimes, mais il est un temps d'ouverture et de dialogue dans le processus qui mène à la décision ; il peut aboutir à améliorer le projet par rapport à la version initiale ; en tout état de cause, il rend la décision acceptable, à défaut d'être acceptée par tous, parce qu'elle a été précédée de cette phase de démocratie participative.

Dans le cas présent, le débat public devra nécessairement présenter des caractéristiques particulières ; certes, comme tout autre, il portera sur le projet présenté ; mais la question n'est pas seulement de savoir s'il faut ajouter un réacteur, fût-il d'un type nouveau, sur un site existant et qui supporte déjà deux tranches nucléaires ; la question n'intéresse pas que les habitants de Flamanville ou de la Manche.

Il n'y a jamais eu de débat public permettant à la population de s'exprimer sur les grandes options de la politique énergétique française ; d'autre part, le débat national sur les énergies du 1<sup>er</sup> semestre 2003 a montré que, s'il y avait un certain consensus sur plusieurs aspects de cette politique, ce n'était pas le cas en ce qui concerne l'option nucléaire ; plus précisément le choix de réaliser l'EPR a fait l'objet de positions divergentes y compris des Sages qui devaient tirer les conclusions de ce débat. Or le débat public a pour vocation non de trancher une controverse mais d'en approfondir et d'en éclairer les termes. Par conséquent le débat public à venir n'a pas à porter sur l'ensemble de la politique nucléaire française, mais, l'EPR étant présenté comme une tête de série, il faut qu'il permette aux Français de s'exprimer sur l'option EPR dans son principe ; il devra donc comporter un volet national permettant de

répondre à cet objectif, en plus d'un volet local lié au territoire d'implantation de l'ouvrage.

### Les modalités du débat public

Elles ne peuvent être aujourd'hui définies dans leur détail puisque l'on est au début de sa préparation mais les textes fournissent un cadre général, notamment en imposant des délais, et la CNDP a défini des principes et une méthode qui s'appliquent à tous les débats, avec naturellement la souplesse nécessaire pour s'adapter aux spécificités de chaque projet.

Lorsqu'elle a décidé d'organiser un débat public, la Commission nationale en confie l'animation à une commission particulière (CPDP) constituée de personnes qu'elle choisit soit en son sein, soit à l'extérieur ; actuellement elle en a désigné le président qui est l'un de ses membres : M. Mathieu, conseiller maître à la Cour des comptes.

A compter de sa décision initiale, le maître d'ouvrage dispose de six mois pour préparer le dossier destiné à informer le public. Pendant ce temps, la CPDP travaille en parallèle à préparer le débat ; cette phase est très importante car son bon déroulement en dépend pour une large partie. La CPDP rencontre les acteurs élus, économiques et associatifs, avec un double but : leur expliquer ce qu'est un débat public, leur demander quelles sont leurs préoccupations ou leurs interrogations sur le projet ; grâce à ces entretiens, la CPDP peut d'une part conseiller le maître d'ouvrage quant au contenu du dossier qu'il prépare, afin que celui-ci réponde le mieux possible par avance à toutes les questions susceptibles d'être posées ; d'autre part, la CPDP conçoit progressivement l'organisation du débat public qui durera au maximum quatre mois.

Au sein de cette durée, on distingue habituellement un premier temps destiné à assurer l'information de la population, un deuxième temps consacré à la discussion, enfin le temps de la synthèse.

La phase de discussion doit être organisée de façon à permettre de traiter tous les aspects du projet (et d'abord son opportunité) et à couvrir tous les territoires concernés ; il faudra donc combiner réunions générales et réunions thématiques, et les répartir géographiquement de façon adaptée.

D'autre part, la Commission particulière du débat public doit prévoir tous les moyens permettant d'assurer l'information et l'expression du public.

Parmi les premiers, il y a le dossier du débat dont la diffusion ouvre le débat public ; il comporte toujours une plaquette émanant de la CPDP (qui présente son rôle, les règles du débat public et le programme prévu) et le dossier préparé par le maître d'ouvrage ; il peut comporter aussi d'autres documents de nature à éclairer et à nourrir le débat, par exemple des études antérieures. Pour EPR, la Commission nationale a considéré qu'il pourrait être utile de joindre un document exprimant les positions des différents acteurs sur les grands thèmes constituant les éléments de la controverse sur le projet ; la CPDP proposera donc à ces acteurs de fournir, s'ils le souhaitent, une contribution sur ces sujets ; ces contributions seront regroupées dans un document collectif exposant les divers points de vue qui éclairera le public sur la problématique et les enjeux, et qui prouvera ab initio l'ouverture et la transparence du débat public.

D'autres moyens d'information sont prévus, par exemple un site Internet régulièrement mis à jour ou un journal publié périodiquement pendant la durée du débat.

D'autre part, diverses formules permettent au public de s'exprimer ; la première est évidemment celle des réunions publiques mais il y a aussi un espace d'expression sur le site Internet, un système de questions-réponses,...

Les "cahiers d'acteurs" méritent une mention particulière : ils consistent pour la CPDP à retenir une contribution jugée spécialement intéressante (qu'elle émane d'une collectivité, d'une compagnie consulaire ou d'une association), à la faire mettre en forme par ces acteurs selon un cahier des charges préalablement défini et à lui donner la même diffusion que le dossier du débat initial ; cela répond à une demande de nombreux participants aux débats publics qui souhaitent que soit rétabli un certain équilibre dans les moyens d'expression entre le maître d'ouvrage et les acteurs locaux.

La CPDP, émanation d'une autorité administrative indépendante, doit veiller à mener le débat en toute indépendance par rapport au maître d'ouvrage comme à toutes les autres parties prenantes ; la Commission nationale a adopté une charte éthique et déontologique que les membres des commissions particulières s'engagent à respecter et qui garantit les principes d'indépendance et de neutralité. La CPDP doit veiller à la qualité, à la transparence, à la crédibilité du débat public ; elle doit veiller à ce que toutes les questions reçoivent une

réponse et que celle-ci soit complète et compréhensible ; elle doit permettre à tous de s'exprimer en garantissant le respect des personnes et des idées ; elle doit inciter les intervenants non seulement à donner leur opinion mais surtout à argumenter : s'affirmer pour ou contre le projet n'a en soi que peu d'intérêt (le débat public n'est ni un référendum, ni même un sondage), en revanche, les arguments qui justifient une position nourrissent le débat et lui permettent de progresser.

La commission particulière, pas plus que la Commission nationale, ne peut selon la loi se prononcer sur le fond des projets mais leur responsabilité, après avoir permis que le débat ait lieu, est de rendre compte de façon aussi précise et fidèle que possible de son déroulement et de ses apports ; c'est le rôle du compte-rendu établi par le président de la commission particulière et du bilan dressé par le président de la CNDP.

Un dernier problème reste à évoquer : la nature du lien à établir entre le débat sur le projet d'EPR et le débat sur le projet de ligne à très haute tension reliant cette nouvelle centrale au réseau public de transport. En effet, la CNDP a reçu de Réseau de Transport d'Electricité le dossier la saisissant de ce projet qui a évidemment des relations très étroites avec l'EPR. Deux options s'offraient à elle : soit organiser un seul débat portant à la fois sur les deux projets, ce qui traduirait leur caractère indissociable, soit organiser deux débats, ce qui tiendrait mieux compte du fait qu'il s'agit d'ouvrages distincts, soulevant des problématiques différentes, ayant des impacts différents et concernant des publics différents.

C'est la solution qu'a retenue la CNDP dans sa séance de début mars mais elle a en même temps affirmé son souci d'assurer la cohérence entre les deux débats en leur donnant le moment venu un calendrier commun et en coordonnant leur organisation de façon à ce que la discussion sur l'opportunité des deux projets s'éclaire mutuellement. ■

# Les enjeux locaux : l'implantation d'un EPR en France à Flamanville dans la Manche

The local stakes: building EPR in France in Flamanville, Manche

par **Claude Gatignol**, député de Valognes, président du groupe Energies – Assemblée nationale

C'est au cours des années 60 que la presqu'île du Cotentin, a vu apparaître son premier site industriel nucléaire : l'usine CEA située dans le canton de Beaumont-Hague.

Aujourd'hui, les sites nucléaires COGEMA, ANDRA, DCN et EDF font partie intégrante de la vie économique de la presqu'île et sont des poids lourds en terme d'emplois et de ressources locales et départementales.

En fait l'ensemble de ce territoire îlien a été sensibilisé par les procédures "grand chantier" : celui d'EDF Flamanville, tranches 1 et 2, celui de COGEMA-UP3 ensuite.

Les entreprises, locales ou nationales, ont eu à répondre à un pic d'appel d'offres en premier lieu, pour le chantier lui-même, puis à des marchés de prestation, de maintenance spécialisée ensuite.

Les collectivités locales ont eu la lourde charge de répondre à une demande exceptionnelle d'équipements nouveaux pour assurer convenablement les hébergements, les écoles, les pratiques sportives, attendus par une population "nouvelle", autant par sa venue d'ailleurs que par son dynamisme issu de sa participation à une aventure moderne, ouverte sur l'extérieur, et formée à une démarche d'innovation, de rigueur et de qualité. Le chef-lieu de canton, les Pieux, est ainsi passé de 1200 habitants à près de 4 000 en deux décennies. La commune de Flamanville, 1800 habitants aujourd'hui, a pris avec volonté et responsabilité, le tournant de la modernité, sans oublier son histoire.

Les élus se sont beaucoup mobilisés pour réaliser un aménagement territorial plus équilibré au niveau régional. L'enseignement supérieur en particulier (IUT, école d'ingénieurs, institut de la mer...) s'est considérablement renforcé pour donner des formations plus qualifiées, gages d'emploi et de salaire plus haut, dans le département de la Manche.

De même, un syndicat mixte a permis d'appréhender plus efficacement la gestion de l'après grand chantier en terme de soutien aux entreprises, de créations d'emplois, d'impératif de diversification, de recherche de donneurs d'ordres plus variés, avec la participation des maîtres d'ouvrage EDF et COGEMA, de l'Etat, de l'Europe.

On comprend mieux ainsi l'osmose qui s'est développée naturellement depuis 40 ans entre la population et l'industrie nucléaire. L'obligation d'excellence dans le fonctionnement est reconnue par le plus grand nombre et les bons résultats de milliers de contrôles environnementaux, de tous horizons, ont levé les inquiétudes dans ce domaine.

Le projet de construction d'un "EPR", 3<sup>e</sup> tranche du CNPE de FLAMANVILLE, complétant les deux 1300 MW existantes, était attendu et la confirmation du site suscite un grand enthousiasme. Les enjeux locaux sont à la mesure de cette décision, chacun en espère beaucoup et se tient prêt à participer.

## Executive Summary

The project to build a European Pressurized Reactor in FLAMANVILLE (Manche) has been confirmed by the choice of the French Government to increase the capacities of the French nuclear energy supplies, in the context of a national and international energy policy.

The stakes and importance of this building site are greatly appreciated by the various players involved who already experienced the procedure of a "grand chantier" for the construction of Flamanville 1 and 2 (1300 MWx2) and COGEMA UP3, in the 1980's. The local representatives and communities want to take advantage of the financial repercussions as efficiently as possible to carry out new installations and to meet the expectations of the local populations when the peak of building site is over.

The companies are ready to take the technological challenge and therefore to increase the number of jobs they can offer and improve the qualification of their current employees in order to be more competitive for future businesses and markets.

EDF, the owner of the site, reinforces in a long-term vision its means of production of electricity thanks to a competitive and environment friendly source and also its capacity to manage a new concept of optimized reactor.

The choice of the location has now motivated all the economic sectors which wish to take part in the success of this exceptional operation.

The objective is to improve the existing equipment, to reinforce the training facilities, to support the companies for innovating, to support the emergence of a well identified pole of competence. The selected slogan is: EPR a chance for the Cotentin, the Cotentin a chance for the EPR.



C'est bien, en premier, un ballon d'oxygène, propre à lutter contre le pessimisme ambiant lié au manque de croissance, à stimuler l'économie locale un peu essoufflée et à redonner le moral pour gagner la bataille de l'emploi.

Une construction évaluée à 3 milliards d'euros, pour six années de réalisation, mettant en œuvre environ 2000 emplois est un formidable espoir de stimulation du tissu local. Et le site, dès sa conception a été prévu pour 4 tranches.

C'est donc un projet pour le moyen-long terme qui peut être décliné sous différentes formes.

De prime abord, les aspects technologiques sont importants : le réacteur européen de 3<sup>e</sup> génération est à ce jour le meilleur de sa catégorie et, participer à la construction de la tête de série est un formidable challenge. Les entreprises le ressentent ainsi et savent bien que toute innovation a pour conséquence de pousser vers le haut les compétences. La compétition sera rude sans doute, mais l'agrément pour le chantier sera une plus-value pour être demain en position favorable pour d'autres chantiers, d'autres marchés, nationaux ou internationaux.

Ce sera une vitrine de compétences, renforçant l'image existante de qualité et de sûreté due à la continuité dans le domaine nucléaire (CEA, COGEMA, DCN, EDF) qui remettra à l'honneur le compagnonnage et la transmission du savoir faire qui existent ici. Les capacités de formation de bon niveau sont une priorité.

Au moment où, de façon plus aiguë, on parle de reconnaître l'innovation industrielle, ses applications, les pôles de compétences, le Cotentin se place en première ligne, mais l'absence d'un pôle de recherche bien identifié pose quelques difficultés. Il faut y répondre et s'inspirer largement du rapport BEFFA.

Cependant, je pense que pour l'entreprise EDF, exploitant du site, c'est une belle occasion de démontrer ses capacités d'adaptation, d'évolution, de maîtrise d'un nouveau concept de réacteur, validé pour le 21<sup>e</sup> siècle et intéressant de nombreux pays

En second lieu, la procédure "grand chantier" que le Cotentin a découverte, il y a 25 ans, est faite pour la réflexion, les propositions, les évaluations et un certain pari sur l'avenir.

C'est un moment important pour fixer les engagements entre le maître d'ouvrage et les collectivités : il représente l'autre volet, non nucléaire pourrait-on dire, du projet.

Il faut faire le point sur les équipements existants, et imaginer les équipements à construire pour la période du chantier et aussi de l'après-chantier. L'expérience acquise par les précédentes négociations sera fort utile pour celles à venir, et les constats sont sous nos yeux : le canton a une population de plus de 13 000 habitants en 2005, elle était de 7300 en 1975. Il y avait alors 3200 logements recensés, ils sont aujourd'hui plus de 6000.

Chacun mesure donc l'importance des défis à relever pour dynamiser au mieux tous les secteurs économiques et bien utiliser toutes les retombées financières. Les travaux publics sont concernés en premier certes, mais les activités commerciales et de services sont aussi prêtes à saisir les opportunités de développement, de modernisation.

La contribution économique du CNPE constitue un élément essentiel pour les décisions à prendre. En 2004, il a été produit 18,1 milliards de kilowatt-heures, soit 3,6 % de la production française d'électricité, malgré un arrêt programmé de la tranche 2, grâce à une disponibilité à souligner de la tranche 1 de 360 jours. Le montant total de la fiscalité versée atteint cette année 25 millions d'euros. Le montant des commandes passées aux entreprises s'est élevé à 37 millions d'euros. Les transferts de technologie, partenariats industriels, les actions en faveur de la formation, les participations à de multiples projets locaux témoignent de l'importance d'un aménagement raisonné du territoire.

De plus, cette présence ne perturbe en rien les activités touristiques, qui connaissent un fort développement, ni la production agroalimentaire, largement exportatrice, qui a ciblé la qualité et le haut de gamme tant en produits laitiers transformés qu'en production légumière.

Le Conseil économique et social de Basse-Normandie, dans un rapport conséquent, répondant à la fois à la question actuelle et prospective, a parfaitement décrit la dimension régionale et locale du choix de Flamanville, concernant les collectivités territoriales, les entreprises, les citoyens. Mais j'ai le sentiment que la perception des enjeux pourrait être simplement démontrée, dans la démarche de l'association de soutien, PRO-FLAM, présidée par un chef d'entreprise locale, constituée par l'ad-

hésion volontaire des chambres consulaires (CCI, Métiers, Agriculture, professions indépendantes), de plus de 1000 entreprises, de centaines d'élus, de citoyens à titre personnel.

Si la géographie ne nous est pas favorable a priori, je crois que cela est largement compensé par la qualité de vie au quotidien, par la beauté du patrimoine et des paysages et nous voulons maintenir ce bel équilibre entre modernité et tradition.

Nous disposons des atouts d'un éventail de compétences : si l'EPR est une chance pour le Cotentin, le Cotentin est une chance pour l'EPR. Nous avons rendez-vous avec l'innovation et notre volonté de réussir est totale. ■

# La recherche sur les réacteurs de quatrième génération : l'initiative Gen IV

Research on 4th generation reactors: the Gen IV initiative

par Franck Carré, CEA, directeur de programme "systèmes du futur"

## L'initiative Génération IV - Historique

À la fin des années 1990, plusieurs pays ont entrepris des réflexions sur de nouveaux systèmes de production d'énergie nucléaire, notamment le Forum International Génération IV (GIF) créé en 2000 à l'initiative des Etats-Unis. Le GIF a pour principe fondateur la reconnaissance des atouts de l'énergie nucléaire pour satisfaire les besoins en énergie croissants dans le monde, dans une perspective de développement durable. Le GIF regroupe onze pays, dont les Etats-Unis, la France, le Japon, le Royaume-Uni, le Canada, la Corée du Sud ainsi que les pays signataires du traité Euratom.

La première phase du Forum (2000-2002) a abouti à la publication, en octobre 2002, d'un plan de développement des technologies jugées les plus prometteuses pour les prochaines décennies (Technology Roadmap [1]- <http://gif.inel.gov/roadmap/>). Six systèmes nucléaires ont été sélectionnés pour permettre des avancées notables en matière de compétitivité économique, de sûreté, de réduction des déchets radioactifs à vie longue, d'économie des ressources en uranium, ainsi que de résistance à la prolifération et à la malveillance :

- *GFR (Gas-Cooled Fast Reactor System)* : réacteur rapide refroidi au gaz avec recyclage du combustible ou RNR-G,
- *SFR (Sodium-Cooled Fast Reactor System)* : réacteur rapide refroidi au sodium avec recyclage du combustible ou RNR-Na,
- *LFR (Lead-Cooled Fast Reactor System)* : réacteur rapide refroidi au plomb ou au plomb-bismuth avec recyclage du combustible ou RNR-Pb,
- *VHTR (Very High Temperature Reactor System)* : réacteur à neutrons thermiques et à très haute température (1000 °C) refroidi à l'hélium ou RTHT, dédié à la production d'hydrogène et envisagé initialement sans recyclage du combustible,
- *SCWR (Supercritical Water-Cooled Reactor System)* : réacteur refroidi à l'eau supercritique ou RESC, à spectre neutronique thermique ou rapide et recyclage du combustible,

- *MSR (Molten Salt Reactor System)* : réacteur à neutrons thermiques à sels fondus ou RSF, avec recyclage du combustible.

Ces systèmes visent avant tout la production d'électricité, mais certains ont également le potentiel de co-générer de l'hydrogène à partir de l'eau ou de fournir de la chaleur à haute température pour des procédés industriels. Les principales caractéristiques de ces systèmes sont données en annexe. De ces six systèmes, cinq font appel au traitement-recyclage du combustible et quatre utilisent les neutrons rapides, ce qui traduit l'importance accordée aux objectifs de minimisation des déchets à vie longue et d'économie des ressources en combustible.

Les travaux du Forum ont clairement conduit à faire reconnaître les systèmes de 4<sup>e</sup> génération à neutrons rapides avec recyclage intégral du combustible comme la solution la plus aboutie pour minimiser la radiotoxicité potentielle et la charge thermique à long terme des déchets du cycle (l'absence d'actinides permettant à ces déchets, constitués quasiment uniquement de produits de fission, de retrouver le niveau de radiotoxicité de l'uranium naturel après 3 siècles seulement).

## Executive Summary

The forward-looking studies led by the CEA and the industrial partners lead to propose for France a R&D strategy on the generation IV systems balanced between medium and longer terms (>2040). The strategy aims at three complementary objectives: the searches for innovations for light water reactors; the systems with fast neutrons spectrum with innovative closed fuel cycle to satisfy durably energy needs; the key technologies for the nuclear production of hydrogen.

Four of six nuclear systems selected by the forum Generation IV have a fast spectrum. In the French context the priority is given to fast spectrum systems cooled by sodium and gas. The systems with very high temperature, capable of supplying industrial heat and of producing hydrogen are also among the French priorities.

The option of complete recycling of all the actinides in the systems with fast neutrons appeals to new processes for the treatment of spent fuels and the re-fabrication of fuels to be recycled.

### Orientations stratégiques françaises pour les systèmes du futur

#### Contexte

Plusieurs éléments de contexte propres à la France doivent être pris en considération dans les orientations stratégiques pour les systèmes nucléaires du futur, parmi lesquels, en allant du moyen au plus long terme :

- tirer le meilleur profit du potentiel de progrès des réacteurs à eau,
- optimiser les opportunités offertes par le renouvellement des installations nucléaires en exploitation,
- intégrer les conséquences de la mise en œuvre d'une stratégie de gestion optimisée des déchets radioactifs sur la base des résultats des recherches menées en France dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991,
- la recherche pour le plus long terme de progrès nécessaires pour inscrire l'énergie nucléaire parmi les énergies capables de satisfaire durablement les besoins en énergie dans le respect de l'environnement.

#### Éléments de stratégie pour les systèmes du futur

Les études prospectives menées tant par le CEA que par ses partenaires industriels conduisent à proposer pour la France une stratégie de R&D sur les systèmes du futur équilibrée entre moyen et plus long termes (> 2040) visant trois objectifs complémentaires :

- les recherches d'innovations pour les réacteurs à eau,
- les systèmes à neutrons rapides avec cycle du combustible fermé pour satisfaire durablement les besoins en énergie,
- les technologies clés pour la production nucléaire d'hydrogène.

Les deux derniers objectifs s'inscrivent clairement dans la perspective d'une participation du CEA et de ses partenaires industriels à la R&D internationale du Forum Génération IV sur des technologies en rupture par rapport aux réacteurs à eau, et d'une coopération bilatérale avec la Russie. Il s'agit de démultiplier l'effort de R&D français pour ces innovations et les possibilités de co-financement de grandes installations de recherche ou réacteurs prototypes en France ou en Europe. Les grands thèmes de R&D sous-tendus par les trois objectifs stratégiques sont présentés ci-après.

### Stratégie de R & D par thème

La priorité est très clairement donnée aux systèmes à neutrons rapides avec cycle du combustible fermé (SFR et GFR). A un niveau inférieur, mais significatif, figurent les systèmes à très haute température capables de produire de l'hydrogène (VHTR). Un effort adaptable à la hausse en fonction de la demande des partenaires industriels est maintenu sur les innovations dans les réacteurs à eau et l'effort exploratoire sur les réacteurs à sels fondus sera poursuivi.

#### Systèmes à neutrons rapides avec cycle du combustible fermé

##### Stratégie neutrons rapides

L'analyse prospective menée par EDF conduit à prévoir la possibilité de déployer industriellement une première série de réacteurs à neutrons rapides dans le parc français à l'horizon 2040.

Dans un contexte caractérisé à la fois par un retour d'expérience important sur les réacteurs rapides à caloporteur sodium et par l'intérêt confirmé, au cours de la phase d'orientation technologique du Forum Génération IV, du gaz comme autre caloporteur potentiel des réacteurs à neutrons rapides avec une technologie de combustible robuste, le CEA et ses partenaires industriels se sont entendus pour concevoir un programme de R&D sur les neutrons rapides sur deux voies parallèles :

- des recherches d'innovations pour résoudre les difficultés technologiques résiduelles des réacteurs rapides à caloporteur sodium, et
- des développements de fond sur les verrous technologiques spécifiques du système rapide à caloporteur gaz (le combustible principalement).

L'intention est de mener ces travaux en parallèle et de les organiser de façon à permettre, vers 2015, le choix d'une filière à développer industriellement pour pouvoir être déployée dans le parc français à l'horizon 2040.

La R&D sur les systèmes de 4<sup>e</sup> génération à neutrons rapides comprend également le développement de nouveaux procédés pour le traitement des combustibles usés des systèmes concernés avec un recyclage au moins de l'uranium et du plutonium et optionnellement de tous les actinides (uranium, plutonium et actinides mineurs).

### Système rapide refroidi au sodium (RNR-Na ou SFR)

Le RNR-Na bénéficie pour le réacteur d'une expérience industrielle importante. Pour cette technologie la priorité est donnée :

- aux études de conception pour simplifier le système et réduire son coût d'investissement,
- à la mise au point de techniques d'inspection en service, maintenance et réparation plus efficaces,
- à une meilleure prévention des accidents graves et des risques de criticité associés,
- au développement de procédés du cycle permettant la cogestion au moins de l'uranium et du plutonium pour une résistance accrue aux risques de prolifération, voire la cogestion de tous les actinides (U, Pu et actinides mineurs) pour un recyclage intégral de tous les actinides.

### Système à neutrons rapides refroidi au gaz (RNR-G ou GFR)

Le RNR-G est un système très innovant qui associe neutrons rapides et haute température, pour lequel aucun démonstrateur n'a encore été construit. Sa faisabilité repose essentiellement sur la levée de quelques verrous technologiques et démonstrations de sûreté spécifiques dont les principaux concernent :

- le combustible dont la technologie vise à transposer aux neutrons rapides les fonctionnalités du concept de combustible des réacteurs à haute température à particule (confinement des produits de fission, résistance aux très hautes températures, bonne conduction de la chaleur...),
- le développement de matériaux de structure pour le cœur résistant à la fois à la haute température et aux dommages par les neutrons rapides,
- la gestion des situations accidentelles, et en particulier de l'accident de dépressurisation, avec des systèmes actifs ou semi-passifs à court terme, et des systèmes passifs utilisant la convection naturelle à moyen terme,
- le cycle du combustible dont les procédés doivent permettre le recyclage au moins de l'uranium et du plutonium cogérés pour une résistance accrue aux risques de prolifération, voire un recyclage intégral de tous les actinides (uranium, plutonium et actinides mineurs) avec une gestion groupée. Ce volet de R&D comporte un tronc commun important avec celle des cycles pour les autres systèmes à neutrons rapides du Forum Génération IV (SFR, LFR et SCWR),

- et, en tronc commun avec la R&D pour le RTHT :
- la technologie des circuits d'hélium à très haute température et des composants tels que les échangeurs de chaleur (fabrication, performances et tenues en service...),
  - la technologie du système de conversion d'énergie par turbine à gaz pour la production d'électricité.

Une fois établie la faisabilité du combustible, le plan de développement du RNR-G prévoit de tester les principes et technologies spécifiques du système dans un Réacteur d'étude et de développement technologique (REDT) de 30 à 50 MW appelé à démarrer vers 2017.

### Production d'hydrogène et Système à neutrons thermiques refroidi au gaz à très haute température (RTHT ou VHTR)

La production d'hydrogène avec les procédés de décomposition de l'eau pressentis aujourd'hui comme les plus efficaces, de même que la fourniture d'énergie à très haute température pour l'industrie, constituent un axe complémentaire de R&D pour satisfaire les besoins en énergie à l'échelle mondiale. Cet objectif est celui des réacteurs à très haute température et caloporteur gaz qui auront une température de 1000 °C en sortie du cœur. Il présente un tronc commun de R&D important avec le programme de développement Antares d'Areva consacré aux réacteurs à haute température (850 – 950 °C).

Outre le tronc commun avec le RNR-G évoqué ci-dessus, les verrous technologiques importants pour la faisabilité d'un système de RTHT avec une température d'hélium de 1000 °C en sortie du cœur sont les suivants :

- les matériaux résistants à très haute température (> 950 °C) pour le circuit primaire et ses composants (en particulier l'échangeur de chaleur intermédiaire s'il y a lieu),
- la technologie des circuits d'hélium à très haute température et des composants tels que les échangeurs (fabrication, performances et tenues en service...),
- le combustible à particule pour lequel la recherche d'une marge supplémentaire d'au moins 200 °C sur la température de fonctionnement conduit par exemple à remplacer l'enrobage d'étanchéité aux produits de fission en SiC par un enrobage en ZrC.

### Recherches d'innovations pour les réacteurs à eau

Les recherches d'innovations pour les réacteurs à eau ont trois objectifs dont les deux premiers sont prioritaires et font déjà l'objet de programmes cofinancés par les partenaires industriels :

- des innovations sur les combustibles pour le palier EPR,
- des innovations pour le marché international dans une gamme de puissance inférieure à 1000 MWe,
- des innovations pour d'éventuels projets de réacteurs postérieurs à l'EPR, à eau sous pression, à eau bouillante ou à eau supercritique.

L'ensemble des recherches d'innovations sur les réacteurs à eau comprend un volet de R&D sur le combustible et, par ailleurs des études de systèmes ou de scénarios pour identifier les technologies réacteur, combustible et cycle stratégiques pour le contexte français afin de préparer leur développement en temps utile.

Au-delà de cette R&D d'optimisation des combustibles actuels, quelques innovations en rupture, visant des progrès substantiels en économie et en sûreté, font l'objet d'études et de travaux de laboratoire :

- combustibles capables d'intégrer des taux de combustion supérieurs à 100 GWj/t,
- combustibles à température de fonctionnement réduite (plaques au lieu de crayons),
- combustibles robustes réduisant radicalement la production d'hydrogène en cas d'accident grave,
- combustibles à poison consommable erbium intégré à la gaine.

Cette R&D de fond, menée en coopération avec Areva et EDF, est également amenée à se poursuivre sur la durée d'exploitation de l'EPR.

### Procédés du cycle pour une gestion globale des actinides

Au-delà du recyclage de l'uranium et du plutonium, l'option de recyclage intégral de tous les actinides dans les systèmes à neutrons rapides (uranium, plutonium et actinides mineurs) fait appel à de nouveaux procédés pour le traitement des combustibles usés et la re-fabrication des combustibles à recycler, dont le développement passe par les grands jalons suivants :

- la réalisation en 2012 d'un atelier pilote auprès de

l'usine de La Hague à même de procéder à des essais représentatifs de procédés de séparation poussée ou groupée (Ganex), et

- un projet international de démonstration de gestion globale des actinides comprenant la séparation de quelques dizaines de kilogrammes d'actinides mineurs par l'atelier pilote de La Hague, la fabrication d'assemblages combustible "tous actinides" aux Etats-Unis à Oak-Ridge, et les essais de ce combustible à partir de 2015 dans le réacteur Monju exploité par JNC au Japon.

Ces recherches bénéficient de la coopération en place avec le CNRS sur les procédés de séparation et transmutation (Groupement de Recherche PARIS dans le cadre PACE).

### Autres systèmes nucléaires

Le CEA avec le CNRS et ses partenaires industriels mène également une activité de recherche sur des filières plus prospectives telles que les réacteurs à sel fondu, les réacteurs à caloporteur plomb et les réacteurs à eau supercritique avec l'objectif d'actualiser l'évaluation tout en contribuant à certains volets de R&D spécifiques sur les points durs de chaque filière.

### Conclusions

Les enjeux de la quatrième génération sont ceux d'un nucléaire durable capable de satisfaire durablement les besoins en énergie à l'échelle mondiale. Ceci conduit à focaliser les programmes de recherche et développement sur des réacteurs à neutrons rapides avec un cycle de combustible fermé, présentant une gestion responsable des déchets et une prévention suffisante des risques de prolifération.

Dans le contexte français la priorité est donnée aux systèmes rapides refroidis au sodium et au gaz. L'introduction d'une fraction de ces réacteurs dans le parc permettra de se prémunir contre les risques de tension sur le marché de l'uranium et de gérer convenablement les stocks de plutonium et d'autres actinides produits par les réacteurs de 2<sup>e</sup> et de 3<sup>e</sup> génération.

Parmi les priorités françaises figurent également les systèmes à très haute température, capables de fournir de la chaleur industrielle et de produire de l'hydrogène.

Une forte participation française au programme in-

ternational de développement des systèmes de 4<sup>e</sup> génération est devenue indispensable pour que notre industrie puisse conserver son leadership au plan mondial. ■

**Références :**

[1] A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems (Dec. 2002) – GIF-002-00 – Issued by the U.S.DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum

## C O N T R O L E .

la revue de l'Autorité de sûreté nucléaire, est publiée conjointement par  
le ministère des solidarités, de la santé et de la famille,  
le ministère de l'économie, des finances et de l'industrie,  
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

Coordinateur du dossier : Olivier Gupta

Rédactrice en chef : Agnès HUGUET - Secrétaire de rédaction : Gérald DUVERT

Photos : couverture : AREVA ; p.24-40-75 : EDF ; p.31-33-67-69 : FRAMATOME

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