

ANNALES DES MINES

R É A L I T É S INDUSTRIELLES

AOÛT 2012 • PRIX : 23 €

Le nucléaire du futur

LE NUCLÉAIRE DU FUTUR



AOÛT 2012

ISSN 1148.7941

ISBN 978-2-7472-1980-8



UNE SÉRIE DES
**ANNALES
DES
MINES**

FONDÉES EN 1794

*Publiées avec le soutien
du ministère de l'Économie
et des Finances*



ESKA

Éditorial

Pierre COUVEINHES

Ce numéro de *Réalités industrielles* présente un état des lieux de l'industrie nucléaire dans le monde, et de ses perspectives de développement technologique. Il ne prend pas parti sur la contribution que pourra avoir l'énergie nucléaire dans le mix énergétique de demain. Le choix de ce mix, qui donnera lieu à un grand débat national à l'automne prochain, résultera nécessairement d'une comparaison entre les avantages et les inconvénients des différentes énergies. En effet, comme l'écrivent Jacques Percebois et Claude Mandil dans leur article, « il n'existe ni énergie sans inconvénient ni scénario idéal ».

Comment l'industrie nucléaire se présente-t-elle à nous, un peu plus d'un an après l'accident de Fukushima, qui a profondément marqué les esprits ?

Tout d'abord, cet accident a rappelé que le risque zéro n'existait pas et il a replacé les questions de sécurité au centre du débat. Cela semble être une évidence, mais n'oublions pas que peu de temps auparavant, certains, en France, s'insurgeaient contre les exigences de l'Agence de Sûreté Nucléaire (ASN), qu'ils estimaient excessives !

En ce qui concerne la perception du nucléaire en France, une étude menée pour l'ASN par l'institut TNS Sofres laisse penser que Fukushima a eu un effet. , mais, comme l'indiquent Emmanuel Rivière et Alain Delmestre, « cet effet n'est pas considérable, et il n'est pas sûr qu'il soit durable ». Globalement, il semble bien que les Français restent majoritairement favorables au nucléaire, alors même que l'Allemagne, la Belgique, la Suisse et l'Italie ont annoncé vouloir renoncer à cette énergie, à plus ou moins longue échéance.

Mais cette attitude de nos voisins ne masque-t-elle pas en partie à nos yeux le fait que, dans leur grande majorité, les pays européens ont confirmé au cours des derniers mois leur choix en faveur du nucléaire ? C'est le cas notamment du Royaume-Uni, des Pays-Bas, de la Suède, de la Finlande, de l'Espagne et de la plupart des pays d'Europe centrale.

Et tous les pays dits BRICS, sans aucune exception, ont confirmé la poursuite de programmes nucléaires ambitieux, avec à leur tête la Chine, où un grand nombre de centrales nucléaires sont en cours de construction ou en projet.

Dans ce contexte, la France dispose d'atouts importants, grâce à l'organisation remarquablement complète et cohérente de sa filière nucléaire. En matière de recherche et développement, le CEA est présent sur toutes les technologies d'avenir avec, pour le long terme, sa participation dans le programme ITER consacré à la fusion nucléaire,

qui est implanté à Cadarache, en France. Avec EDF, notre pays dispose du plus important exploitant de centrales nucléaires dans le monde.

Ce dispositif est complété par l'Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA), qui est chargée de leur gestion à long terme, et par l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), qui apporte son appui technique à l'ASN, autorité de sûreté dont la compétence et l'indépendance font référence dans le monde entier.

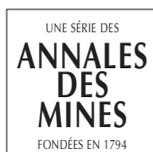
En matière d'offre industrielle proprement dite, AREVA est en mesure de faire des propositions intégrées couvrant toutes les étapes du cycle du combustible, la conception et la construction de réacteurs nucléaires et les services associés. Cette offre est complétée non seulement par d'autres grandes entreprises françaises (telles qu'Alstom, pour les groupes turbo-alternateurs, ou Bouygues, Vinci et Eiffage pour le génie civil), mais aussi par plusieurs centaines de PME et ETI.

Il est souvent reproché aux grands groupes français de ne pas chercher à associer des entreprises de plus petite taille à leur développement. On peut à juste titre considérer que le secteur nucléaire français dément cette accusation. Ainsi, le « Pôle nucléaire Bourgogne », que Gérard Kottmann présente dans ce numéro de Réalités Industrielles, associe plus de cent-cinquante partenaires, entreprises de toute taille et établissements d'enseignement.

L'organisation exemplaire du secteur du nucléaire de notre pays peut permettre à celui-ci de conquérir une part substantielle des marchés à l'exportation, situés principalement dans les pays émergents. Mais ces derniers ne restent pas inactifs : ils développent à un rythme soutenu leurs compétences en matière nucléaire, y compris dans les technologies les plus avancées. Ainsi, aujourd'hui, l'Inde, la Russie et la Chine consacrent des moyens importants au développement de réacteurs à neutrons rapides.

Il convient donc de ne pas perdre cette avance dont notre pays dispose encore aujourd'hui !

R É A L I T É S INDUSTRIELLES



Rédaction

120, rue de Bercy - Télédéc 797
75572 Paris Cedex 12
Tél. : 01 53 18 52 68
Fax : 01 53 18 52 72
<http://www.anales.org>

Pierre Couveinhes, rédacteur en chef

Gérard Comby, secrétaire général de la série
« Réalités Industrielles »

Martine Huet, assistante de la rédaction

Marcel Charbonnier, lecteur

Comité de rédaction de la série
« Réalités industrielles » :

Michel Matheu, président,
Pierre Amouyel,
Grégoire Postel-Vinay,
Claude Trink,
Bruno Sauvalle,
Jean-Pierre Dardayrol
Pierre Couveinhes

Maquette conçue par
Tribord Amure

Iconographe
Christine de Coninck

Fabrication :
Marise Urbano - AGPA Editions
4, rue Camélinat
42000 Saint-Étienne
Tél. : 04 77 43 26 70
Fax : 04 77 41 85 04
e-mail : agpaedit@wanadoo.fr

Abonnements et ventes

Editions ESKA
12, rue du Quatre-Septembre
75002 Paris
Tél. : 01 42 86 55 65
Fax : 01 42 60 45 35
<http://www.eska.fr>

Directeur de la publication :

Serge Kebabtchieff
Editions ESKA SA
au capital de 40 000 €
Immatriculée au RC Paris
325 600 751 000 26

**Un bulletin d'abonnement est encarté
dans ce numéro page 180**

Vente au numéro par correspondance
et disponible dans les librairies suivantes :
Presses Universitaires de France - PARIS ;
Guillaume - ROUEN ; Petit - LIMOGES ;
Marque-page - LE CREUSOT ;
Privat, Rive-gauche - PERPIGNAN ;
Transparence Ginetet - ALBI ;
Forum - RENNES ;
Mollat, Itaque - BORDEAUX.

Publicité

J.-C. Michalon
directeur de la publicité
Espace Conseil et Communication
2, rue Pierre de Ronsard
78200 Mantes-la-Jolie
Tél. : 01 30 33 93 57
Fax : 01 30 33 93 58

Table des annonceurs

Annales des Mines : 2^e, 3^e et 4^e de couverture

Illustration de couverture :
Vue de l'enceinte plasma de Tore Supra - ITER
©CEA

S o m m a i r e

LE NUCLÉAIRE DU FUTUR

- 1 **Éditorial**
Pierre Couveinhes
- 5 **Avant-propos**
Claude Trink

Des facteurs structurants pour l'avenir

- 7 **La perception du risque nucléaire en France, en 2012 : « il y a un avant Fukushima et un après Fukushima »**
Emmanuel Rivière et Alain Delmestre
- 13 **Les perspectives en matière de sûreté nucléaire**
Sophie Mourlon
- 21 **Les programmes de recherche au CEA sur les systèmes nucléaires du futur**
Christophe Béhar
- 27 **Le projet ASTRID**
François Gauché
- 35 **ITER : une étape clé pour inscrire la fusion dans le mix énergétique du futur**
Jérôme Pamela et Sylvie André-Mitsialis
- 41 **Des sciences fondamentales aux enjeux sociétaux : le rôle du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives**
Daniel Iracane, Stanislas Pommeret et Elvire Leblanc
- 53 **Les conclusions du rapport Energies 2050 sur les perspectives du nucléaire en France**
Jacques Percebois et Claude Mandil
- 59 **Le mode de gouvernance envisagé pour la France**
Charles-Antoine Louët et Timothée Furois

La filière nucléaire : une dynamique entre des marchés diversifiés

- 65 **En amont de la filière nucléaire (mines d'uranium et préparation du combustible)**
Philippe Knoche
- 71 **Un an après Fukushima, panorama des marchés de nouveaux réacteurs**
Luc Oursel et Pierre Landau
- 78 **Les marchés des îlots conventionnels dans le monde**
Olivier Mandement, Philippe Anglaret et Patrick Ledermann
- 86 **Les enjeux de la gestion des déchets radioactifs**
Fabrice Boissier
- 92 **Le projet Cigéo**
Thibaud Labalette
- 98 **La gestion des déchets issus du démantèlement des installations nucléaires, une activité en croissance qui reste à optimiser**
Bruno Cahen

Quel modèle industriel dans l'avenir ?

- 113 **Généralités sur les réacteurs nucléaires**
Claude Jaouen et Pierre Bérout
- 128 **Le réacteur ATMEA1**
Philippe Namy
- 132 **Les *Small Modular Reactors* (SMR)**
Jean-Michel Delbecq
- 142 **Le réacteur AP1000**
François Harari et Carole Chauvin
- 146 **Quelles sont, en France, les perspectives de la construction de gros composants pour les centrales nucléaires ?**
Claude Trink et Jean-Luc Vo Van Qui
- 151 **Nucléaire : quelle approche industrielle pour préserver l'atout français ?**
Hervé Machenaud
- 157 **Le Pôle Nucléaire Bourgogne : une association d'énergies pour développer l'industrie des composants nucléaires**
Gérard Kottmann
- 163 **Biographies des auteurs**
- 170 **Résumés étrangers**

Avant-propos

Claude Trink

La catastrophe nucléaire de Fukushima a été provoquée par un tsunami. Mais c'est à un véritable tremblement de terre politique et industriel auquel nous avons assisté dans le domaine de l'énergie, dans le monde entier. Les politiques publiques afférentes ont été réorientées et les perspectives de développement de la filière du nucléaire civil sont passées de prometteuses à incertaines.

Face au risque de prises de positions hâtives ou irrationnelles, il est apparu d'autant plus nécessaire de fournir au public une présentation des enjeux actuels et futurs de la filière nucléaire française.

Il ne s'agit pas ici de définir la place qu'occupera le nucléaire dans le futur mix énergétique, ni de faire une prévision, mais plutôt de dégager les lignes de force des perspectives d'avenir pour une filière d'activité industrielle qui occupe une place significative en France et de présenter les enjeux techniques et économiques de son développement futur.

L'exercice de prospective se traduit ici par la définition de l'enveloppe des forces en présence pour construire le futur : progrès technologique, exigences de sûreté, développement des activités industrielles, orientations des politiques publiques, avenir (utilisation et maintenance) du parc d'installations actuellement en exploitation,...

Aussi, avons-nous choisi d'aborder la question sous trois angles, en nous demandant : a) quels sont, après Fukushima, les facteurs structurants pour l'avenir, b) quels sont les enjeux et stratégies des acteurs intervenant sur les différents marchés concernés et, enfin, c) quelle est la dynamique d'organisation et de concurrence entre les différents systèmes et modèles industriels en présence ?

Quatre facteurs structurants pour l'avenir ont été mis en exergue : la perception du nucléaire par l'opinion (et c'est volontairement que nous commençons par cet aspect immatériel), l'évolution des règles de sûreté, les progrès attendus des grands programmes de recherches et, enfin, les orientations de la politique publique en matière d'électronucléaire.

Les stratégies des grands acteurs français sont présentées en passant en revue quatre domaines : la production du combustible, la fabrication des équipements de centrales

* Ingénieur général des Mines.

électriques, tant ceux concernant les îlots nucléaires que ceux destinés aux îlots conventionnels, enfin le traitement des déchets.

Des enjeux concurrentiels apparaissent aussi bien au niveau des modèles de réacteurs susceptibles de s'imposer dans le futur, qu'à celui de la concurrence internationale entre les entreprises en charge de leur fabrication et de leur maintenance. Les perspectives qu'offre leur fabrication en France sont ainsi analysées.

La réponse française à ces enjeux est à chercher à travers la structuration d'une filière comportant plusieurs centaines d'entreprises, représentant 240 000 emplois en direct et plus de 400 000 emplois induits : des groupes internationaux, tels EDF, Areva, Alstom ; de grands organismes, comme le CEA, l'ASN, l'ANDRA ; une vingtaine d'entreprises de taille intermédiaire, tel Valinox ; près de 200 PME/PMI spécialisées dans le nucléaire et environ 400 PME/PMI impliquées pour une partie de leur activité dans la filière. Mais cette réponse doit aussi être recherchée à travers le succès des programmes engagés, chacun dans son registre, par le CEA ou par le Pôle de compétitivité nucléaire de Bourgogne, ou bien à travers une présence active dans des programmes de construction de centrales en Chine ou au Royaume-Uni.

Mais au premier chef, le succès de la filière nucléaire française reposera sur le soutien et la confiance dont elle pourra bénéficier tant de la part des autorités politiques que de l'opinion publique, les consommateurs d'électricité que nous sommes.

La perception du risque nucléaire en France, en 2012 : « il y a un avant Fukushima et un après Fukushima »

Pour l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), l'année 2011 a été marquée par l'accident nucléaire de Fukushima. Cet accident majeur rappelle qu'en dépit des précautions qui peuvent être prises, un accident ne peut jamais être exclu. Clairement, il y a un « avant Fukushima » et un « après Fukushima ». En effet, cet accident pose des questions fondamentales qui vont bien au-delà de l'accident survenu sur l'installation de la société Tepco, au Japon.

Dans ce contexte, l'ASN a un rôle de premier plan à jouer en faveur non seulement du développement de la transparence en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection, mais aussi du développement d'une culture du risque chez nos concitoyens.

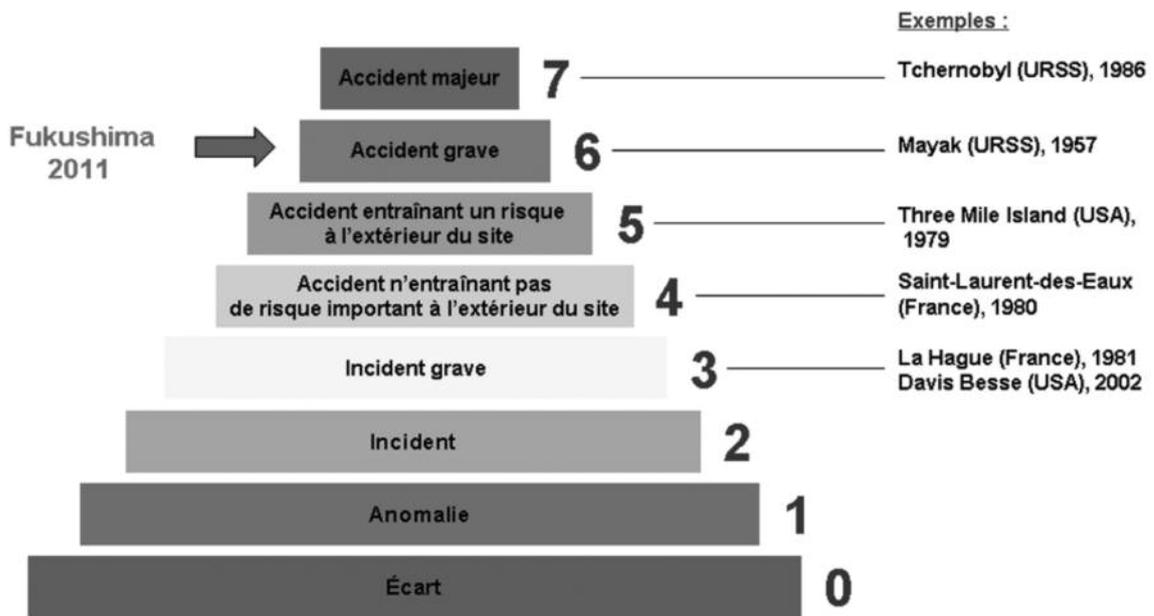
Par **Emmanuel RIVIÈRE*** et **Alain DELMESTRE****

Dès l'annonce de la catastrophe, l'Autorité de sûreté nucléaire s'est totalement mobilisée, en relation avec son appui technique, l'IRSN, pour donner aux pouvoirs publics, aux médias et à tous nos concitoyens une information réactive et une appréciation la plus juste possible de la réalité de l'accident. En dépit des difficultés pour comprendre techniquement l'accident, l'ASN a décidé, dès les premiers jours de la crise, de classer cet accident au niveau 6 de l'échelle internationale INES de classement des incidents et accidents nucléaires. Ce classe-

ment effectué « comme si cet accident était arrivé en France », était en décalage avec celui, largement sous-évalué, opéré par les autorités japonaises. Pour l'ASN, l'accident était plus grave que celui de Three Mile Island (niveau 5), mais moins grave que celui de Tchernobyl (niveau 7).

* Institut TNS-Sofres, directeur du département Stratégies d'Opinion.

** Autorité de sûreté nucléaire (ASN), directeur général adjoint, directeur de la communication et de l'information des publics.



L'ASN a classé très rapidement l'accident au niveau 6 de l'échelle INES.

En l'occurrence, l'ASN a utilisé l'échelle INES pour ce qu'elle est réellement, un outil de communication conçu pour que les citoyens puissent avoir une compréhension claire des enjeux, dans une logique de culture du risque, plus qu'une échelle à vocation exclusivement technique

LES PERCEPTIONS DU PUBLIC APRÈS L'ACCIDENT DE FUKUSHIMA ET LES ENSEIGNEMENTS DU BAROMÈTRE D'OPINION DE L'ASN

Depuis 2005, l'ASN a mis en place un baromètre d'opinion destiné à mieux comprendre les attentes du grand public, mais aussi celles d'un public « averti » constitué de professionnels.

La dernière vague de cette étude d'opinion a été réalisée entre octobre et décembre 2011. Nous livrons ici les principaux enseignements retirés de l'attitude du public après l'accident de Fukushima.

Le nucléaire civil a occupé une place inédite dans l'actualité de l'année 2011, en raison bien sûr de l'accident de Fukushima, qui a aggravé et prolongé le dramatique séisme du 11 mars 2011 et le raz-de-marée qui a suivi. La répercussion de cet accident sur l'opinion publique a été immédiatement planétaire, moins à cause des conséquences environnementales de la catastrophe qu'en raison des décisions immédiatement prises par plusieurs gouvernements, au premier rang desquels la chancellerie allemande, qui décida la fermeture immédiate de sept réacteurs et celle de toutes les centrales nucléaires d'ici à 2020. Cet événement ne pouvait manquer de susciter un débat majeur en France, pays partenaire et voisin de l'Allemagne et

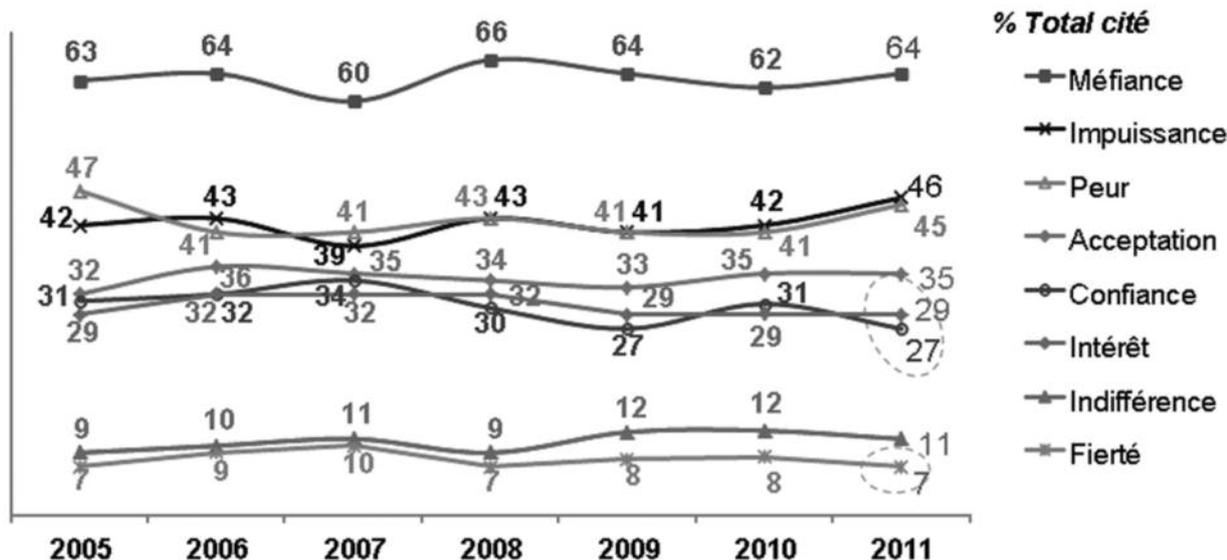
acteur de premier plan dans le domaine de la production électronucléaire.

En France, dès le printemps 2011, la campagne présidentielle est venue amplifier l'écho de ce débat.

Jamais le nucléaire n'aura été aussi présent dans le débat public. Pourtant, l'impact de ces événements sur la manière dont les publics perçoivent le nucléaire et son contrôle a été limité. C'est ce qui ressort de l'édition 2011 du baromètre d'opinion de l'ASN. Cet outil de suivi de l'opinion montre que Fukushima a eu un impact sur les perceptions des risques. Mais cet impact n'est pas aussi spectaculaire que l'on aurait pu l'imaginer.

Certes, l'attitude des Français à l'égard du nucléaire a été affectée par les événements de 2011. Les « favorables au nucléaire » sont moins nombreux, les « opposants au nucléaire » voient leur nombre augmenter. Mais le camp le plus nombreux reste celui des hésitants, qui représente, après comme avant l'accident, la moitié des interviewés. C'est là un point essentiel d'analyse de l'opinion à l'égard du nucléaire : la plupart des gens ne se situent pas dans une lecture binaire, « pour ou contre ». Comme souvent, lorsque les enjeux sont complexes, avec une forte dimension technique, beaucoup estiment ne pas en savoir assez pour pouvoir trancher. Quand on les interroge sur l'avenir de cette énergie, ces hésitants sont séduits par les options intermédiaires, qui consisteraient en l'espace à sortir progressivement du nucléaire, sur plusieurs décennies.

À côté de ces hésitants, il y a ceux qui prennent parti et, parmi eux, les avis favorables étaient, avant Fukushima, bon an mal an, deux fois plus nombreux (un gros tiers) que les opposants (moins d'un sur six). Au lendemain de la catastrophe, les lignes avaient



On n'observe pas de changement radical d'état d'esprit à l'égard du nucléaire en France malgré l'accident de Fukushima.

bougé significativement : entre novembre 2010 et fin mars 2011, les partisans du nucléaire étaient passés de 35 à 28 %, et les opposants au nucléaire de 14 à 24 %. La fin de l'année 2011 semblait annoncer l'amorce d'un retour à l'état antérieur, les opposants reculant à 21 % et les partisans en restant à 28 %. Globalement, il apparaît donc que Fukushima a eu un effet sur la perception du nucléaire en France, mais cet effet n'est pas considérable, et il n'est pas sûr qu'il soit durable.

travers les Evaluations complémentaires de sûreté (ECS).

L'IMPACT DES ÉVÉNEMENTS « MÉDIATIQUES »

Ainsi, l'impact de Fukushima sur l'opinion française apparaît bien moindre que celui d'un fait infiniment moins grave survenu sur notre sol à l'été 2008 : une fuite d'uranium, à l'usine Socatri (sur le site du Tricastin). Cet événement, fortement médiatisé en pleine trêve estivale et suivi d'autres incidents remarquables dans la même région, avait fortement entamé la confiance placée par le public dans le contrôle des installations nucléaires.

La proportion des Français jugeant ces contrôles satisfaisants était ainsi passée de 63 % fin 2007 à 45 % en septembre 2008. Au sein du public « professionnel », la satisfaction avait chuté, passant de 88 à 75 %. Après ces incidents de 2008, on note une brusque chute de la confiance dans le contrôle, puis une amélioration progressive des perceptions. Mais jamais les niveaux de confiance antérieurs à 2008 n'ont été retrouvés (ni même approchés) par la suite. Que les incidents du Tricastin aient davantage altéré la confiance dans la sûreté des installations nucléaires françaises que Fukushima est, somme toute, assez logique, étant donné l'éloignement géographique de Fukushima. Il n'est cependant pas anodin de constater que les événements de l'été 2008 ont durablement marqué la perception de la sûreté nucléaire par l'opinion, alors que très peu de gens les ont encore à l'esprit. Pourtant, ils ont laissé une trace, comme si une présomption d'infailibilité s'était alors évanouie. À l'inverse de Fukushima, les incidents de 2008 n'ont pas eu d'impact global sur la perception générale du nucléaire par

LA PERCEPTION DU CONTRÔLE DE LA SÛRETÉ NUCLÉAIRE ET DE LA RADIOPROTECTION EN FRANCE

Au-delà de la perception du nucléaire, Fukushima a affecté la manière dont les Français jugent le contrôle de la sûreté du nucléaire en France. Fin 2010, près de six Français sur dix (57 %) jugeaient efficace la manière dont la sûreté des centrales nucléaires était contrôlée en France.

Quelques jours après l'accident nucléaire, cette confiance chutait de dix points. Incontestablement, le fait qu'un tel enchaînement de difficultés non maîtrisées se soit produit dans un pays développé a jeté un doute global sur la sûreté nucléaire.

Toutefois, là encore, cet effet de Fukushima et de ses suites peut (et doit) être relativisé. En effet, dès la fin de l'année 2011, la proportion des personnes interrogées qui jugeaient efficace le contrôle des centrales nucléaires redevenait majoritaire (53 %). Ce retour progressif à la confiance peut être attribué à la fois à l'éloignement de l'événement, à sa médiatisation et à la mise en valeur des contrôles engagés en France à

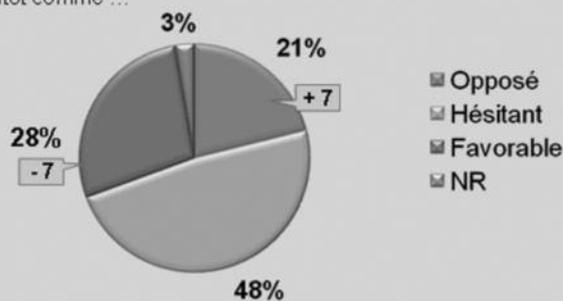
l'opinion, mais ils ont suscité une interrogation sur le niveau de précaution retenu par la France.

QUELLES LEÇONS TIRÉES DE CES ÉVÉNEMENTS ?

Il serait possible de disserter longuement sur ces phénomènes d'opinion et sur le traitement médiatique qui les alimente. Mais il ne s'agit pas ici de dire si ces perceptions de l'opinion sont ou non fondées ; il s'agit de s'interroger sur leurs conséquences et sur les attentes qu'elles suscitent. Or, l'une de ces conséquences pourrait être une prise de conscience d'une réalité du risque nucléaire qui ne soit plus prise en étau entre la négation et l'exagération. En mars 2011, plus d'un Français sur deux (56 %) estimaient « probable » qu'un accident comparable à celui de Fukushima puisse se produire un jour en France, 19 % estimant cette occurrence « très probable ». Il est important de comprendre ce que cela veut dire, en termes de mécanismes d'opinion. Naturellement, les « opposants » sont les plus enclins à croire probable un tel accident en France (ils sont 80 %). Mais on rencontre aussi 60 % d'« hésitants » et même un tiers des personnes « favorables » au nucléaire qui le jugent probable. Ce qui signifie que l'acceptation du nucléaire peut, chez un même individu, coexister avec le sentiment de sa dangerosité potentielle. Autrement dit, qu'il y a une forme d'intégration du risque nucléaire, probablement dans l'idée que ce risque ne serait pas forcément cataclysmique. En cela, Fukushima aura peut-être donné à la perception du public une certaine « gradation » des risques, par rapport à la référence qu'est l'accident majeur de Tchernobyl.

Positionnement vis-à-vis de l'énergie nucléaire

Vis-à-vis de l'énergie nucléaire, vous définiriez-vous plutôt comme ...



LA CULTURE DU RISQUE ET LES CAMPAGNES DE DISTRIBUTION DE COMPRIMÉS D'IODURE DE POTASSIUM (IODE STABLE)

CAMPAGNE 2009

Retirez vos comprimés d'iode en pharmacie

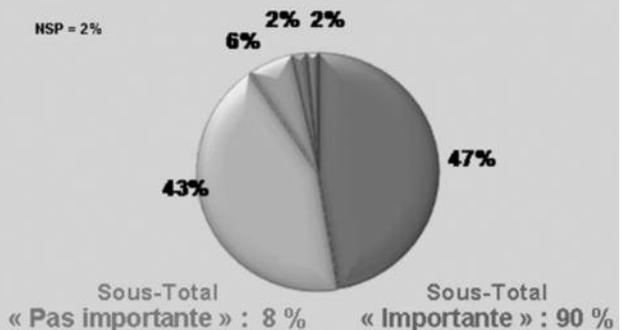
Le comprimé d'iode est un moyen de protection simple et efficace en cas d'accident nucléaire.

Pour plus d'informations, rendez-vous sur : www.distribution-iode.com

Affiche d'information de la dernière campagne de distribution d'iode.

Importance accordée à la question du nucléaire

La question du nucléaire est une question ...



"Ça me paraît indispensable que l'on soit alerté sur tout ce qui se passe dans ce domaine"



Facteurs de segmentation du grand public : un positionnement opposé au nucléaire en progression et des attentes plus importantes en matière d'alerte.

NB : Dans la figure du haut à gauche, le pourcentage des « Opposé » est de 21 %, celui des « Hésitant » est de 48 % et celui des « Favorable » est de 28 %.

Les études réalisées pour l'ASN sur la perception du risque ont montré que les personnes même les mieux informées avaient des difficultés à sortir de l'alternative entre la négation du risque et son exagération. C'est notamment ce qu'ont montré des études conduites en 2010 et en 2011 afin de comprendre les comportements des riverains des centrales nucléaires à l'égard des comprimés d'iode qui leur sont distribués gratuitement. Ces campagnes de distribution visent à faire en sorte que les foyers et les établissements se trouvant à proximité d'installations nucléaires disposent de ces comprimés destinés à protéger la glande thyroïde en cas d'accident nucléaire. Les études conduites par l'ASN et l'institut de sondages TNS Sofres cherchaient à expliquer pourquoi près de la moitié des foyers concernés n'avaient pas fait la démarche consistant à aller retirer leurs boîtes de comprimés dans leur pharmacie habituelle.

Ces enquêtes ont montré que la campagne d'information avait été très largement remarquée (80 % des citoyens concernés s'en souvenaient), elle n'était donc pas en cause. Ce qui constituait le principal obstacle au retrait des comprimés, c'était l'interrogation sur leur utilité, une perplexité des publics concernés qui puisait dans deux excès opposés : le sentiment qu'il n'y avait aucune probabilité qu'un quelconque accident se produise et le sentiment qu'un accident nucléaire est forcément apocalyptique, rendant ainsi dérisoire la protection offerte par un simple comprimé d'iode stable.

La cause profonde du non retrait des comprimés en pharmacie réside donc dans un déficit de culture du risque nucléaire chez les citoyens. Il apparaît par conséquent nécessaire de développer cette culture (individuelle et collective) du risque en faisant du citoyen un acteur de sa propre protection. L'enjeu de

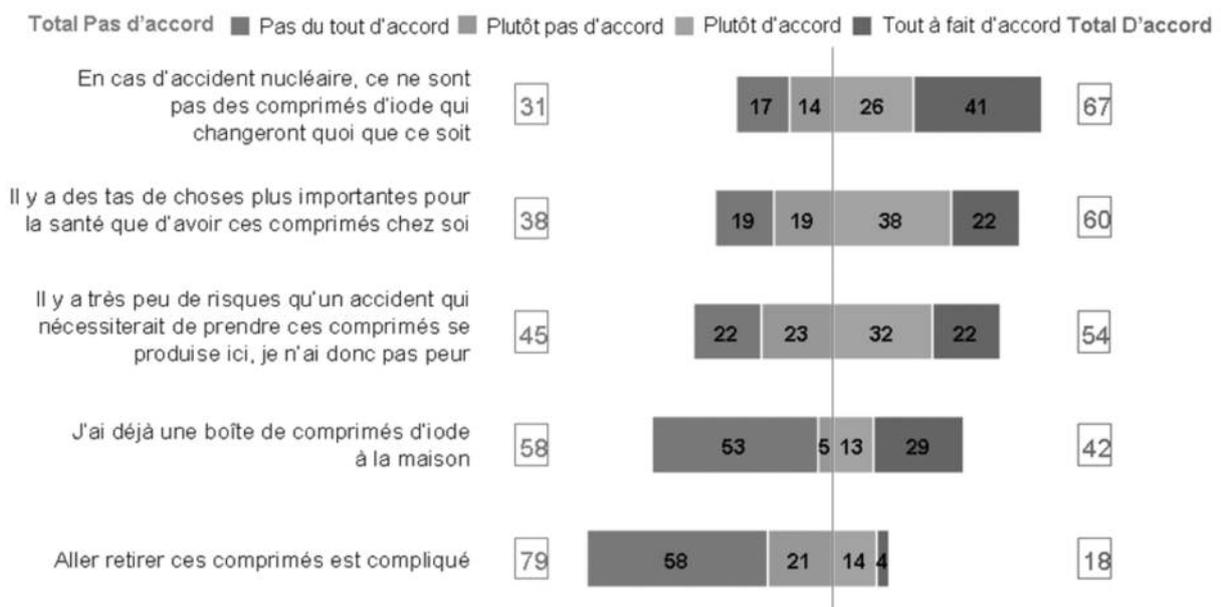
communication étant de dissiper ses représentations erronées de l'accident nucléaire et de lui montrer que des actions de protection efficaces existent.

Le risque zéro n'existe pas : Fukushima nous l'a rappelé. En relation avec les pouvoirs publics et avec les élus locaux (notamment les maires des communes concernées), l'ASN souhaite faire progresser la culture du risque auprès de nos concitoyens pour qu'ils sachent se protéger en cas d'accident nucléaire. Ils sont informés et associés aux exercices de crise organisés régulièrement par les pouvoirs publics dans l'objectif d'assurer une gestion optimale de la crise en cas d'accident réel. Cette logique a poussé l'ASN à engager, dès 2005, les travaux du comité directeur post-accidentel (Codirpa) visant à imaginer avec l'ensemble des parties prenantes, ce que pourrait être la vie des populations dans un territoire contaminé par la radioactivité et à gérer les conséquences d'un accident nucléaire.

L'ASN : UN GENDARME DU NUCLÉAIRE DE MIEUX EN MIEUX IDENTIFIÉ ET À L'AVIS DE PLUS EN PLUS ATTENDU

Comme nous l'avons mentionné, les analyses des évolutions de l'opinion ne montrent pas de fort impact de Fukushima sur la perception de la sûreté nucléaire par nos concitoyens. Est-ce à dire que cette catastrophe n'a pas marqué les esprits ? Non, bien sûr : au contraire, elle semble avoir été l'occasion à la fois d'une attention accrue et d'une attente d'informations.

Les différents publics (professionnels ou non) interrogés dans le cadre de ce baromètre de l'opinion sont en



Attitude des citoyens qui ne sont pas allés chercher leurs comprimés d'iode en pharmacie.

majorité convaincus qu'il y aura un « avant Fukushima » et un « après Fukushima ». Les deux tiers des personnes interrogées s'attendent à des changements importants dans la politique nucléaire de la France dans les prochaines années et cette conviction s'accompagne d'une attention accrue à l'égard de l'information sur le nucléaire.

Les professionnels interrogés au sein du public averti sont ainsi significativement plus nombreux fin 2011 à consulter les médias pour s'informer sur la sûreté nucléaire et la radioprotection. Mais cette attention plus forte n'est pas synonyme d'inquiétude élevée, comme nous l'avons déjà souligné. Une majorité des personnes interrogées sont même convaincues que la catastrophe survenue au Japon aura un impact positif sur le contrôle du nucléaire en France, aussi bien dans le grand public que parmi les professionnels, notamment dans le cadre des contrôles effectués par l'ASN.

La visibilité et l'identification du « gendarme du nucléaire » qu'est l'ASN est une autre conséquence collatérale des incidents et des accidents nucléaires fortement médiatisés. Créée par la loi TSN de 2006 (mais existant déjà sous cette appellation bien avant 2006), l'ASN est une institution qui est de mieux en mieux connue tant du grand public que des professionnels, du fait notamment de l'actualité, qui lui permet de faire connaître son existence et ses missions.

Or, la question de la visibilité de l'institution en charge du contrôle du nucléaire est un enjeu important du débat lui-même. Il apparaît en effet, à la lecture des résultats de notre baromètre, année après année, que la notion d'Autorité Administrative Indépendante est une notion que les Français ont du mal à s'approprier. En effet, le grand public veut bien croire qu'une insti-

tution publique soit dotée de compétences pointues, mais il a plus de mal à en concevoir l'indépendance à l'égard de la sphère politique.

Le cas de l'ASN est à cet égard emblématique. L'ASN n'est soupçonnée d'excès de zèle ni par le grand public ni par les professionnels. Même lorsque certains exprimaient avant Fukushima leur crainte que ses exigences ne nuisent au développement et à l'exportation du nucléaire civil français, le sentiment dominant, y compris chez les professionnels, était que son attitude était la bonne, et que si l'on avait un reproche à lui faire, c'était celui de ne pas être assez exigeante. Tout se passe comme si l'ASN, parce qu'elle est une institution publique dans un pays qui a fait le choix du nucléaire, devait en permanence faire la preuve de son indépendance tant à l'égard des pouvoirs politiques qu'à l'égard des opérateurs.

Le plus souvent, l'ASN y parvient. Ceux et celles qui se rappellent ses prises de parole disent avoir confiance en ce que l'ASN dit (54 %, contre 37 % au sein du grand public, 72 % contre 26 %, chez les professionnels). Quand elle s'exprime, l'ASN dissipe le soupçon formulé *a priori* sur sa réelle indépendance. Fukushima en a été l'occasion : les trois quarts des professionnels qui ont suivi l'information donnée par l'ASN durant la catastrophe se déclarent satisfaits de l'information fournie, ce qui correspond à la meilleure appréciation parmi toutes les institutions testées.

Dans le contexte de l'après Fukushima, et dans le cadre du débat sur la transition énergétique qui s'annonce, l'ASN aura un rôle important à jouer non seulement dans le développement de la transparence en matière de sûreté nucléaire et de radioprotection, mais aussi dans un développement conjoint de la culture du risque chez nos concitoyens.

Les perspectives en matière de sûreté nucléaire

L'accident survenu le 11 mars 2011 à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, au Japon, à la suite d'un violent séisme suivi d'un tsunami, confirme que malgré les précautions prises, un accident ne peut jamais être exclu, et cela pose des questions fondamentales, qui vont bien au-delà des caractéristiques particulières des réacteurs de Fukushima.

En France, l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) considère que la prise en compte de tous les enseignements de cette catastrophe, qui pourrait prendre jusqu'à dix ans, est nécessaire à l'amélioration de la sûreté nucléaire partout dans le monde. Elle y veillera, comme elle le fait pour les autres enjeux structurants pour la sûreté nucléaire : le vieillissement des installations, les exigences applicables aux nouveaux réacteurs, les projets de recherche de la filière en vue du développement d'une « quatrième génération » de réacteurs, la cohérence du cycle du combustible, la gestion des déchets nucléaires et le démantèlement des installations. Dans ce contexte et quels que soient les scénarios énergétiques retenus, l'ASN rappelle que s'il y a du nucléaire, il faut que celui-ci soit sûr, et que sur ce point la transparence et l'indépendance du contrôle revêtent une importance fondamentale.

Par **Sophie MOURLON***

L'accident survenu le 11 mars 2011 à la centrale nucléaire de Fukushima I (Daiichi), au Japon, à la suite d'un violent séisme suivi d'un tsunami, a de nouveau placé la question de la sûreté nucléaire sur le devant de la scène médiatique. Cette catastrophe confirme que malgré les précautions prises pour la conception, la construction et le fonctionnement des installations nucléaires, un accident ne peut jamais être exclu.

Dans ce contexte, le rôle de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) est de prévenir les risques et de faire en sorte que la probabilité de l'occurrence d'un accident grave et ses conséquences éventuelles soient aussi réduites que possible. La catastrophe de Fukushima est un déterminant majeur des perspectives en matiè-

* Directrice générale adjointe, Autorité de sûreté nucléaire (ASN).

re de sûreté nucléaire. Elle pose des questions fondamentales qui vont bien au-delà des caractéristiques particulières des réacteurs de Fukushima et de leur exploitation : notre approche de la sûreté est-elle assez prudente ? Prenons-nous suffisamment en compte les incertitudes des connaissances scientifiques ?

L'ASN considère qu'il y a, de ce point de vue, un « avant » et un « après » Fukushima.

Au-delà du champ technique, l'évolution de l'image médiatique de la sûreté nucléaire depuis deux ans est frappante. Avant Fukushima, certains se demandaient publiquement, en France, si l'ASN, devenue Autorité Administrative Indépendante en 2006, « n'en faisait pas trop » en matière d'exigences de sûreté. Depuis l'accident de Fukushima et les évaluations complémentaires de la sûreté des installations nucléaires menées en France en 2011 suite à cet accident, rares sont ceux qui remettent en cause la nécessité d'apporter des améliorations significatives à la sûreté des installations nucléaires.

LA SÛRETÉ NUCLÉAIRE : UN PROCESSUS D'AMÉLIORATION CONTINUE

La sûreté nucléaire s'inscrit dans un processus d'amélioration continue. L'ASN y veille depuis plusieurs

décennies et ce principe a été repris dans la loi du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire, laquelle a été récemment intégrée dans le Code de l'environnement. Cette amélioration se fonde principalement sur deux piliers complémentaires : les réexamens périodiques et le retour d'expérience.

Tous les dix ans, les exploitants sont tenus de réexaminer la sûreté de leurs installations, sous le contrôle de l'ASN. Ce réexamen décennal est l'occasion de contrôler en profondeur la conformité d'une installation aux exigences qui s'appliquent à elle. Il a aussi pour but d'apporter des modifications à l'installation afin d'améliorer son niveau de sûreté en prenant pour référence les exigences applicables aux installations les plus récentes. Le réexamen de sûreté permet à l'ASN de juger de la possibilité (ou non) de poursuivre l'exploitation de l'installation jusqu'à son prochain réexamen décennal.

En complément et de manière continue, les événements, incidents et anomalies détectés sur les installations, en France et dans le monde, sont traités, puis analysés afin d'en tirer les leçons utiles pour la sûreté. Ce retour d'expérience, qui peut conduire à des modifications concernant les installations, les procédures ou l'organisation des exploitants, permet de renforcer la sûreté nucléaire et la radioprotection. Il s'intéresse aussi bien aux accidents majeurs qu'aux faits et évé-



(Crédit ASN)

Présentation du rapport de l'ASN sur les évaluations complémentaires de sûreté, le 3 janvier 2012.

ments qui, bien que n'ayant pas eu de conséquence sur la sûreté, peuvent néanmoins apporter des enseignements utiles.

LES ENSEIGNEMENTS DE L'ACCIDENT DE FUKUSHIMA

À la suite de l'accident survenu à Fukushima, l'ASN a veillé à ce qu'un processus de retour d'expérience approfondi soit rapidement lancé. Elle a en effet considéré qu'une démarche d'évaluation complémentaire de la sûreté des installations devait être engagée sans délai. Cette démarche inédite répondait à la demande du Premier ministre et aux conclusions du Conseil européen, formulées peu après l'accident. L'ASN a également engagé une campagne d'inspections ciblées sur des thèmes en lien avec l'accident de Fukushima.

À l'issue des évaluations complémentaires de sûreté menées en 2011, qui ont donné lieu à une mobilisation exceptionnelle des exploitants, des experts, des parties prenantes et de l'ASN, cette dernière a considéré que les installations examinées présentaient un niveau de sûreté suffisant pour qu'elle ne demande l'arrêt immédiat d'aucune d'entre elles. Dans le même temps, l'ASN a considéré que la poursuite de leur exploitation nécessitait d'augmenter dans les meilleurs délais, au-delà des marges de sûreté dont elles disposaient déjà, leur robustesse face à des situations extrêmes.

Cette conclusion tenait compte des décisions, déjà prises, d'arrêter plusieurs installations anciennes (l'atelier de traitement du plutonium de Cadarache (ATPu), les réacteurs Phénix et Osiris, certains ateliers du site Areva de La Hague, l'usine d'enrichissement d'Eurodif,...). Elle a conduit l'ASN à imposer aux exploitants un ensemble de mesures devant permettre

Les évaluations complémentaires de la sûreté des installations françaises après l'accident de Fukushima.



Les évaluations complémentaires de la sûreté nucléaire portent, selon un cahier des charges précis, sur la robustesse des installations face à des situations exceptionnelles du type de celles qui ont conduit à l'accident de Fukushima, à savoir des phénomènes naturels extrêmes (séisme, inondation et leur cumul) mettant à l'épreuve les fonctions de sûreté des installations et conduisant à un accident grave. L'évaluation porte d'abord sur les effets de ces phénomènes naturels. Elle s'intéresse ensuite au cas de la perte de l'un ou de plusieurs des systèmes importants pour la sûreté mis en cause à Fukushima (alimentations électriques et systèmes de refroidissement), cela quelle que soit la probabilité ou la cause de la perte de ces systèmes. Enfin, elle traite de l'organisation et de la gestion des accidents graves pouvant résulter de ces événements. Ces évaluations constituent une réévaluation ciblée des marges de sûreté des installations et sont complémentaires de la démarche de sûreté menée de manière permanente.

Les évaluations complémentaires de sûreté concernent la quasi-totalité des 150 installations nucléaires françaises (58 réacteurs électronucléaires, réacteur EPR en construction, installations de recherche, usines du cycle du combustible,...). En est exclue moins d'une dizaine d'installations dont le démantèlement est en voie d'achèvement. Des niveaux de priorité ont été définis en fonction de la vulnérabilité des installations aux phénomènes ayant donné lieu à l'accident de Fukushima et de l'importance des conséquences d'un accident qui les affecterait. Pour les 79 installations jugées prioritaires (dont notamment les 59 réacteurs électronucléaires en fonctionnement ou en construction), les exploitants (EDF, le CEA, Areva et l'Institut Laue Langevin) ont remis leurs rapports à l'ASN, le 15 septembre 2011.

L'ASN a considéré qu'il était de la plus haute importance que cette démarche soit effectuée de manière ouverte et transparente : le Haut Comité pour la Transparence et l'Information sur la Sécurité Nucléaire (HCTISN), les commissions locales d'information (CLI) et plusieurs autorités de sûreté étrangères y ont été associés. Par ailleurs, l'ASN a rendu accessibles sur son site Internet (www.asn.fr) les rapports des exploitants, le rapport d'expertise de l'IRSN, l'avis des groupes permanents d'experts qu'elle a réunis, les lettres de suite des inspections qu'elle a réalisées et, bien sûr, son avis et son rapport, rendus publics le 3 janvier 2011.

Les évaluations complémentaires de sûreté sont la mise en œuvre en France des *stress tests* menés à l'échelle européenne sur les centrales nucléaires. Les rapports des différents pays, remis au début de l'année 2012, ont ensuite été soumis à une revue croisée (*peer review*) par des experts issus de l'ensemble des autorités de sûreté et de la Commission européennes, de janvier à avril 2012.

de doter les installations de moyens leur permettant de faire face :

- à un cumul de phénomènes naturels d'une ampleur exceptionnelle et surpassant celle des phénomènes retenus lors de la conception ou du réexamen de la sûreté des installations ;
- à des situations d'accidents nucléaires graves consécutifs à la perte prolongée des sources électriques ou du refroidissement et pouvant affecter l'ensemble des installations d'un même site.

Pour toutes les installations, ces mesures prévoient, en particulier, la mise en place d'un « noyau dur » de dispositions matérielles et organisationnelles permettant de maîtriser les fonctions fondamentales de sûreté dans des situations extrêmes. Le but est de sanctuariser les fonctions vitales des installations, avec pour objectifs de prévenir un accident grave, de limiter les rejets radioactifs massifs (dans le scénario d'un accident qui n'aurait pas pu être maîtrisé) et de permettre à l'exploitant d'assurer, même dans des situations extrêmes, les missions qui lui incombent dans la gestion d'une crise. Il s'agira, par exemple, de mettre en place un centre de gestion de crise et un groupe électrogène diesel « bunkérisés », ainsi qu'une alimentation en eau d'ultime secours.

Le principe de ce noyau dur a été formalisé par l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), qui assure l'appui technique de l'ASN, au cours de l'expertise menée par cet Institut dans le cadre des évaluations complémentaires de sûreté. Les matériels qui feront partie de ce noyau dur devront être conçus pour résister à des événements majeurs (séisme, inondation,...) d'une ampleur très supérieure à celle des événements pris en compte pour déterminer le niveau de résistance des installations, même s'ils ne sont pas considérés comme plausibles.

L'ASN impose ainsi une trentaine de mesures nouvelles, parmi lesquelles on peut citer, outre le noyau dur :

- pour les centrales nucléaires, la « force d'action rapide nucléaire (FARN) » proposée par EDF, qui est un dispositif national d'urgence rassemblant des équipes spécialisées et des équipements, capables d'intervenir en moins de vingt-quatre heures sur un site accidenté, par exemple dans des situations où les équipes de secours habituelles ne pourraient pas y accéder,
- des dispositions renforcées visant à réduire les risques de dénoyage du combustible placé dans les piscines d'entreposage des différentes installations,
- des études de faisabilité de dispositifs supplémentaires de protection des eaux superficielles et souterraines, en cas d'accident grave.

Ces nouvelles exigences impliquent la réalisation de travaux considérables et des investissements massifs, qui ont commencé dès 2012 et s'étaleront sur plusieurs années. L'ASN vérifiera que la mise en place des modifications se fait avec toute la rigueur nécessaire et dans les délais prévus.

Au-delà de ces mesures, l'ASN considère qu'il convient d'apporter une attention particulière aux facteurs sociaux, organisationnels et humains. Réduire la sûreté nucléaire à l'accumulation de dispositifs techniques serait une tentation commode dont il faut se garder : fondamentalement, la sûreté nucléaire repose sur les hommes.

Sur avis du HCTISN, l'ASN avait d'ailleurs étendu aux facteurs humains le cahier des charges des évaluations post-Fukushima élaboré au niveau européen. À l'issue des expertises menées sur ces évaluations, l'ASN retient plusieurs priorités dans ce domaine : les effectifs et les compétences, l'organisation du recours à la sous-traitance et la recherche sur ces thèmes.

Le renouvellement des effectifs et des compétences des exploitants est en effet un point fondamental alors que s'engagent simultanément une relève importante des générations et la réalisation de travaux considérables consécutifs à l'accident de Fukushima, avec la perspective souhaitée par les exploitants (notamment par EDF) de pouvoir prolonger la durée de fonctionnement de leurs installations. L'organisation du recours à la sous-traitance est un sujet majeur et difficile, à la fois parce que c'est un élément essentiel de la prévention des accidents, de la maintenance des installations et de la qualité de leur exploitation, et parce que l'accident de Fukushima a montré que la capacité de l'exploitant et de ses prestataires à s'organiser pour travailler dans des conditions d'accident grave joue un rôle essentiel dans la maîtrise de ce type de situation. En outre, le recours à la sous-traitance ne doit pas se faire au détriment de la capacité des exploitants à assumer leurs responsabilités en matière de sûreté de leurs installations.

Il est important de garder à l'esprit que les évaluations complémentaires de sûreté menées en 2011 et en 2012 ne sont que le début d'un processus plus long. Le retour d'expérience complet de l'accident pourrait prendre jusqu'à une dizaine d'années, comme ce fut le cas après les accidents de Three Mile Island (aux États-Unis) et de Tchernobyl (en Ukraine). Nos connaissances sur cet accident sont donc encore susceptibles d'évoluer.

À la lumière de ces enseignements, l'ASN renforcera les référentiels de sûreté des installations nucléaires, en particulier pour la prévention des risques liés aux séismes et aux inondations. Les principes du « noyau dur » et la recherche d'une bonne robustesse des installations seront intégrés aux exigences en matière de sûreté nucléaire et s'appliqueront pleinement aux nouveaux modèles de réacteurs.

LES ENJEUX À VENIR EN MATIÈRE DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE EN FRANCE

Par ailleurs, d'autres enjeux apparaissent également structurants pour la sûreté nucléaire, dont les princi-

paux sont : le vieillissement des installations, les exigences applicables aux nouveaux réacteurs, les projets de recherche de la filière pour préparer la « génération IV », la cohérence du cycle du combustible, la gestion des déchets nucléaires et, enfin, le démantèlement des installations.

Le vieillissement des installations

Les centrales nucléaires actuellement en fonctionnement en France ont été mises en service entre 1979 et 2000 ; leur âge moyen est donc de vingt-sept ans. Les plus anciennes d'entre elles ont été récemment soumises à leur troisième visite décennale et les plus récentes, à leur première visite décennale. En plus de l'approche de la sûreté au quotidien (rigueur de l'exploitation, application des programmes de maintenance préventive,...), l'exploitant (EDF) doit prendre en compte le vieillissement progressif de ses installations. Cela suppose de renforcer les programmes de contrôle et de maintenance, d'anticiper le remplacement des matériels obsolètes, de développer de nouveaux procédés pour réparer des matériels diffi-

lement remplaçables qui subissent des modes de dégradation inédits et de maintenir à niveau les compétences et les connaissances.

En 2010, EDF a annoncé qu'elle envisageait d'étendre la durée de fonctionnement de son parc nucléaire à soixante ans. Or, la durée de vie envisagée par EDF pour les centrales, lors de leur conception, était de quarante ans. Cela signifie qu'un certain nombre de marges de sûreté ont été dimensionnées pour quarante années d'exploitation. En réponse, l'ASN a demandé à l'exploitant de déployer un programme d'études visant à :

- garantir la conformité des réacteurs, notamment par un examen des composants non remplaçables, pour lesquels l'exploitant devra fournir la preuve de leur tenue dans le temps. L'ASN estime en effet que, si elle était autorisée, la poursuite de l'exploitation des réacteurs au-delà de quarante années nécessiterait une surveillance renforcée des équipements non remplaçables (la cuve et l'enceinte de confinement des réacteurs) ;
- améliorer le niveau de sûreté des réacteurs.

La poursuite de l'exploitation des réacteurs au-delà de quarante ans nécessiterait de reprendre les démonstrations de sûreté, de remplacer une partie des matériels des centrales par des matériels neufs et d'apporter des



(Crédit ASN)

Inspection de l'ASN à la centrale nucléaire de Fessenheim – Septembre 2011.

améliorations significatives à leur niveau de sûreté (en particulier vis-à-vis du risque d'accident grave) en prenant pour référence les objectifs de sûreté assignés aux nouveaux réacteurs (EPR) et en prenant en compte le retour d'expérience de l'accident de Fukushima.

La sûreté des nouveaux réacteurs

Au début des années 2000, l'ASN a défini les objectifs de sûreté des nouveaux réacteurs dits de troisième génération, comme l'EPR. Ces objectifs prévoient une réduction significative de la probabilité des accidents graves et des rejets radioactifs pouvant résulter de toutes les situations d'accident concevables, y compris avec fusion du cœur. La conception de ces réacteurs doit donc intégrer des dispositions pour faire face à l'éventualité d'accidents graves et aux combinaisons d'agressions. À la suite de l'accident de Fukushima, l'ASN a exigé que soit appliqué au projet de réacteur EPR de Flamanville 3 le processus d'évaluation complémentaire de sûreté. Les conclusions de cette évaluation confirment que du fait de sa conception renforcée, ce type de réacteur assure une protection améliorée vis-à-vis des accidents graves. La mise en place du noyau dur (une mesure qui s'applique également à l'EPR) devrait nécessiter pour ce réacteur des modifications d'une ampleur significativement moindre que pour les réacteurs du parc existant.

Les réacteurs du futur, dits de génération IV

Le CEA a fait savoir à l'ASN qu'il souhaitait construire puis exploiter un projet de prototype, appelé ASTRID, lequel est destiné à tester et à préparer les options de conception de réacteurs devant succéder à l'EPR, appelés « réacteurs de la quatrième génération » et dont les premières réalisations industrielles pourraient intervenir, selon le CEA, vers 2050. L'ASN considère que, si une nouvelle génération de réacteurs doit voir le jour, les options de sûreté de ces réacteurs du futur devront apporter des améliorations significatives par rapport à ceux de la troisième génération. Il importe donc que la recherche sur ces réacteurs du futur se fonde sur une comparaison des différentes filières possibles analysées du point de vue de leur sûreté. L'ASN considère également que les éventuels prototypes construits dans les prochaines années devront, d'une part, répondre au moins aux objectifs de sûreté de la troisième génération (type EPR) et, d'autre part, permettre de tester les solutions techniques qui permettront de répondre aux exigences de sûreté de la quatrième génération.

La cohérence du cycle du combustible

En France, EDF fait principalement appel aux installations du groupe Areva pour gérer le cycle du combustible utilisé dans ses centrales nucléaires, depuis la fabrication des assemblages de combustible jusqu'au retraitement du combustible usé. Or, des modifications dans la conception ou l'utilisation du combustible des centrales peuvent avoir des répercussions importantes sur le reste du cycle du combustible. Par exemple, l'utilisation de combustible MOX implique que les assemblages de combustible correspondants refroidissent plus longtemps dans les piscines servant à entreposer le combustible irradié des réacteurs avant d'être transportés vers des installations de retraitement. Autre exemple : le changement de la teneur de certains produits dans les assemblages de combustible peut avoir un impact sur le dimensionnement des ventilations ou des protections contre les radiations dont sont dotées les installations qui fabriquent ces assemblages. Compte tenu des délais nécessaires à la modification ou à la création d'une installation, il est donc indispensable qu'exploitants et opérateurs du cycle du combustible évaluent périodiquement, de manière prospective, l'adéquation entre les installations du cycle et les pratiques d'utilisation du combustible dans les centrales nucléaires.

La gestion des déchets nucléaires

La gestion des déchets radioactifs repose en France sur trois piliers : a) un cadre législatif et réglementaire dédié, b) un plan national de gestion des déchets et matières radioactifs (PNGMDR) et c) une agence nationale en charge de la gestion des déchets radioactifs, l'Andra.

L'ASN considère qu'il est essentiel que pour chaque catégorie de déchets, il existe une filière de gestion et de stockage spécifique et que celle-ci soit mise en œuvre le plus rapidement possible. Le PNGMDR est élaboré tous les trois ans, dans le cadre d'un travail pluraliste, et a pour objectifs de s'assurer de l'existence de filières de gestion qui soient sûres, d'identifier les besoins prévisibles en installations d'entreposage et de stockage des déchets radioactifs et de définir l'ensemble des actions correspondantes à mener. Au-delà de la mise à jour de ce plan national de gestion, l'ASN veillera à ce que le débat public relatif au projet de stockage géologique des déchets de moyenne activité à vie longue et de haute activité, qui doit se dérouler en 2013, soit préparé dans les meilleures conditions possibles et elle continuera à travailler sur la question de la réversibilité de ce stockage avec ses homologues étrangères.

Le démantèlement des installations

Même arrêtées, les installations nucléaires présentent des risques. La phase de leur démantèlement présente des enjeux propres, en particulier en matière de radioprotection des travailleurs, de gestion des déchets et de financement des opérations jusqu'à leur terme. L'ASN considère que le démantèlement des installations doit intervenir le plus tôt possible après leur mise à l'arrêt définitif, le vieillissement des installations et la perte des connaissances techniques pouvant porter préjudice au bon déroulement des opérations de démantèlement. Aujourd'hui, environ vingt-cinq installations sont en cours de démantèlement, au nombre desquels figurent les réacteurs électronucléaires dits de première génération. D'autres projets importants de démantèlement doivent être menés à bien dans les prochaines années : l'usine d'enrichissement Eurodif du Tricastin, certains ateliers anciens de La Hague et le réacteur de la centrale de Brennilis.

Les enjeux en matière de sûreté nucléaire pour le court et le moyen terme sont donc variés, importants et interdépendants. Dans le débat énergétique qui s'est instauré en France, l'ASN rappelle que quel que soit le scénario retenu, la sûreté des installations nucléaires doit être assurée en toutes circonstances (construction, exploitation ou démantèlement des installations). L'ASN veillera à ce que les investissements nécessaires soient réalisés et à ce que les compétences soient maintenues à un niveau suffisant en toute hypothèse et tant qu'il y aura du nucléaire en France. Elle demandera l'arrêt des installations qui ne pourraient pas atteindre le niveau de sûreté exigé. Rappelons à ce sujet que pour éviter d'aboutir à des situations dans lesquelles les impératifs de sûreté et d'approvisionnement énergétique risqueraient d'entrer en conflit, il est fondamental d'anticiper le renouvellement des capacités de production électrique du pays, quel que soit le mode de production retenu pour ce faire.

PERSPECTIVES INTERNATIONALES

Au-delà de ces considérations concernant le niveau français, l'un des objectifs de l'ASN, encore renforcé suite à la catastrophe de Fukushima, est de faire en sorte que la sûreté nucléaire progresse partout dans le monde. Par le passé, l'ASN a déjà été amenée à dire qu'elle considèrerait que le développement du nucléaire dans un pays qui en était jusque-là dépourvu devait être envisagé comme un processus de long terme : elle avait affiché une durée de 15 ans. Elle a également exprimé son hostilité au développement d'un nucléaire *low-cost* dans le monde, même si celui-ci représenterait un progrès par rapport aux réacteurs de deuxième génération qui sont aujourd'hui en exploitation en

France. Cela suppose que tous les Etats (et que la filière elle-même) jouent le jeu. L'accident de Fukushima montre à quel point un pays insuffisamment doté en infrastructures administratives, techniques et sanitaires serait démuni face à un accident de grande ampleur.

Dans ce domaine, l'Europe a un rôle important à jouer. Elle doit promouvoir au niveau international sa démarche et les conclusions de ses « *stress tests* ». L'ASN veillera à ce que soient tirées toutes les conséquences des résultats des revues croisées (*peer reviews*) menées au niveau européen et à ce que les bonnes pratiques identifiées soient promues en Europe et au-delà. Le concept du « noyau dur », par exemple, peut être transposé à l'ensemble des installations nucléaires en Europe et dans le monde.

Pour l'ASN, la construction d'un pôle européen de la sûreté nucléaire et de la radioprotection a toujours été un objectif majeur. L'adoption de deux directives européennes, la première (en 2009) portant sur la sûreté nucléaire et la seconde (en 2011) portant sur la gestion des déchets radioactifs et du combustible usé, a été un progrès en ce sens. La première conférence européenne sur la sûreté nucléaire a également été organisée à Bruxelles en juin 2011. Les travaux effectués au sein du club des chefs d'autorité de sûreté, WENRA (1), ont permis d'aboutir dans des délais courts à la définition du cahier des charges des *stress tests* européens menés à la suite de l'accident de Fukushima. Les travaux de WENRA ont également permis d'adopter des objectifs de sûreté nucléaire pour les nouveaux réacteurs électronucléaires construits en Europe.

Afin de faire progresser la sûreté partout dans le monde, il est également indispensable d'effectuer un retour d'expérience complet de l'accident de Fukushima. L'ASN continuera à participer activement aux analyses entreprises en ce sens et s'impliquera également dans la mise en œuvre du plan d'action de l'AIEA adopté à la fin de l'été 2011. Si, dans sa version finale, ce plan ne contient pas de disposition contraignante, l'ASN considère qu'il est important d'agir afin que l'ensemble des mesures qu'il préconise soient effectives. Une étape majeure sera la réunion extraordinaire de la Convention internationale sur la sûreté nucléaire qui se tiendra à Vienne (en Autriche), à la fin du mois d'août 2012.

L'harmonisation des exigences en matière de sûreté au niveau européen et au niveau international reste pour l'ASN un objectif de premier plan. De nombreuses actions ont été entreprises dans ce sens, comme les

(1) WENRA : *Western European Nuclear Regulator's Association*. Ce club informel créé en 1999 à l'initiative du président de l'ASN regroupe les responsables de toutes les autorités de sûreté nucléaire des pays de l'Union européenne et de la Suisse. Y assistent, en tant qu'observateurs, les autorités de sûreté des dix pays ne disposant pas de réacteur, ainsi que celles de l'Arménie, de l'Ukraine et de la Russie.

travaux de WENRA, d'abord sur les réacteurs en fonctionnement, puis sur les nouveaux réacteurs, ou l'initiative MDEP (*Multilateral Design Evaluation Programme*) soutenue par l'Agence de l'énergie nucléaire (AEN) de l'OCDE. L'expérience acquise jusqu'ici montre que cet objectif de convergence et d'harmonisation est une ambition de long terme. Cela s'explique par le fait que les centrales nucléaires sont à la fois des installations industrielles complexes et des objets politiques et idéologiques. Dès lors, les processus de convergence doivent surmonter non seulement des difficultés liées à la complexité technique des sujets abordés, mais aussi des obstacles qui découlent du caractère spécifique des processus de réglementation et de contrôle des différents pays. Dans ce domaine également, l'Europe a un rôle important à jouer : sur la base des travaux déjà validés par WENRA et l'ENSREG (2), la normalisation internationale pourra progresser si cette dynamique continue à être portée par l'Union européenne.

TRANSPARENCE ET INDÉPENDANCE

En dehors du champ purement technique, il apparaît clairement, après la catastrophe de Fukushima et à la lumière des échanges menés à l'occasion des *stress tests* en Europe, que l'organisation et la gouvernance du

(2) ENSREG : *European Nuclear Safety Regulators Group*. L'ENSREG est un groupe indépendant créé en 2007 suite à une décision de la Commission européenne. Il rassemble les chefs des autorités de sûreté nucléaire, de contrôle des déchets radioactifs et de radioprotection des vingt-sept pays membres de l'Union européenne et des représentants de la Commission européenne. Le rôle de l'ENSREG est de contribuer à l'amélioration continue et à la convergence dans ses domaines de compétence.

contrôle de la sûreté nucléaire sont des éléments structurants. La transparence et l'indépendance des autorités de sûreté nationales revêtent une importance fondamentale. En France, le dispositif mis en place par la loi du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire a permis des avancées significatives en la matière. Cette loi a créé le HCTISN. Elle a donné à l'ASN le statut d'Autorité Administrative Indépendante tout en lui permettant de s'appuyer pour préparer ses décisions sur un organisme public d'expertise reconnu, l'IRSN, et des groupes permanents d'experts. La loi a clairement inscrit dans les missions de l'ASN l'information du public et la transparence.

Depuis 2006, l'ASN s'est attachée à développer ses actions dans ce domaine. Aujourd'hui, l'ASN publie toutes les lettres (près de deux mille par an) qu'elle envoie à la suite de ses inspections, ainsi que ses rapports et ses décisions les plus importants.

Pour les évaluations complémentaires de sûreté post-Fukushima, l'ASN a mis en place un processus exceptionnel de publication immédiate de l'intégralité des rapports des exploitants et des expertises. À chaque fois que des enjeux importants de sûreté nucléaire et de radioprotection se présentent à elle, elle prend position publiquement.

Cinq ans après sa création sous son nouveau statut, l'ASN considère que les démarches de transparence qui ont pu être mises en œuvre confirment que cette plus grande ouverture apporte des bénéfices importants à la qualité de l'élaboration des décisions et à la sûreté nucléaire elle-même.

Continuer à promouvoir la transparence et l'indépendance du contrôle permettra de faire progresser la sûreté et de fonder les choix du pays en matière de sûreté nucléaire sur des débats de plus en plus largement accessibles aux citoyens.

Les programmes de recherche au CEA sur les systèmes nucléaires du futur

Dans un contexte de raréfaction des ressources fossiles et face à la nécessité d'assurer la sécurité des approvisionnements et de limiter les émissions de gaz à effet de serre, il s'avère indispensable de disposer de sources d'énergies compétitives et durables, dont fait partie le nucléaire.

Acteur majeur dans le domaine des énergies dé-carbonées, le CEA s'emploie, dans le domaine du nucléaire, à développer une énergie durable et compétitive.

Depuis sa création, le CEA est au carrefour de la science et de l'industrie. En collaboration avec les industriels et les académiques, il œuvre à l'amélioration de la compétitivité du parc nucléaire actuel, au développement des systèmes nucléaires de quatrième génération et des procédés de traitement des combustibles usés.

Par **Christophe BÉHAR***

L'ÉNERGIE, ENJEU MAJEUR DU XXI^e SIÈCLE

Créé en 1945, le CEA conduit depuis plus de soixante-cinq ans des programmes de recherche dans des domaines présentant des enjeux stratégiques et sociétaux majeurs pour notre pays.

Parmi ces enjeux, l'énergie représente à la fois un besoin vital et un facteur de développement et de croissance : l'augmentation de l'espérance de vie de la population dans les différents pays est fortement cor-

rélée à la quantité d'énergie consommée par habitant corrigée par les indicateurs d'intensité énergétique de chacun de ces pays. Alors que la population mondiale, qui vient d'atteindre sept milliards de personnes, devrait augmenter encore pour se situer entre neuf et dix milliards à l'horizon 2050, la demande en énergie devrait, quant à elle, doubler dès 2030, en dépit des

* Directeur de l'Énergie Nucléaire (CEA).

indispensables efforts déployés en matière d'efficacité énergétique et d'économies d'énergie. Les principaux responsables de cette croissance de la demande sont les pays émergents, qui sont dynamiques à la fois sur le plan démographique et sur le plan économique, ce qui crée des besoins importants en énergie (en particulier en électricité).

Mais cette problématique à laquelle il va falloir résoudre fait face est confrontée à un certain nombre de contraintes : la raréfaction des ressources fossiles (au rythme actuel de consommation, les réserves mondiales connues sont inférieures à cinquante ans pour le pétrole, à une soixantaine d'années pour le gaz et à cent vingt ans pour le charbon), la sécurité d'approvisionnement (avec des réserves en énergies fossiles très inégalement réparties dans le monde et situées dans des zones géographiques politiquement instables susceptibles de devenir des enjeux stratégiques majeurs) et la nécessité de limiter les émissions de gaz à effet de serre (si l'on veut réduire l'amplitude du changement climatique). Aujourd'hui, 27 % des émissions anthropiques de gaz à effet de serre proviennent de la production d'électricité. Cela, sans compter l'augmentation substantielle des coûts d'importation des énergies fossiles, qui représentent plus de 60 milliards d'euros en 2011 (à comparer aux 23 milliards d'euros de 2005).

Face à ces contraintes particulièrement sévères, il est nécessaire de disposer de sources d'énergie compétitives et durables, dont l'énergie nucléaire fait partie. Même si celle-ci ne saurait à elle seule répondre à tous les besoins, c'est aujourd'hui la seule énergie capable de produire de façon massive de l'énergie électrique sans émettre de gaz à effet de serre et d'apporter ainsi un élément de réponse aux problématiques énergétiques que nous devons affronter.

LE CEA, UN ACTEUR MAJEUR DANS LE DOMAINE DES ÉNERGIES DÉ-CARBONÉES

Le CEA est l'opérateur majeur des recherches scientifique et technologique dans le champ de ces énergies dé-carbonées que sont les énergies renouvelables et l'énergie nucléaire. Dans le domaine du nucléaire, il s'agit de développer une énergie durable, encore plus sûre et compétitive.

Face à cet enjeu, le CEA, en collaboration avec ses partenaires industriels et académiques, travaille sur les systèmes nucléaires du futur dits de quatrième génération, dont le développement permettra de mieux répondre non seulement aux contraintes de sécurité d'approvisionnement et d'indépendance énergétique, mais aussi aux contraintes environnementales, cela grâce aux perspectives qu'ils offrent en matière de gestion des déchets radioactifs à vie longue. L'objectif est de disposer, en 2012, d'une première évaluation des

perspectives industrielles de cette nouvelle filière (réacteurs et cycles du combustible associé) en vue de réaliser à l'horizon 2020 un prototype industriel, pour un possible déploiement industriel vers 2040 en France (et sans doute bien avant, en Inde et en Chine).

Dans une perspective d'action à plus court terme, le CEA mène des recherches à la demande des industriels pour, d'une part, améliorer la compétitivité du parc nucléaire actuel (il s'agit de répondre aux enjeux que représentent pour les industriels la durée de vie, le rendement énergétique, la disponibilité et la sûreté des réacteurs du parc français actuellement en exploitation) et, d'autre part, optimiser ou adapter, en collaboration avec Areva, les procédés de traitement des combustibles usés de l'usine de la Hague, pour tenir compte notamment des nouveaux combustibles nucléaires apparus sur le marché.

Pour relever ces défis, le CEA développe lui-même, puis exploite les grands outils d'expérimentation et de simulation dont il a besoin pour mener ses recherches. À cette fin, il entretient et développe, d'une part, un parc complet et cohérent d'installations expérimentales indispensables à ses besoins de R&D et, d'autre part, des plateformes logicielles et des codes de calcul dans les grandes disciplines du nucléaire (neutronique, thermo-hydraulique, mécanique, thermique, chimie et matériaux) ainsi que dans leurs divers couplages pour pouvoir répondre aux besoins des programmes nucléaires tant actuels que futurs.

Conduire des recherches dans le domaine nucléaire, cela implique de gérer et de faire évoluer son parc d'installations. Ainsi, en parallèle à ses programmes de construction et de rénovation, le CEA mène, en tant qu'exploitant nucléaire, des programmes d'assainissement et de démantèlement de ses installations arrivées en fin de vie. Au-delà de ses activités de recherche et de son rôle d'exploitant nucléaire, le CEA, en partenariat avec l'I2EN (Institut International de l'Énergie Nucléaire), contribue aux offres de formation initiale ou continue dans différentes spécialités du nucléaire afin de garantir les compétences et les métiers indispensables au développement d'une industrie nucléaire responsable et sûre.

UN POSITIONNEMENT UNIQUE, À L'INTERFACE ENTRE LE MONDE INDUSTRIEL ET LA RECHERCHE ACADÉMIQUE, ET UNE PRÉSENCE FORTE À L'INTERNATIONAL

Dès sa création, le CEA a été au carrefour de la science et de l'industrie. Ses programmes à vocation technologique, tout en s'appuyant sur une recherche de base d'excellence, permettent encore aujourd'hui à la France d'être un leader mondial dans le domaine de l'industrie nucléaire.

Ses liens avec l'industrie, notamment avec EDF et Areva, sont donc anciens, forts et structurés, au travers d'accords de collaboration inscrits dans la durée, dans lesquels le CEA apporte son important potentiel de création de propriété intellectuelle.

Par ailleurs, dans sa stratégie, le CEA veille à prendre en compte la dimension européenne et internationale des enjeux énergétiques dans la définition de sa stratégie et il développe des partenariats avec ses homologues internationaux.

Le CEA exerce ses missions dans le cadre de la politique internationale nucléaire de la France telle que la définit le Conseil de Politique Nucléaire (CPN) que préside le Président de la République. Il a pour mission de conseiller le gouvernement en matière de politique nucléaire extérieure et représente à ce titre la France dans des instances internationales, comme l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA).

Dans le domaine des systèmes de quatrième génération, c'est à travers le CEA que la France est membre du Forum international génération IV (GIF), de l'initiative américaine IFNEC (*International Framework for Nuclear Energy Cooperation*) ainsi que de l'initiative de l'AIEA INPRO (*International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles*). Ces instances visent à promouvoir la coopération entre pays en vue du développement de systèmes nucléaires de quatrième génération et de la diffusion de l'énergie nucléaire dans le monde. Le CEA est également membre de la plateforme européenne SNE-TP (*European Sustainable Nuclear energy – Technology Platform*), qui est dédiée à l'énergie nucléaire durable et dont les principaux objectifs sont de contrôler la sécurité de l'approvisionnement des pays membres, d'assurer un développement durable et d'améliorer la compétitivité de l'offre.

LES SYSTÈMES INDUSTRIELS NUCLÉAIRES DU FUTUR

Ces systèmes devront répondre aux critères établis dans le cadre du Forum international Génération IV, à savoir :

- la durabilité : mieux utiliser la ressource naturelle en uranium et générer moins de déchets,
- la sûreté,
- la compétitivité,
- enfin, la résistance à la prolifération nucléaire.

Pourquoi des réacteurs de quatrième génération à neutrons rapides (RNR)?

Les réacteurs à neutrons thermiques des filières électrogènes actuelles consomment principalement de

l'uranium 235. Celui-ci est le seul isotope de l'uranium naturel à être fissile, mais il n'en représente que 0,7 % en masse. Ces réacteurs utilisent donc très mal le potentiel énergétique de la matière première, l'uranium. Même en recyclant les matières valorisables (uranium et plutonium) encore présentes dans les combustibles usés, cette valeur n'atteint pas 0,8 %. Dans la perspective, inéluctable, de l'épuisement des ressources en uranium naturel, le développement d'un nucléaire durable ne pourra se faire qu'en mettant en œuvre de nouveaux systèmes nucléaires (réacteurs et cycle associé) dits de quatrième génération, qui exploitent pleinement la ressource naturelle en uranium, c'est-à-dire qu'ils sont capables d'utiliser l'uranium 238 fertile (1) qui est le constituant majoritaire de l'uranium naturel.

L'idée est d'exploiter une propriété unique de l'énergie nucléaire, la régénération de son combustible fissile. En effet, au fur et à mesure qu'elle consomme son combustible initial, l'énergie nucléaire peut produire un nouveau combustible (à base de plutonium) par la conversion de noyaux fertiles présents en grande quantité dans l'uranium. Le plutonium présent en fin de vie du combustible peut être extrait et réutilisé comme matière fissile dans une nouvelle recharge de combustible. Pour des raisons tenant à la physique, seuls les réacteurs à neutrons rapides (RNR) offrent la possibilité de régénérer autant de matière fissile qu'ils en ont brûlée. De plus, contrairement aux réacteurs à eau légère, ils peuvent utiliser tous les isotopes du plutonium et permettent donc de le recycler totalement, en plusieurs passages successifs.

Ainsi, les RNR présentent plusieurs avantages déterminants, par rapport aux autres filières de réacteurs :

- ils peuvent brûler (et donc utiliser) tout le plutonium, permettant ainsi de boucler parfaitement et totalement le cycle du combustible,
- ils permettent de valoriser la quasi-totalité de la ressource : non seulement l'uranium naturel, mais aussi les matières valorisables issues des filières actuelles. Ils multiplient ainsi d'un facteur supérieur à cent l'énergie que l'on peut extraire d'une masse donnée d'uranium naturel. Concrètement, cela signifie que le stock actuel d'uranium appauvri français permettrait de faire fonctionner un parc de RNR pendant plusieurs millénaires. L'autonomie énergétique de la France offerte par les RNR sera donc directement proportionnelle à leur part dans le parc nucléaire de notre pays.
- ils permettent de diminuer la radiotoxicité (2) des déchets ultimes, grâce à la propriété qu'ont les neu-

(1) Un isotope est dit fissile s'il peut subir une fission nucléaire suite à un bombardement de neutrons. Un isotope fertile est un isotope capable de produire un noyau fissile, par capture d'un neutron.

(2) La radiotoxicité mesure la quantité de rayonnements toxiques pour l'organisme humain émis par une matière radioactive.

trons rapides de pouvoir transformer (transmuter) certains éléments radioactifs à vie longue (les actinides mineurs) en éléments à vie plus courte.

Enfin, les RNR sont un atout en ce qui concerne la résistance à la prolifération, puisqu'ils utilisent tous les types d'uranium (ils ne nécessitent donc plus d'usines d'enrichissement) et sont capables de brûler le plutonium (ce qui leur permet de consommer celui issu des réacteurs actuels et de ne pas en produire par eux-mêmes).

Les programmes de recherche sur les systèmes nucléaires du futur

Si la technologie des RNR a déjà été étudiée et bénéficié du retour d'expérience de plusieurs réalisations (à l'échelle du prototype ou du démonstrateur), les recherches dans ce domaine sont réalisées aujourd'hui en vue de déployer, à une échelle industrielle, un RNR de quatrième génération présentant des innovations en rupture technologique totale avec ce qui s'est fait jusque-là.

C'est parce que, dans l'industrie nucléaire, les cycles de développement sont longs qu'il est important d'anticiper de plusieurs décennies les orientations futures et de travailler dès maintenant au développement de ces réacteurs, même si la troisième génération n'en est qu'au début de son déploiement industriel.

C'est tout l'enjeu des recherches menées par la direction de l'Énergie nucléaire du CEA. Celles-ci sont cadrées par des textes structurants :

- la loi de programme du 13 juillet 2005 fixant les orientations de la politique énergétique française,
- une déclaration du Président de la République du 5 janvier 2006 : « J'ai décidé de lancer dès maintenant la conception, au sein du Commissariat à l'énergie atomique, d'un prototype de réacteur de quatrième génération, qui devra entrer en service en 2020 »,
- la loi de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs du 28 juin 2006. Celle-ci demande au CEA d'évaluer les perspectives des filières industrielles présentant un potentiel pour la séparation et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue, ces filières étant basées sur les réacteurs à neutrons rapides, en vue de la mise en exploitation d'un prototype avant le 31 décembre 2020.

Ainsi, les recherches menées par le CEA portent sur deux filières de réacteurs à neutrons rapides, une filière refroidie au sodium (RNR-Na, prototype : ASTRID) (3) et, dans une perspective à plus long terme, une filière refroidie au gaz (RNR-G, réacteur

expérimental : ALLEGRO) portée par un *consortium* regroupant actuellement, avec le soutien de la France, la République tchèque, la Hongrie et la Slovaquie.

Conformément aux orientations fixées par la loi de programme du 28 juin 2006, le CEA fournira en 2012 les éléments en vue de la prise de décision par les pouvoirs publics de la poursuite de la conception du futur réacteur prototype de quatrième génération. Ces éléments couvrent notamment les améliorations en termes de conception et de sûreté, l'articulation des aspects « réacteur » avec ceux liés au « cycle du combustible » associé, la précision du calendrier de réalisation et, dans une première approche, celle des coûts de déploiement associés et des scénarios de déploiement industriel.

Il convient de noter que la décision la plus importante, celle de construire, ne sera prise qu'en 2017.

ASTRID, prototype de RNR-Na

L'objectif du CEA est de permettre, si la décision en était prise, la mise en service, à l'horizon 2020, d'un prototype de RNR-Na innovant appelé ASTRID. ASTRID sera un réacteur électrogène de 600 mégawatts électriques (MWe) (une puissance suffisante pour être qualifié de démonstrateur industriel) intégrant les retours d'expérience de l'ensemble des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium déjà développés dans le monde et remplissant les critères d'une rupture technologique décisive qui feront de lui un réacteur de quatrième génération.

Ces expérimentations sont menées dans le cadre de partenariats industriels. Si le CEA garde la responsabilité de l'architecture d'ensemble du réacteur, de son cœur et de son combustible, d'autres lots sont confiés à différents industriels : Areva (chaudière, contrôle et commande, auxiliaires nucléaires), EDF (assistance à la maîtrise d'ouvrage, REX d'exploitation, études de sûreté), Alstom (système de conversion d'énergie eau-vapeur et gaz) et COMEX Nucléaire (innovations en matière de robotique et de manutention). Des discussions sont en cours avec d'autres industriels (Bouygues, Toshiba, Rolls-Royce, AMEC et Astrium). Plus généralement, des collaborations internationales sont mises en place avec des partenaires majeurs en matière de R&D dans la filière des RNR refroidis au sodium (la Russie, le Japon, la Chine, l'Inde et les États-Unis).

L'aval du futur cycle nucléaire

En cohérence avec les études portant sur le prototype de RNR-Na ASTRID, le CEA mène des recherches sur l'aval du futur cycle, c'est-à-dire sur tout ce qui concerne les opérations de gestion du combustible utilisé

(3) ASTRID est l'acronyme d'*Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration*.

après son utilisation en réacteur. Ces recherches visent à préparer l'ensemble des options de gestion des matières nucléaires pour les parcs des réacteurs à neutrons rapides en mettant au point les procédés avancés de recyclage du plutonium et de l'uranium.

Dans ce cadre, et conformément aux attentes de la loi de 2006, le CEA évalue les options de séparation et de transmutation des radioéléments à vie longue (les actinides mineurs) en incluant des études de scénarios et des évaluations technico-économiques, dans l'objectif d'en déterminer les perspectives industrielles et l'opportunité. Ainsi, le programme de R&D du CEA se décline en quatre phases successives :

- la préparation des technologies futures de recyclage du plutonium et de l'uranium,
- la préparation du recyclage des combustibles rapides, avec la réalisation (possible sur le moyen terme) d'un atelier de traitement spécifique des combustibles ASTRID permettant de démontrer la viabilité, à l'échelle du pilote, des technologies proposées,
- la mise au point des principes des procédés de séparation poussée permettant la récupération des actinides mineurs,
- enfin, en matière de réduction de la toxicité des déchets nucléaires, la consolidation des options de la transmutation.

L'OPTIMISATION DU NUCLÉAIRE INDUSTRIEL ACTUEL

Les réacteurs

Le CEA met ses compétences à disposition pour répondre aux besoins de R&D sur les systèmes nucléaires actuels (de deuxième et troisième générations).

Pour les réacteurs de deuxième génération, les travaux portent principalement sur :

- l'augmentation de la durée de fonctionnement (jusqu'à soixante années) des tranches des réacteurs,
- l'amélioration de leurs performances, notamment en faisant évoluer la gestion des cœurs et de leurs caractéristiques, pour une meilleure utilisation de l'uranium,
- l'augmentation de leur niveau de sûreté grâce à des programmes d'étude d'accidents de dimensionnement ou hors dimensionnement du réacteur,
- enfin, l'optimisation des combustibles, notamment de la robustesse et de la fiabilité des assemblages.

En ce qui concerne les réacteurs de troisième génération, les travaux spécifiques du CEA s'inscrivent principalement dans le cadre d'un soutien au démarrage du réacteur EPR de Flamanville (dans le département de la Manche).

Le cycle du combustible

Outre les réacteurs eux-mêmes, le CEA travaille sur l'ensemble du cycle du combustible, c'est-à-dire sur l'ensemble des opérations destinées, en amont, à produire du combustible pour les réacteurs (depuis l'extraction du minerai d'uranium) et, en aval, à gérer le combustible utilisé après son irradiation en réacteur.

Pour ce qui concerne l'amont du cycle, dans un contexte de raréfaction des ressources en uranium, le CEA mène, en lien avec Areva, des recherches pour améliorer les procédés d'extraction et de purification de l'uranium afin de tenir compte de la baisse des teneurs en uranium des ressources fossiles, du traitement d'une plus grande diversité de minerais (et donc des impuretés associées), ainsi que de nouvelles ressources minières non conventionnelles (comme les phosphates). L'autre objectif est de réduire l'impact environnemental en mettant en œuvre des procédés consommant moins d'eau, moins de réactifs et moins de solvants.

Dans le domaine du traitement des combustibles usés, le CEA intervient en soutien à Areva pour optimiser ou adapter les procédés de l'usine de La Hague. Ses actions portent sur le maintien de l'usine dans des conditions opérationnelles permettant sa pleine capacité, sur l'évolution des procédés (afin de tenir compte des nouveaux combustibles du marché présentant de forts taux de combustion et nécessitant de nouveaux gainages, notamment) et l'accompagnement d'Areva dans sa démarche de réduction des rejets liquides et gazeux.

Concernant la gestion des déchets, des solutions technologiques sont mises au point pour la reprise, le traitement et le conditionnement des déchets anciens. Par ailleurs, en lien avec l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra), le CEA contribue aux études sur le comportement à long terme des colis de haute et moyenne activité à vie longue (HA-MAVL) en conditions de stockage géologique, en vue de la constitution des dossiers Andra sur la période 2013-2015.

DE GRANDS OUTILS POUR LE DÉVELOPPEMENT DU NUCLÉAIRE

La réalisation des programmes de recherche pour le nucléaire du futur nécessite de grands outils d'expérimentation et de simulation. Ainsi, le CEA maintient, rénove, conçoit et/ou construit les outils qui lui sont nécessaires pour mener à bien ses activités de R&D.

Le Réacteur Jules Horowitz

La construction du Réacteur Jules Horowitz (RJH) sur le site de Cadarache est un des projets majeurs du

CEA. Seul outil de ce type à être construit en Europe, le RJH sera à terme une installation unique pour l'étude des matériaux et des combustibles sous irradiation, en soutien aux réacteurs nucléaires de deuxième et troisième générations. Il assurera aussi la production d'une part importante des radio-isotopes médicaux.

Le RJH est un projet international. Il est réalisé dans le cadre d'un *consortium* regroupant Areva, EDF, le *Joint Research Center* de la Commission européenne, Vattenfall, DAE, SCK, NRI, VTT, Ciemat et la *Japan Atomic Energy Agency* (JAEA). Le CEA reste l'exploitant nucléaire et le maître d'ouvrage de cette installation.

Pour son financement, le RJH bénéficie d'un soutien du Programme nucléaire de demain (qui figure parmi les Investissements d'avenir du gouvernement français). La première divergence du réacteur est prévue pour 2016.

La simulation

La simulation numérique est un outil indispensable aux études de sûreté, à la conception et à l'exploitation des réacteurs nucléaires. À cette fin, comme nous l'avons indiqué précédemment, le CEA développe des plateformes et des codes de calcul dans tous les grands domaines du nucléaire (neutronique, thermo-hydraulique, mécanique, thermique, chimie et matériaux) afin de modéliser le comportement de l'ensemble des phénomènes entrant en jeu dans le fonctionnement d'un réacteur. En parallèle, le CEA maintient à niveau et exploite les outils expérimentaux nécessaires à la qualification de ces codes et, en particulier, de celle des maquettes critiques dédiées aux études et à la conception des cœurs de réacteurs.

Le projet ASTRID

ASTRID est l'acronyme d'*Advanced Sodium Technology Reactor for Industrial Demonstration*. Il s'agit donc d'un prototype de réacteur à neutrons rapides (RNR) refroidi au sodium d'une puissance suffisante pour être représentatif d'un démonstrateur électrogène industriel. Il sera le premier de ce type au monde à remplir les critères de la quatrième génération des réacteurs nucléaires. C'est un projet ambitieux qui s'inscrit dans le cadre des actions prévues par la loi française de juin 2006 sur la gestion durable des matières et des déchets nucléaires. Il prépare donc l'avenir énergétique de notre pays.

Par **François GAUCHÉ***

LES SYSTÈMES NUCLÉAIRES DE QUATRIÈME GÉNÉRATION

Le cadre international de la coopération en matière de systèmes nucléaires de quatrième génération est le GIF (*Generation IV International Forum*), dont l'objectif est la conduite des travaux de R&D nécessaires à la mise au point de systèmes nucléaires (réacteurs et cycle du combustible) qui répondent à des critères de durabilité à long terme de l'énergie nucléaire.

Le GIF est une association intergouvernementale qui a été lancée en 2000 à l'initiative du *Department of Energy* des États-Unis. Il regroupe à ce jour treize membres (1) engagés par la signature d'une charte dans laquelle ils reconnaissent l'importance du développement de systèmes futurs sûrs pour la production d'énergie nucléaire, ainsi que la nécessité à la fois de préserver au mieux l'environnement et de se prémunir contre les risques de prolifération.

Le Forum a sélectionné six concepts (quatre à neutrons rapides et deux à neutrons thermiques) (2) et il a défini un plan de R&D visant à apporter les innovations nécessaires à leur déploiement.

Il faut noter que la maturité technologique des différents systèmes retenus par le GIF est très variable. Sachant que l'enjeu majeur pour notre pays est, au-delà de l'exploration des possibilités de la transmutation des actinides mineurs, à la fois le recyclage et,

éventuellement, la consommation du plutonium existant ou dont la production est prévue, et l'optimisation de l'utilisation de l'uranium appauvri ou de recyclage, l'effort pour le CEA se concentre sur les technologies de réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na, en anglais : SFR, pour *Sodium-cooled Fast Reactors*), et, dans une moindre mesure (surtout en ce qui concerne l'innovation concernant les matériaux), sur les technologies de refroidissement par gaz (GFR), dans une vision de beaucoup plus long terme. Au niveau français, la R&D est principalement portée par les équipes du CEA, d'Areva et d'EDF.

Au-delà des différences de maturité, les technologies étudiées au sein du GIF présentent toutes des avantages et des inconvénients qu'il serait trop long de détailler ici. Dans le cas français, l'accent est donc mis sur les technologies fonctionnant avec des neutrons rapides (ce qui n'est pas le cas des concepts à très haute température VHTR, ou à eau supercritique – *Supercritical Water Reactors* – SCWR). Le concept de

* CEA, chef du programme Réacteurs de quatrième génération.

(1) Afrique du Sud, Argentine, Brésil, Canada, Chine, États-Unis, Euratom, France, Japon, Corée du Sud, Royaume-Uni, Russie et Suisse.

(2) Neutrons rapides : Sodium-cooled fast Reactor (SFR), Gas-cooled fast Reactor (GFR), Molten Salt Reactor (MSR), Lead-cooled Fast Reactor (LFR).
Neutrons thermiques : Super Critical Water-cooled Reactor (SCWR), Very High Temperature Reactor (VHTR).

réacteur à sels fondus (MSR) comporte des difficultés de démonstration de sûreté et d'exploitation en raison de l'absence de première barrière au niveau du combustible, qui font douter de sa viabilité industrielle. Quant au réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb fondu, les problématiques de la corrosion et de la gestion du plomb à haute température, entre autres, en font un concept moins attractif que le réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium, dont la faisabilité industrielle, démonstration de sûreté comprise, a déjà été prouvée dans quelques cas, constituant ainsi un socle précieux sur lequel il est possible de s'appuyer pour développer le concept innovant recherché.

Le concept de RNR au gaz repose sur la résolution du problème posé par la mise au point d'un combustible réfractaire très innovant à base de pastilles de carbure d'uranium et de plutonium entourées d'une gaine de carbure de silicium SiC-SiCf. Il s'agit en effet du verrou technologique sur lequel repose la démonstration de sûreté du réacteur en cas de perte accidentelle des moyens normaux d'évacuation de la puissance ou de dépressurisation du circuit primaire.

Ainsi, le CEA est partie prenante dans la mise au point de deux types de réacteurs à neutrons rapides :
 – il contribue aux études sur le combustible et la sûreté d'un projet de réacteur expérimental ALLEGRO, d'une puissance d'environ 80 mégawatts thermiques (MWth), qui serait construit à l'horizon 2025-2030 en Europe centrale par un *consortium* regroupant, outre la France, au moins la République tchèque, la Hongrie et la Slovaquie,

– il porte le projet de prototype de réacteur à neutrons rapides ASTRID, d'une puissance d'environ 1 500 MWth et refroidi au sodium, pour une mise en service à l'horizon 2020-2022.

Les objectifs fixés pour ces deux systèmes de quatrième génération sont les suivants :

– de pouvoir multi-recycler le plutonium et utiliser le mieux possible la ressource en uranium. Cela nécessite des réacteurs couplés à un cycle fermé du combustible,

– si l'option précitée est démontrée, d'avoir la capacité de réaliser la transmutation de certains actinides mineurs,

– d'avoir un niveau de sûreté équivalent à celui des réacteurs de troisième génération mis en service au même moment. Pour le prototype ASTRID, cela signifie un niveau de sûreté au moins équivalent aux réacteurs de troisième génération actuels, en intégrant les enseignements retirés de l'accident de Fukushima,

– d'atteindre une bonne compétitivité économique tenant compte du service rendu. Il conviendra d'avoir une vision d'optimisation économique globale d'un parc qui sera à la fois composé de réacteurs de troisième génération et de réacteurs de quatrième génération et de leurs cycles du combustible, y compris le stockage à très long terme de ses déchets ultimes. Cela signifie que l'objectif est que le surcoût inévitable du réacteur de quatrième génération par rapport à la troisième génération devra être plus que compensé par les gains réalisés sur l'ensemble du cycle,

– enfin, de présenter des garanties en matière de résistance à la prolifération nucléaire.

LES RÉACTEURS À NEUTRONS RAPIDES

La filière des réacteurs à neutrons rapides (RNR) possède des avantages extrêmement importants en matière d'énergie durable :

– une excellente utilisation de la ressource en uranium et la capacité de recycler le plutonium sans limitation du nombre de recyclages (multi-recyclage).

Contrairement aux réacteurs actuellement exploités dans le parc nucléaire français et aux futurs EPR, qui consomment moins de 1 % du potentiel d'énergie de l'uranium naturel utilisé pour préparer leurs combustibles, les RNR ont la capacité de consommer plus de 80 % de cette ressource. Ainsi, avec le stock d'uranium appauvri actuellement disponible sur le territoire français, on pourrait alimenter un parc de RNR pendant plusieurs milliers d'années,

– les RNR sont une source d'énergie intensive dont le procédé n'émet pas de gaz à effet de serre,

– enfin, les RNR ont la capacité de brûler, outre le plutonium, les actinides mineurs, en produisant de l'électricité, ce qui présente l'avantage d'une forte réduction de la quantité et de la durée de vie des déchets radioactifs ultimes.

QUELQUES RAPPELS À PROPOS DES RÉACTEURS À NEUTRONS RAPIDES REFROIDIS AU SODIUM (RNR-NA)

Le choix du sodium comme fluide caloporteur pour refroidir le cœur du réacteur est le résultat d'une analyse multicritère faisant intervenir la nécessité non seulement d'utiliser un fluide qui ne ralentisse pas les

	T [°C]	P [bar]	Masse volumique [kg.m ⁻³]	Cp [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	Viscosité dynamique [Pa.s]	Conductivité thermique [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Réf.
Eau	300	155	727	5460	0,09.10 ⁻³	0,6	1
Sodium	400	1	856	1278	0,28.10 ⁻³	72	2
Plomb	400	1	10508	147	2,25.10 ⁻³	17	3

Tableau 1

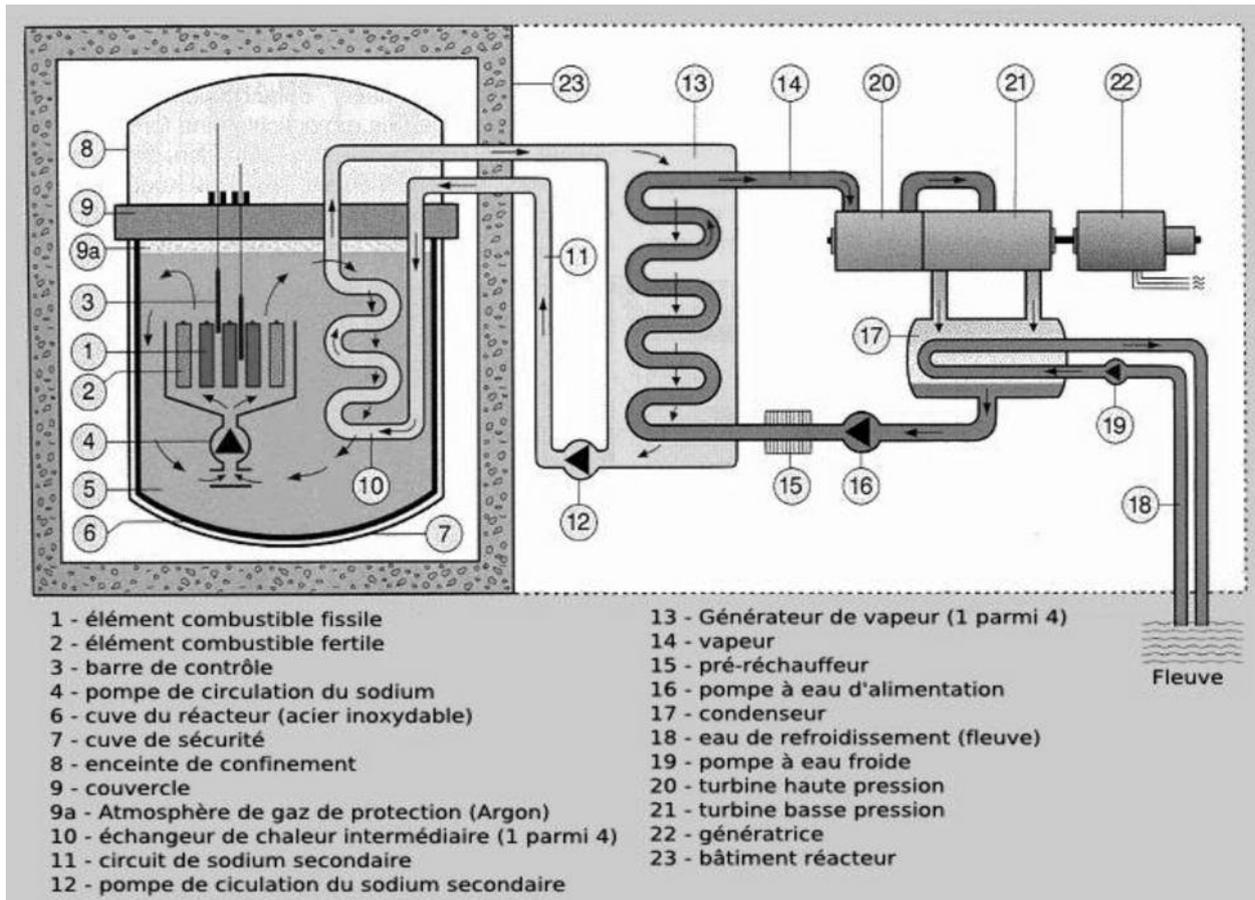


Figure 1 : RNR-Na de type intégré.

neutrons, mais aussi de la prise en compte de ses propriétés thermiques, de sa viscosité, de sa compatibilité avec les aciers, de son activation sous les neutrons, etc. Le tableau 1 de la page précédente donne quelques-unes des grandeurs intéressantes, en comparaison avec les caloporteurs eau et plomb.

Les inconvénients principaux du sodium sont son opacité et sa forte réactivité chimique lorsqu'il entre en contact avec de l'eau et/ou avec l'air.

Le principe de fonctionnement d'un RNR-Na du type intégré est donné par la figure ci-dessus.

Retenons que par rapport au schéma bien connu du fonctionnement d'un réacteur à eau pressurisée, un RNR-Na se caractérise par les points déclinés ci-après :

- le circuit primaire est situé dans la cuve principale, qui contient non seulement le cœur du réacteur, mais aussi les échangeurs intermédiaires et les pompes primaires,
- il existe un circuit intermédiaire de sodium pour servir de barrière entre le sodium primaire et le circuit de conversion d'énergie (dans un système classique de conversion d'énergie en eau-vapeur, c'est sur ce circuit que sont branchés les générateurs de vapeur),
- le circuit primaire n'est pas pressurisé et possède une grande inertie thermique,

- l'architecture générale du réacteur permet une radioprotection excellente des opérateurs.

Les RNR-Na ont fait l'objet de nombreux projets dans le monde, ce qui a permis d'accumuler plus de 400 années d'expérience d'exploitation de ce type de réacteur.

Les réacteurs suivants sont toujours en service :

- en Inde, le FBTR (40 MWth) (entré en divergence en 1985),
- en Russie, le BOR-60 (60 MWth) (1968) et le BN-600 (600 MWe) (1980),
- en Chine, le CEFBR (25 MWe) (2010),
- au Japon, les réacteurs Joyo (140 MWth) (1994) et Monju (280 MWe) (1994) ; ces deux réacteurs ont été mis à l'arrêt suite à des avaries techniques, mais le Japon souhaite en reprendre l'exploitation.

Plusieurs pays ont des projets en cours :

- la Russie : BN-800 (800 MWe) en construction, et conception de BN-1200,
- en Inde : PFBR (500 MWe) en construction, et six CFBR en projet,
- en Chine : plusieurs dizaines de RNR-Na, pour une mise en service en 2050,
- en Corée du Sud : projet KALIMER, mise en service en 2035,
- au Japon : projet JSFR,

– enfin, en France : projet ASTRID.

LA SÛRETÉ DES RNR-NA

Il serait trop long de présenter ici dans le détail l'ensemble des éléments qui concourent à la démonstration de sûreté des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium, et ce d'autant plus que l'objectif de l'avant-projet sommaire d'ASTRID vise justement à amener la sûreté des futurs RNR-Na au niveau attendu pour la quatrième génération. Pour plus de détail, nous invitons le lecteur à se reporter aux ouvrages de référence ci-après :

- *Safety for the future Sodium cooled Fast Reactors*, FIORINI (G.L.) & al., International Conference on Fast Reactors & Related Fuel Cycles: Challenges and Opportunities (IAEA-FR-2009), décembre 2009, Kyoto, Japon ;
- *Science and technology of Fast Reactor Safety - Proceedings of an international conference held in Guernsey on 12-16 May 1986*, British Nuclear Energy Society, London, ISBN 0 7277 0359 5 (en deux volumes) ;
- *Fast Breeder reactors* – WALTAR (Alan E.) & REYNOLDS (Albert B.), Pergamon Press, 1981.

La démonstration de sûreté concerne les fonctions suivantes : le contrôle de la réactivité du réacteur, le refroidissement du réacteur et le maintien du confinement du réacteur.

Depuis de nombreuses années, la R&D menée au CEA en partenariat avec EDF et Areva a eu pour objectif de renforcer les lignes de défense et la robustesse de la démonstration sur l'ensemble de ces fonctions de sûreté, notamment en ce qui concerne les points particuliers aux RNR-Na, à savoir (sans être exhaustif) :

- la conception du cœur,
- les moyens d'évacuation de la puissance résiduelle,
- ou les réactions du sodium avec l'eau.

Ainsi, le CEA, EDF et Areva travaillent sur la conception d'un cœur de réacteur (dit CFV) qui a pour particularité de présenter un coefficient de vidange du sodium négatif, contrairement aux réacteurs conçus précédemment (un coefficient de vidange positif, cela veut dire que la réactivité du réacteur augmente en cas de disparition du sodium, par exemple par ébullition locale). Il est important de retenir, à ce stade, que ces travaux très prometteurs ne sont pas encore achevés et que les études actuellement en cours cherchent à confirmer le potentiel de la conception d'un tel cœur au regard des objectifs de sûreté. Ce cœur constituerait, si la confirmation en est apportée, une avancée essentielle dans le domaine de la sûreté.

Concernant l'évacuation de la puissance résiduelle, il faut rappeler l'importance de la notion d'inertie thermique, à savoir les masses de fluide primaire et de structures métalliques, multipliées par leur capacité

calorifique. Plus l'inertie thermique est élevée, plus le réacteur sera résistant à une augmentation de température en cas de perte des sources d'évacuation de la puissance résiduelle. La comparaison entre un RNR-Na intégré et un REP (réacteur à eau pressurisé-PWR) de conception standard fait ainsi apparaître une inertie thermique presque vingt fois supérieure en faveur du RNR-Na.

L'inertie thermique ne suffit pas à elle seule dans la démonstration de sûreté et il est important de bien considérer la séquence accidentelle complète (par exemple, la perte totale des alimentations électriques) et d'évaluer quels moyens de secours sont encore disponibles dans un tel cas de figure.

Ainsi, les RNR-Na conçus et construits précédemment comportaient une combinaison de systèmes d'évacuation de la puissance résiduelle (EPuR), à la fois, passifs et actifs et, à la fois, redondants et diversifiés, permettant l'évacuation de la puissance résiduelle dès la chute des barres et ce, même en cas de perte totale des alimentations électriques et de la source froide en eau. En effet, certains de ces circuits fonctionnent par circulation naturelle passive (thermosiphon) et utilisent l'air atmosphérique comme source froide. Leur efficacité a été vérifiée à plusieurs reprises lors de tests effectués sur les réacteurs Phénix et Superphénix. Il convient cependant de noter d'emblée qu'ASTRID est fondamentalement distinct de ces deux précédents prototypes dans la mesure où l'objectif est d'être iso-générateur de plutonium, alors que c'était la surgénération qui était recherchée pour les réacteurs à neutrons rapides de la génération précédente.

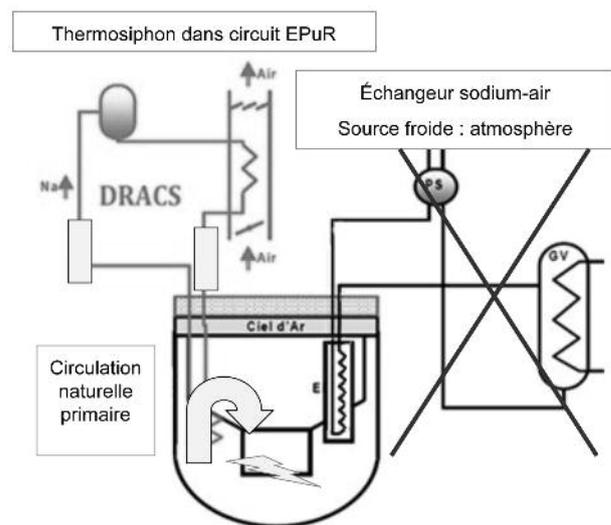


Figure 2 : Évacuation autonome de la puissance résiduelle dans un RNR-Na.

Enfin, en ce qui concerne la réaction sodium-eau, l'objectif est de concevoir des réacteurs qui soit éliminent totalement la possibilité d'une telle réaction

grâce à l'emploi d'un fluide alternatif (un système utilisant de l'azote à la place de l'eau est étudié sur ASTRID, comme l'une des options possibles), soit garantissent l'absence de conséquences pour la sûreté dans le cas où une telle réaction aurait lieu malgré les lignes de défense mises en place (concept de générateurs de vapeur modulaires).

LE PROTOTYPE ASTRID

Sur la base de l'expérience accumulée au sujet des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium qui ont fonctionné dans le passé (notamment, Phénix et Superphénix) ou qui fonctionnent actuellement (BN-600, en Russie), le CEA et ses partenaires travaillent sur certaines innovations pour développer un réacteur de quatrième génération, ASTRID, présentant des progrès décisifs, notamment en termes de démonstration de sûreté. Ces innovations sont :

- un cœur amélioré à coefficient de vidange négatif. Ce cœur constitue une avancée essentielle dans le domaine de la sûreté ; il confère au réacteur un comportement naturel favorable en cas de perte de refroidissement ;
- un système de conversion d'énergie à générateurs de vapeur modulaires (pour limiter les effets d'une éventuelle réaction sodium-eau) ou à échangeurs sodium-azote (pour éliminer totalement la présence d'eau à proximité du sodium) ;
- une grande inertie thermique, la convection naturelle, des systèmes d'évacuation de la puissance résiduelle passifs et actifs, redondants et diversifiés (source froide : eau ou atmosphère) ;
- la prise en compte des agressions externes (séisme, inondation, chute d'avion,...) dès la conception et avec suffisamment de marge pour garantir l'absence d'effet falaise (et donc préserver la faculté du réacteur à revenir à un état sûr) ;
- enfin, une conception d'ensemble de l'architecture du réacteur garantissant sa résistance accrue aux risques de prolifération.

Le prototype ASTRID est l'étape clé permettant de disposer de la démonstration industrielle d'un réacteur de quatrième génération, sachant que dans les décennies qui viennent, les exigences environnementales, climatiques et énergétiques ne feront très probablement que s'accroître, limitant d'autant le recours aux combustibles fossiles. ASTRID présentera des garanties de sûreté et de sécurité au moins équivalentes à celles de la troisième génération de réacteurs (ainsi que cela a été indiqué ci-dessus) en prenant en compte le retour d'expérience de l'accident de Fukushima dès la conception et il démontrera la réalisation de progrès significatifs en matière d'exploitation industrielle.

ASTRID a ainsi pour objectifs essentiels de démontrer, à l'échelle industrielle, des avancées en qualifiant des options innovantes dans les domaines de progrès identifiés (notamment en matière de sûreté et d'opérabilité) et de servir de banc d'essai à l'utilisation de techniques d'inspection et de réparation avancées. Il aura également des capacités de transmutation de déchets radioactifs afin d'apporter la démonstration de sa faisabilité à l'échelle industrielle.

Le programme ASTRID actuel comprend la réalisation du réacteur ASTRID proprement dit, la construction de boucles de validation technologique en sodium et de la validation sur celles-ci de composants du réacteur à l'échelle 1, ainsi que la construction d'un atelier de fabrication du combustible des cœurs (AFC). Le réacteur doit être opérationnel à l'horizon 2020.

La première échéance fixée par la loi du 28 juin 2006 se situe fin 2012, moment où les pouvoirs publics devront pouvoir disposer des éléments techniques et budgétaires (notamment en termes de montant et de planning des investissements), pour prendre une décision quant à la poursuite (ou non) des études en vue de la construction du prototype. Aussi le CEA a engagé sur la période 2010-2012 la première phase d'un avant-projet sommaire destiné à évaluer le coût d'investissement à l'échéance précitée et à définir les options techniques innovantes, ainsi que les orientations en matière de sûreté.

La deuxième phase de l'avant-projet sommaire se déroulera sur les années 2013 et 2014. L'avant-projet détaillé est, quant à lui, prévu de 2015 à 2017, période après laquelle on entrera dans les phases d'étude, d'exécution et de construction proprement dites.

À chaque étape clé, une revue des options retenues sera réalisée de façon à garantir le respect des critères de la quatrième génération.

Les études de conception d'ASTRID, phase d'avant-projet détaillé incluse, sont financées par le Programme d'investissements d'avenir. Ce programme (action « Nucléaire de demain ») couvre aussi les études de conception d'ateliers de fabrication des cœurs d'ASTRID et la rénovation ou la réalisation d'installations technologiques de qualification de composants à l'échelle 1.

LE RETOUR D'EXPÉRIENCE DE PHÉNIX ET DE SUPERPHÉNIX : UNE SOURCE DE PROGRÈS POUR ASTRID

Phénix est un réacteur nucléaire de recherche du type réacteur nucléaire à neutrons rapides et à caloporteur sodium. Mis en service le 31 août 1973 (date de son entrée en divergence) et raccordé au réseau électrique en 1974, pour une puissance électrique de 250 MWe,

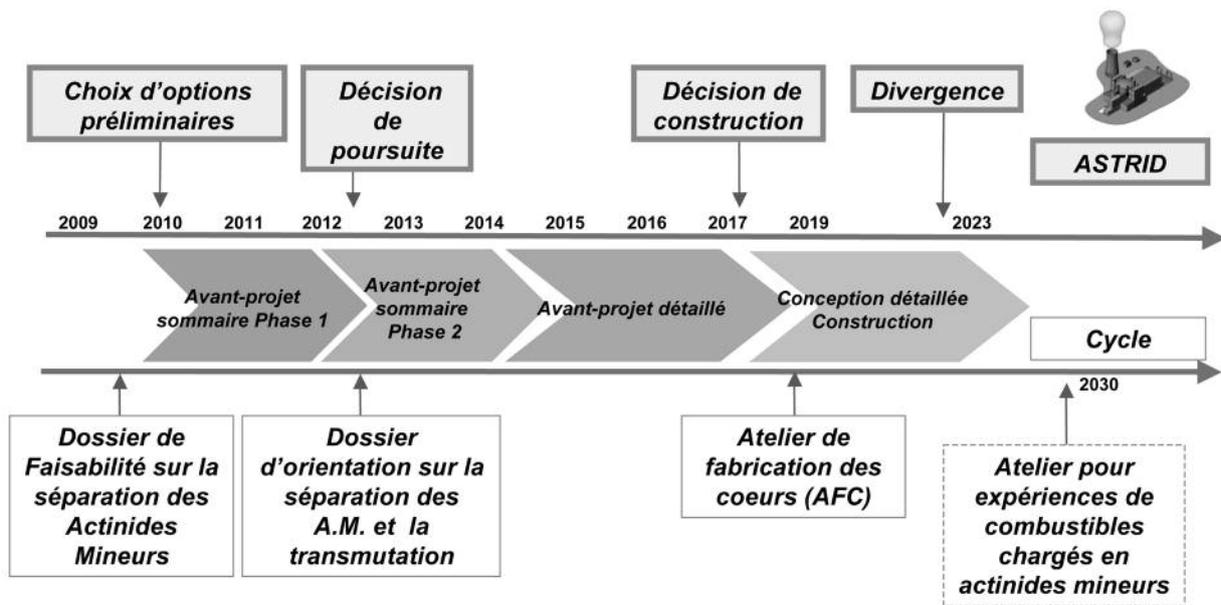


Figure 3 : Calendrier d'Astrid

Phénix a été exploité pendant trente-six ans conjointement par le CEA et EDF (jusqu'en mars 2009).

Superphénix est le nom du réacteur nucléaire de Creys-Malville (Isère). Superphénix était un prototype français de réacteur à neutrons rapides et à caloporteur sodium, qui faisait suite aux réacteurs nucléaires expérimentaux Phénix et Rapsodie. D'une puissance électrique de 1 240 MWe, Superphénix a été mis en service en 1985 et arrêté, sur décision politique, en 1998.

Les années d'exploitation de Phénix et de Superphénix ont permis de rassembler un ensemble très important de données sur ce type de réacteur. Superphénix a été ainsi le seul réacteur au monde à ce niveau de puissance. De son côté, Phénix se caractérise par une durée d'exploitation très longue. Ce retour d'expérience constitue une base précieuse pour la conception de futurs réacteurs qui intégreront, dès le départ, les enseignements retirés de Phénix et de Superphénix, tout en s'en différenciant.

Le retour d'expérience de l'exploitation des réacteurs Phénix et Superphénix présente aussi un bilan contrasté. Les faiblesses identifiées portent principalement sur les points suivants :

- certains aspects liés à la démonstration de sûreté du réacteur. La sûreté de Phénix et de Superphénix n'a pas été remise en cause (un rapport de la direction de la Sûreté des installations nucléaires jugeait que Superphénix atteignait le niveau de sûreté d'un réacteur REP de deuxième génération). Cependant, pour atteindre le niveau de sûreté des réacteurs de quatrième génération, certains éléments de la démonstration de sûreté doivent être rendus plus

robustes, il s'agit notamment des aspects liés à la réactivité du cœur ou à la robustesse de la conception face aux risques de réactions sodium-eau ou sodium-air. Le retour d'expérience de l'accident de Fukushima vient également augmenter les exigences de sûreté ;

- l'opérabilité du réacteur : la durée des arrêts (pour Superphénix) et leur fréquence (pour Phénix) pour manutention des assemblages, inspection, maintenance corrective ou pour réparation ont été importants, dégradant la disponibilité de l'outil de production, de sorte que les critères d'une rentabilité économique n'étaient pas réunis. Ce constat global cache de bons résultats, certaines années, qui permettent de dire que les défauts constatés pourront être corrigés sur de futurs réacteurs, à la condition que certaines dispositions soient prises en compte dès la conception (comme l'inspection en service) ;

- les coûts d'investissement : Superphénix a souvent été présenté comme étant un investissement extrêmement coûteux. Bien que l'analyse fine de la situation soit plus contrastée, il est clair que, pour de futures installations, il faudra être en mesure de garantir les coûts d'investissement à un niveau qui soit compatible avec le déploiement d'une filière compétitive, en tenant compte du service rendu. L'évaluation économique d'une filière de quatrième génération dépendra de nombreux facteurs, qu'il est difficile de prévoir aujourd'hui : exigences de sûreté, demande d'uranium, acceptabilité, importance du critère d'indépendance énergétique, politique de gestion des déchets, politique en matière d'émissions de gaz à effet de serre, etc.

ASTRID : UN RÉACTEUR DE QUATRIÈME GÉNÉRATION PRÉSENTANT DES AVANCÉES SIGNIFICATIVES

Les objectifs impartis à ASTRID

Des objectifs ambitieux sont fixés au réacteur ASTRID pour qu'il soit, de par sa conception, un réacteur de quatrième génération. Tout au long du processus de conception et de construction, le respect de ces objectifs sera vérifié.

Sûreté

Il est proposé de fixer à ASTRID l'objectif d'atteindre un niveau de sûreté équivalent à celui d'un EPR, doublé de l'exigence d'avoir obtenu des progrès significatifs sur les points spécifiques de la filière RNR-Na (comportement du cœur amélioré, inspection, réaction du sodium avec l'eau ou l'air, résistance aux agressions internes et externes,...). Ces objectifs de sûreté sont formalisés dans le document WENRA (3) intitulé *Safety Objectives for New Nuclear Power Plants* (2010). La démonstration de sûreté associée devra avoir la qualité correspondant à l'état de l'art exigé par l'Autorité de sûreté nucléaire. ASTRID intégrera, dès sa conception, les exigences issues du retour d'expérience de l'accident de Fukushima, sachant que les réacteurs refroidis au sodium disposent intrinsèquement d'une bonne résistance à ce type de scénario en raison de la grande inertie thermique de leur circuit primaire.

Opérabilité

Par conception, il est demandé qu'ASTRID puisse démontrer au bout de quelques années d'exploitation un coefficient de disponibilité comparable à celui du parc actuel de réacteurs en exploitation (soit autour de 80 % de disponibilité), déduction faite des pénalités apportées par certaines irradiations expérimentales. Cela est rendu possible par les progrès réalisés dans les techniques d'inspection en service et par la mise au point d'une chaîne de manutention du combustible innovante.

Transmutation de déchets ultimes

Phénix a permis de tester à l'échelle expérimentale la faisabilité de la transmutation d'actinides mineurs, ce qui permet de réduire fortement la quantité, la radio-toxicité et la durée de vie des déchets radioactifs

ultimes. ASTRID continuera la démonstration de la faisabilité de la transmutation des déchets à une échelle supérieure à ce qui a été fait jusqu'ici.

Coûts d'investissement

ASTRID sera un réacteur de démonstration industrielle fortement innovant. Un effort particulier sera fait pour contenir au maximum les coûts d'investissement. La participation d'industriels au projet sera une garantie dans ce domaine. Il est également prévu d'appliquer à la conception d'ASTRID les outils modernes d'analyse de la valeur qui, avec suffisamment d'anticipation, permettent de réaliser des économies substantielles dans ce type de projet.

Les actions de R&D conduites actuellement et les solutions envisagées pour ASTRID (ou pouvant être testées dans ASTRID)

Sûreté : conception et démonstration plus robuste

En matière de sûreté, les solutions envisagées prévoient :

- la prévention et la mitigation des risques d'accident de fusion de cœur ;
- la conception d'un cœur innovant à coefficient de vidange négatif (voir le paragraphe « La sûreté des RNR-Na ») ;
- l'installation possible de dispositifs complémentaires de sûreté dans le cœur : dispositifs d'insertion passive d'anti-réactivité (SEPIA) équivalents à un troisième niveau d'arrêt permettant l'atteinte d'un état sûr du réacteur lors d'un accident de perte de débit ou de source froide sans chute des barres d'arrêt normal, systèmes de plaquettes renforcées pour éliminer le risque de compaction du cœur ;
- une conception robuste des structures de fond de cuve pour éliminer le risque de défaillance du supportage du cœur ;
- l'augmentation des performances de l'instrumentation du cœur (thermocouples permettant de suivre la température des assemblages, chambres à fission pour la détection neutronique et des produits de fission, technologies par ultra-son pour les mesures de déplacements, détection acoustique de l'ébullition, mesures de débit,...).
- l'élimination pratique (au sens AIEA) de la perte des moyens d'évacuation de la puissance résiduelle : architecture de systèmes d'évacuation de puissance résiduelle redondants, actifs et passifs, diversifiés, avec absence de modes communs des systèmes (source froide : eau, mais aussi atmosphère) ;

(3) *Western European Nuclear Regulators' Association (WENRA)*.

- l'élimination des grands feux de sodium : casemate de locaux, inertage de locaux ;
- l'élimination des réactions sodium-eau violentes avec dégagement énergétique important : deux voies principales sont à l'étude : a) celle d'un système eau-vapeur afin de réduire la quantité de sodium réagissant, conception de générateurs de vapeur modulaires, avec une détection améliorée de l'hydrogène et b) le remplacement de l'eau-vapeur par un circuit à l'azote éliminant totalement le risque de réaction sodium-eau ;
- le comportement au séisme : conception du bâtiment réacteur comportant des patins antisismiques ;
- l'état de l'art en matière de protection contre les agressions externes (coque résistant à une éventuelle chute d'avion, protection contre les inondations,...).

Opérabilité et économie : disponibilité, aux standards de l'industrie

La conception d'ASTRID intégrera certaines dispositions permettant :

- de réduire la durée des arrêts pour rechargement du combustible : amélioration de la conception des systèmes de manutention ;
- d'augmenter le taux de combustion (*burn-up*) et la durée de cycle ;
- d'améliorer la qualité de fabrication des tuyauteries et des capacités contenant du sodium ;
- d'améliorer les performances de l'instrumentation pour la détection et la localisation des fuites de sodium.

L'ISIR (Inspection en Service, Intervention et Réparation) est prise en compte dès la conception :

- simplification de l'architecture du circuit primaire ;
- fixation de l'objectif de l'inspection de toutes les structures dont la défaillance est préjudiciable pour la sûreté (accessibilité des structures, inspection par l'extérieur, robots porteurs) ;
- démontabilité des composants en vue de leur réparation ou de leur remplacement ;
- accessibilité et espace disponible autour des composants et des structures.

Enfin, le réacteur ASTRID sera conçu pour une durée de vie de soixante ans : l'exigence de durée de vie des RNR-Na de quatrième génération (cahier des charges EDF) est d'au moins soixante ans, comme l'EPR. Pour Phénix et Superphénix, la durée totale de fonctionnement prévue à la conception était, respective-

ment, de vingt et trente ans. Cette durée de vie de soixante ans s'appuiera sur des choix de matériaux adaptés confirmés par une modélisation pertinente (vieillesse) et sur le choix de certaines options de maintenance.

COLLABORATIONS INDUSTRIELLES POUR ASTRID

Dès le début du programme ASTRID, le CEA s'est attaché le concours d'industriels qui participent aux études de conception d'ASTRID au travers d'accords de collaboration prévoyant une contribution sur fonds propres des partenaires. Ainsi, tandis que le CEA garde la responsabilité de l'architecture d'ensemble du réacteur, de son cœur et de son combustible, les lots ci-après sont apportés par différents industriels :

- Areva : chaudière, contrôle commandes, auxiliaires nucléaires ;
- EDF : assistance à la maîtrise d'ouvrage, REX d'exploitation, études de sûreté ;
- Alstom : système de conversion d'énergie, eau-vapeur et gaz (azote) ;
- COMEX Nucléaire : innovations sur la robotique et la manutention.

Le bilan, fait à la fin de l'année 2011, de ces collaborations industrielles est très positif. Ce sont ainsi plus de quatre cent cinquante personnes (du CEA et des entreprises concernées) qui travaillent sur le projet ASTRID.

Des discussions sont en cours avec les industriels suivants : Bouygues, Toshiba (avec lequel un *Memorandum of Understanding* a été signé), Rolls-Royce, AMEC et ASTRIUM. Plus généralement, des collaborations internationales sont mises en place avec des acteurs majeurs de la filière des RNR refroidis au sodium, notamment la Russie, le Japon, la Chine, l'Inde et les Etats-Unis.

RÉFÉRENCES

- 1 *Properties of water and steam* Springer-Verlag (Ernst Schmidt) (1982).
- 2 Recommandation du Bureau de Valorisation du CEA (1974).
- 3 *Handbook on Heavy Liquid Metals* OECD (2007).

ITER : une étape clé pour inscrire la fusion dans le mix énergétique du futur

La question énergétique est sur le devant de la scène et il est légitime qu'elle préoccupe les opinions. Une ère nouvelle a commencé dans laquelle l'énergie sera chère, en comparaison de son coût depuis le début de l'ère industrielle. Cela rend essentielles les recherches sur la mise au point d'une nouvelle source d'énergie sûre et abondante, à l'horizon au plus d'une génération.

Aux côtés des énergies renouvelables et de la fission nucléaire, la fusion pourrait au cours de ce siècle contribuer à satisfaire une part de la consommation mondiale d'électricité aujourd'hui assurée par des combustibles fossiles. Trente-quatre pays représentant plus de la moitié de la population de la planète mettent en commun leurs efforts pour franchir la dernière étape des recherches vers cette production d'énergie massive et durable dans le cadre du projet ITER.

Par **Jérôme PAMELA** et **Sylvie ANDRÉ-MITSIALIS***

Si personne ne peut avoir de certitude sur la composition du panorama énergétique des prochaines décennies, tout le monde s'accorde sur un point : les besoins énergétiques augmentent, et vont continuer à le faire. Sur la base des niveaux de consommation actuelle, la consommation totale d'énergie dans le monde, aujourd'hui estimée à quelque 12 milliards de tonnes équivalent pétrole par an, pourrait être de deux à trois fois plus importante dès 2100, et ce quelles que soient les économies d'énergie que nous pourrions réaliser.

Si aujourd'hui près des trois quarts de l'énergie mondiale proviennent de ressources fossiles (gaz, charbon, pétrole), la donne va obligatoirement évoluer dans les

prochaines décennies au regard des réserves estimées et de leur coût d'accès quel que soit le résultat des recherches en cours sur les capacités offertes par de nouveaux gisements de combustibles fossiles, car la question climatique prendra le pas sur toutes les autres considérations : la poursuite de l'utilisation massive des énergies génératrices de gaz à effet de serre constitue un risque grave pour le climat de la planète. Le recours prioritaire à des énergies non productrices de gaz à effet de serre est devenu une nécessité absolue.

* Commissariat à l'énergie atomique CEA.

Selon une étude publiée en 2011 par l'Agence internationale de l'énergie (AIE), le solaire pourrait fournir un tiers de l'énergie dans le monde en 2060. Mais force est de constater que malgré le bond réalisé ces dernières années par de nouvelles filières énergétiques renouvelables (comme l'éolien et le solaire), leur offre est encore loin de pouvoir répondre à l'accroissement de la demande, ne serait-ce qu'en raison de leur caractère intermittent.

Ce problème est aggravé par les disparités entre les pays. La population de l'Afrique, qui représente 13 % de la population mondiale, ne consomme que 3 % de l'énergie mondiale. En revanche, l'Amérique du Nord et l'Europe, où vit 1/5^{ème} de la population mondiale environ, consomment près des 2/3 de l'énergie mondiale.

Parmi les solutions énergétiques sûres, abondantes et non génératrices de gaz à effet de serre, la fusion pourrait contribuer au mix énergétique à l'horizon de la seconde moitié du siècle, sous réserve de démontrer qu'elle est applicable à la production industrielle d'énergie. C'est tout l'enjeu du programme de réacteur thermonucléaire expérimental international ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*).

DES ÉTOILES À L'ÉNERGIE DE FUSION

La réaction de fusion est en quelque sorte l'inverse de la réaction de fission. Si des noyaux atomiques lourds tels ceux d'uranium ou de plutonium peuvent fissionner spontanément (ou sous l'effet d'un bombardement de neutrons), les noyaux les plus légers peuvent, au contraire, se combiner pour donner naissance à des éléments plus lourds. Des réactions de ce type se produisent dans les étoiles, permettant, après un enchaînement complexe de réactions nucléaires, la nucléosynthèse, c'est-à-dire la synthèse des éléments de la classification de Mendeleïev formant notre univers.

La compréhension du phénomène de la fusion, à la fin des années 1930, a permis de poser les bases du programme de recherche et de développement visant à domestiquer l'énergie de fusion.

Les physiciens se sont d'abord appliqués à mesurer expérimentalement les sections efficaces (probabilités de réaction en fonction de la vitesse des collisions atomiques) de toutes les réactions possibles, ainsi que l'énergie libérée. Il est apparu que la réaction de fusion la plus prometteuse est celle qui implique un mélange de deutérium (D) et de tritium (T), deux isotopes de l'hydrogène. Le deutérium se trouve en abondance sur terre (dans la proportion d'un atome d'hydrogène sur 6 500). Le tritium (un élément instable à période radioactive courte, d'environ douze ans) est, quant à lui, produit à partir de lithium.

Les noyaux de deutérium et de tritium sont constitués respectivement d'un proton et d'un neutron, et d'un

proton et de deux neutrons. De leur fusion naît un élément constitué de deux protons et de deux neutrons, l'hélium, ainsi qu'un neutron. Le noyau d'hélium et le neutron emportent chacun une part de l'énergie issue de la réaction : 20 % pour le premier et 80 % pour le second. L'énergie libérée est considérable, elle atteint plus de 17 millions d'électronvolts par réaction (à comparer à des énergies libérées de l'ordre du dixième d'électronvolt dans les réactions chimiques mises en jeu dans la combustion des hydrocarbures). La capacité énergétique par unité de masse est donc supérieure d'environ huit ordres de grandeurs à celle des combustibles fossiles. Ainsi, une batterie d'ordinateur portable et quarante litres d'eau contiennent suffisamment de lithium et de deutérium pour satisfaire la consommation d'électricité d'un européen pendant trente ans (autant que ce que produirait une quarantaine de tonnes de charbon).

C'est ce formidable potentiel qui a conduit les grands pays industrialisés à lancer dans les années 1950 des activités de recherche visant à maîtriser la fusion par confinement magnétique pour tenter d'en faire une source d'énergie, un programme impliquant une approche très différente de celle adoptée par les programmes nucléaires militaires : ce qui fut reconnu dès 1958 avec la déclassification de ce domaine de recherches. Mais les conditions requises pour enclencher les réactions de fusion sont difficiles à réaliser sur Terre.

Il faut, en premier lieu, vaincre la répulsion électrostatique entre les noyaux, qui sont tous chargés positivement [Ndlr : des charges de même signe se repoussent mutuellement], afin qu'ils puissent suffisamment se rapprocher les uns des autres pour qu'entrent en jeu les forces nucléaires, qui n'agissent qu'à très petite distance. Cela est réalisé en portant et en maintenant à une température de l'ordre de la centaine de millions de degrés (100 kilo-électronvolts) les noyaux de deutérium et de tritium, qui acquièrent alors suffisamment d'énergie pour fusionner. À ces températures, les atomes sont totalement ionisés : les électrons sont séparés des noyaux. Les électrons, porteurs d'une charge électrique négative, se comportent collectivement comme un fluide couplé par les forces électromagnétiques au fluide composé des noyaux, qui eux sont chargés positivement. Ce gaz ionisé, appelé plasma, forme le quatrième état de la matière. C'est l'état le plus fréquent dans l'univers : en effet, les étoiles sont toutes formées de plasma ; sur Terre, on trouve des plasmas dans les arcs électriques, les éclairs, les lampes au néon et, bien entendu, dans les installations de recherche de fusion par confinement magnétique. La seconde difficulté a trait au confinement de ce plasma dans un grand volume (un millier de mètres-cubes, dans le cas d'un réacteur comme ITER). Il s'agit, d'une part, de confiner les particules, en particulier les noyaux d'hélium (appelés aussi particules alpha), qui doivent rester plusieurs secondes dans le

plasma afin de céder, par collision, leur énergie cinétique aux particules de deutérium et de tritium et entretenir ainsi une température élevée et, d'autre part, de confiner l'énergie du plasma afin d'éviter qu'il ne se refroidisse, ce qui mettrait fin aux réactions de fusion. Pour confiner le plasma, on utilise le fait que les particules chargées électriquement demeurent prisonnières de champs magnétiques : leurs trajectoires s'enroulent autour des lignes de champ, et plus le champ est fort, plus petit est le rayon de courbure de ces trajectoires ; de ce fait, un champ magnétique très élevé (de l'ordre de plusieurs Teslas, soit environ 10 000 fois l'intensité du champ magnétique terrestre), réalisé dans une configuration magnétique optimisée, permet d'isoler le plasma des parois qui l'entourent.

Le neutron est, quant à lui, électriquement neutre. Il peut donc s'échapper de la cage virtuelle créée par les champs magnétiques et va céder son énergie aux parois internes de la machine. Il en résulte un troisième défi : la mise au point des matériaux capables de supporter pendant des années ces bombardements neutroniques (c'est l'enjeu de la technologie des « couvertures » qui entoureront le plasma).

Dans les futures centrales à fusion, ces couvertures assureront trois fonctions : a) elles arrêteront les neutrons afin d'éviter qu'ils n'atteignent le système magnétique, b) la chaleur produite y sera récupérée par un circuit d'eau (ou de gaz) et transformée en vapeur qui permettra de générer de l'électricité, enfin, c) le tritium y sera généré par les collisions entre les neutrons et du lithium.

L'ÈRE DES TOKAMAKS

Les premières décennies de recherche furent consacrées à explorer de nombreuses configurations expérimentales. Une percée décisive dans la maîtrise de la fusion a été réalisée par des chercheurs soviétiques, en 1968 : ils ont réussi à porter un plasma d'hydrogène à une température d'environ 10 millions de degrés Celsius grâce à une machine baptisée tokamak (l'acronyme russe de *toroidalnaïa kamas-magnitnymi katushkami*, qui signifie : *chambre toroïdale et bobines magnétiques*). Dix années plus tard, une vingtaine de ces tokamaks étaient opérationnels ou en cours de construction dans le monde.

C'est véritablement durant la décennie qui a suivi que des étapes essentielles ont été franchies grâce à deux installations expérimentales : aux Etats-Unis, le tokamak TFTR a réussi à produire 10 MW de puissance de fusion et, en Europe, le tokamak européen JET (*Joint European Torus*) situé près d'Oxford, au Royaume-Uni, détient le record mondial de puissance (16 MW) depuis 1997. Son plasma, obtenu à partir d'un mélange gazeux de deutérium et de tritium, a été confiné et chauffé à 150 millions de degrés

Celsius. Le JET a également permis de démontrer qu'il était possible de chauffer un plasma par des particules alpha, condition nécessaire au fonctionnement du réacteur (comme nous l'avons indiqué plus haut). Mais à ce stade, le bilan énergétique du système reste toutefois négatif : la puissance injectée dans le plasma pour obtenir les réactions de fusion demeure supérieure à celle restituée. Pour pouvoir obtenir un bilan énergétique positif, un changement d'échelle s'impose.

ITER

C'est ainsi que pour des raisons autant scientifiques que financières ou géopolitiques, sept pays représentant plus de la moitié de la population de la planète (la Chine, la Corée, les Etats-Unis, les pays européens, l'Inde, le Japon et la Russie) ont décidé de s'unir pour réaliser le projet ITER. L'idée de ce projet remonte au Sommet de Genève (21 novembre 1985) avec la proposition de Mikhaïl Gorbatchev et de Ronald Reagan de mettre en place un projet international de développement de la fusion nucléaire en tant « *que source d'énergie inépuisable au service de l'humanité* ». Entre la rencontre de Genève et la décision de construire ITER à Cadarache (département des Bouches-du-Rhône), sur le site proposé par l'Union européenne, vingt-et-un ans allaient s'écouler, au cours desquels les contours du projet ont connu de nombreuses modifications.

Les premières études conceptuelles (1988-1990) ont permis de déboucher sur la signature d'un premier accord international (dénommé *ITER Engineering Design Activities*) regroupant la Fédération de Russie, l'Union européenne, le Japon et les Etats-Unis. Ensemble, ces quatre partenaires conduiront des études détaillées, techniques et économiques. Mais le projet, jugé trop ambitieux par les Etats-Unis, sera revu à la baisse, débouchant sur un nouveau dossier de conception, qui sera finalisé en juillet 2001.

Un processus de négociation s'est alors engagé pour choisir le pays d'accueil du projet sur la base de quatre propositions initiées par le Canada, l'Espagne, la France et le Japon. Au terme de près de trois années de négociations internationales, le choix de construire ITER à Cadarache, en France, est entériné lors d'une réunion ministérielle internationale organisée à Moscou, le 28 juin 2005. Quelques mois plus tard, une dizaine de personnes s'installaient à Cadarache aux côtés du premier directeur général d'*ITER Organization*, M. Kaname Ikeda (nommé en novembre 2005). Un an plus tard, ITER comptait un effectif de près de deux cents personnes.

Créée par un traité international signé ou ratifié, en 2007, par les sept partenaires du programme, ITER repose sur une organisation scientifique internationale sans précédent dans l'histoire. Le Conseil ITER,

composé de représentants de chacun des pays participant au programme, constitue le conseil d'administration d'*ITER Organization* que dirige, depuis le 28 juillet 2010, le Professeur Osamu Motojima et qui est chargée de concevoir, de construire et d'exploiter l'installation de recherche. Chacun des sept pays membres du programme ITER a mis en place une « agence domestique », unique interface chargée de fournir à *ITER Organization* les composants de l'installation dont la construction lui a été confiée. Au titre des engagements pris lors de la phase de candidature en tant que pays hôte, la France s'est organisée, dès 2005, pour accueillir les équipes scientifiques, avec leurs familles, et a engagé toutes les procédures préalables au démarrage des premiers travaux de viabilisation et d'aménagement du site de construction d'ITER.

La France est représentée au sein des instances internationales par Bernard Bigot, administrateur général du CEA et Haut Représentant pour la réalisation en France d'ITER ; il assure la coordination des acteurs nationaux impliqués dans le programme ITER. Le soutien et l'engagement du gouvernement français et de huit collectivités locales sont essentiels dans l'ancrage du projet dans le sol provençal.

Au total, la contribution française à la construction du projet sera de l'ordre de 1,2 milliard d'euros. La participation financière des collectivités s'est déjà concrétisée par le versement de 78,5 millions d'euros, à la fin 2011, soit 28 % de leur contribution prévue (de 280 millions d'euros) au titre d'une participation échelonnée durant la phase de construction de la machine qui se poursuivra jusqu'en 2018. À cela s'ajoutent les investissements qui ont permis d'aménager les routes existantes pour permettre le passage des convois nécessaires au transport des composants d'ITER (110 millions d'euros sur les contributions du Conseil général du département des Bouches-du-Rhône et de l'Etat) et la construction d'une école internationale (55 millions d'euros prélevés sur la contribution versée par le Conseil régional PACA), qui a été inaugurée le 24 janvier 2011. Unique en son genre, cette école accueille actuellement plus de cinq cents élèves, de la maternelle jusqu'au baccalauréat, représentant vingt-sept nationalités et répartis dans six sections bilingues différentes.

Sur le site de construction, la première phase de travaux de viabilisation a été lancée en janvier 2007. Elle concernait le défrichage et les sondages archéologiques sur un espace d'environ 90 hectares ; elle a impliqué de trouver des équilibres entre les besoins d'aménagement et la préservation de la faune et de la flore. La seconde phase de travaux a été réalisée entre 2008 et 2009 : une centaine d'engins aplanissent alors une immense plateforme d'une quarantaine d'hectares. Plus de 2,5 millions de m³ de matériaux seront ainsi traités, dont les deux tiers ont été réutilisés comme remblais. En parallèle, plus de 20 km de

réseaux nécessaires à la gestion des eaux industrielles, pluviales et sanitaires sont installés. Dans la foulée de ces travaux d'aménagement, un espace viabilisé et aménagé de 110 ha est mis à la disposition d'*ITER Organization* : à ce titre, un bail emphytéotique entre le Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA) et *ITER Organization* a été signé en juillet 2010, transférant la responsabilité du site à *ITER Organization* pour la durée de l'Accord ITER (qui court jusqu'au 24 octobre 2042).

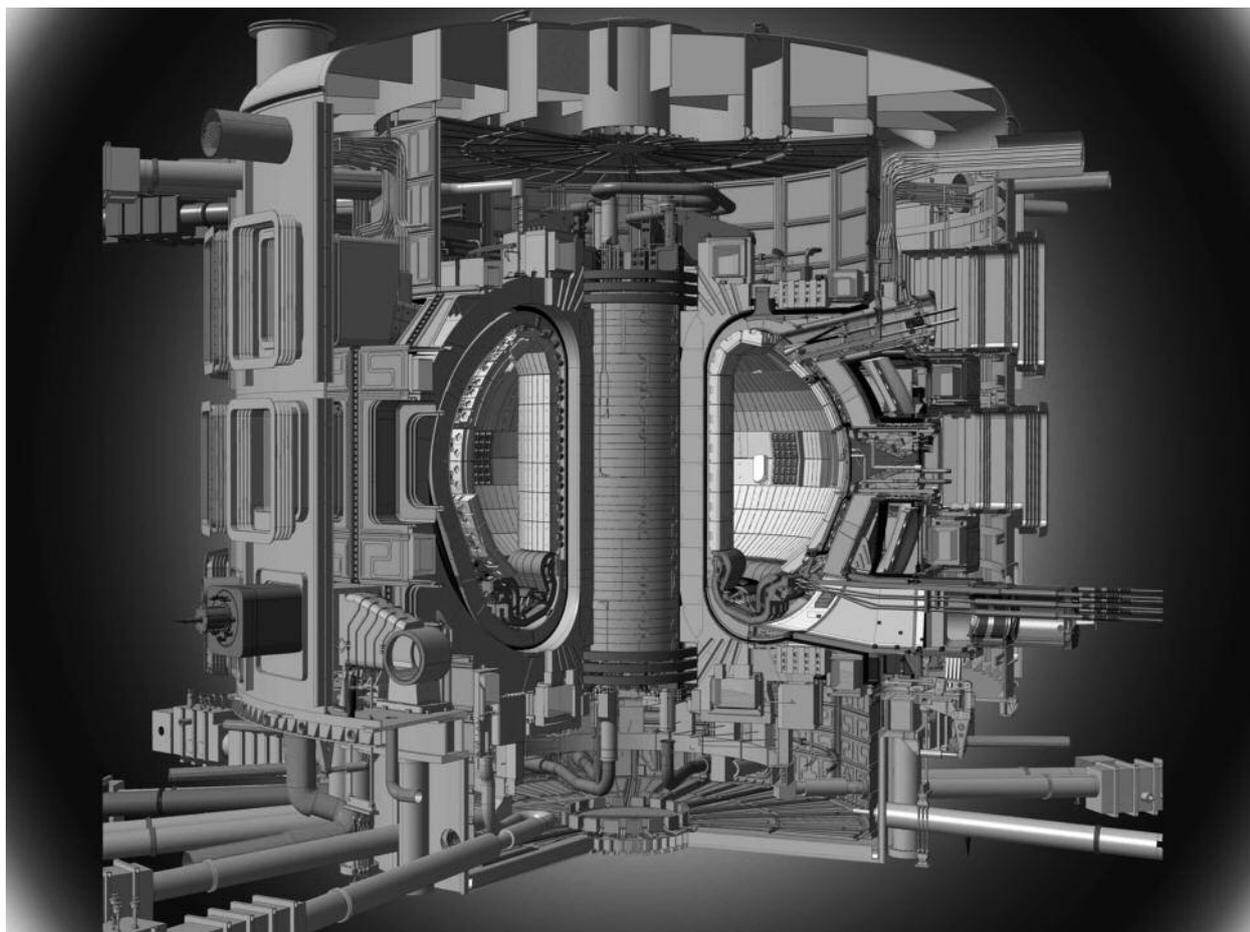
Les travaux de construction d'ITER ont démarré dans la foulée, avec trois grandes opérations engagées au cours de l'été 2010 : la construction du siège d'ITER (dont les trois bâtiments émergent en l'espace d'à peine une année) ; les fondations parasismiques du bâtiment tokamak qui nécessitent la pose de 493 plots parasismiques dans une cavité de 100 m sur 80 m de côté et 20 m de profondeur et, enfin, la construction du bâtiment technique dans lequel seront assemblés les plus gros aimants de la machine, dont la construction s'est achevée en janvier 2012. Dès que les câbles seront livrés, d'ici à la fin de l'année 2012, les opérations de bobinage pourront commencer ; elles dureront cinq ans.

En parallèle, la fabrication des composants se poursuit à travers le monde. Depuis 2007, soixante-cinq « accords de fournitures », sur un total de cent vingt-six, ont été signés par les sept membres d'ITER pour la fourniture en nature des éléments de la machine (ce qui représente 75 % de la valeur totale – également en nature – du projet).

Les premiers composants sont attendus à Cadarache à partir de 2014. Un itinéraire d'une centaine de kilomètres (de Fos-sur-Mer jusqu'au site de construction) a été spécialement aménagé pour recevoir ces convois très exceptionnels qui, pour les plus lourds, pèseront 900 tonnes ; les plus hauts auront un tirant d'air d'environ 10 mètres, soit la hauteur d'un immeuble de trois étages, et les plus longs mesureront une soixantaine de mètres. Dans la perspective de ces transports très exceptionnels, deux étapes sont en cours de préparation. La première concerne des opérations tests organisées en 2012 sur les ponts pour mesurer et valider, notamment, l'impact des vibrations liées au passage des convois ; la deuxième étape consistant en l'organisation d'un convoi test, en 2013.

UN INVESTISSEMENT D'AVENIR

À présent, ITER s'apprête à entrer dans sa troisième année de construction. Des travaux qui mobiliseront près de 3 000 personnes lors du pic des opérations, à partir de 2014 et pour une durée d'environ trois ans. Outre l'ampleur de ces travaux, qui dureront une dizaine d'années au total, ITER représente un investissement d'avenir offrant des opportunités multiples d'ouverture et de développement. Le projet crée des



Vue du réacteur ITER.

emplois directs et indirects, accueille des entreprises, développe de nouveaux secteurs économiques. À fin 2011, les retombées économiques enregistrées au niveau français étaient estimées à environ 800 millions d'euros de contrats, auxquels il faut ajouter les salaires des personnes impliquées dans ce projet.

L'expérience du CERN et d'autres organisations montre qu'un emploi dans une installation de recherche entraîne la création d'au moins un autre emploi dans sa zone d'implantation. Ainsi, dans le sillage d'ITER, plusieurs implantations d'entreprises sont déjà intervenues dans la région, sans compter les nombreuses entreprises locales qui travaillent directement aux côtés d'*ITER Organization* (environ 500 personnes au titre de la sous-traitance). L'entreprise d'ingénierie SNC-Lavallin est l'une d'entre elles. Elle dispose de sérieuses références dans le domaine de l'ingénierie nucléaire, en particulier dans le domaine de la filière des réacteurs nucléaires canadiens et indiens Candu. Après avoir été sélectionnée par l'Agence ITER France aux côtés de la société Léon Grosse, dans le cadre de la construction du siège d'ITER à Cadarache, elle vient de renforcer sa présence dans le Sud-Est de la France en rachetant la

société aixoise Setor, une entreprise d'ingénierie générale du bâtiment. La montée en puissance des nombreuses constructions sur le site ITER n'est sans doute pas étrangère à cette stratégie de développement économique. D'autres sociétés ont fait le choix de s'implanter à Pertuis afin de se rapprocher d'ITER, comme, par exemple, le bureau d'études et d'ingénierie mécanique Latecis, filiale du groupe Latécoère (bien connu dans le domaine de l'aéronautique). Preuve de ses ambitions, Latecis entend quasiment multiplier par cinq ses effectifs d'ici à trois ans. Quant au groupe d'ingénierie mécanique et électronique Soditech, il a ouvert une antenne à Pertuis qui compte déjà une trentaine de personnes impliquées sur le site ITER. Venue de l'autre côté du Rhin, la société allemande Kraftanlagen (KAH) a ouvert une antenne, il y a de cela trois ans, à Manosque. Celle-ci emploie une dizaine de personnes. Une autre entreprise d'ingénierie et de bureaux d'études allemande, C-CON, a fait le choix de s'implanter sur la commune de Saint-Paul-lez-Durance pour pouvoir travailler aux côtés des équipes d'ITER dans le cadre d'études de conception, de génie mécanique, d'assemblage et de gestion de projet.

Caractéristiques techniques d'ITER

Plus la taille d'un tokamak est importante, plus grande est sa capacité à confiner et à chauffer un plasma. Avec un volume de plus de 800 m³ (plus de 30 fois celui de l'installation Tore Supra de Cadarache et plus de 8 fois celui du JET, la plus grande machine existant au monde à ce jour), ITER vise une production de puissance 10 fois supérieure (500 MW) à la puissance qui aura été injectée dans la machine (50 MW).

- Grand rayon du plasma : 6,2 mètres
- Petit rayon du plasma : 2 mètres
- Intensité du courant du plasma : 15 méga-ampères
- Champ magnétique : 5,3 Teslas
- Type de plasma : Deutérium-Tritium
- Puissance thermique : 500 mégawatts
- Durée des impulsions : plus de 400 secondes
- Fonctionnement sur de longues durées (à puissance réduite).

VINGT ANNÉES D'EXPÉRIMENTATION

La construction des trente-neuf bâtiments et installations techniques a pour point de mire le démarrage des premières expérimentations en 2020. Les quatre premières années seront consacrées aux tests de fonctionnement et à la mise au point des paramètres techniques et physiques de l'installation de recherche, ainsi qu'au réglage des paramètres de fonctionnement. Les six années suivantes correspondent à la phase de montée en puissance progressive des performances technologiques, avant d'aborder la phase nucléaire avec le combustible deutérium-tritium, à partir de 2026-2027.

À l'issue de ces phases expérimentales, dans moins d'une vingtaine d'années, ITER aura démontré la viabilité scientifique de la fusion avec l'obtention et le contrôle de plasma de deutérium-tritium en combustion et un gain d'énergie d'un facteur dix ou plus (500 MW de puissance thermique). Plusieurs démonstrations de composants applicables à un prototype préindustriel auront aussi été apportées : grands aimants supraconducteurs (pour produire le champ magnétique de confinement), chambre de confinement, télémanipulateurs, etc.

La maintenance des futures installations de fusion constitue l'un des défis technologiques du développement de la filière. Le fonctionnement d'ITER, dont la maintenance sera totalement télé-opérée, sera à cet égard essentiel. Ses robots de maintenance sont conçus pour répondre aux contraintes spécifiques d'une installation de fusion. Outre des interventions dans un environnement nucléaire, il leur faut opérer sans laisser d'impuretés dans la chambre d'expérimentation, car celles-ci risqueraient de diminuer les performances du plasma. Les composants à déplacer sont nombreux : parmi eux, plusieurs centaines de composants internes à la chambre pesant de 4,5 tonnes à 45 tonnes, avec des géométries variables. Aux téléma-

nipulateurs puissants chargés de déplacer puis de replacer des composants massifs s'ajoutent d'autres systèmes qui devront, quant à eux, réaliser des missions d'inspection interne.

ITER testera aussi un équipement essentiel, le divertor, qui sert à collecter les flux de particules et d'énergie les plus forts.

Un autre des éléments clefs de la réalisation d'un réacteur électrogène est la couverture tritigène (que nous avons évoquée plus haut). Ce composant entourant le plasma sera destiné à absorber les neutrons résultant des réactions de fusion afin de produire du tritium à partir de lithium et de chauffer un caloporteur. Le programme de R&D qui a été lancé depuis plus de vingt ans pour sélectionner les matériaux nécessaires a déjà identifié des solutions techniques pour y arriver : des aciers ferritiques, avec ou sans dispersoïdes, qui seront sans doute testés sur une installation d'irradiation internationale, IFMIF, qui, complémentaire d'ITER, ouvre avec celui-ci la voie vers un futur réacteur de fusion. Cette installation consistera en deux faisceaux de deutons [Ndlr : particule composée d'un neutron et d'un proton] qui frapperont une cible de lithium liquide, produisant des neutrons ayant un spectre très proche de celui produit par les réactions de fusion. Le projet IFMIF est entré dans sa phase de validation technique, avec la construction (dans le cadre d'une collaboration nippo-européenne) d'un prototype de l'accélérateur, sur le site de Rokkasho, au Japon. IFMIF permettra de qualifier des échantillons de matériaux avant leur utilisation dans le réacteur de démonstration, DEMO, qui devrait succéder à ITER et produire les premiers mégawatts électriques issus de la fusion nucléaire.

Ces installations expérimentales utilisées dans le cadre d'un programme coopératif international devraient nous permettre de franchir une nouvelle étape et de relever le formidable défi que représente le développement de la fusion pour assurer un avenir énergétique durable.

Des sciences fondamentales aux enjeux sociétaux : le rôle du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

Par la force des choses, de profondes mutations sont en cours dans nos modes de consommation et de production d'énergie. Les acteurs de R&D de ce domaine se doivent de répondre à ces nécessités par l'innovation technologique et de proposer des solutions énergétiques qui soient sûres, compétitives, économes en ressources naturelles et respectueuses de l'environnement.

Par **Daniel IRACANE***, **Stanislas POMMERET**** et **Elvire LEBLANC*****

Aux côtés d'autres organismes de recherche français, le CEA est depuis plus de soixante-cinq ans un instrument central de la politique française de recherche et développement scientifique et technologique. Son rôle est d'accroître la connaissance scientifique et de stimuler l'innovation et les transferts de technologies dans plusieurs domaines stratégiques et sociétaux majeurs au premier rang desquels se place l'énergie. Même si elles ont fortement évolué dans le temps, les nécessités d'ordre national et international, auxquelles le CEA contribue à répondre dans ces domaines restent à ce jour tout aussi pressantes (1).

* Directeur adjoint de la direction des Relations internationales du Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA).

** Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA).

*** Responsable du domaine scientifique des Nouvelles Technologies pour l'Énergie, direction Stratégie et Programme du Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA).

(1) Cette notion de nécessité dans le domaine de l'énergie structure l'action du CEA, conçu pour répondre aux « pressantes nécessités d'ordre national et international... pour que la France puisse tenir sa place dans le domaine des recherches concernant l'énergie atomique... », tel que le rappelle l'exposé des motifs de l'ordonnance du 18 octobre 1945 signée par le général De Gaulle et portant création du Commissariat à l'énergie atomique.

À l'heure où la Chine excelle dans le monde du calcul haute performance (elle possède les deuxième et quatrième machines les plus puissantes) (2), où l'Inde s'apprête à démarrer un réacteur à neutrons rapides d'une puissance de 500 MW électriques près de Chennai (anciennement Madras), marquant ainsi leur maîtrise des technologies de pointe, la France et l'Europe cherchent à maintenir leur *leadership* dans les domaines de la recherche et de l'innovation. Face aux puissances émergentes, notre atout majeur est notre capacité, fruit d'une longue culture, à coupler et à intégrer les résultats de la recherche fondamentale et ceux de la recherche technologique pour réaliser des démonstrateurs industriels. Ce couplage, illustré ci-dessous par quelques exemples, constitue le fil directeur de l'action du CEA.

La question de l'énergie est aujourd'hui critique dans nos sociétés, certes, mais elle relève aussi de notre responsabilité vis-à-vis des générations futures.

Cet article a pour objet de faire le point sur l'ensemble des énergies, sur leur devenir et leur complémentarité à l'horizon du milieu du XXI^e siècle. Une profonde mutation de nos modes de consommation énergétique et la réduction de notre dépendance énergétique vis-à-vis des importations de combustibles fossiles ne nous paraissent possibles qu'à travers une approche associant le nucléaire, les énergies renouvelables, de nouveaux vecteurs d'énergie et des progrès significatifs en matière de stockage de l'énergie et de développement de réseaux intelligents. C'est sur ce programme de travail qu'œuvre le CEA.

Les deux articles précédents évoquent la capacité de l'énergie nucléaire de contribuer, à l'échelle du siècle, à la satisfaction de nos besoins énergétiques, d'une part, par le développement de réacteurs à neutrons rapides multipliant par cent le rendement de l'uranium naturel que nous extrayons du sous-sol (objet de l'article de François Gauché) et, d'autre part, par la recherche menée sur la fusion, qui ouvre une voie encore plus prometteuse et durable (objet de l'article de Jérôme Pamela et Sylvie André-Mitsialis).

DES SCIENCES EN AMONT D'ENJEUX SOCIÉTAUX

Les progrès scientifiques en général et les sciences mobilisées sur les enjeux sociétaux s'alimentent les uns les autres, aussi bien sur le plan des outils et techniques utilisés que dans les réponses apportées aux grands enjeux de l'énergie, de la santé ou encore de la défense. Les exemples que nous allons évoquer illustrent, au travers des programmes de recherche du CEA, la manière dont un grand organisme de recherche tire parti de ces fertilisations croisées pour répondre aux grands enjeux sociétaux, et notamment à celui de l'énergie.

Au sein de multiples partenariats, le CEA apporte sa culture de la maîtrise de grands programmes et de

grands projets scientifiques et technologiques associant des équipes à la fois pluridisciplinaires et fortement intégrées.

Science et énergie

Dans le domaine de la recherche fondamentale, cette culture permet au CEA de concevoir et de réaliser des instrumentations faisant appel à des technologies de très haut niveau. Les ingénieurs-chercheurs du CEA créent leurs instruments en poussant les technologies à leurs limites ultimes, en toute connaissance des besoins d'une science dont ils contribuent, avec d'autres grands organismes de recherche, à repousser les frontières. Cette dualité connaissance/instrumentation est une spécificité de la recherche fondamentale menée au CEA dans le domaine de la physique des particules comme dans celui de l'astrophysique. On peut évoquer à ce sujet la contribution majeure du CEA, en collaboration avec le CNRS, à la construction du *Large Hadron Collider* (LHC) et des détecteurs Atlas, CMS et Alice du Centre Européen de Recherche Nucléaire (CERN), à Genève.

Un des grands enjeux de la recherche fondamentale menée par le CEA est d'effectuer les recherches amont nécessaires aux développements des filières technologiques actuelles et des nouvelles sources d'énergie en prenant en compte, dès leur conception, des préoccupations sociétales, telles que leur impact sur le climat, sur la santé et sur l'environnement. De ce point de vue, le CEA, avec ses partenaires de l'Institut Pierre-Simon Laplace (CNRS, UPMC, UVSQ, CNES, IRD, ENS, Ecole Polytechnique,...) est un des acteurs majeurs des recherches menées sur le climat et l'environnement tant du point de vue scientifique que du point de vue sociétal. Le projet d'infrastructure ICOS (*Integrated Carbon Observation System*), qui est inscrit sur la liste ESFRI (*European Strategy Forum on Research Infrastructures*), sera un outil mis à la disposition des scientifiques et permettra de quantifier les émissions de gaz à effet de serre (GES) dans le cadre d'une politique européenne de suivi de celles-ci.

Les grandes infrastructures de recherche sont au point de convergence des technologies mises en œuvre pour développer les capacités d'investigation et de création de la communauté scientifique et, au-delà, de l'innovation, grâce à l'ouverture de ces très grands instruments de recherche (TGIR) aux industriels.

Outre la compréhension des mécanismes fondamentaux qu'elles apportent, ces installations permettent aussi de caractériser finement les matériaux utilisés dans les filières énergétiques (nucléaire, photovoltaïque, électrochimique, notamment). La découverte

(2) <http://top500.org/>, classement de novembre 2011.



Atlas



Atlas Higgs

Collision « candidate » pour signer la présence d'un boson de Higgs. (déTECTEUR ATLAS, décembre 2011)
©ATLAS/CERN

La découverte du boson de Higgs

À l'occasion d'un séminaire qui s'est tenu au CERN le 4 juillet 2012, en prélude à la grande conférence de physique des particules de l'année, ICHEP2012, les expériences ATLAS et CMS ont présenté leurs derniers résultats préliminaires concernant la recherche du boson de Higgs. Les deux expériences observent une nouvelle particule de masse voisine de 125 GeV. Il s'agit d'un boson dont les caractéristiques sont compatibles avec celles du boson de Higgs, bien que des analyses complémentaires soient nécessaires pour en établir la nature. Cette découverte représente une étape cruciale dans la compréhension des composants ultimes de la matière. Les résultats des deux expériences s'appuient sur l'analyse d'un volume de données environ deux fois supérieur à celui des résultats présentés en décembre 2011. « Nous avons franchi une nouvelle étape dans notre compréhension de la nature », a déclaré le directeur général du CERN, Rolf Heuer. Cette découverte ouvre un champ de recherche totalement nouveau car le boson de Higgs n'est ni une particule de matière ni un vecteur d'interaction, mais il est directement lié à la structure du vide et est à l'origine de la masse des particules élémentaires. Ce programme de recherche exige dans un premier temps bien davantage de données statistiques relatives au LHC à l'énergie actuelle, puis à l'énergie nominale du LHC à partir de 2014. En établissant les propriétés de cette nouvelle particule, on contribuera à lever le voile sur d'autres mystères de la physique, notamment celui de la matière noire de notre Univers. Les équipes du CNRS/IN2P3 et du CEA/Irfu ont joué un rôle de premier plan dans la construction du LHC et des expériences et dans la réalisation des analyses ayant conduit à cette découverte majeure.



ICOS

ICOS : un futur réseau européen de suivi des sources et puits de gaz à effet de serre

Quatre observatoires atmosphériques ont entrepris en Europe une campagne de mesures afin de démontrer la faisabilité d'un réseau européen de suivi des puits et des sources de gaz à effet de serre. Soutenu en France par le CEA, le CNRS, l'UVSQ et l'Andra, le futur réseau atmosphérique ICOS (*Integrated carbon observing system*) est appelé à devenir une infrastructure de recherche en environnement dédiée à l'observation à haute résolution des échanges de carbone (dioxyde de carbone, méthane et autres gaz à effet de serre) entre la surface terrestre, la surface des océans et l'atmosphère. Il rassemblera plus de quarante laboratoires de recherche de tout premier plan d'une vingtaine de pays.

de nouveaux matériaux susceptibles de révolutionner le monde de l'énergie sera inspirée par notre connaissance de leurs structures et de leurs dynamiques aux niveaux moléculaire et atomique.

Ainsi, le CEA œuvre à donner une compréhension fine des matériaux utiles aux énergies d'avenir sur des échelles de temps et d'espace allant de la structure moléculaire aux cellules énergétiques, et de la picose-

conde aux phénomènes liés au vieillissement. À cette fin sont mobilisées, à proximité immédiate du CEA Grenoble et avec l'implication forte de celui-ci, les deux installations majeures à l'échelle internationale que sont le réacteur HFR (*High Flux Reactor*) de l'Institut Laue Langevin (ILL) et le synchrotron ESRF (*European Synchrotron Radiation Facility*). En effet, les neutrons et les photons X sont des sondes irrempla-

çables pour explorer l'organisation micro et mésoscopique de la matière. Ces laboratoires internationalement reconnus dans le domaine des nanosciences et des nanotechnologies, alliés à des moyens d'investigation associés (comme la plateforme de nano-caractérisation PFNC) et soutenus par le CEA, le CNRS, l'Institut National Polytechnique de Grenoble et l'Université Joseph Fourier, offrent un environnement scientifique et technologique propice à l'innovation énergétique. L'interaction entre ces partenaires, déjà formalisée dans le cadre de l'initiative Grands Instruments pour les Matériaux pour l'Énergie (GIME), est renforcée *via* des accords bilatéraux avec l'Institut Laue-Langevin (ILL) et l'*European Synchrotron Radiation Facility* (ESRF) sur les thématiques afférentes à l'énergie.

La science des matériaux utilisés dans le domaine des énergies nucléaires est complexe. Dans les réacteurs nucléaires électrogènes d'aujourd'hui, les aciers utilisés dans les parties internes du cœur sont extrêmement sollicités : chaque atome subit en moyenne deux déplacements par an sous l'effet de l'impact des neutrons émis par le cœur. Le développement des futurs réacteurs nucléaires à neutrons rapides, et plus encore celui des réacteurs de fusion, nécessite des matériaux résistant à une sollicitation dix fois plus intense.

Plusieurs décennies de progrès ont permis de développer une physique du vieillissement des matériaux soumis à l'irradiation. Aujourd'hui, la simulation, adossée à l'expérience, permet d'appréhender les mécanismes en jeu. Cet enjeu est au cœur de la performance de la production d'énergie nucléaire, de par son impact direct sur la durée de vie des installations et, surtout, sur leur sûreté. Le CEA maintient en cette matière des compétences et des installations correspondant au meilleur état de l'art au niveau international. Cette science repose tout d'abord sur des réacteurs de recherche qui ont été à la base du développement de l'énergie nucléaire. Le réacteur OSIRIS, qui est en fonctionnement à Saclay depuis les années 1960, sera remplacé par le réacteur RJH, en cours de construction à Cadarache afin d'offrir un outil moderne permettant aux futurs ingénieurs et chercheurs de continuer à expérimenter dans les conditions les plus performantes les matériaux nécessaires à la production d'énergie nucléaire.

Si ces réacteurs de recherche permettent de mener des expériences en matière de qualification des matériaux, il convient de les compléter par des outils permettant une approche plus fondamentale. Ainsi, sur le réacteur ORPHEE, le Laboratoire Léon Brillouin participe aux développements de matériaux hétérogènes très prometteurs, les aciers à dispersion d'oxyde. Le synchrotron SOLEIL (inauguré en 2006) permet la caractérisation de matériaux grâce à ses puissantes sources de lumière ; dès sa conception, il a été prévu de pouvoir étudier des matériaux radioactifs, ce qui nécessite de disposer de moyens de protection adap-

tés, tels que permettra d'en réaliser la ligne expérimentale MARS (*Multi Analyses on Radioactive Samples*) en vue d'étudier des combustibles irradiés. La ligne METROLOGIE (ouverte en 2008) est accessible à l'ensemble de la communauté scientifique concernée par l'instrumentation laser X et XUV. Enfin, en couplant plusieurs accélérateurs d'ions, le CEA et le CNRS ont réalisé la plateforme expérimentale JANNUS, qui, de par son caractère très innovant, va permettre de progresser dans la compréhension des mécanismes d'endommagement des matériaux soumis à l'irradiation.

Dans le domaine des bioénergies, l'étude des mécanismes fondamentaux de la photosynthèse et du métabolisme de micro-algues ouvre des voies prometteuses pour la production de biocarburants de troisième génération. En 2011, le CEA a obtenu de premiers résultats portant sur l'un des processus moléculaires responsables de la dynamique des réserves carbonées dans une micro-algue photosynthétique (3).

La production d'hydrogène à partir d'une décomposition (bio-inspirée) de l'eau par voie photocatalytique nécessite l'élaboration de systèmes qui soient capables de capter la lumière et de la transformer en flux d'électrons, qui à leur tour vont oxyder l'eau et réduire en hydrogène les protons résultant de cette oxydation (4). En 2011, les chercheurs du CEA ont effectivement mis au point un photocatalyseur permettant l'oxydation de l'eau ainsi qu'une photocathode permettant la production d'hydrogène à partir des protons qu'elle génère (5).

Science et vivant

Les technologies médicales doivent beaucoup aux développements réalisés dans d'autres domaines scientifiques (technologies de l'information, matériaux, instrumentations physiques, chimie et biochimie,...) et cette tendance doit encore s'amplifier pour arriver à mieux comprendre le fonctionnement du vivant et mieux prendre en charge les pathologies humaines (cancers, maladies génétiques, maladies neuro-dégénératives, affections cardio-vasculaires,...).

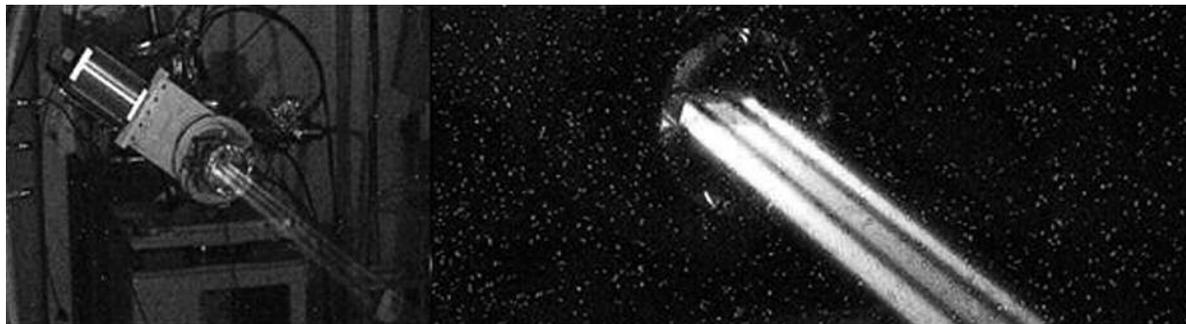
(3) SIAUT (M.), CUINE (S.), CAGNON (C.), FESSLER (B.), NGUYEN (M.), CARRIER (P.), BEYLY (A.), BEISSON (F.), TRIANTAPHYLIDES (C.), LI-BEISSON (Y.) & PELTIER (G.), *BMC Biotechnol.*, 11(1) :7, 2011.

(4) LE GOFF (A.), ARTERO (V.), JOUSSELME (B.), DINH (P. T.), GUILLET (N.), METAYE (R.), FIGHI (A.), PALACIN (S.) & FONTECAVE (M.), *Science*, 326, pp. 1384-1387, 2009.

(5) TRAN (P. D.), LE GOFF (A.), HEIDKAMP (J.), JOUSSELME (B.), GUILLET (N.), PALACIN (S.), DAU (H.), FONTECAVE (M.) & ARTERO (V.), *Angew. Chem.*, 2011, 50, pp. 1371-1374.

5 février 2008 : ouverture de la ligne METROLOGIE sur le synchrotron SOLEIL

Cette ligne de lumière du synchrotron SOLEIL est équipée de plusieurs stations permettant de mesurer dans la plus grande partie du spectre couvert par le synchrotron les paramètres photométriques qui caractérisent des éléments optiques tels que la réflectivité des surfaces, l'efficacité de diffraction des réseaux, la diffusion des surfaces ou l'efficacité des détecteurs X et X-UV. Cette installation pourra servir également à développer des instruments et des diagnostics nécessaires à la caractérisation des faisceaux de rayons X (intensité, taille, degré de cohérence, polarisation, etc.). Le synchrotron SOLEIL est partenaire de PRISME, un réseau de mesure et de métrologie en région Île-de-France.



Ligne Métrologie



La plateforme de multi-irradiation JANNUS (Jumelage d'Accélérateurs pour les Nanosciences, le Nucléaire et la Simulation) se compose de deux dispositifs expérimentaux d'irradiation. L'un est situé à Orsay, au Centre de Spectrométrie de Masse et de Spectrométrie Nucléaire rattaché au CNRS/IN2P3 et à l'Université Paris Sud ; il couple un accélérateur de type tandem de 2 MV (ARAMIS), un implanteur d'ions de 190 kV (IRMA) et un microscope électronique à transmission de 200 kV. L'autre dispositif est installé au CEA Saclay. Il regroupe deux accélérateurs électrostatiques d'ions positifs, comme l'hélium et l'hydrogène, une machine de type Pelletron™ d'une différence de potentiel de 3 MV équipée d'une source d'ions multichargés (ECR à résonance cyclotronique électronique) et un Van de Graaff simple étage de 2,5 MV. À terme, un tandem de 2 MV viendra compléter ce dispositif.

De nombreux exemples en témoignent, dans les domaines de l'imagerie médicale, de la chirurgie assistée, du diagnostic ou encore de la biologie dite à grande échelle (génomique, protéomique, métabolomique).

En retour, cette connaissance des sciences du vivant est source d'inspiration pour la mise au point de solutions énergétiques innovantes.

Les recherches menées par le CEA dans ce domaine scientifique s'appuient sur sa capacité à rassembler un large ensemble de compétences issues des sciences du vivant (imagerie, techniques de marquage et d'analyse, ingénierie et structure des biomolécules, plateformes de génomique et de post-génomique) provenant de la recherche technologique (micro et nanotechnologies) ou encore de la chimie et de la physique (accélérateurs de particules, cryogénie et

détecteurs associés) pour développer les technologies pour les domaines de la santé, de l'environnement et des biotechnologies.

Elles visent aussi à évaluer l'impact sur l'homme et sur son environnement des activités en matière d'énergie nucléaire ou renouvelable, ou encore de certaines substances utilisées par les grands procédés industriels, ce qui nécessite, notamment, de caractériser aux différents niveaux d'organisation de la matière vivante les éléments de la réponse à l'exposition aux rayonnements, aux toxiques chimiques et aux nanoparticules.

Dans le domaine de l'imagerie médicale, le CEA apporte une réponse opérationnelle, par le biais de technologies clefs, aux grands enjeux de santé publique que sont les maladies neuro-dégénératives, le cancer, les pathologies cardiovasculaires ou les mala-

dies émergentes. Il a d'ores et déjà fait la preuve de son efficacité dans le domaine du diagnostic des neuropathies, de la vaccination ou de la biothérapie des désordres génétiques hématologiques.

Ces recherches s'articulent autour de quatre plateformes d'imagerie (SHFJ, NeuroSpin, MIRCen et Cycéron) uniques en France dans leur double mission de développement scientifique et technologique en imagerie médicale et d'offre de services à la communauté scientifique et médicale. Le CEA contribue à la structuration des actions autour des neurosciences et à la pérennisation de l'interaction fructueuse entre les communautés scientifiques de la physique et de la médecine, en particulier en réalisant dans le cadre du projet ISEULT un aimant de 11,7 Tesla destiné à l'examen IRM du corps humain en entier, ce qui sera une première mondiale. Ce projet qui est le fruit d'une coopération exemplaire entre les différentes composantes du CEA permet de mettre au service des préoccupations de santé du public des technologies qu'il a développées à d'autres fins.

Science et Défense

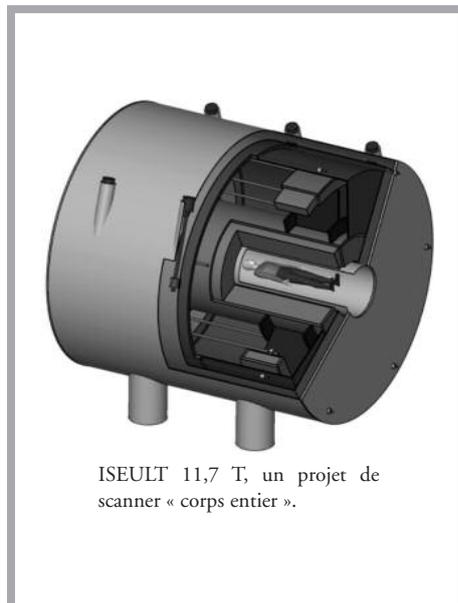
La signature du traité d'interdiction complète des essais nucléaires en 1996 et sa ratification par la France en 1998 ont profondément modifié l'approche du CEA pour assurer la pérennisation des outils de la dissuasion nucléaire française. Le lancement par la France et les Etats-Unis d'un programme de simulation du fonctionnement des armes nucléaires se traduit par un recours au calcul scientifique intensif et par le développement de nouvelles plateformes expérimentales destinées à collecter les données nécessaires

à leur modélisation, dont la plus impressionnante, de par sa taille et sa complexité, est le Laser Mégajoule. Les développements scientifiques et techniques pour la Défense nationale se basent sur les acquis du monde civil et, en poussant certaines technologies jusqu'à leurs limites, ils créent des opportunités dans le domaine des recherches dites duales (optique, électronique, matériaux, énergie, procédés manufacturiers,...).

Lasers et fusion

La recherche sur l'obtention de la fusion thermonucléaire par confinement inertiel (FCI) a débuté dans les années 1960. Cette recherche était menée essentiellement par les organismes destinés à concevoir les armes nucléaires, que ce soit en France (au CEA), aux Etats-Unis et en URSS. Afin de mener à bien ces recherches, ces trois pays ont développé des lasers de très forte énergie afin de comprimer des billes contenant un mélange de deutérium et de tritium ($^2\text{H}/^3\text{H}$) et d'initier ainsi un plasma dans des conditions de température et de pression aboutissant à la fusion nucléaire. En France, on peut citer deux installations qui ont contribué à cette recherche : le laser PHEBUS, dans les années 1990 (CEA), et le laser LULI2000 (CEA-CNRS-Ecole Polytechnique). Suite à l'annonce, au début des années 2000, de la construction de la NIF (*National Ignition Facility*) aux Etats-Unis, sur le site du Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), et du Laser Mégajoule (LMJ), en France, sur le site CESTA du CEA/DAM, la communauté FCI s'est structurée autour de deux pôles :

- un pôle, autour de la NIF, avec le projet LIFE (*Laser Inertial Fusion Energy*) ;



ISEULT 11,7 T, un projet de scanner « corps entier ».

Le centre de neuro-imagerie en champ intense NeuroSpin est une infrastructure de recherche majeure dédiée à l'étude tant des maladies neurologiques (Alzheimer) que des affections psychiatriques (dépression ou schizophrénie). Fort de compétences en physique et en technologie des grands accélérateurs, le CEA a construit une installation à la pointe de l'état de l'art visant prochainement le record d'une intensité magnétique de 11,7 teslas et exploitant la résonance magnétique nucléaire (RMN) pour fournir une imagerie du cerveau des plus précises.

L'imagerie neuro-fonctionnelle couple des informations anatomiques et des informations fonctionnelles pour mieux comprendre le fonctionnement du cerveau. NeuroSpin permettra de voir des amas de milliers de neurones (au lieu de millions de neurones aujourd'hui) avec une finesse d'un dixième de millimètre, à la cadence d'une image par dixième de seconde, ce qui représente une résolution spatiale et temporelle multipliée par dix, par rapport à celle des instruments actuels.



Photo 1 : LMJ Site



Photo 2 : LMJ Cible

- un second pôle, en Europe, avec le projet HiPER (*High Power Laser Energy Research Facility*) autour du LMJ et de sa composante PETAL (*Pétawatt Aquitaine Laser*).

À ces deux pôles qui fédèrent une recherche fondamentale civile autour de la FCI à partir d'instruments construits pour la garantie des armes nucléaires, il convient d'ajouter le pôle de recherche civile du Japon sur la FCI par allumage rapide à l'aide d'un laser pétawatt, au laboratoire ILE (à Osaka). Enfin, la Russie et la Chine projettent d'ouvrir des installations lasers de grandes dimensions pour la garantie de leurs armes nucléaires, et développer la recherche en matière d'applications dans le domaine civil.

La simulation

L'arrêt des essais nucléaires a conduit le CEA à recourir, en ce qui concerne la France, aux méthodes de simulation pour la conception et la garantie de ces armes (énergie, sûreté).

Le CEA a concentré ses efforts sur les architectures massivement parallèles et, en partenariat avec l'entreprise Bull, il a œuvré dans un objectif d'indépendance de la France (et, au-delà, de l'Europe) dans le domaine du calcul intensif. Parallèlement aux déve-

loppements opérés dans le domaine de la Défense nationale, la France, en créant le GENCI (Grand Equipement National pour le Calcul Intensif), en 2007, a su stimuler l'introduction du calcul intensif dans le domaine civil et coordonner la mise en œuvre d'un plan stratégique d'équipement des trois centres nationaux de calcul intensif pour la recherche civile (l'IDRIS du CNRS, le CCRT du CEA et le CINES des universités).

De même, depuis 2007, la participation de la France au projet européen PRACE visant à équiper l'Europe de moyens de calcul du meilleur niveau mondial et l'installation, à Bruyères-le-Châtel, du supercalculateur Curie, ont permis à la France de se doter d'une puissance de calcul haute performance pétaflopique [Ndlr : à un million de milliards d'opérations à virgule flottante par seconde - *Floating-point Operations Per Second* (FLOPS)] et de figurer ainsi à trois reprises dans le Top 10 mondial en 2011.

Ces moyens de calcul sont aujourd'hui indispensables à la simulation de certains problèmes clés du domaine de l'énergie, tels que l'évolution des matériaux soumis à l'irradiation dans des conditions extrêmes (comme ceux utilisés dans le nucléaire), mais aussi pour mieux maîtriser les phénomènes liés au vieillissement (dans le domaine du photovoltaïque, notamment).

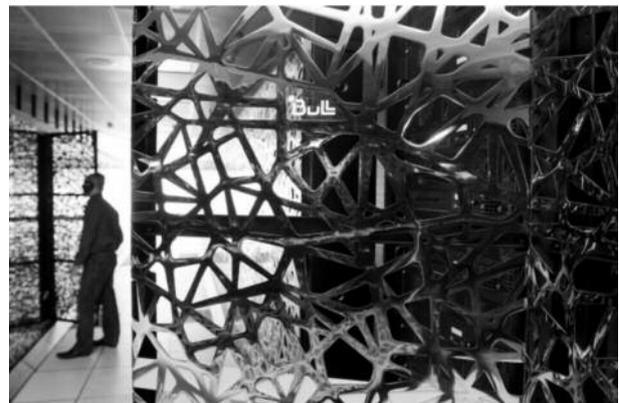


Photo 3 : TERA 100



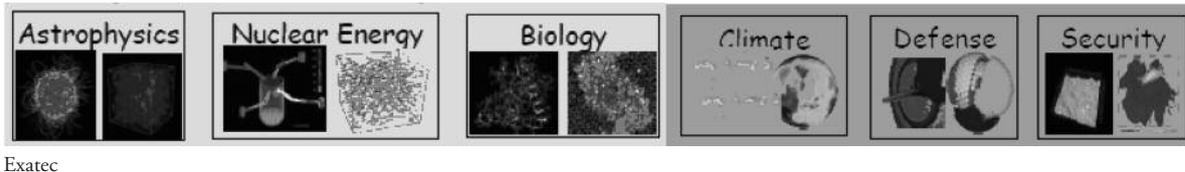
Photo 4 : TGCC Vue extérieur

L'apport des sciences aux questions sociétales que le CEA endosse est replacé dans le contexte de l'évolution de la problématique de l'énergie, que nous abordons dans la seconde partie de cet article.

Ex@tec

Le laboratoire commun Ex@tec, qui réunit le CEA, l'Université de Versailles Saint-Quentin, la société GENCI et INTEL, associe des développeurs de composants matériels et logiciels, des architectes et des utilisateurs, autour de l'objectif d'ouvrir la porte à la réalisation de machines d'une puissance exaflopique.

L'activité de ce laboratoire inclut l'exploration des défis liés à l'intégration de systèmes multi-pétaflopiques, l'optimisation des performances logicielles et une collaboration avec les développeurs et les utilisateurs de grands systèmes orientée vers l'optimisation des applications. L'énergie, la sismologie, la dynamique des fluides et la santé font partie des secteurs retenus pour cette collaboration. L'émergence de la classe Exascale (l'exaflops est mille fois plus puissant que le pétaflops) permettra la résolution de problèmes complexes, impossibles à traiter actuellement dans un laps de temps raisonnable. En santé, il deviendra possible de proposer un traitement individualisé à un patient grâce au calcul de son génome.

**L'AVENIR DES ÉNERGIES**

Le nucléaire, une réponse durable au besoin de disposer d'une énergie de base sans carbone

Aujourd'hui, la France présente la particularité de produire son énergie électrique (puissance moyenne annuelle de 60 GW) avec des émissions de gaz à effet de serre (GES) très limitées, grâce à l'apport largement majoritaire du nucléaire (~ 78 %) et à l'apport complémentaire des sources d'énergie renouvelable : hydraulique, éolien, ... (~ 12 %). Les énergies fossiles (~ 10 %) n'interviennent que pendant les périodes de pointe (la puissance instantanée demandée pouvant aller jusqu'à 105 GW). L'adaptation de l'offre à la demande sur le réseau électrique français se fait essentiellement *via* l'hydraulique et les énergies fossiles, y compris grâce aux interconnexions avec nos voisins. Le choix du nucléaire a été assumé en France par l'opinion publique et par les différents gouvernements successifs au vu des avantages que notre pays et chacun de ses habitants pouvaient en retirer en termes de coût et de disponibilité et des moyens mis en place pour prévenir les accidents et en maîtriser les risques. Sans cette source d'énergie, force est de constater que nous devrions importer plus de 92 % de notre consommation primaire d'énergie. Même avec le nucléaire, nous sommes encore dépendants à hauteur de 50 % des importations de pétrole et de gaz dont les coûts ne peuvent aller que croissants (triplement en six ans) ; grâce aux choix opérés par le pays, nous bénéficions d'un prix du kWh inférieur d'environ 40 % à la moyenne de celui constaté chez nos voisins européens, tout en émettant un tiers en moins de gaz à effet de serre.

Dans le contexte d'une demande mondiale d'énergie croissante dans laquelle le pétrole, le gaz et le charbon représentent encore aujourd'hui 80 % de la consommation mondiale en énergie primaire malgré leur coût de plus en plus élevé, nous devons diminuer notre dépendance vis-à-vis des pays exportateurs en raison de l'épuisement progressif des réserves mondiales et de la nécessaire limitation des émissions de gaz à effet de serre qui sont associées aux combustibles fossiles. Dans le mix énergétique du XXI^e siècle, le nucléaire peut contribuer durablement à la satisfaction d'une part des besoins en énergie de l'humanité, les innovations en cours de développement (avec les réacteurs à neutrons rapides notamment) garantissant une sécurité d'approvisionnement à l'échelle pluriséculaire. Si l'Allemagne a décidé de cesser de faire appel à un horizon rapproché à l'énergie nucléaire, de nombreux autres pays confirment leur décision de garder une composante nucléaire dans leur mix énergétique, avec des critères de sûreté de plus en plus exigeants. En effet, des standards de sûreté de plus en plus élevés, aussi bien au plan de la conception des installations et des choix de sites que sur celui de la robustesse de la chaîne opérationnelle et décisionnelle, sont, à juste titre, comme l'a illustré l'accident de Fukushima, la condition *sine qua non* de l'acceptation par l'opinion mondiale d'un développement de l'énergie nucléaire. Près d'un an après le grave accident de Fukushima, les décideurs publics, les acteurs du nucléaire et les citoyens sont sensibles à ses conséquences et, dans un débat désormais mondialisé, ils en retirent des enseignements techniques (comme le montre notre encart consacré aux évaluations complémentaires en matière de sûreté et de politique énergétique).

L'utilisation durable de l'énergie nucléaire nécessite la confiance de la population dans la robustesse des dispositifs de sûreté mis en œuvre. La sûreté nucléaire

Les évaluations complémentaires de sûreté, après Fukushima

En réaction aux événements de Fukushima, le Premier ministre français, M. François Fillon, demandait, le 23 mars 2011, une inspection de toutes les centrales nucléaires françaises afin de s'assurer que celles-ci étaient préparées à demeurer sûres y compris face à des événements naturels extrêmes des plus improbables.

Dans le même temps, le Conseil de l'Union européenne déclarait que « la sûreté de toutes les centrales nucléaires de l'Union européenne devrait être réexaminée sur la base d'une évaluation globale et transparente des risques (*stress tests*) ».

Pour apporter une réponse à la demande du Conseil dans les meilleurs délais, les experts de l'ENSREG (*European Nuclear Safety Regulators' Group*) ont travaillé (en associant la Commission européenne) de manière intensive, en tirant pleinement parti des compétences disponibles, notamment de celles de l'association WENRA (*Western European Nuclear Regulators' Association*), pour déterminer la définition technique de ces tests dans une approche homogène à l'échelle de l'Europe.

L'accord définitif du 25 mai 2011 entre les autorités nationales de sûreté nucléaire des pays membres de l'Union européenne et la Commission européenne sur le cahier des charges des « tests de résistance » de ces centrales a fixé les grandes étapes du processus.

Ces tests, qui consistent en une réévaluation ciblée des marges de sûreté des centrales nucléaires à la lumière des événements qui ont frappé le Japon, concernent trois thèmes : les agressions naturelles externes, la perte des fonctions de sûreté (source froide, électricité) et la gestion d'un accident sévère.

Enfin, le 31 décembre 2011, chaque État membre concerné remettait son rapport national définitif au Conseil européen.

L'étape actuelle, qui a débuté le 15 janvier 2011 et qui s'achèvera en juin 2012, consiste en une « revue par les pairs » des rapports nationaux définitifs.

En France, dans le cadre de ces procédures, l'ASN a, dès le 5 mai 2011, demandé aux exploitants français d'engager des évaluations complémentaires de sûreté (ECS) qui soient cohérentes avec le cahier des charges européen approuvé par l'ENSREG. La France a mené ces tests sur l'ensemble de ses installations : 58 réacteurs en exploitation, 1 réacteur en construction et 21 autres installations jugées prioritaires. Outre les inspecteurs de l'ASN et les experts de l'IRSN, 47 experts étrangers ont participé aux inspections dans notre pays, à Chooz, à Gravelines, à Cattenom et à Fessenheim.

Le 3 janvier 2012, l'ASN rendait public son rapport final d'analyse des ECS (6) en le remettant au Premier ministre, indiquant que si des travaux complémentaires ou des organisations nouvelles étaient recommandées, rien ne justifiait l'arrêt définitif d'une seule installation nucléaire en France.

repose sur une conception robuste des installations désormais soumises, au plan technique, à une réévaluation pour une meilleure prise en compte de l'occurrence simultanée d'événements naturels même hautement improbables. Elle repose aussi sur une organisation adaptée avec des personnels bien formés, entraînés et préparés pour faire face aux situations de crises les plus aiguës. Le partage de l'information et le débat avec le public sont également des composantes clés.

Partout dans le monde, la sûreté nucléaire connaît un « après-Fukushima ». Les contrôles de sûreté réalisés par une autorité indépendante des enjeux économiques autant que les recherches pour renforcer la sûreté conditionnent son avenir. Les États exploitant l'énergie nucléaire progressent vers une concertation renforcée afin de réaliser une harmonisation des standards de sûreté de leurs installations. À cette fin, la pratique de revues de sûreté à l'échelle régionale pourrait être renforcée, par la présence de membres d'autorités de sûreté nucléaires étrangères et d'experts internationaux.

Les nouvelles technologies de l'énergie pour une sortie du « tout-pétrole »

Pour nous permettre d'atteindre les objectifs dit des « *trois fois vingt* » du paquet climat de l'Union européenne (- 20 % d'émission de GES, une amélioration de 20 % de l'efficacité énergétique par rapport à 1990 et une contribution à hauteur de 20 % des énergies renouvelables aux mix énergétiques), le CEA mène des recherches suivant les trois axes d'une stratégie intégrée : la production durable d'énergie sans émission de gaz à effet de serre, avec les énergies nucléaire, solaire et marine, les technologies de stockage de l'énergie électrique et thermique et de fonctionnement optimisé du réseau (*via* l'hydrogène et les piles à combustible, les batteries, les biocarburants et l'intelligence des réseaux) et l'efficacité énergétique avec

(6) <http://www.asn.fr/index.php/S-informer/Publications/Rapports-d-expertise/Evaluations-complementaires-de-surete/Rapport-de-l-ASN-sur-les-evaluations-complementaires-de-surete-ECS>

l'optimisation des modes de consommation (bâtiments, transports, technologies de l'information et de la communication).

Les énergies renouvelables solaire, éolienne, marine et géothermique connectées à des réseaux de distribution intelligents viendront compléter la production de base, d'énergie nucléaire. Le stockage de l'électricité par voie directe (grâce à des batteries), ou par voie indirecte (*via* l'hydrogène et les biocarburants de deuxième génération) permettra d'ajuster, à tout instant, l'offre à la demande.

Nous sommes convaincus du fort potentiel des nouvelles technologies de l'énergie, qui se positionneront à terme comme une alternative crédible aux énergies fossiles. Leur développement sur le marché national permettra de diminuer la dépendance de la France au pétrole et au gaz naturel tout en abaissant les émissions de gaz à effet de serre. Décentralisées et intermittentes, consommées près de leur lieu de production, les énergies renouvelables cohabiteront avec l'énergie nucléaire qui, grâce à ses caractéristiques (fonctionnement stable et prévisible sur de longues périodes, puissance), assurera une production régulière, dite de base, pouvant être transportée sur de longues distances. Ainsi, loin de voir dans les énergies renouvelables des concurrentes de l'énergie nucléaire, le CEA affiche leur montée en puissance comme un objectif majeur de complémentarité avantageuse pour tous.

Au niveau national, l'Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Energie (ANCRE), que le CEA a contribué à fonder avec le CNRS, la Conférence des Présidents d'Universités et l'IFP-Energies Nouvelles, incarne cette volonté commune qu'ont les acteurs de mener les recherches nécessaires à la construction d'un bouquet énergétique mieux adapté à l'évolution de nos besoins. Par-delà les engagements dit des *trois fois vingt* fixés dans le cadre de l'*European Energy Research Alliance* (EERA), que nous avons mentionnés plus haut, la France se mobilise autour de l'objectif de son indépendance énergétique quasi complète à l'horizon 2040-2050.

Pour les transports, la France reste très dépendante des énergies fossiles. Il reste donc à développer à grande échelle des technologies faisant appel à de nouvelles sources, de nouveaux vecteurs et de nouveaux moyens de stockage, ainsi qu'à une plus grande intelligence dans le couplage de ces techniques.

Le stockage d'énergie est primordial pour apporter de la flexibilité et de la fiabilité compte tenu de l'intégration de plus en plus grande de différentes énergies alternatives, qui, pour la plupart, sont intermittentes. Il concerne différentes gammes de puissance et de durées de restitution de l'énergie qu'il permet d'emmagasiner. Ce stockage ne peut se concevoir sans parler du vecteur de transport de l'énergie. On retrouve ici les différents vecteurs fossiles (pétrole, gaz et biocarburants) qui sont intrinsèquement stockables, mais aussi l'électricité, l'hydrogène, la chaleur ou le froid. La conversion d'énergie entre différents vecteurs (chaleur, électricité, hydrogène, hydrocarbures de synthèse,...) est essentielle pour adapter l'énergie produite aux différents besoins rencontrés (l'habitat, les transports, l'industrie, l'agriculture,...). C'est un élément de flexibilité indispensable pour optimiser l'utilisation des différents moyens de production et de stockage de l'énergie.

Le réseau électrique actuel n'est pas adapté aux évolutions à moyen terme des pratiques de consommation et de production énergétiques. Les chercheurs du CEA travaillent à la conception du réseau énergétique dit intelligent. Aujourd'hui très centralisé, le réseau électrique national dépend d'un nombre d'acteurs limité, on peut donc facilement anticiper son état et en assurer une relative stabilité. Demain, le réseau électrique sera composé de millions d'acteurs (consommateurs et producteurs) au comportement peu prévisible. Une optimisation fine de son fonctionnement ne sera possible qu'au prix d'un couplage important aux techniques de l'information. Bien sûr, la sûreté des systèmes d'information et de contrôle des systèmes énergétiques deviendra alors un enjeu majeur, dans ce nouveau contexte d'interdépendance

L'efficacité énergétique des bâtiments

L'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments est un enjeu majeur, en particulier pour réduire la dépendance énergétique de la France vis-à-vis de l'extérieur lors de périodes de froid ou de chaleur intenses. En partenariat avec le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), le CEA développe une plateforme logicielle ouverte aux différents acteurs du bâtiment, qui permettra de garantir l'efficacité énergétique à toutes les étapes : conception, construction, vie et démolition du bâtiment. Cette plateforme intégrera également une application pour le diagnostic thermique et la rénovation de bâtiments anciens au moindre coût.

Cette plateforme est située à Chambéry (Institut National de l'Énergie Solaire).

entre des réseaux de plus en plus complexes : électricité, communication et informatique ; cela constitue aussi un axe de recherche pour le CEA.

Comme nous l'avons mis en évidence dans la première partie de cet article, un des atouts du CEA est sa capacité à mobiliser en synergie des équipes de recherche fondamentale et des équipes de recherche technologique en vue d'un couplage amont/aval efficace nécessaire à l'introduction de véritables ruptures technologiques. Ses recherches sur les énergies renouvelables se développent grâce à la complémentarité entre les domaines d'expertise des différents pôles du CEA et en étroite adéquation avec la demande des industriels. Cela lui permet de développer des technologies innovantes adaptées à un domaine industriel dans lequel il existe de fortes contraintes (en matière de coûts, d'approvisionnement en matériaux, d'environnements d'utilisation, de capacités industrielles). À titre d'illustration, nous développons trois exemples de ces recherches, dans les encadrés ci-après.

CONCLUSION

La maîtrise de grands projets de recherche explorant les frontières de la connaissance et ses applications aux enjeux sociétaux, avec un positionnement équilibré entre recherche fondamentale et innovation, est la marque du CEA. Elle lui permet d'être performant, dans la durée, en tant qu'acteur majeur de la recherche technologique mondiale (7).

Cela est tout particulièrement vrai dans le domaine de l'énergie, où le CEA a développé une stratégie de recherche intégrée, autour du nucléaire et des énergies renouvelables, de l'adaptation entre l'offre et la demande d'énergie et des nouvelles applications de l'électricité aux transports et au bâtiment, dans une logique d'économie des ressources et d'efficacité énergétique.

(7) En 2011, le CEA a déposé 655 brevets. Il est le premier organisme public de recherche à être précédé uniquement par des industriels dans le classement mondial des brevets PCT (*Patent Common Treaty*).

L'énergie solaire

La stratégie retenue par le CEA dans le domaine du photovoltaïque et du solaire thermique à concentration consiste à favoriser l'innovation dans ces deux domaines autour des matériaux et de leur intégration dans des composants et/ou systèmes, et par des plateformes technologiques et/ou des démonstrateurs.

- Matériaux innovants. Le CEA s'appuie sur ses recherches fondamentales dans le domaine des nanotechnologies et des nanosciences pour dépasser les limites actuelles des cellules photovoltaïques et atteindre des rendements de 30 % et plus.

- Composants « cœurs » et systèmes associés. Le CEA tire profit des résultats de sa recherche amont pour l'élaboration de composants innovants. Ceux-ci seront intégrés dans des systèmes électriques complets, grâce à un partenariat très fort avec les acteurs industriels (EDF-PV-Alliance, Clipsol, Giordano,...).

- Les plateformes technologiques et les démonstrateurs. En réponse directe aux recommandations du Grenelle de l'Environnement, l'INES permet d'intégrer l'innovation au cœur des procédés industriels afin d'accélérer le transfert industriel.

Un des exemples au niveau des matériaux de l'apport de la recherche fondamentale à l'amélioration des procédés industriels est le procédé PHOTOSIL, qui est basé sur le silicium métallurgique. Cette technologie mise au point par le CEA à partir d'une innovation issue du SIMaP (CNRS/INP) a permis d'obtenir des cellules solaires à partir de silicium métallurgique à plus de 16 % de rendement, un résultat qui le situe au meilleur niveau mondial.



cea



La plateforme de R&D Solaire et de stockage de l'énergie MYRTE

Le 9 janvier 2012, le CEA, le CNRS, l'Université de Corse et la société HELION ont inauguré à Ajaccio, au Centre de Recherches scientifiques Georges Peri, la plateforme de recherche et développement solaire et stockage de l'énergie MYRTE.

Cette plateforme a pour objectif d'expérimenter et de rendre possible l'intégration massive des énergies renouvelables dans le bouquet énergétique de la Corse sur la base d'un couplage entre les énergies renouvelables et l'hydrogène.

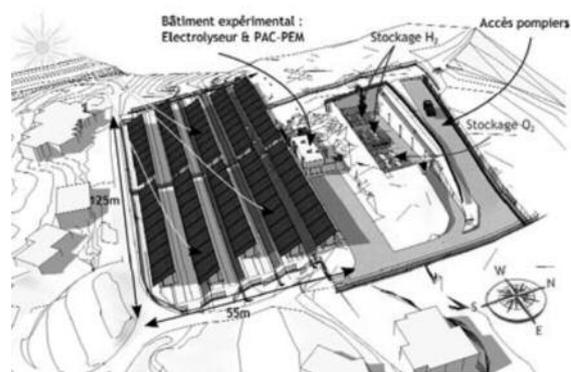
Comment convertir l'énergie solaire, qui est soumise à des rendements aléatoires, en une source d'électricité disponible à tout moment ? Après cinq années de recherches, la plateforme MYRTE a vu le jour à Ajaccio. Elle est constituée d'une centrale photovoltaïque d'une puissance installée de 560 kilowatts crêtes couvrant 3 700 m² et reliée directement à une chaîne hydrogène utilisée comme moyen de stockage.

Le but de ce démonstrateur est de stocker l'énergie photovoltaïque *via* un électrolyseur qui convertit l'électricité en hydrogène et oxygène pendant les heures de faible consommation. Cette énergie est ensuite restituée *via* une pile à combustible qui, en recombinaison l'hydrogène et l'oxygène, produit de l'électricité qui est alors disponible sur le réseau pendant les heures de forte consommation, c'est-à-dire le soir, lorsque les panneaux photovoltaïques ne produisent plus d'électricité.

L'hydrogène ainsi produit, puis stocké, permet de gérer les fluctuations de la puissance des énergies renouvelables intermittentes injectées dans le réseau. Le CEA apporte ici son expertise scientifique au développement de la plateforme par des études scientifiques portant sur la production photovoltaïque et le stockage de l'hydrogène.



Myrte 1. et Myrte 2.



Myrte 3.

Les biocarburants de deuxième génération : le projet SYNDIESE

SYNDIESE est un projet de plateforme intégrée de production de biocarburants de deuxième génération porté par le CEA faisant le lien entre la recherche amont et la pré-industrialisation. Les équipes de recherche du CEA apportent leur savoir-faire au développement de nouvelles méthodes susceptibles d'augmenter le rendement de la conversion de biomasse en hydrocarbures. Une amélioration du rendement de 30 %, grâce à l'ajout d'hydrogène dans le procédé a été démontrée en laboratoire. C'est une première mondiale. D'autre part, les chercheurs du CEA travailleront sur la maîtrise de l'intégration des différentes étapes technologiques pour de futurs procédés industriels. Le démonstrateur pré-industriel SYNDIESE, situé à Bure-Saudron (Haute-Marne), permettra ainsi l'optimisation économique du procédé et de la filière, afin de transformer une invention en une réalité industrielle.

La région de Bure-Saudron dispose d'une importante ressource forestière, que le projet SYNDIESE permettra de valoriser en accord avec les acteurs locaux. Le projet SYNDIESE consistera donc à utiliser des résidus de l'exploitation des forêts (les rémanents forestiers) pour fabriquer du biodiesel ou du bio-kérosène.

Cette usine prototype sera capable de produire annuellement 23 000 tonnes de biocarburant à partir de 75 000 tonnes de biomasse. Les technologies développées ici pourront à terme contribuer à l'indépendance énergétique nationale dans le domaine des transports (routier, aérien...) en se substituant à l'utilisation du pétrole.

Les conclusions du rapport Energies 2050 sur les perspectives du nucléaire en France

DES FACTEURS
STRUCTURANTS
POUR L'AVENIR

Cet article présente les conclusions et recommandations de la Commission chargée par M. Eric Besson, le ministre chargé de l'Industrie, de l'Energie et de l'Economie numérique, d'analyser les différents scénarios possibles pour la politique énergétique de la France à l'horizon 2030 et au-delà.

En matière d'offre d'électricité, cette Commission a travaillé sur quatre scénarios d'évolution : a) la prolongation de l'exploitation du parc nucléaire actuel, b) l'accélération du passage à la troisième génération de réacteurs nucléaires, voire à la quatrième génération, c) une réduction progressive du nucléaire et, enfin, d) une sortie complète du nucléaire.

Par **Jacques PERCEBOIS*** et **Claude MANDIL****

LE CONTEXTE

Le ministre chargé de l'Industrie, de l'Energie et de l'Economie numérique, Monsieur Eric Besson, a demandé le 19 octobre 2011 à Jacques Percebois, professeur à l'Université de Montpellier 1, de présider une commission pluraliste et ouverte, avec comme Vice-président, Claude Mandil, ancien directeur exécutif de l'Agence internationale de l'énergie et Vice-président du groupe consultatif « Feuille de route énergie 2050 » auprès de la Commission européenne, afin de mener une analyse des différents scénarios possibles de politique énergétique pour la France à l'horizon 2030 et 2050.

Dans ce cadre, le ministre a souhaité en particulier que soient examinées quatre options d'évolution de

l'offre d'électricité en France : a) la prolongation de l'exploitation du parc nucléaire actuel, b) l'accélération du passage à la troisième génération de réacteurs nucléaires, voire à la quatrième génération, c) une réduction progressive du nucléaire et, enfin, d) une sortie complète du nucléaire.

Cette analyse a pour objet d'éclairer la programmation pluriannuelle des investissements que le ministre chargé de l'Energie présentera devant le Parlement en 2013 et qui a pour objectif principal d'identifier les investissements souhaitables dans le secteur de l'énergie au regard de la sécurité d'approvisionnement.

* Président de la Commission « Energies 2050 ».

** Vice-président de la Commission « Energies 2050 ».

Malgré l'étendue et la complexité des sujets à traiter, le délai fixé à la Commission était particulièrement court : la lettre de mission demandait effectivement que le rapport final soit rendu au ministre pour la fin janvier 2012. Il le fut, le 13 février. Composée de plus de cinquante membres, cette commission a été installée par le ministre le jeudi 20 octobre 2011 et s'est réunie en séance plénière à huit reprises.

Pour mener à bien son travail, le Président s'est entouré d'une équipe de rapporteurs co-pilotée par la direction générale de l'Energie et du Climat (DGEC – Ministère chargé de l'Ecologie) et par le Centre d'analyse stratégique (CAS) et s'appuyant sur l'IFP-Energies Nouvelles, le CEA, ainsi que sur la direction générale du Trésor. Les rapporteurs généraux étaient Richard Lavergne (DGEC) et Dominique Auverlot (CAS).

Dans ce laps de temps, la Commission a procédé en réunion plénière à :

- l'examen des principaux scénarios de prospective énergétique internationaux, européens ou français aux horizons 2030 et 2050 parus jusqu'à la fin de l'année 2011, ce qui a permis d'inclure la feuille de route Energie 2050 publiée par la Commission européenne le 16 décembre 2011,
- une analyse des politiques énergétiques de l'Allemagne et du Royaume-Uni,
- l'analyse des quatre options précitées d'évolution de l'offre électrique,
- l'audition des membres de la commission et de personnes extérieures qui ont bien voulu faire part de leur vision ou de leurs propositions sur l'avenir de la politique énergétique française à l'horizon 2050.

Par ailleurs, les rapporteurs ont mené de leur côté un certain nombre d'auditions particulières qui ont porté sur des thèmes transverses ; les travaux qui en ont résulté figurent soit dans le corps du rapport, soit en annexe (le rapport est disponible sur Internet à l'adresse suivante : http://www.strategie.gouv.fr/system/files/rapport-energies_0.pdf).

Au total, plus de quatre-vingts organismes ont ainsi été entendus en commission plénière ou lors d'entretiens particuliers avec les personnalités qualifiées et les rapporteurs.

De plus, la Commission a pu prendre connaissance des évaluations complémentaires de sûreté (ECS) menées à la suite de l'accident nucléaire de Fukushima par l'Autorité de sûreté nucléaire et rendues publiques le 3 janvier 2012, de l'avancement des travaux de la Cour des comptes sur l'audit financier de la filière nucléaire (grâce à un exposé de sa rapporteure générale) ainsi que d'une première présentation des travaux du Centre d'analyse stratégique sur les perspectives technologiques du développement durable.

Enfin, la Commission a bénéficié d'une présentation du député Claude Birraux, Président de l'Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, sur les conclusions de la mission qu'il a menée sur l'avenir de la filière nucléaire.

Le Rapport « Energies 2050 » analyse plus particulièrement la situation à l'horizon 2030, car, pour 2050, les anticipations sont difficiles à faire. Des ruptures technologiques sont plus que probables et la plupart des scénarios étudiés se limitent en fait à l'horizon 2030. Ce rapport se décompose en quatre chapitres :

– le premier présente la problématique énergétique à trois échelles : mondiale tout d'abord, grâce notamment aux travaux de l'Agence internationale de l'énergie, européenne ensuite, la feuille de route Energie de la Commission européenne qui est parue fin décembre 2011 y est analysée. Il examine enfin les stratégies que développent deux grands pays européens, le Royaume-Uni et l'Allemagne, pour répondre aux enjeux climatiques, aux enjeux de sécurité d'approvisionnement et de compétitivité dans ce contexte d'incertitudes à long terme. Ces stratégies sont contrastées : l'Allemagne a décidé de sortir du nucléaire, tandis que le Royaume-Uni s'apprête, au contraire, à construire de nouvelles centrales nucléaires ;

– le deuxième analyse le système énergétique français actuel et les principaux enjeux auxquels celui-ci va être confronté dans les années qui viennent sous l'effet de déterminants, contraintes et incertitudes certes internationaux, mais aussi, parfois, propres à la France. Cet examen permet également de mettre en évidence les principaux impacts du mix énergétique sur les équilibres macroéconomiques (emploi, balance commerciale, indépendance énergétique, tissu industriel) ;

– le troisième recense tout d'abord les différents scénarios de prospective énergétique publiés relatifs à la France, avant de les comparer d'abord du point de vue de l'offre et de la demande, puis par l'éclairage des impacts du mix retenu. Les différents scénarios (huit, au total) sont notamment appréciés en termes d'émissions de CO₂, d'emplois, de coût, de prix de l'énergie et de sécurité des approvisionnements. Cette comparaison ne porte pas sur les scénarios proposés par la Commission européenne dans le cadre de sa Feuille de route Energies 2050 : en effet, si celle-ci donne une vision du devenir énergétique européen, les chiffres relatifs aux évolutions de chaque Etat membre ne sont pas disponibles ;

– le dernier chapitre analyse tout d'abord la pertinence des représentations du futur ainsi mises sous forme de scénarios et les limites actuelles de l'analyse. Il souligne ensuite les forces et les faiblesses des systèmes énergétiques étudiés, à travers leurs représentations sous la forme de scénarios, ainsi que l'importance d'un certain nombre d'enjeux qui doivent être traités quel que soit le mix énergétique retenu. Enfin, dans une dernière partie, il est procédé à l'analyse des quatre grandes options envisagées par le ministre : la prolongation de la durée de vie du parc nucléaire actuel, l'accélération du passage à la troisième (voire à la quatrième) génération de réacteurs, la réduction progressive du nucléaire ou la sortie complète du nucléaire.

LES CONCLUSIONS

On peut les résumer comme suit :

Il n'existe ni énergie sans inconvénients ni scénario idéal, pas plus que de trajectoire idéale pour y parvenir. Chaque scénario implique des choix entre différents inconvénients et l'opinion publique doit en être clairement informée. Les analyses partielles ou simplistes, celles qui présentent les avantages en oubliant les inconvénients, devraient être proscrites d'où qu'elles proviennent. Certains scénarios ne sont envisageables qu'au prix de révolutions dans les comportements individuels et sociaux qui ne nous semblent ni crédibles ni souhaitables.

Notre pays n'est pas un isolat énergétique ; il s'approvisionne sur des marchés mondiaux, il participe pleinement à la grande œuvre de progrès et de solidarité qu'est l'Union européenne, ses entreprises se développent et sont en compétition sur les marchés mondiaux, la contrainte climatique est mondiale. Cela ne signifie pas qu'aucune politique autonome ne serait possible, mais que l'on ne peut pas agir comme si l'extérieur était insignifiant. Or, les tendances lourdes de l'évolution du paysage énergétique mondial sont décrites dans les publications récentes de l'AIE, et elles sont souvent très différentes de ce que nous percevons comme nécessaire ou souhaitable : croissance continue de la demande d'énergie tirée par les besoins des économies émergentes, place durablement prépondérante des énergies fossiles et en particulier du charbon, maintien du pétrole comme énergie de choix pour les besoins de transport, développement spectaculaire de la production des hydrocarbures non conventionnels (huile et gaz), part croissante (mais modérée) des énergies renouvelables et du nucléaire, maintien d'une grande partie de l'humanité dans un état de pauvreté énergétique insupportable. Nous ne pouvons pas nier ce contexte, nous devons nous y insérer.

En particulier, la contrainte du changement climatique est gigantesque. D'après l'AIE, les émissions mondiales de gaz à effet de serre créées par la production ou l'utilisation de l'énergie sont d'environ 30 milliards de tonnes par an et elles risquent, même avec les politiques ambitieuses décidées par plusieurs pays, de dépasser 35 milliards de tonnes en 2035, alors que pour avoir des chances raisonnables de respecter l'objectif de Cancun (augmentation de la température moyenne à long terme limitée à 2°C), les émissions ne devraient pas dépasser 20 milliards de tonnes en 2035 et 13 milliards de tonnes en 2050. Il s'agit réellement d'opérer sans délai un changement complet de trajectoire. Cela signifie que tous les outils à notre disposition seront nécessaires. C'est vrai pour l'offre : il faudra plus de renouvelables, plus de nucléaire, encore beaucoup d'énergie fossile et donc de la capture et de la séquestration du dioxyde de carbone, mais c'est tout aussi vrai pour la demande : le

point commun entre tous les scénarios que nous avons examinés est le rôle primordial de la sobriété (réduire la consommation de services énergétiques) et de l'efficacité (réduire la consommation d'énergie pour un même service rendu). Certes, l'Europe, et *a fortiori* notre pays, ne peut pas à elle seule apporter la solution à ce défi et il serait dangereux pour l'économie européenne de vouloir faire cavalier seul, mais, en sens inverse, personne ne comprendrait que notre continent ne fasse pas sa part de l'effort indispensable. Personne ne peut prédire ce que sera le paysage énergétique en 2050. Qu'il suffise de penser à ce que nous aurions écrit, fin 1972, sur des scénarios énergétiques pour les quarante années à suivre, jusqu'en 2012 ! L'incertitude porte sur tous les domaines : elle est technologique, économique, politique, financière, et même démographique. La flexibilité est donc essentielle : une caractéristique indispensable d'un scénario acceptable est la possibilité d'en changer en cours de route pour tenir compte de l'imprévu et, quel que soit le scénario à long terme, nous devons à court terme prendre les décisions de moindre regret, celles qui évitent de fermer prématurément des options qui pourraient ultérieurement se révéler indispensables. Un certain nombre des scénarios étudiés n'entrent pas dans cette catégorie des scénarios de moindre regret : ceux qui se passent d'un effort sur la sobriété et l'efficacité, bien sûr, mais aussi ceux qui font l'impasse sur la R&D en capture et en stockage de carbone (CCS), car nous pourrions en avoir besoin à l'avenir, ou ceux qui comportent la fermeture de centrales nucléaires avant que celles-ci soient exigées par l'Autorité de sûreté nucléaire.

C'est l'occasion de dire ici le parti que nous avons pris sur la question de la sûreté de l'énergie nucléaire : nous avons refusé d'avoir un avis autonome sur le sujet. La France dispose d'une autorité de sûreté nucléaire citée en exemple dans le monde entier pour sa compétence, pour son indépendance et pour sa prudence. Nous considérons donc comme sûre une installation nucléaire dont l'Autorité de sûreté nucléaire a déclaré acceptable le niveau de sûreté. Toute autre position compliquerait le travail de l'ASN et nuirait à son autorité, et donc, *in fine*, à la sûreté nucléaire. En revanche, il serait préoccupant que la démarche de sûreté ne soit pas portée au même niveau que le nôtre dans tous les pays qui ont fait le choix de l'énergie nucléaire et que se développe une sûreté nucléaire à deux vitesses. Nous recommanderons que la France prenne toutes les initiatives utiles pour que cette situation soit évitée en améliorant la gouvernance mondiale de la sûreté.

Le développement de l'énergie éolienne (et dans une moindre mesure celui du photovoltaïque) pose un problème d'intermittence qu'il ne faut pas sous-estimer dès lors que la part de ces énergies dans la production nationale d'électricité devient significative. Une grande attention doit être apportée à toutes les

perspectives de stockage massif de l'énergie et de gestion de la demande, sans passer leur coût sous silence. Mais tant que ces solutions ne seront pas disponibles et compétitives, des centrales au gaz devront assurer la permanence de la production ; le « foisonnement », même à l'échelle de l'Europe, ne permet pas d'exclure une situation d'absence de vent pendant plusieurs jours consécutifs. En tout état de cause, l'effort portant sur les réseaux de transport et de distribution doit être considérable.

Les notions de coût et de financement sont particulièrement importantes pour au moins deux raisons. La première est que tous les scénarios s'accordent sur une perspective de hausse durable des coûts énergétiques : demande croissante, raréfaction de l'offre à bon marché, coût croissant des équipements et des matières premières, coût de la sûreté et de la protection de l'environnement, nécessité de financer les conséquences de l'intermittence des énergies renouvelables, tous ces facteurs augurent de prix des énergies de plus en plus élevés pour le consommateur final. Raison de plus pour ne pas « en rajouter » en lui faisant supporter des coûts qui auraient pu être évités grâce à des choix énergétiques moins dispendieux. La seconde raison est que presque tous les choix de politique énergétique à notre disposition sont extrêmement capitalistiques : c'est vrai de l'efficacité énergétique, en particulier dans le gisement le plus important, celui de l'habitat existant, ça l'est également de l'électricité renouvelable, et encore plus si l'on prend en compte la nécessité d'installations de « *back-up* » pour compenser l'intermittence de l'éolien et, dans une moindre mesure, du photovoltaïque, c'est également vrai des nouvelles centrales nucléaires, ainsi que de la capture et de la séquestration du CO₂, c'est encore vrai des interconnexions électriques et gazières ; dans tous ces cas, de lourdes dépenses en capital précèdent les revenus ou les atténuations de dépenses. Il ne s'agit pas là d'une constatation nouvelle, mais le contexte financier mondial actuel rend cette situation particulièrement préoccupante et confère un avantage aux rares solutions peu capitalistiques, qui sont la sobriété énergétique (consommer moins de services énergétiques), les cycles combinés à gaz et, naturellement, la prolongation de la durée de vie des centrales nucléaires existantes aussi longtemps que l'Autorité de sûreté nucléaire le juge possible. À cet égard, même si l'on ne connaît pas encore le coût exact des mesures imposées par l'ASN à EDF pour autoriser la prolongation de la durée de vie des centrales en incluant les travaux dits « *post-Fukushima* », il semble bien que ces coûts doivent rester très inférieurs à 1 000 €/kW installé, c'est-à-dire de l'ordre de la moitié de ceux de l'éolien *off-shore* par MW installé, donc de l'ordre du sixième par MWh produit. La contrainte économique et financière impose donc de recourir en priorité aux solutions les moins coûteuses. Encore faut-il en avoir évalué les coûts ; en effet, certains des scénarios étudiés ont refu-

sé de considérer le coût de leurs propositions, nous pensons que cette attitude n'est pas responsable.

Lié à la question du financement, il y a le déficit, particulièrement préoccupant, de notre balance commerciale, qui est à peu près équivalent à celui de la balance énergétique ; même s'il s'agit d'une coïncidence, elle est frappante. Plus que la notion d'indépendance énergétique, qui est de toute façon limitée par la géographie et la géologie et qui n'assure pas la sécurité avec certitude, c'est ce problème qui justifie que l'on apporte une attention particulière, d'une part, à la maîtrise de la demande et, d'autre part, aux énergies dont la production comporte une valeur ajoutée nationale importante. Il s'agit notamment du nucléaire et de certaines énergies renouvelables (hydraulique, biomasse, éolien (à un degré moindre)), mais aussi, faut-il le dire, des hydrocarbures conventionnels ou non, dont les réserves, si elles étaient prouvées et exploitables avec les précautions que l'on sait prendre, apporteraient un soulagement significatif au déséquilibre de nos comptes extérieurs.

L'ampleur des programmes énergétiques à lancer au cours des prochaines années invite à examiner la possibilité de retombées industrielles créatrices d'emplois. Il s'agit en effet d'une perspective très attractive, mais qu'il faut étudier avec sérieux et en évitant les conclusions hâtives et les erreurs de jugement. Trois règles nous paraissent s'imposer, à cet égard : a) on ne crée pas une filière industrielle en la fondant prioritairement sur le marché intérieur (sauf naturellement pour ce qui concerne les activités artisanales d'installation et d'entretien), il faut considérer le marché mondial en prenant en compte les stratégies énergétiques souvent différentes des principaux grands pays mondiaux (à titre d'exemple, il est peu probable que la France connaisse prochainement un fort développement du photovoltaïque ou du captage et du stockage du CO₂ (CSC) sur son territoire, mais, puisque ces technologies sont appelées à un fort développement mondial, il serait absurde de ne pas les considérer si l'industrie française peut y exceller (ce qui est le cas)) ; b) on ne lâche pas la proie pour l'ombre en sacrifiant une filière énergétique française d'excellence : la France est le pays de référence dans le monde dans le domaine nucléaire, il serait irresponsable d'abandonner toute présence sur cette technologie au moment où la Chine et la Russie en deviennent des acteurs importants ; enfin, c) les seuls emplois industriels durables sont ceux qui sont créés par une activité non subventionnée, car, autrement, on détruit ailleurs plus d'emplois que l'on n'en a créés. En d'autres termes, on créera des filières industrielles compétitives non pas par des tarifs de rachat subventionnés, mais par des projets innovants appuyés par des programmes de recherche et de développement associant laboratoires publics et recherche dans les groupes industriels et visant le marché mondial.

Des places sont à prendre ou à maintenir dans le nucléaire, le photovoltaïque, le stockage de l'électricité, les réseaux intelligents, la CCS, l'efficacité énergétique, entre autres.

La France bénéficie, grâce aux décisions passées, d'une énergie à un prix généralement acceptable et en particulier d'une électricité à un prix nettement moins élevé que ses voisins. Mais nous avons déjà souligné que tous les facteurs de coût vont orienter durablement les prix à la hausse. Il est important que les consommateurs subissent, sauf exception, ces hausses sans atténuation. Des prix maintenus artificiellement à un niveau insuffisant sont triplement nocifs : ils impliquent des subventions destructrices d'emplois et incompatibles avec l'état des finances publiques, ils donnent aux consommateurs un signal erroné les dissuadant de pratiquer des économies d'énergie et ils empêchent les opérateurs de dégager l'autofinancement nécessaire à leurs investissements. Cette politique de vérité des prix indispensable pose un problème difficile pour deux catégories de consommateurs : les ménages en situation de précarité et les entreprises « énergie-intensives ». Ces deux catégories doivent bénéficier des atténuations nécessaires adaptées à la réalité de leur situation, mais il serait très regrettable que tous les problèmes, de nature complètement différente, soient traités de la même façon, c'est-à-dire par la gestion administrative des tarifs. Nous avons noté avec intérêt (et non sans une certaine perplexité) que le gouvernement allemand, qui reconnaît les conséquences tarifaires de ses décisions récentes sur le nucléaire, semble décidé à en éviter le surcoût à ses entreprises électro-intensives par une série de moyens (recyclage des certificats ETS, tarification spéciale du transport) dont il serait bon de s'inspirer, sous réserve qu'ils soient compatibles avec le droit communautaire.

Le marché intérieur européen apporte aux économies des pays membres de grands avantages : il accroît la sécurité en permettant la solidarité et donne aux différents acteurs économiques la possibilité d'exercer une liberté fondamentale, celle de choisir leur fournisseur. Il doit donc être défendu contre les attaques qu'il subit. Cela étant dit, il n'y a pas de contradiction dans le fait d'affirmer que, tel que ce marché a été bâti, il ne permet pas de résoudre les problèmes qui se posent aujourd'hui et qui exigent que les États membres et l'Union en tant que telle puissent prendre des décisions politiques sur le mix énergétique et que les investissements nécessaires soient financés. Or, on voit bien que cela n'est pas le cas, aujourd'hui, par exemple pour le financement des interconnexions transfrontières ou pour celui des centrales de « *back up* ». On voit bien, également, que la décision unilatérale prise par l'Allemagne de sortir du nucléaire, quelque légitime qu'elle soit pour un pays souverain, entraîne des conséquences parfois très difficiles à gérer pour ses voisins et pour l'Union prise globalement. Il

faudra donc revoir en profondeur l'architecture du marché intérieur.

LES RECOMMANDATIONS

Le Rapport se termine par quelques recommandations :

Recommandation n°1 : Faire de la sobriété et de l'efficacité énergétique une grande cause nationale ; lancer des appels à propositions afin de mobiliser l'innovation dans le domaine du bâtiment et des transports, en particulier.

Recommandation n°2 : S'interdire toute fermeture administrative d'une centrale nucléaire qui n'aurait pas été décidée par l'exploitant à la suite des injonctions de l'Autorité de sûreté nucléaire.

Recommandation n°3 : Ne pas se fixer aujourd'hui d'objectif de part du nucléaire à quelque horizon que ce soit, mais s'abstenir de compromettre l'avenir et pour cela maintenir une perspective de long terme pour cette industrie en poursuivant le développement de réacteurs de quatrième génération. La prolongation de la durée de vie du parc actuel paraît donc la meilleure solution (à la condition absolue que celle-ci soit autorisée par l'ASN).

Recommandation n°4 : Envisager une initiative dans le domaine de l'harmonisation internationale des règles et des pratiques de sûreté nucléaire afin de les faire converger vers le niveau le plus élevé.

Recommandation n°5 : Pour chaque décision de politique énergétique, évaluer le coût et l'effet sur les finances publiques, sur la balance commerciale, sur les émissions de CO₂ et sur l'emploi, par comparaison avec une décision différente, afin de dégager des priorités.

Recommandation n°6 : Maintenir (voire accroître) l'effort de recherche publique dans le domaine de l'énergie en accordant une priorité absolue aux programmes mis en œuvre conjointement par des laboratoires publics et des entreprises innovantes, grandes ou petites, capables de s'attaquer au marché mondial. Les énergies renouvelables et le stockage de l'énergie devront recevoir une attention toute particulière.

Recommandation n°7 : S'engager courageusement dans une politique de vérité des prix de l'énergie en traitant de façon spécifique et différente le cas de la précarité et celui des industries grosses consommatrices.

Recommandation n°8 : Prendre l'initiative de proposer à nos principaux partenaires européens un réexamen en profondeur des règles du marché intérieur de l'énergie. Celui-ci doit permettre le financement des investissements nécessaires, en particulier de ceux destinés à répondre à la demande d'électricité à la pointe, et il doit assurer la cohérence des décisions prises par les différents acteurs.

Annexe

Analyse des 4 options						
Options/ critères		Coût de l'électricité 2030	Émissions de CO ₂ en 2030	PIB et emplois en 2030	Balance commerciale	Sécurité d'approvision- nement
1. Accélération du passage à la troisième génération		de 60 à 73 €/MWh	20 MtCO ₂ /an	la perte de valeur pourrait atteindre 10 Mds€ par an une fois le parc remplacé, ce qui induirait une perte d'emplois	proche de l'équilibre au périmètre de la production d'électricité	identique à la situation actuelle
2. Prolongation de l'exploitation du parc actuel		52 à 59 €/MWh	20 MtCO ₂ /an	le facteur déterminant est le coût de l'électricité : ce scénario est donc le plus favorable	proche de l'équilibre au périmètre de la production d'électricité	identique à la situation actuelle
3. Réduction progressive du nucléaire		de 69 à 79 €/MWh	plus de 30 MtCO ₂ /an	- 0,6 % du PIB - 100 000 à 150 000 emplois	- 0,15 % des importations - 0,35 % des exportations déficit de 5 à 8 Mds€ par an au périmètre de la production électrique	sources d'approvisionnement diversifiées, mais les importations de combustibles fossiles augmentent
4. Sortie complète du nucléaire	Substitution par les énergies renouvelables	de 92 à 102 €/MWh	30 MtCO ₂ /an	- 0,9 % du PIB - 200 000 emplois	dégradation de 10 Mds€ par an au périmètre de la production électrique	problème de sécurité du système électrique
	Substitution par les énergies fossiles	80 à 89 €/MWh	110 MtCO ₂ /an	+ 0,1 % des importations - 0,65 % des exportations	dégradation de 20 à 30 Mds€ par an au périmètre de la production électrique	dépendance accrue

Le mode de gouvernance envisagé pour la France

L'énergie est un bien essentiel pour le développement. Elle contribue à satisfaire les besoins vitaux et de confort des êtres humains et à soutenir l'activité économique. Elle nous impose aussi des choix difficiles, car il n'existe pas de source d'énergie idéale. Le premier article du Code de l'énergie fixe les quatre objectifs de notre politique énergétique : garantir la sécurité d'approvisionnement, maintenir un prix de l'énergie compétitif, préserver la santé humaine et l'environnement (en particulier en luttant contre l'aggravation du changement climatique) et garantir la cohésion sociale et territoriale en assurant l'accès de tous à l'énergie.

Le nucléaire est l'une des composantes de la politique énergétique de la France. Les pouvoirs publics en encadrent les conditions d'utilisation en ayant le souci de leur amélioration continue au bénéfice des citoyens. C'est l'objectif de la gouvernance en matière de nucléaire.

Par **Charles-Antoine LOUËT*** et **Timothée FUROIS****

Dès l'après-guerre, le nucléaire a fait en France l'objet d'une recherche active qui a conduit à la mise en œuvre d'un programme électronucléaire de grande ampleur entre la fin des années 1970 et les années 1990, dans une perspective d'indépendance énergétique. Il résulte de ces choix historiques que le nucléaire fournit entre 75 et 80 % de l'électricité produite annuellement, et 17 % de l'énergie finale consommée en France.

Ce choix de l'énergie nucléaire permet à la France de disposer, simultanément dans les trois domaines des émissions de gaz à effet de serre, de la compétitivité de l'électricité et de la sécurité de ses approvisionnements énergétiques, de résultats qui se classent parmi les meilleurs en Europe. Ce choix constitue l'un des éléments fondamentaux de notre politique énergie-climat.

Il présente cependant des inconvénients qui lui sont spécifiques, le risque de la survenue d'un accident nucléaire et la production de déchets radioactifs. Ces enjeux considérables de l'énergie nucléaire nécessitent une implication forte des pouvoirs publics. Ils ont donné lieu à des travaux législatifs fondamentaux et à la mise en œuvre de politiques publiques visant à

* Sous-directeur de l'Industrie nucléaire à la direction générale de l'Énergie et du Climat (DGEC) - Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie.

** Adjoint au chef du bureau chargé des Politiques publiques et des Questions de Tutelle des entreprises et des établissements publics, sous-direction de l'Industrie nucléaire à la direction générale de l'Énergie et du Climat (DGEC) - Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie.

assurer un développement de l'énergie nucléaire qui soit cohérent avec les axes de la politique énergétique évoqués plus haut et qui s'inscrive dans le long terme.

GOUVERNANCE ET ENCADREMENT DU RECOURS À L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

La sûreté est la première des priorités

Le choix de recourir à l'énergie nucléaire est indissociable d'une exigence d'absolu en matière de sûreté. La loi du 13 juin 2006 relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire a constitué une étape de progrès : elle a créé l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), autorité indépendante chargée du contrôle de la sûreté des installations nucléaires françaises (les réacteurs d'EDF, mais aussi les usines d'Areva, les laboratoires et les réacteurs expérimentaux du CEA...) et dotée d'un pouvoir de contrôle et de coercition pouvant aller jusqu'à la suspension du fonctionnement d'une installation qui contreviendrait aux exigences de sûreté. Elle a posé les principes de la responsabilité première de l'exploitant, de la transparence et d'une amélioration continue des installations qui renforce les exigences de sûreté au fil du temps.

Le traitement des suites de l'accident de Fukushima donne un aperçu condensé du fonctionnement de notre système de contrôle. L'ASN et son appui technique l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), ont, dès les premiers temps de la crise, mis à disposition des pouvoirs publics, des médias et du public les informations pertinentes et les conclusions de leurs analyses techniques sur la situation japonaise et ses conséquences environnementales. À la demande du Premier ministre, ainsi qu'à celle de la Commission européenne, des évaluations complémentaires de sûreté ont été conduites. Leur cahier des charges a été soumis à l'avis du Haut comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire (HCTISN). Ces évaluations ont consisté en un réexamen ciblé des marges de sûreté des installations nucléaires à la lumière des événements qui se sont produits à Fukushima, à savoir des phénomènes naturels extrêmes (séisme, inondation et leur cumul) mettant à l'épreuve les fonctions de sûreté des installations et conduisant à un accident grave. Les travaux des exploitants, de l'IRSN, ceux du groupe permanent d'experts, ainsi que le rapport de l'ASN ont tous été publiés après une élaboration associant les partenaires européens. Lors de la publication de son rapport, début janvier, l'ASN a indiqué que « les installations examinées présentent un niveau de sûreté suffisant pour qu'elle ne demande l'arrêt immédiat d'aucune d'entre elles. Dans le même temps, elle considère que la poursuite de leur exploitation néces-

site d'augmenter, dans les meilleurs délais, au-delà des marges de sûreté dont elles disposent déjà, leur robustesse face à des situations extrêmes ». L'ASN a publié au mois de juin les prescriptions détaillées adressées aux exploitants nucléaires portant notamment sur les travaux à mettre en œuvre et fixant des délais contraignants.

L'objectif est que chacun puisse se faire moyennant un effort propre ou *via* un relais une idée personnelle sur le risque collectif qui est pris, et sur la manière dont il est géré. L'ambition que se fixe la France est que le risque soit géré de façon exemplaire, sans concession et en toute transparence, afin d'apporter l'assurance raisonnable que ce risque est maîtrisé, quand bien même il ne serait pas totalement éliminé.

Les pouvoirs publics ont adopté un cadre pour la gestion des déchets

Une des conséquences majeures de l'exploitation d'installations nucléaires est la production de déchets radioactifs, que l'on classe en fonction de leur niveau de radioactivité et de leur période de décroissance radioactive :

- les déchets de haute activité principalement issus des combustibles usés qui concentrent la majorité des radionucléides (ils concentrent 95 % de la radioactivité produite par les activités électronucléaires), qu'il s'agisse de produits de fission ou d'actinides mineurs ;
- les déchets de moyenne activité à vie longue issus en majorité des déchets de structure des combustibles usés ;
- les déchets de faible activité à vie longue correspondant principalement aux déchets de graphite issus du démantèlement des réacteurs de première génération (filiale uranium naturel/graphite/gaz) ;
- les déchets de faible activité et moyenne activité à vie courte issus pour l'essentiel de l'exploitation et du démantèlement des diverses installations nucléaires ;
- enfin, les déchets de très faible activité majoritairement issus de l'exploitation et du démantèlement des installations nucléaires.

Le rôle des pouvoirs publics est d'organiser au mieux la gestion de ces déchets radioactifs pour éviter d'en reporter le coût sur les générations futures. La loi du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs, dite loi Bataille, peut être considérée comme l'acte législatif à la base de la mise en place d'une politique de gestion à long terme des déchets nucléaires de haute activité (les plus radio-toxiques). Il s'agissait alors, en premier lieu, de fixer le cadre d'un programme de recherche selon trois axes envisageables pour cette gestion à long terme : a) le stockage en couches géologiques profondes, b) l'entreposage de longue durée en surface ou c) la trans-

mutation et la séparation poussée de déchets radioactifs. Elle a par ailleurs créé l'Andra, l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, qui a la charge de la gestion à long terme des déchets radioactifs. Les travaux conduits dans le cadre de cette loi et les différentes initiatives d'évaluation et de concertation mises en œuvre sous l'impulsion du Parlement et du gouvernement (dont la plus large a été le débat public lancé à la fin de l'année 2005) ont montré la nécessité d'élargir le champ à la gestion de l'ensemble des matières et des déchets radioactifs. Ils ont ainsi permis l'élaboration de la loi du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs, conformément au calendrier fixé par la loi de 1991.

La loi de 2006 rappelle, en premier lieu, la responsabilité première des producteurs de combustibles usés et de déchets radioactifs, selon le principe « pollueur-payeur », pour assurer et financer la gestion des matières et des déchets radioactifs dont ils sont à l'origine et elle fixe les axes structurants de la politique de gestion des matières et déchets radioactifs :

- la réduction de la quantité et de la nocivité des déchets, notamment grâce à leur réduction à la source, par le traitement des combustibles usés et, dans l'avenir, le cas échéant, par la séparation poussée/transmutation ;
- l'entreposage des matières radioactives en attente de traitement et des déchets radioactifs en attente du stockage ;
- le stockage en tant que solution pérenne, en particulier le stockage réversible en couche géologique profonde pour les déchets de moyenne et de haute activité à vie longue, qui ne peuvent pas être stockés en surface ou à faible profondeur pour des raisons de sûreté nucléaire et de radioprotection.

La loi confirme également la pertinence de la stratégie de traitement/recyclage mise en œuvre par la France, qui permet de réaliser une économie de 17 % d'uranium naturel (pouvant aller jusqu'à 25 %) *via* la réutilisation du plutonium (et la fabrication du combustible MOX) et de l'uranium encore utilisable par un nouvel enrichissement (combustible dit URE). En effet, un combustible à l'uranium naturel usé contient environ 94 % d'uranium, 1 % de plutonium, 4 % de produits de fission et 1 % d'actinides mineurs. Le traitement des combustibles usés à l'usine de La Hague permet par ailleurs d'extraire séparément l'uranium et le plutonium et de conditionner les actinides mineurs et les produits de fission sous la forme de colis de déchets vitrifiés, d'une très grande durabilité, destinés au stockage géologique, réduisant ainsi le volume des déchets.

Dans une perspective de progrès continu, la loi dispose qu'un plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs doit être élaboré, puis actualisé tous les trois ans, afin d'identifier les pistes d'améliorations possibles pour chacun des trois axes précités et de poser des jalons pour en assurer le suivi et les avan-

cées. La seconde version de ce plan a été transmise au Parlement en mars 2010. En matière de gestion des déchets radioactifs à vie longue de haute ou de moyenne activité, celle-ci dispose que les recherches et les études relatives à ces déchets seront poursuivies suivant trois axes complémentaires : le stockage en couche géologique profonde (afin que la demande d'autorisation d'un centre de stockage puisse être instruite en 2015 et, sous réserve de cette autorisation, de la mise en exploitation de ce centre en 2025), la séparation et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue et, enfin, l'entreposage.

Après plus de vingt années de maturation scientifique, technique et politique, un débat public est prévu en 2013 sur le projet de stockage géologique en couche profonde des déchets les plus radioactifs, dans lequel les pouvoirs publics joueront un rôle évidemment majeur.

La sécurisation des charges de long terme permet de ne pas faire peser celles-ci sur les générations futures

Parallèlement à la structuration d'une gestion des matières et des déchets radioactifs et afin de ne pas reporter sur les générations futures les charges de long terme liées au nucléaire (démantèlement des installations, gestion des déchets,...), la loi du 28 juin 2006 prévoit la sécurisation des financements correspondants par les exploitants d'installations nucléaires. Les exploitants doivent évaluer l'ensemble des dépenses futures de démantèlement et de gestion des combustibles usés et des déchets radioactifs de leurs installations. Les provisions afférentes à ces charges futures doivent faire l'objet d'une couverture par des actifs dédiés présentant un niveau de sécurité, de diversification et de liquidité suffisant pour répondre à leur objet. Les pouvoirs publics, au travers de la direction générale de l'Énergie et du Climat (DGEC), assurent le contrôle du respect des obligations légales qui s'imposent aux exploitants nucléaires. La loi impose un taux de couverture des provisions par les actifs dédiés qui soit supérieur à 75 % (depuis le 28 juin 2011) et supérieur à 100 % (à partir du 28 juin 2016). Au 31 décembre 2010, le montant cumulé des provisions de tous les exploitants nucléaires s'élevait à 34,6 milliards d'euros et le montant des actifs dédiés constitués s'élevait à 30,2 milliards d'euros au 30 septembre 2011, soit un taux de couverture de 87 %.

Dans son rapport consacré aux coûts de la filière électronucléaire qu'elle a remis en janvier 2011, la Cour des comptes a souligné le caractère par nature incertain de l'évaluation des charges futures notamment en matière de démantèlement et de stockage des déchets. Ces évaluations doivent donc être affinées en permanence sous la vigilance des pouvoirs publics, par

exemple sous la forme d'audits externes des devis (comme c'est actuellement prévu). Il s'agit de l'enjeu principal de ces prochaines années pour les pouvoirs publics, avec, bien entendu, la question de la sécurisation des actifs dédiés, en raison du contexte financier actuel.

Face au risque d'accident nucléaire et à la question des déchets radioactifs, les pouvoirs publics ont pris des dispositions importantes, dont les lois de 2006 constituent des fondements majeurs. Leur objectif est d'en améliorer toujours la gouvernance par un processus itératif et ainsi de façonner un cadre adapté aux exigences croissantes des citoyens. La France porte cette exigence d'une gestion responsable du nucléaire sur la scène internationale.

GOUVERNANCE ET STRATÉGIE POUR L'AVENIR

Le monde envisage de recourir de plus en plus au nucléaire

L'énergie nucléaire se classe parmi les sources énergétiques les plus compétitives. Elle contribue à la sécurité d'approvisionnement des pays qui la choisissent. En effet, les pays producteurs d'uranium sont diversifiés et géopolitiquement moins sensibles que les producteurs d'énergies fossiles, les principaux étant l'Australie, le Canada, le Kazakhstan, la Namibie, le Niger et la Russie. Mais, surtout, la part du coût de l'uranium naturel dans le coût de production de l'électricité nucléaire est très faible (moins de 5 %) et sa grande densité énergétique permet de constituer des stocks stratégiques très importants – de plus de deux années, en France, par exemple – ce qui protège largement contre d'éventuels chocs de cours et d'approvisionnement en ce métal. Par ailleurs, l'énergie nucléaire contribue à la lutte contre le changement climatique et assure une production électrique stable en base.

La perspective d'une hausse mondiale des coûts des énergies fossiles et l'indispensable lutte contre le changement climatique (la France s'étant engagée à diviser par quatre ses émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050) renforcent ces atouts. L'accident nucléaire de Fukushima ne semble pas avoir remis fondamentalement en cause le renouveau du nucléaire qui était envisagé à travers le monde. À l'exception du Japon et de certains pays d'Europe, cet accident semble avoir eu un impact limité : les programmes nucléaires, dont la plupart se déploient en Asie, se poursuivent, avec simplement un décalage temporel. Outre la France, les États-Unis, la Chine, l'Inde, la Russie, la Pologne, la République tchèque, le Royaume-Uni, les Emirats Arabes Unis, l'Arabie Saoudite, la Corée du Sud, le Vietnam, la Turquie, la

Suède, la Finlande, l'Espagne et la Bulgarie, pour n'en citer que quelques-uns, maintiennent leurs programmes, voire en lancent de nouveaux. La conséquence principale de Fukushima est la plus grande attention apportée à la sûreté, ce qui favorisera les réacteurs de troisième génération au détriment des réacteurs de deuxième génération. Dans certains pays, cet accident a cependant ravivé les oppositions. Ainsi, la Belgique et la Suisse ont décidé de ne pas prolonger la durée d'exploitation de leurs réacteurs et de ne pas les remplacer. L'Italie a mis fin à son retour vers l'énergie nucléaire. L'Allemagne a décidé, quant à elle, d'en revenir à son calendrier initial de sortie du nucléaire tout en maintenant ses objectifs de lutte contre l'effet de serre, qu'elle devra atteindre par d'autres moyens. À l'inverse, la stratégie mise en œuvre par le Royaume-Uni consiste à mettre en place un cadre réglementaire propice au développement des énergies décarbonées quelles qu'elles soient, sélectionnées sur la base de leur compétitivité comparative.

La France pourra mettre à profit son avance en matière de réacteurs de troisième génération, dont les premières réalisations entreront en service prochainement, ainsi que sa grande expérience en matière d'exploitation et sa réputation en matière de sûreté nucléaire pour conquérir ces marchés en croissance.

La question de la poursuite de l'exploitation du parc nucléaire actuel

Les évolutions des systèmes énergétiques envisagées, notamment pour répondre aux impératifs climatiques, nécessitent l'élaboration de stratégies de long terme qui permettent à l'ensemble des parties prenantes de se préparer, de s'adapter et d'investir à la hauteur des enjeux.

La dernière Programmation Pluriannuelle des Investissements (PPI) de production d'électricité qui a été présentée au Parlement en juin 2009, privilégie, pour l'horizon 2020, dans une perspective économique et sans préjuger des décisions qui seront prises par l'Autorité de sûreté nucléaire, un scénario central de prolongation du parc nucléaire actuel au-delà de quarante ans. Ce scénario permettait à la France, contrairement à ses voisins, qui y sont contraints pour diverses raisons, de retarder l'investissement massif que représente, quel que soit le nouveau mix électrique retenu, un renouvellement complet du parc de production d'électricité. La France est ainsi en capacité de maintenir des prix compétitifs tout en laissant ouvertes toutes les options pour son futur mix énergétique, qui pourra être choisi une fois que seront mieux connus, à l'issue du débat qui se prépare, les atouts et les inconvénients de telle ou telle technologie (coût (pour l'EPR et pour les énergies renouvelables), faisabilité de la séquestration du carbone, inté-

gration des énergies renouvelables dans les réseaux, stockage de l'électricité, etc.).

Enfin, la stratégie française intègre une marge de sécurité en termes de capacité de production électrique correspondant aux incertitudes de l'horizon 2020 (qui portent notamment sur le rythme du développement des énergies renouvelables, sur l'atteinte des objectifs de maîtrise de la demande et sur la possibilité de la poursuite de l'exploitation du parc existant au-delà de quarante ans), qu'entraîne la primauté absolue conférée à la sûreté nucléaire. Cette préoccupation alliée à la nécessité de lisser l'effort d'investissement de renouvellement du parc nucléaire existant et de maintenir les compétences industrielles de cette filière a conduit à la décision de lancer le projet de Flamanville.

La PPI intègre également la mise en œuvre d'un programme de développement des énergies renouvelables (ENR) avec, notamment, la mise en service de 25 GW d'éolien à l'horizon 2020 et elle fait de la maîtrise de la demande son premier pilier. Son objectif est d'offrir ainsi à notre système électrique des marges de manœuvre qui lui permette de faire face aux incertitudes de l'horizon 2020. Ainsi, en cas d'atteinte de l'ensemble des objectifs qu'elle fixe, le solde exportateur de la France serait de l'ordre de 99 à 135 TWh à l'horizon 2020, laissant des marges pour s'adapter à l'éventuelle non-prolongation de la durée de fonctionnement de certains réacteurs.

La conférence environnementale que le gouvernement lancera au second semestre 2012 et le débat énergétique qui s'en suivra permettront de préciser la stratégie énergétique de la France à plus long terme que ne le prévoyait la précédente PPI. C'est en particulier dans ce cadre que seront précisées les modalités d'atteinte de l'objectif d'une part de nucléaire dans la production d'électricité de 50% à l'horizon 2025, conformément à l'engagement du Président de la République.

L'effort de recherche nécessaire à un secteur nucléaire en progrès

Les réacteurs de quatrième génération visent à répondre à des objectifs de durabilité du nucléaire (par l'économie de la ressource naturelle et la minimisation de la quantité des déchets), de sûreté et d'accroissement de la fiabilité des réacteurs nucléaires. De nombreux types de ces réacteurs sont actuellement étudiés dans le cadre du forum international génération IV (GIF), dont des réacteurs à neutrons rapides et des réacteurs à haute température (à neutrons rapides, ou non). En France, le choix a été fait de porter l'effort sur les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium, une filière qui est jugée comme la mieux placée pour parvenir au stade d'une démonstration à l'échelle industrielle.

Ces réacteurs permettent de valoriser totalement la ressource en uranium : l'uranium naturel est composé à plus de 99 % d'uranium 238, et pour environ 0,7 % d'uranium 235. Dans les réacteurs de génération 2 ou de génération 3, c'est principalement l'uranium 235 (isotope fissile) qui est utilisé, soit 0,7 % de la matière première. Les réacteurs à neutrons rapides ont, quant à eux, la capacité de brûler bien plus efficacement l'uranium 238 (isotope fertile) en le transformant (par capture neutronique) en plutonium 239 (un isotope fissile) qui alimente la réaction de fission. Ainsi, le potentiel énergétique de l'uranium s'en trouve multiplié par un facteur allant de 50 à 100. Il est à noter que la France dispose sur son territoire d'un stock important d'uranium 238 de par ses stocks d'uranium appauvri (issu de l'opération d'enrichissement), dont la concentration en isotope 235 est plus faible que celle de l'uranium naturel.

Ces réacteurs présenteraient par ailleurs des caractéristiques plus avantageuses en termes de production de déchets radioactifs ultimes, sans toutefois supprimer la nécessité de leur gestion à long terme.

Le projet ASTRID pourrait être un démonstrateur industriel des réacteurs de quatrième génération, à neutrons rapides et refroidis au sodium, dans la perspective (s'il en était décidé ainsi) de rendre possible un déploiement industriel à l'horizon 2040.

La valorisation de l'uranium 238, le recyclage multiple du plutonium et, si la séparation/transmutation est adoptée, la séparation des actinides mineurs dans des réacteurs de quatrième génération induisent par ailleurs un cycle du combustible nucléaire radicalement différent en ce qu'il permet, par exemple, de s'affranchir de l'extraction minière en raison de l'importance du stock d'uranium appauvri accumulé. Le recyclage multiple du plutonium nécessite une adaptation des procédés industriels actuels. L'ensemble de ces éléments sont étudiés par le CEA, qui doit remettre aux pouvoirs publics une étude détaillée pour la fin de cette année (2012). Le plutonium et l'uranium contenus dans les combustibles MOX et URE usés, ainsi que l'uranium appauvri, sont aujourd'hui considérés comme des matières valorisables et non pas comme des déchets, en raison de cette perspective d'une valorisation de leur potentiel énergétique dans les systèmes nucléaires du futur. Les recherches dans ce domaine, menées sous l'impulsion des pouvoirs publics, et leurs conclusions sont donc d'une importance cruciale.

Au-delà des recherches sur la fission, la France participe aux recherches sur les réacteurs de fusion nucléaire, au travers du projet ITER (en cours de construction sur le centre du CEA, à Cadarache). Sur le plan scientifique, le projet ITER est un programme de recherche sur la possibilité de produire de l'électricité au moyen de la fusion nucléaire par confinement magnétique. À très long terme, si sa faisabilité est démontrée, la fusion nucléaire permettrait de

bénéficier d'atouts importants en matière de production d'énergie : utilisation d'un combustible pratiquement inépuisable et bien réparti sur la planète, impossibilité qu'un emballement de la réaction conduise à un accident de grande ampleur et gestion simplifiée des déchets nucléaires résultant de son exploitation. Mais les travaux sur la fusion relèvent encore aujourd'hui bien plus de la recherche fondamentale que de la recherche appliquée à un nouveau projet énergétique.

CONCLUSION

Sous l'impulsion des pouvoirs publics, la France s'est engagée massivement dans le nucléaire à partir des

années 1970. Les Français ont bénéficié de ce choix jusqu'à aujourd'hui, sous la forme de prix de l'électricité bas et stables. La décennie qui s'ouvre est riche d'enjeux de politiques publiques dans le domaine nucléaire, en matière de sûreté nucléaire et de gestion des déchets, en matière de choix énergétiques à moyen terme, mais aussi en matière de recherche et développement. Dans un contexte incertain contraint par la nécessité d'atteindre les objectifs fixés dans le cadre de la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre et par le contexte de la crise financière, ces politiques publiques peuvent disposer des avantages que procure à la France son parc nucléaire historique, ainsi que de l'avance industrielle qu'a acquise la filière pour répondre aux enjeux de l'horizon 2020 et, au-delà, pour satisfaire aux objectifs qui lui seront fixés à ces échéances.

En amont de la filière nucléaire (mines d'uranium et préparation du combustible)

LA FILIÈRE NUCLÉAIRE :
UNE DYNAMIQUE ENTRE
DES MARCHÉS DIVERSIFIÉS

L'innovation technologique est au cœur du cycle du combustible nucléaire. Les différentes étapes qui mènent à la fabrication du combustible font intervenir un savoir-faire et des technologies en constante évolution. Les combustibles utilisés aujourd'hui sont le fruit d'une longue période de développements, de modélisations très pointues et d'un retour d'expérience très important. Ils présentent des caractéristiques optimisées tant au plan opérationnel qu'au plan accidentel. Il en va de même pour les procédés de fabrication actuels. Dans un contexte post-Fukushima, l'enjeu principal pour les années à venir sera de garantir un niveau de sûreté toujours plus élevé pour les personnels de la filière comme pour les populations. Optimiser la productivité, assurer la stabilité d'approvisionnement des clients et amoindrir toujours plus l'impact sur l'environnement restent des impératifs fondamentaux pour l'avenir de l'industrie nucléaire.

Par **Philippe KNOCHE***

L'EXTRACTION DU MINÉRAI D'URANIUM

À l'état naturel, l'uranium est renfermé dans des minerais (pechblende, uraninite) contenus dans des roches granitiques ou sédimentaires, ainsi que dans certains phosphates. Deux principaux isotopes composent le minerai d'uranium, l'U 238 (²³⁸U) (dit fertile) et l'U 235 (²³⁵U) (qui est fissile).

L'U 235 est beaucoup plus rare que le premier, il ne représente que 0,7 % des ressources terrestres d'uranium. Or, il est, de par son caractère fissile, l'élément nécessaire pour le fonctionnement des réacteurs à eau

ordinaire (REO), qui composent l'essentiel du parc mondial. L'U 235 constitue la matière permettant la réaction en chaîne de fissions nucléaires qui se produit dans le cœur des réacteurs. Cela étant, le minerai à l'état brut n'est pas directement exploitable, l'extraction de l'uranium qu'il renferme nécessite plusieurs transformations exigeant un haut degré de technicité industrielle.

Si le minerai d'uranium est une ressource naturelle, certes en quantités finies, ses ressources connues couvrent aujourd'hui de façon très large les besoins à

* Areva.

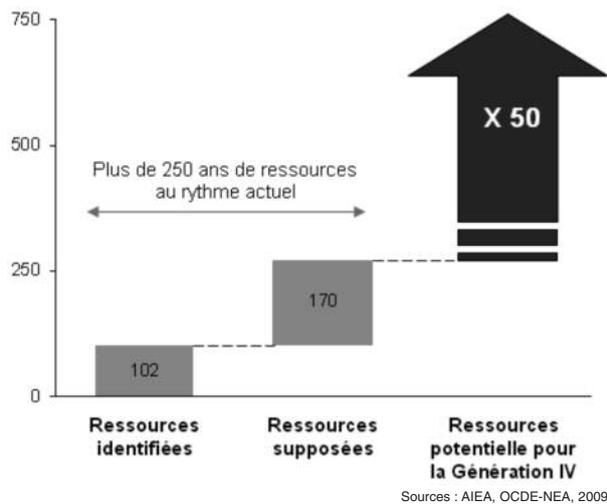
Pays producteurs (tU)	2008	2009	2010
Australie	8 430	7 982	5 900
Canada	9 000	10 173	9 783
Kazakhstan	8 521	14 020	17 803
Namibie	4 366	4 626	4 496
Niger	3 032	3 243	4 198
Total	43 853	50 772	55 663

Source : Areva.

Tableau 1 : Principaux pays producteurs d'uranium, 2008-2010.

venir. Il existe trois types de ressources en uranium : les ressources conventionnelles identifiées (6,3 millions de tonnes), les ressources conventionnelles supplémentaires estimées (10,4 millions de tonnes) et, enfin, les ressources non conventionnelles (principalement dans des phosphates – estimées entre 9 et 22 millions de tonnes).

Au rythme des besoins actuels (soit environ 60 000 tonnes/an), les ressources conventionnelles identifiées d'uranium permettront une production d'électricité durant un siècle, suivies de 170 années supplémentaires, si l'ensemble des ressources de minerais tant identifiées que supposées sont prises en considération.



Sources : AIEA, OCDE-NEA, 2009.

Graphique 1 : Ressources fissiles (années de consommation 2009).

À l'heure actuelle, la prospection de l'uranium est réalisée grâce à des images satellites et à des techniques géophysiques, notamment la radiométrie qui vise à détecter les descendants radioactifs de l'uranium. Les indications sur la quantité de minerai des gisements sont obtenues par des méthodes électriques et électromagnétiques, ainsi que par des études géochimiques. Quinze années peuvent s'écouler entre la détection de l'uranium et son exploitation. Ce délai relativement long s'explique par des contraintes réglementaires (permis de recherche, convention minière,...), ainsi que par la multiplicité des étapes à franchir avant la mise en production (prospection détaillée, sondages de reconnaissance,...).

Plusieurs techniques d'extraction sont actuellement utilisées. L'extraction à ciel ouvert consiste à ôter la partie supérieure de la roche recouvrant le gisement. Il est également possible d'accéder au minerai en creusant des galeries souterraines. Une technique plus récente, l'extraction par lixiviation *in situ* suppose l'injection dans le sous-sol de solutions acides ou basiques qui dissolvent l'uranium (la solution contenant de l'uranium est ensuite pompée). Enfin, l'uranium peut être extrait par coproduction, c'est-à-dire dans une mine contenant majoritairement un autre minerai.

Type d'extraction	Tonnes U	% à l'échelle mondiale
Souterraine	15 094	28
Ciel ouvert	13 541	25
Lixiviation	22 108	42
Total	53 663	100

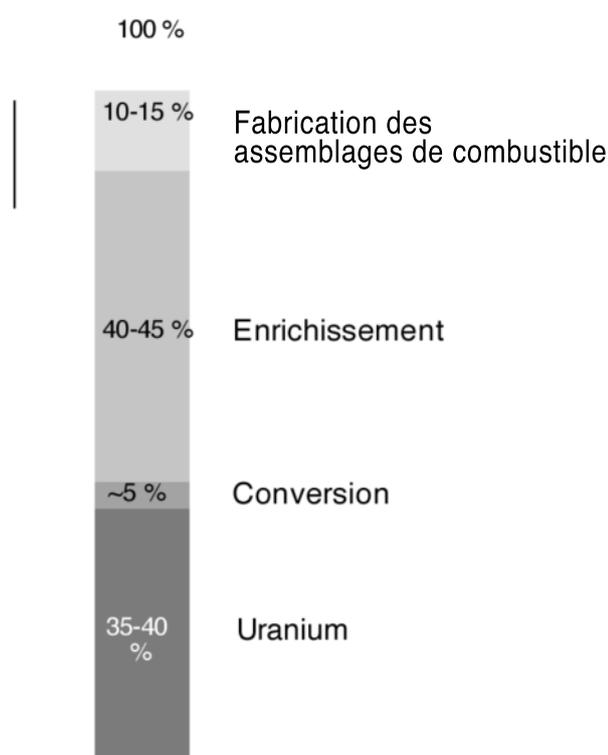
Source : World Nuclear Association, The Global Nuclear Fuel Market, 2011.

Tableau 2 : Répartition des différentes méthodes d'extraction de l'uranium.

Après le démantèlement des installations minières, les sites font l'objet d'une remédiation, puis sont placés sous surveillance radiologique et environnementale. Cette remise en l'état de l'écosystème occupe une place de plus en plus importante dans les contrats de concession minière signés entre les Etats et les exploitants.

Des évolutions majeures vont s'avérer structurantes pour l'extraction d'uranium dans les années à venir afin de diminuer la part des ressources énergétiques actuellement employées dans l'exploitation des mines. En effet, la mise en œuvre de nouveaux procédés d'exploration constitue un objectif significatif allant de pair avec la valorisation des ressources uranifères utilisées pour les réacteurs de prochaine génération. En outre, l'enjeu pour les décennies à venir sera d'améliorer l'extraction de l'uranium, qui en étant plus sélective permettra de réduire le poids de certaines opérations mécaniques de traitement du minerai (broyage, concassage) fortement consommatrices d'énergie et d'eau.

Certaines technologies sont actuellement à l'étude. Ainsi, l'extraction liquide/liquide (favorisant la décantation) ou l'extraction sur support solide utiliseront des molécules sélectives et robustes permettant de concentrer l'uranium plus efficacement. Sur un temps plus long, la récupération de l'uranium contenu dans des solutions peu concentrées pourrait également être envisagée. Cela suppose la mise au point d'une technique concentrant hautement l'uranium sur des supports solides afin de limiter les étapes de traitement permettant ainsi de gagner en énergie, en productivité et en impact sur l'environnement (par une diminution de la quantité des déchets industriels toxiques). Une fois extrait, l'uranium doit encore être acheminé, sous la forme de *yellowcake*, une poudre concentrée contenant environ 75 % d'oxyde d'uranium. Deux étapes indispensables suivent : la conversion et l'enrichissement de l'uranium.



Source : AREVA.

Graphique 2 : Décomposition des coûts de l'amont du cycle du combustible (€/MWh).

LA CONVERSION

La conversion consiste à raffiner le *yellowcake* (oxyde d'uranium) provenant des mines pour le purifier et à le transformer en hexafluorure d'uranium (UF_6).

Il existe actuellement dans le monde six acteurs industriels capables d'opérer la conversion de l'uranium à une échelle commerciale. La réduction programmée de la part du nucléaire dans le mix électrique en

Allemagne et au Japon a contracté la demande mondiale, tandis que les industriels ont des difficultés à réduire leurs coûts fixes. De plus, les fermetures temporaires d'installations, en Amérique du Nord, font également craindre une rupture dans le cycle, et donc dans la sécurité d'approvisionnement en uranium, sur le plus long terme.

Actuellement, l'usine Comurhex II d'Areva est le seul projet mondial d'envergure ayant pour but de donner un second souffle à une filière en difficulté, mais indispensable au cycle du combustible. Ces installations auront une capacité de conversion de 15 000 tonnes d'uranium par an (contre 14 000 tonnes actuellement, pour Comurhex I).

L'ENRICHISSEMENT

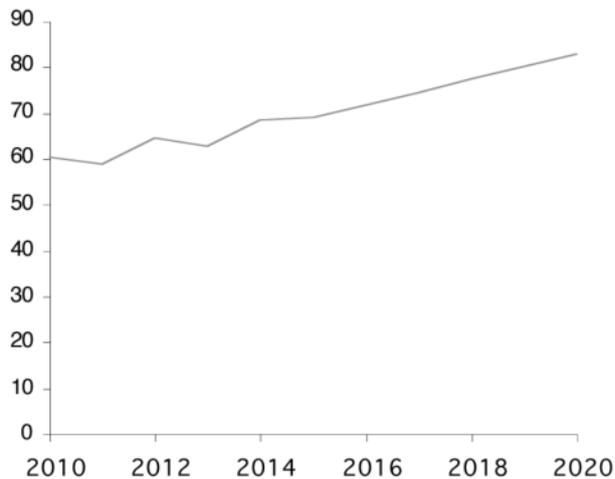
Une fois concentré et converti, l'hexafluorure d'uranium (UF_6) doit être enrichi afin de faire fonctionner les réacteurs à eau. L'enrichissement de l'uranium est une opération consistant à accroître la proportion de l'isotope U 235 présent dans l'uranium naturel à hauteur de 0,7 % en la faisant passer à une valeur comprise entre 3 et 5 %. Environ huit tonnes d' UF_6 entrant dans l'usine d'enrichissement produisent une tonne d'uranium enrichi avec une teneur en U 235 se situant entre 3 et 5 %. Le solde contient de l'uranium appauvri, dont la teneur en isotope U 235 est inférieure à 0,3 %.

Parmi les procédés d'enrichissement existants, deux sont exploités à l'échelle industrielle, la diffusion gazeuse et l'ultracentrifugation gazeuse. Ces méthodes s'appuient sur le différentiel de masse molaire entre l'U 235 et l'U 238.

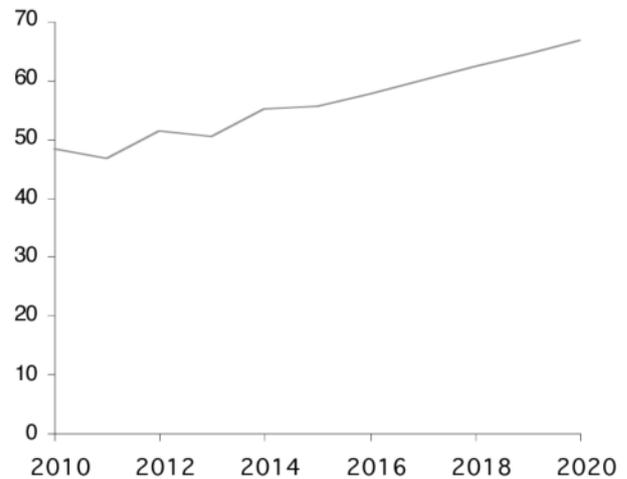
La diffusion gazeuse est historiquement le premier procédé à avoir été opéré à grande échelle. Son principe consiste à séparer les deux éléments grâce à un diffuseur, à un compresseur et à un échangeur de chaleur. Ainsi, la différence de masse molaire entre l'hexafluorure d'uranium 235 et l'hexafluorure d'uranium 238 (ce dernier étant plus dense que le premier) conduit à leur séparation isotopique lorsqu'un mélange gazeux contenant les deux molécules traverse une membrane de filtration présentant les qualités requises.

La diffusion gazeuse est très énergivore, cette opération étant répétée jusqu'à 1 400 fois afin de produire un uranium qui soit suffisamment enrichi. Cette technologie est donc peu à peu remplacée par l'ultracentrifugation. D'ici à 2020, la moitié des capacités d'enrichissement installées devrait être renouvelée, ce qui amène l'industrie à s'orienter vers le procédé d'ultracentrifugation, plus économe en énergie. Un des exemples concrets est le passage, pour Areva, de l'usine Georges Besse I (diffusion gazeuse) à l'usine Georges Besse II (ultracentrifugation). Cette transi-

Demande en conversion
(Milliers de tonne tUnat)



Demande d'enrichissement
(MUTS)



Source : World Nuclear Association, The Global Nuclear Fuel Market 2011, Reference scenario.

Graphique 3.

tion se traduira par une nette baisse de la consommation d'électricité dans la mesure où l'ultracentrifugation en consomme cinquante fois moins que la diffusion gazeuse.

L'ultracentrifugation s'opère *via* des rotors contenant du gaz hexafluorure d'uranium (UF_6) tournant à grande vitesse. L'effet de la force centrifuge éloigne les molécules les plus lourdes à la périphérie tandis que les plus légères se rapprochent du centre.

En sus de la diffusion et de l'ultracentrifugation, l'enrichissement par laser est actuellement à l'étude. Les essais opérés par *Global Laser Enrichment* (de la *General Electric Energy*) aux Etats-Unis en 2009 et en 2010 sont jugés satisfaisants à l'échelle du laboratoire. Pour l'heure, l'inexistence de procédé industriel rend incertain le montant des investissements nécessaires. Le projet SILVA (*Séparation Isotopique par Laser sur la Vapeur Atomique de l'uranium*) mené en France n'a pas eu de suite, pour les mêmes raisons.

À l'image de l'industrie de la conversion, l'industrie de l'enrichissement est un marché très concurrentiel de type oligopolistique. Quatre acteurs principaux ont une présence significative à l'échelle mondiale. Il s'agit d'Areva, du consortium Urenco, du russe Tenex/TVEL et de l'américain USEC. Les coûts d'entrée sur ce marché expliquent le faible nombre des concurrents. Les trois principales barrières sont l'importance des capitaux à mobiliser, le haut niveau de technologie à maîtriser et les aspects juridiques afin de se conformer au droit international.

Les préoccupations liées à la non-prolifération nucléaire impliquent en effet le respect de règles strictes. Ces préoccupations expliquent pourquoi le nucléaire civil (en particulier l'enrichissement) fait l'objet d'engagements internationaux à travers le traité de non-prolifération nucléaire de 1968 (1). Le développement des capacités d'enrichissement repré-

sente en effet une étape clé difficile à franchir pour tout pays souhaitant maîtriser l'ensemble du cycle du combustible nucléaire à des fins civiles et/ou militaires.

Le marché de l'enrichissement est un marché en croissance. En 2010, la demande s'est établie à 49 MUTS (millions d'unités de travail de séparation, l'unité de mesure de l'enrichissement). Les programmes ambitieux de construction de nouvelles centrales (en particulier, indiens et chinois) expliquent en partie la raison pour laquelle la demande devrait atteindre 66 MUTS en 2020 et se situer au-delà de 80 MUTS en 2030 (2).

LA FABRICATION D'ASSEMBLAGES DE COMBUSTIBLE NUCLÉAIRE

Une fois enrichi, l'uranium n'est pas encore directement utilisable dans les réacteurs. Pour qu'il le devienne, il est nécessaire de disposer de pastilles d'oxyde d'uranium (UO_2) dans des assemblages de combustible nucléaire. Ces assemblages constitueront le cœur du réacteur, là où se déroule la fission nucléaire libératrice d'énergie. Leur conception a pour finalité de maximiser le rendement énergétique et de maîtriser la réaction en chaîne, tout en assurant une barrière fiable pour empêcher la dispersion de matière fissile. Ces

(1) Aux termes du traité de non-prolifération nucléaire, l'Agence Internationale pour l'Énergie Atomique (AIEA) devient responsable de l'application du traité. Une des fonctions principales de l'AIEA est d'inspecter les installations nucléaires existantes et de s'assurer que celles-ci sont conformes aux engagements internationaux.

(2) Selon le rapport de la World Nuclear Association publié en septembre 2011.

	900 MWe	1 300 MWe	1 500 MWe	EPR
Nombre d'assemblages par cœur	157	193	205	241
Nombres de crayons par assemblage	264	264	264	265
Longueur des crayons (mètres)	3,6	4,3	4,3	4,2
Masse d'un assemblage (kg)	649	760	760	760

Source : AREVA.

Tableau 3 : Comparaison des assemblages de combustibles des REP français.

assemblages peuvent contenir de 200 à 500 kilogrammes de matière fissile. Ils sont composés de crayons contenant la matière uranifère et d'un cadre métallique généralement fabriqué en alliage de zirconium (ce matériau a pour propriétés principales de résister à la corrosion par l'eau à très haute température et de ne pas absorber les neutrons, ce qui permet d'optimiser la réaction nucléaire dans le cœur du réacteur).

Au préalable, l'UF₆ enrichi est dé-fluoré afin de convertir en poudre d'oxyde d'uranium (UO₂) par un procédé de conversion qui utilise un mélange gazeux de vapeur d'eau et d'hydrogène. La poudre obtenue est ensuite comprimée dans des petits moules cylindriques afin de les transformer en pastilles d'oxyde d'uranium. Ces pastilles sont ensuite « frites » (autrement dit cuites) dans des fours, à température très élevée (1 700°C). Elles sont ensuite enfilées dans des gaines de zirconium chargées en hélium afin de constituer des « crayons » contenant chacun environ 300 pastilles. Les crayons sont alors placés dans des grilles (le plus souvent carrées) afin de constituer un assemblage complet.

Le nombre d'assemblages de combustible dans le cœur du réacteur dépend de la conception de ce dernier et de la gestion du combustible. Ce nombre pourra également varier suivant l'étape dans la vie d'un réacteur, par exemple s'il s'agit d'un cœur en démarrage ou d'un cœur en fonctionnement équilibré.

En France, environ 1 200 tonnes de combustibles neufs (1 080 tonnes d'UOX et 120 tonnes de MOX) sont chargées chaque année dans les cinquante-huit réacteurs du parc nucléaire national. Cela nécessite l'extraction d'environ 8 000 tonnes d'uranium.

Le marché européen du combustible nucléaire est toutefois marqué par un déséquilibre conjoncturel entre l'offre et la demande. Ce déséquilibre a un impact direct sur les marchés à court et moyen terme. Entre 2012 et 2020, la demande de combustible ne devrait pas croître en Europe, tandis qu'elle connaîtra une croissance annuelle moyenne de 6 % en Asie. En 2030, sur les 304 GWe produits par les nouveaux réacteurs construits, 60 % le seront en Asie.

Pour chaque réacteur pressurisé européen (EPR) mis en service, l'impact positif sur le marché du combustible en Europe s'élèvera à 130 tonnes d'uranium (tU) pour le premier cœur, puis de 35 à 40 tU tous les dix-huit mois. L'impact est donc favorable, mais il est limité.

En ce qui concerne la fabrication des assemblages de combustibles, les capacités de conception, d'analyse de sûreté et de modélisation s'avèrent capitales. Les conditions sans cesse renforcées en matière de sûreté impliquent que l'examen des dossiers techniques sera de plus en plus exigeant. De ce fait, la filière doit se structurer au regard d'un environnement réglementaire déjà très strict et qui le deviendra encore davantage suite à l'accident du 11 mars 2011 à Fukushima.

Différentes pistes d'amélioration sont d'ores et déjà envisagées en ce qui concernent le développement, le coût de production et la sécurité offerte par les architectures de combustible. Ces recherches visent notamment une meilleure tenue du combustible en phase accidentelle, l'efficacité de la réaction en chaîne et son contrôle, des options céramiques pour le gainage et des améliorations concernant l'entreposage de longue durée des combustibles usés.

Areva a développé des solutions visant à récupérer 96 % des matières issues du combustible usé. Au cours d'une étape ultérieure, dite de retraitement, l'uranium (appelé uranium de retraitement, URT) et le plutonium (présent dans le combustible usé) sont séparés des actinides mineurs et des produits de fission. L'URT peut être recyclé dans des réacteurs à eau ordinaire, après une phase d'enrichissement.

En France, chaque année, 600 tonnes d'URT sont ainsi ré-enrichies pour alimenter deux réacteurs d'EDF. Le plutonium est, quant à lui, recyclé sous la forme de combustible MOX, qui est composé d'environ 8 à 10 % de plutonium (Pu), le solde étant de l'uranium appauvri.

CONCLUSION

L'uranium est la matière à l'origine de la production d'électricité nucléaire. Il nécessite plusieurs étapes de transformation industrielle afin qu'une fission nucléaire puisse s'opérer. Malgré ces étapes successives d'extraction minière, de conversion, d'enrichissement et d'assemblage, l'électricité d'origine nucléaire demeure compétitive pour les ménages comme pour les entreprises.

Le cycle du combustible constitue également un élément majeur de la sûreté nucléaire et de la fiabilité des installations nucléaires françaises. Satisfaire à ces critères est une priorité pour la filière.

Le contexte économique et industriel du cycle du combustible nucléaire peut être amené à évoluer, mais les préoccupations en matière de sûreté et de sécurité demeurent fondamentales. C'est en cela que la recherche et le développement de techniques plus efficaces, toujours plus sûres et respectueuses de l'environnement sont une priorité pour l'avenir de la filière nucléaire.

Un an après Fukushima, panorama des marchés de nouveaux réacteurs

LA FILIÈRE NUCLÉAIRE :
UNE DYNAMIQUE ENTRE
DES MARCHÉS DIVERSIFIÉS

L'accident nucléaire de Fukushima a replacé la sûreté nucléaire au cœur des préoccupations des opinions publiques, des décideurs politiques et des industriels du nucléaire. Quelle que soit sa compétitivité-coût, quels que soient les avantages qu'il procure en termes d'indépendance énergétique, quelle que soit sa contribution à la lutte contre le réchauffement climatique, le nucléaire n'a d'avenir que dans le respect des plus hautes exigences de sûreté. Pour être pérenne, le nucléaire doit être sûr et transparent.

Par **Luc OURSEL*** et **Pierre LANDAU****

En 2011, six nouveaux réacteurs ont été raccordés aux réseaux électriques, tandis que treize tranches ont été définitivement mises à l'arrêt, dont douze en conséquence directe de l'accident nucléaire de Fukushima (huit en Allemagne, qui s'ajoutent aux quatre tranches de la centrale de Fukushima Daiichi). Pour autant, ce bilan comptable négatif pour 2011 ne doit pas occulter les perspectives de croissance du parc nucléaire mondial dans les vingt prochaines années. Les fondamentaux qui sous-tendent le recours au nucléaire demeurent inchangés : la hausse de la demande d'électricité, l'épuisement des ressources fossiles et l'impératif de la lutte contre le changement climatique. Les pays ont majoritairement confirmé leurs programmes nucléaires, tout en lançant des évaluations de sûreté de leur parc en exploitation.

DE SOLIDES PERSPECTIVES DE CROISSANCE

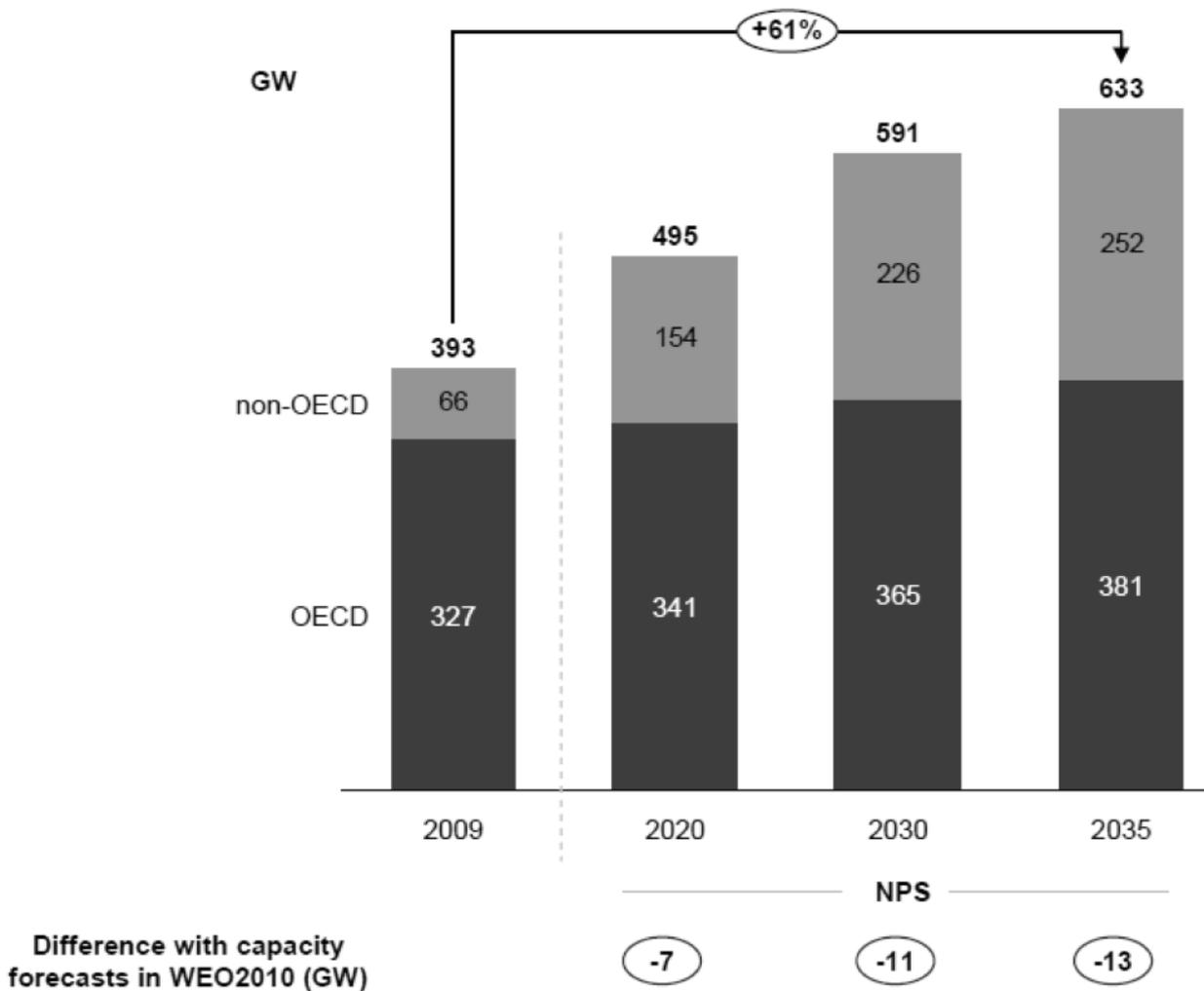
L'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) a publié en 2011 une révision de son *World Energy Outlook* (WEO). Il s'agit de l'étude prospective la plus com-

plète réalisée après Fukushima. D'après le scénario de référence NPS (*New Policies Scenario*), la demande mondiale d'énergie croîtra de plus de 40 % d'ici à 2035. La demande d'électricité devrait, quant à elle, bondir de plus de 85 % dans un contexte d'augmentation des prix, d'une part, des hydrocarbures et, d'autre part, de la tonne de CO₂ rejetée dans l'atmosphère. Le scénario NPS prévoit une hausse de 60 % de la capacité installée entre 2009 et 2035. À cet horizon, l'AIE table sur une capacité de 633 GWe, inférieure de seulement 2 % à sa prévision pré-Fukushima.

Cette vision mondiale fait cependant l'impasse sur l'hétérogénéité des contextes nationaux et des motivations qui président à la relance d'un programme historique pour certains, au lancement d'un premier projet électronucléaire pour d'autres. Il n'y a pas de marché mondial homogène pour les réacteurs, mais une agrégation de marchés nationaux plus ou moins accessibles. La décision de construire un réacteur ne

* Président du Directoire d'Areva.

** Chargé de mission auprès du Président du Directoire d'Areva, Secrétariat Exécutif, Areva.



Prévision de la croissance des parcs nucléaires des pays de l'OCDE et des pays non-OCDE aux horizons 2020, 2030 et 2035.

Figure 1 : Différence par rapport aux capacités prévues dans le WE0 2010 (GW).

répond pas partout aux mêmes motivations, ne revêt pas les mêmes enjeux, ne s'inscrit pas dans un même calendrier et n'offre pas les mêmes opportunités commerciales. Plus que d'autres grands projets d'infrastructures, les projets nucléaires sont jugés « d'intérêt stratégique » par les Etats. Il en résulte parfois des restrictions à l'accès au marché, justifiées par des considérations historiques, stratégiques (sécurité d'approvisionnement), industrielles (promotion d'une filière nationale) et de souveraineté.

LA SÛRETÉ, PIERRE ANGULAIRE DU NUCLÉAIRE DE DEMAIN

À l'échelon national, les évaluations de sûreté ont jalonné l'année 2011. Le Conseil européen du 9 décembre 2011 a réaffirmé la priorité donnée à leur

finalisation dans les délais prévus. La Conférence générale de l'AIEA a adopté en septembre 2011 un plan d'action sur la sûreté qui prévoit notamment de lancer un processus de révision des standards de sûreté, à la suite de l'accident de Fukushima. L'accent est mis sur la nécessaire indépendance des autorités de sûreté nucléaires, gendarmes nationaux de la sûreté. Bien avant Fukushima, Areva n'a eu de cesse de promouvoir les plus hauts standards de sûreté et de développer des technologies de troisième génération présentant les meilleures garanties de sûreté. C'est le cas non seulement du réacteur EPR™ (en construction en Finlande, en France et en Chine), mais aussi de l'ATMEA1, le réacteur de moyenne puissance développé depuis 2007 dans le cadre de la co-entreprise ATMEA avec le Japonais *Mitsubishi Heavy Industries*. Ce réacteur a été présélectionné par la Jordanie en 2010. Mais si l'accident de Fukushima a conduit à un changement de paradigme, l'AIEA n'est pas investie,

de par son mandat, du rôle de « gendarme de la sûreté », comme elle l'est dans le domaine de la non-prolifération. L'Agence onusienne n'est ni prescriptrice de règles contraignantes ni contrôleur du respect, par les Etats, de leurs engagements en matière de sûreté nucléaire. Les documents touchant à la sûreté publiés par l'AIEA n'ont pas de valeur contraignante. Areva plaide pour la définition de critères techniques de sûreté communs qui seraient d'application systématique pour toute nouvelle construction de réacteur en Europe, et le plus rapidement possible au niveau mondial. En attendant, chaque pays a tiré pour son propre compte les leçons de l'accident nucléaire de Fukushima pour sa propre base installée et ses propres projets de nouveaux réacteurs. Fukushima ne conduira pas mécaniquement à restreindre la concurrence sur les nouveaux marchés en écartant *de facto* les technologies les moins avancées. Sur certains marchés, il n'est pas exclu que le processus de mise en concurrence s'ouvre même à de nouveaux acteurs.

LA CHINE, LOCOMOTIVE DE LA CROISSANCE DU PARC NUCLÉAIRE MONDIAL

La croissance du nucléaire mondial est majoritairement le fait des pays émergents. D'après le scénario NPS de l'AIE, les pays hors OCDE contribueront à hauteur de 80 % à l'augmentation de la capacité installée d'ici à 2035. Parmi les six réacteurs raccordés au réseau en 2011, deux l'ont été en Chine. Ce ratio d'un tiers, pour l'année 2011, n'est pas anecdotique : l'AIE estime que le parc nucléaire chinois passera d'une capacité (aujourd'hui modeste) de 12 GWe à 114 GWe en 2035, contribuant à hauteur de 40 % à la croissance du parc mondial. La Chine se trouve à un moment charnière : alors que la répartition entre réacteurs de deuxième et de troisième générations n'a jamais été clairement arrêtée par Pékin, Fukushima devrait accélérer le basculement de la Chine vers un parc de troisième génération. L'histoire du nucléaire civil chinois procède d'une dynamique double : l'objectif premier de Pékin a été de soutenir sa croissance économique, ce qui supposait de faire appel à la technologie étrangère. Cette logique a présidé à l'ouverture du marché chinois, dans les années 1980-1990. Framatome (devenue depuis Areva NP) a su saisir cette opportunité en vendant à la Chine les réacteurs de Daya Bay, puis ceux de Ling Ao. De la licence octroyée par Framatome à son partenaire chinois CGNPC est né le programme des CPR1000 chinois, qui a depuis essaimé en Chine. Les vingt-cinq réacteurs en construction en Chine sont majoritairement des CPR1000 de deuxième génération. Le marché des nouveaux réacteurs s'est ré-ouvert, il y a quelques années, lorsque Toshiba-Westinghouse et Areva ont successivement été retenus pour la fourniture de réac-

teurs de troisième génération, l'AP1000 et l'EPRTM. CGNPC construit ainsi deux réacteurs EPRTM sur le site de Taishan. La Chine poursuit cependant un second objectif : le développement de sa propre industrie nucléaire. Elle l'a d'abord fait par le biais du programme CPR1000. Pékin étudie désormais le développement d'un programme de troisième génération autonome pour satisfaire ses propres besoins, mais aussi pour l'export. Afin de maintenir ouvert le marché chinois des nouveaux réacteurs (alors même que la Chine monte en compétences), il est nécessaire de s'implanter durablement dans ce pays. Comme d'autres entreprises, Areva s'y emploie, en créant avec ses partenaires chinois des sociétés communes qui accompagneront la croissance du nucléaire chinois. À titre d'exemple, la co-entreprise WECAN (Areva-CGNPC) servira de plateforme commune d'ingénierie pour des projets en Chine et à l'export.

Il serait vain de faire fi des ambitions industrielles chinoises dans le nucléaire civil, y compris à l'export. L'approche classique fournisseur-client doit céder la place à des schémas partenariaux plus complexes qui permettent de profiter de l'effet d'entraînement créé par la locomotive chinoise et de conserver un accès au marché en dépit de la montée en puissance technologique et industrielle des Chinois. C'est le sens de la coopération franco-chinoise (EDF-Areva-CGNPC) dans le développement d'un réacteur de troisième génération de moyenne puissance, conformément aux recommandations du Conseil de Politique Nucléaire du 21 février 2011. Areva y contribue pleinement et œuvre à la convergence entre ce projet franco-chinois et le programme ATMEA développé avec le Japonais MHI. Une condition de la participation de la Chine à ce projet est bien évidemment l'ouverture de son marché domestique. Ce projet permettra d'inscrire dans la durée la présence commerciale et industrielle de la filière nucléaire française en Chine et d'accompagner la Chine dans les fortes ambitions qu'elle nourrit à l'export.

L'INDE SORT DE SON ISOLEMENT

Non signataire du traité de non-prolifération (TNP), l'Inde a été mise au ban de la communauté du nucléaire civil à la suite de son essai de bombe nucléaire de 1974. L'adoption de « l'exception indienne » par le Groupe des Fournisseurs Nucléaires (NSG) en décembre 2008, puis la conclusion par l'Inde d'un accord de garanties avec l'AIEA ont mis fin à trente-quatre années de marginalisation et normalisé le commerce nucléaire avec New Delhi.

Confrontée à une hausse massive de ses besoins en électricité, l'Inde a prévu d'investir 175 milliards de dollars d'ici à 2030 afin de multiplier par treize sa capacité nucléaire. Toutefois, New Dehli ne dispose

pas d'une filière technologique à la hauteur de ses ambitions : le parc indien est constitué d'une vingtaine de réacteurs de petite taille (de 200 à 500 MWe) dérivés de la technologie canadienne Candu.

L'Inde fait du développement des réacteurs à neutrons rapides (de quatrième génération) une priorité pour tirer bénéfice de ses réserves en thorium et accéder à l'indépendance technologique et énergétique. Dans l'intervalle, New Delhi doit faire appel à la technologie étrangère pour soutenir sa croissance économique. Après Fukushima, le Premier ministre indien, M. Singh, a confirmé la poursuite du programme nucléaire et le recours à la technologie étrangère en complément de la technologie domestique.

Marquée par son passé récent, l'Inde n'entend pas se rendre dépendante d'un unique fournisseur de technologie. New Delhi discute donc avec les industriels français, américains, japonais, russes et coréens. La construction de deux réacteurs russes VVER-1000 est en cours d'achèvement sur le site de Kudankulam. Des contrats de gré à gré pourraient être conclus par l'électricien indien NPCIL avec Toshiba-Westinghouse, General Electric-Hitachi et Areva qui négocie la vente de deux premiers réacteurs EPRTM sur le site de Jaitapur.

Son modèle intégré permet à Areva de répondre à une préoccupation majeure des Indiens en garantissant l'approvisionnement en combustible de leurs futurs réacteurs sur la totalité de leur durée de vie. Par ailleurs, Fukushima a fait évoluer la sensibilité des décideurs indiens aux problématiques de sûreté. La décision de construire deux réacteurs russes supplémentaires est ainsi retardée du fait d'oppositions exprimées au niveau local. L'Inde ne sortira de cette situation que par le haut. Cela passe notamment par un discours intransigeant sur la sûreté. La création d'une autorité de sûreté indépendante, à l'image de l'ASN française, constitue un passage obligé. Lors d'une visite en Inde le 8 février, l'administrateur général du CEA, Bernard Bigot, a présenté au Secrétaire du *Department of Atomic Energy* (DAE) indien l'évaluation complémentaire de sûreté du réacteur EPRTM de Flamanville, réalisée après Fukushima par l'ASN, dont la réputation d'indépendance n'est plus à faire. Les garanties offertes par le réacteur EPRTM en matière de sûreté constituent un atout décisif pour ouvrir les portes du marché indien.

DES MARCHÉS DE NOUVEAUX RÉACTEURS CAPTIFS, MAIS NON DÉPOURVUS D'OPPORTUNITÉS

Si l'Inde s'ouvre aux technologies étrangères, c'est parce qu'elle ne dispose pas en propre des technologies nécessaires pour satisfaire ses besoins croissants en électricité. L'accès au marché des nouveaux réacteurs

est a *contrario* largement fermé aux fournisseurs étrangers dans les pays dotés d'une filière robuste et d'une technologie domestique éprouvée. C'est le cas des marchés russe et coréen. Les industriels nationaux y jouissent d'une position monopolistique dans le développement de capacités de production nucléaires, et développent des stratégies commerciales agressives sur les marchés internationaux.

La Corée du Sud dispose d'un parc de vingt-et-un réacteurs, qui couvre un tiers de sa demande d'électricité. Sans l'apport du nucléaire, le pays serait dépendant à hauteur de 97 % des importations pour satisfaire ses besoins énergétiques. Après Fukushima, Séoul a réaffirmé que le développement du nucléaire faisait pour elle figure de priorité afin de garantir sa sécurité d'approvisionnement. Son objectif est de disposer en 2030 d'une quarantaine de réacteurs satisfaisant 60 % de ses besoins. Après avoir acheté des réacteurs nucléaires clé en main, la Corée du Sud a obtenu dans les années 1980 des transferts de technologie (Combustion Engineering, aujourd'hui Westinghouse) et lancé des programmes d'autonomisation et de standardisation technologiques. Les Coréens ont depuis développé leur propre filière en s'affranchissant largement de leur dépendance vis-à-vis de Westinghouse. Si le marché des nouveaux réacteurs est (*de facto* plus que *de jure*) un marché captif, pour les industriels KHNP-Kepeco, le marché coréen est ouvert et concurrentiel dans l'amont du cycle : dépourvue de ressources en uranium, la Corée du Sud fait de la sécurité d'approvisionnement de son parc nucléaire une priorité. Areva y détient une position forte dans la fourniture d'uranium, de services de conversion et d'enrichissement. Grâce à son modèle intégré, Areva est un partenaire clé de l'industrie coréenne... comme elle l'est de l'industrie japonaise. La politique énergétique japonaise est en cours de redéfinition suite à Fukushima ; il serait vain de spéculer sur les décisions à venir. Observons simplement que pour Areva, le marché japonais a toujours été dual : exclue du marché des nouveaux réacteurs, qui est le terrain de jeu exclusif des industriels japonais Toshiba, Hitachi et Mitsubishi, Areva a su se rendre incontournable dans le cycle du combustible, tant dans l'amont du cycle (de l'uranium à la fabrication du combustible) que dans l'aval du cycle (traitement-recyclage des combustibles usés japonais dans les usines de La Hague et Melox, transfert de technologie pour la construction de l'usine de traitement-recyclage japonaise de Rokkasho Mura).

L'équation russe se pose dans des termes différents puisque la holding Rosatom est, avec Areva, le seul industriel nucléaire à être verticalement intégré, couvrant l'ensemble de la chaîne de valeur. Rosatom est à la manœuvre sur neuf chantiers de nouveaux réacteurs en Russie et n'a besoin ni des ressources uranifères ni de l'expertise technique ni des capacités industrielles

étrangères pour garantir l'approvisionnement de son parc nucléaire en combustible.

Cela n'a pas empêché le développement de coopérations industrielles dans certains domaines précis, y compris sur le marché russe. Le *leadership* technologique d'Areva dans le contrôle commande lui ouvre des opportunités sur un marché difficile d'accès. Dans ce segment, Areva est présente sur des réacteurs VVER à l'étranger, mais aussi en Russie (nouveaux réacteurs ou modernisation de centrales existantes). Par ailleurs, la France et la Russie promeuvent toutes deux le cycle fermé du combustible. Moscou souhaite développer une chaîne industrielle complète dans l'aval du cycle. Or, c'est dans le traitement-recyclage que le *leadership* industriel et technologique de la filière française, et notamment celui d'Areva, est le plus fort. Là encore, des coopérations mutuellement bénéfiques sont possibles sur un marché qu'il serait réducteur de présenter comme uniformément et irrémédiablement fermé.

DE NOUVEAUX MARCHÉS NUCLÉAIRES TRÈS CONCURRENTIELS

Au cours des prochaines décennies, la croissance du parc nucléaire mondial sera essentiellement le fait de pays déjà nucléarisés. Néanmoins, le nucléaire présente un potentiel certain dans de nouveaux pays désireux de diversifier leur mix électrique. C'est le cas en Asie du Sud-Est (Vietnam) et au Moyen-Orient. Après les Emirats Arabes Unis et la Jordanie, l'Arabie Saoudite met en œuvre un programme nucléaire ambitieux afin de préserver ses réserves pétrolières pour l'export et de préparer l'ère de l'après-pétrole. Elle entend se doter d'une capacité nucléaire de 20 GWe, soit l'équivalent de douze réacteurs EPRTM, et table sur un calendrier serré : un jalon important devrait être posé dès 2012, avec le lancement d'un processus concurrentiel. À plusieurs égards le marché saoudien apparaît caractéristique des pays accédant au nucléaire. Il s'agit d'abord d'un marché ouvert et très concurrentiel : ces pays ne s'interdisent d'explorer aucune piste. N'ayant ni capacités industrielles ni compétences techniques dans le nucléaire, Riyad entend faire jouer la concurrence entre tous les fournisseurs de technologie. Par ailleurs, l'Arabie Saoudite conditionne l'accès de son marché à des engagements forts en termes de localisation industrielle, de formation et d'emploi de citoyens saoudiens, ainsi que de création de valeur sur son territoire. Il ne s'agit pas uniquement pour l'Arabie Saoudite de produire de l'électricité à un coût compétitif et prévisible, mais aussi de développer une filière industrielle dont bénéficiera l'économie nationale dans la durée.

Enfin, ces pays partent de la « feuille blanche » en matière de sûreté. Or, la mise en place d'une autorité

de sûreté indépendante et d'un référentiel de sûreté en ligne avec les standards internationaux et intégrant le retour d'expérience de Fukushima figure sur le chemin critique d'un programme électronucléaire. L'AIEA appuie cette démarche, mais les documents sur la sûreté qu'elle publie n'ont pas de valeur contraignante. Or, un pays qui s'engage dans la voie du nucléaire civil n'a d'autre choix que celui des plus hauts standards de sûreté. L'idée du nucléaire *low cost* est périmée et une compétition portant simplement sur les prix n'a pas lieu d'être. La promotion par la France d'un nucléaire mieux-disant sur le plan de la sûreté est une condition nécessaire, mais non suffisante, de l'accès de l'industrie nucléaire française aux marchés nucléaires de demain. C'est une offre globale qui est recherchée : les pays accédants valorisent la compétence technique, les références des fournisseurs en mode projet, la capacité d'un *consortium* étranger à proposer une aide à l'exploitation, des solutions dans le cycle du combustible et à garantir l'approvisionnement en combustible nucléaire d'un futur réacteur, mais aussi l'assistance à la préparation d'une législation nucléaire, la mise en place d'une autorité de sûreté, la création de programmes de formation ou encore le partage d'expériences dans le domaine de la *public acceptance*.

EN EUROPE, DES MARCHÉS OUVERTS, DANS LE RESPECT DE HAUTES EXIGENCES DE SÛRETÉ

D'après l'AIE, la croissance nucléaire dans les pays de l'OCDE sera réelle, mais plus limitée que dans les pays émergents. En majorité, les nouvelles capacités nucléaires y remplaceront les réacteurs les plus anciens, qui seront mis à l'arrêt. Pour autant, l'Europe continue de croire en l'avenir du nucléaire. Après Fukushima, l'Allemagne et la Suisse restent isolées dans leur décision de sortir du nucléaire. Seize Etats membres de l'Union européenne ont confirmé leur choix du nucléaire pour leur mix électrique (il s'agit, outre la France, de la Bulgarie, l'Espagne, l'Estonie, la Finlande, la Hongrie, la Lettonie, la Lituanie, les Pays-Bas, la Pologne, la République tchèque, la Roumanie, le Royaume-Uni, la Slovaquie, la Slovénie et la Suède). Ces pays ont aussi confirmé leurs projets de construction de nouveaux réacteurs tout en s'engageant fermement à tirer les enseignements de Fukushima.

Réunis par le ministre français de l'Industrie, Eric Besson, le 10 février 2012, douze ministres ou secrétaires d'Etat à l'Énergie ont réaffirmé que « la sûreté nucléaire [n'était] pas négociable ». Dès février 2011, avant l'accident de Fukushima, le Conseil européen avait appelé à l'application des plus hauts niveaux de sûreté. Il serait inconcevable qu'un Etat membre de

l'Union se lance dans la construction d'un réacteur de deuxième génération. Parmi les Etats non nucléarisés, si l'Italie a renoncé à relancer un programme nucléaire, Varsovie est déterminé à engager la Pologne dans la voie de l'électronucléaire, seul moyen pour ce pays d'atteindre ses objectifs de réduction de ses émissions de gaz à effet de serre. En effet, c'est bien par sa politique de lutte contre le changement climatique que l'Europe se singularise, en faisant le pari assumé de l'exemplarité. Par son positionnement de leader industriel dans la fourniture de solutions énergétiques non émettrices ou faiblement émettrices de CO₂, aussi bien nucléaires (de troisième génération) que renouvelables, Areva s'inscrit pleinement dans cette politique d'exemplarité européenne dans la lutte contre le changement climatique et en faveur d'un haut niveau de sûreté nucléaire.

C'est d'ailleurs en Europe (en Finlande) que le premier réacteur de troisième génération est en cours de construction, pour le compte de l'électricien TVO (projet Olkiluoto 3, dit OL3). En plus des quatre réacteurs déjà en exploitation en Finlande, qui assurent 30 % de sa production électrique, et du réacteur EPR™ d'Olkiluoto, TVO et le consortium Fennovoima ont obtenu en 2010 l'aval politique pour deux nouveaux projets. Dans les deux cas, le choix technologique résultera d'un processus concurrentiel : parmi les technologies présélectionnées par TVO pour un quatrième réacteur sur le site d'Olkiluoto figure notamment le réacteur EPR™, ce qui est un signe de confiance de TVO, en dépit des aléas du projet OL3. Fennovoima a déjà lancé un appel d'offres auquel ont répondu, début 2012, les deux fournisseurs présélectionnés en 2011, Toshiba (ABWR) et Areva (réacteur EPR™).

Si la Finlande a ouvert la voie de la construction de nouveaux réacteurs et confirme après Fukushima son choix résolu du nucléaire, le Royaume-Uni se présente comme le premier marché européen pour la construction de nouveaux réacteurs. À plusieurs égards, le cas britannique est emblématique des défis auxquels sont confrontés les pays européens dont le parc électrique est vieillissant. Les centrales thermiques assurent 80 % de la production électrique britannique. Or, non seulement Londres s'est engagée à réduire ses émissions de CO₂, mais ses ressources gazières en Mer du Nord s'épuisent, alors que l'obsolescence de son parc de centrales à charbon s'accélère. Pionnier dans le développement du nucléaire civil en Europe, le Royaume-Uni dispose du deuxième parc nucléaire européen, qui produit 18 % de son électricité. Mais au milieu des années 2020, un seul de ses dix-neuf réacteurs actuels sera encore en exploitation. Plus que ses partenaires européens, le Royaume-Uni doit donc renouveler ses capacités de production électrique. Il mise sur le développement massif de l'éolien *offshore* et sur la construction de nouvelles capacités nucléaires. Le pays s'est donné les moyens de ses

ambitions : la réforme du marché de l'électricité (prix-plancher du CO₂, tarifs de rachat de l'électricité) en cours constitue un modèle du genre : elle crée un cadre incitatif pour le développement de capacités de production électrique non émettrices ou faiblement émettrices de CO₂. L'autorité de certification britannique (HSE) évalue actuellement les *designs* de l'AP1000 (Toshiba-Westinghouse) et du réacteur EPR™ (Areva). EDF Energy a déjà choisi la technologie du réacteur EPR™ pour construire quatre réacteurs, dont les premiers entreront en service en 2018. Suite au retrait des électriciens allemands E.ON et RWE du projet porté par leur co-entreprise commune HNP (construction de 6000 MWe nucléaires d'ici à 2025 au Royaume-Uni), le gouvernement britannique cherche activement de nouveaux investisseurs pour reprendre HNP et les projets de nouveaux réacteurs associés. Londres entend non seulement se doter de nouvelles capacités de production nucléaire, mais aussi présider à la renaissance au Royaume-Uni d'une filière nucléaire performante et ambitieuse à l'export. Areva s'inscrit pleinement dans cette démarche en appuyant des initiatives dans le domaine de la formation et en développant des partenariats à long terme avec les industriels britanniques.

Bien qu'en retrait par rapport à la locomotive britannique, les pays d'Europe centrale et orientale présentent un potentiel nucléaire conséquent. Sur les dix Etats d'Europe centrale et orientale ayant intégré l'Union européenne en 2004 et 2007, six exploitent déjà des réacteurs nucléaires : la République tchèque, la Slovaquie, la Hongrie, la Slovaquie, la Roumanie et la Bulgarie. Leur engagement réaffirmé en faveur du nucléaire est notamment motivé par un souci d'indépendance énergétique, tous ces pays étant largement dépendants de la Russie pour leur approvisionnement en gaz naturel.

En 2011, l'électricien tchèque EZ a émis le cahier des charges de son appel d'offres pour la construction de deux réacteurs sur le site de Temelín. Les fournisseurs présélectionnés, Areva, Toshiba-Westinghouse et Rosatom, ont remis chacun une offre début juillet 2012. En Hongrie, un appel d'offres devrait être lancé en 2012 pour la construction de deux réacteurs sur le site de Paks.

La Slovaquie entend également se doter d'un nouveau réacteur, à Bohunice.

Ces trois pays disposent aujourd'hui de parcs constitués de réacteurs russes (VVER) datant d'avant 1990. Si les Russes y détiennent une position majoritaire, voire monopolistique, dans l'approvisionnement en uranium et en combustible, les projets de nouveaux réacteurs permettront de redistribuer les cartes. Les choix technologiques se feront à l'issue d'appels d'offres ouverts.

Il en sera de même en Pologne, le seul primo-accédant au nucléaire en Europe : ses engagements dans le cadre du paquet énergie-climat européen, l'obsoles-

cence de son parc de centrales thermiques et sa demande croissante d'électricité imposent à Varsovie de renouveler sa politique énergétique. À l'horizon 2030, le gouvernement polonais prévoit de construire l'équivalent de quatre réacteurs EPRTM. L'électricien PGE prévoit de lancer en 2012 la première phase d'un appel d'offres technologique auquel Areva participera. Sur ces marchés de taille modeste, la certification d'un *design* de réacteur constitue un défi majeur. Les capacités limitées des autorités de sûreté nationales rendent nécessaire l'harmonisation des procédures de certification au niveau européen. C'est en mutualisant leurs efforts que les autorités de sûreté nucléaire européennes pourront accompagner au mieux les nouveaux projets nucléaires dans le strict respect des exigences de sûreté les plus élevées. La reconnaissance mutuelle des analyses de sûreté doit constituer un objectif fort au service d'un développement responsable de l'énergie nucléaire.

CONCLUSION

Si l'accident de Fukushima a retardé certains programmes nucléaires, le marché des nouveaux réacteurs est promis à une expansion significative au cours des prochaines décennies. La théorie distingue traditionnellement des marchés ouverts et des marchés captifs. Mais la réalité est plus complexe. Là où les marchés de nouveaux réacteurs sont réservés aux industriels locaux, l'excellence technologique, notamment dans le domaine de la sûreté, ouvre des opportunités de développement industriel et commercial. Des alliances ciblées, des partenariats mutuellement bénéfiques peuvent être développés sur des marchés *a priori* difficiles d'accès. Par son modèle intégré couvrant

toutes les activités, de l'extraction uranifère jusqu'au traitement-recyclage des combustibles nucléaires usés, Areva dispose d'un large portefeuille de solutions pour répondre de manière différenciée aux besoins de ses clients. Là où les marchés de nouvelles capacités nucléaires sont ouverts et concurrentiels, les fortes exigences de localisation industrielle mettent l'industrie nucléaire au défi de développer des approches partenariales, en lieu et place d'une stricte relation fournisseur-client.

L'accident nucléaire de Fukushima a rappelé que la sûreté nucléaire ne saurait tolérer de demi-mesure et que le développement d'un nucléaire à bas coût était inacceptable. La sûreté constitue la pierre angulaire du développement d'un nucléaire responsable, et donc pérenne. C'est depuis toujours le credo d'Areva, qui refuse tout compromis en matière de sûreté. Il n'est pas anodin que le réacteur EPRTM soit le seul réacteur de troisième génération en construction à la fois en Europe (France, Finlande) et en Asie (Chine), en attendant le démarrage des chantiers d'EDF au Royaume-Uni. Il incombe à l'Union européenne, et en son sein à la France, de promouvoir avec vigueur la logique du mieux-disant en matière de sûreté nucléaire.

Cet exercice de promotion doit impérativement s'accompagner d'initiatives structurantes en matière de financement des projets nucléaires. Le financement des contrats à l'export revêt une dimension stratégique et constitue un facteur de différenciation commerciale. À l'heure où les principaux concurrents d'Areva bénéficient de financements publics ne respectant pas les règles de l'OCDE, il est crucial que des solutions de financement innovantes soient mises en œuvre aux niveaux français et européen afin de maintenir la compétitivité de l'industrie européenne et d'encourager le développement du nucléaire le plus sûr.

Les marchés des îlots conventionnels dans le monde

Marché discret, au sens mathématique de ce terme, avec un volume d'affaires irrégulier d'une année sur l'autre, le marché des îlots conventionnels de centrales nucléaires impose de développer une stratégie particulière pour chaque projet. La diversité des réacteurs proposés (technologie, puissance thermique, caractéristiques thermodynamiques de la vapeur fournie), la variété des sources froides dont il faut arriver à tirer parti (de la mer Baltique à l'océan Indien) et les différences de fréquence des réseaux électriques à alimenter (50 Hz ou 60 Hz) nécessitent le développement de véritables plateformes de solutions. De plus, les exigences de parts de marchés locales dans certains contrats imposent souvent de nouer des partenariats avec des acteurs locaux.

Par **Olivier MANDEMENT, Philippe ANGLARET et Patrick LEDERMANN***

La diversité de ce marché rappelée, tâchons néanmoins d'en dégager les principales caractéristiques.

OÙ CE MARCHÉ EST-IL LOCALISÉ ?
QUELLE EN EST LA TAILLE ?

Marquée par la signature du contrat de Olkiluoto 3, première commande de centrale neuve en Europe occidentale après plus d'une décennie sans commande, l'année 2003 est généralement considérée comme l'année de la « renaissance » du marché des centrales nucléaires. Depuis cette date, ce sont environ 95 GWe

qui ont été commandés dans le monde (ce chiffre correspondant à la construction de centrales neuves dont le contrat est effectivement entré en vigueur), soit de 10 à 11 GWe par an, en moyenne. Les pays où ces centrales ont été commandées sont (par ordre de puissances décroissantes) : la Chine (> 55 GWe commandés), la Corée du Sud (~10 GWe), la Russie (~8 GWe), les Emirats Arabes Unis (> 5 GWe), les Etats-Unis (5 GWe). L'Europe, quant à elle, ne totalise depuis cette date que deux commandes d'îlots conventionnels, de 1,7 GWe chacun, respectivement en Finlande et en France.

* Alstom.

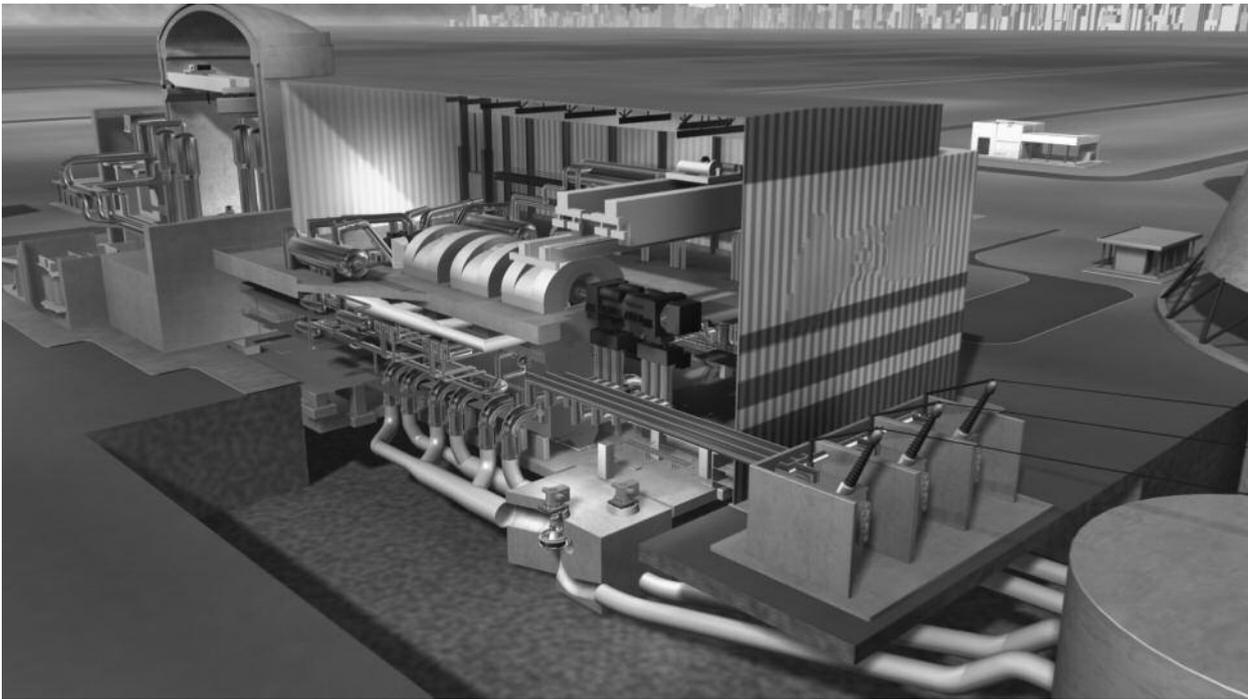


Photo 1 : Îlot conventionnel de centrale nucléaire.

Alors qu'elles étaient plus optimistes, nos prévisions sur la taille du marché mondial pour les dix années à venir, qui ont été revues à la baisse suite à l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima en 2011, sont maintenant de l'ordre de 15 GWe par an, en moyenne. L'essentiel de ces nouvelles centrales (environ les deux tiers en termes de GWe) sera commandé par la Chine, l'Inde et la Russie. Alstom reste également attentif à son marché historique en Europe et se positionne sur les développements en cours, notamment au Royaume-Uni où il est envisagé de construire jusqu'à 16 GWe d'origine nucléaire pour remplacer les centrales arrivant en fin de vie, en Finlande où le Parlement a autorisé la construction de deux tranches supplémentaires depuis la commande de Olkiluoto 3, ainsi qu'en République tchèque et en Pologne. Hors Europe, l'Afrique du Sud et le Brésil, qui exploitent déjà deux réacteurs nucléaires chacun (le chantier de Angra 3 au Brésil est toujours en cours), devraient lancer au cours des prochaines années de nouveaux programmes électronucléaires.

LES ROUTES D'ACCÈS AU MARCHÉ DES ÎLOTS CONVENTIONNELS

Il faut distinguer deux cas principaux : soit l'électricien, qui est le client final de la centrale, dispose de ses propres compétences en ingénierie nucléaire et en intégration, auquel cas il va passer des commandes en lots séparés de plus ou moins grande taille, puis gérer lui-même les interfaces entre ces

différents lots (îlot nucléaire, îlot conventionnel, génie civil), soit il va commander une centrale « clé en main » à un *consortium* dont le chef de file sera, le plus souvent, le vendeur du réacteur nucléaire.

Le premier cas est illustré par l'approche historique d'EDF pour le développement du parc électronucléaire français. Il s'agit également de l'approche retenue par l'électricien chinois CGNPC (*China Guangdong Nuclear Power Corporation*), qui exploite aujourd'hui 6 GWe d'origine nucléaire et a lancé la construction de 20 GWe supplémentaires. Fondée en 2004, première du genre en Chine, la CNPEC (*China Nuclear Power Engineering Company*) est la branche d'ingénierie nucléaire de la CGNPC. Capitalisant sur les premières expériences accumulées lors de la construction des tranches de Daya Bay (2 x 985 MWe) et de Ling Ao phase I (2 x 990 MWe), la CNPEC a depuis développé ses propres compétences en ingénierie, ainsi qu'en construction et en gestion de grands projets. Cette société est aujourd'hui impliquée dans la construction de nombreuses centrales nucléaires en Chine, notamment Ling Ao phase II (2 x 1080 MWe) récemment mise en service industrielle avec de l'avance sur le planning, Hongyanhe (4 x 1080 MWe), Ningde (4 x 1080 MWe), Yangjiang (6 x 1000 MWe), Fangshengang (2 x 1000 MWe) et Taishan (2 x 1750 MWe). Soixante pour cent des îlots conventionnels de ces centrales de la CGNPC sont équipés de turbines à vapeur, d'alternateurs et de condenseurs de technologies Alstom.

Le second cas est illustré par l'électricien finlandais TVO, qui, en 2003, a passé commande d'une

tranche de type EPR (Olkiluoto 3) sur la base d'un contrat clé en main. Plusieurs appels d'offres en cours sont basés sur une telle approche : l'extension de la centrale existante de Temelin (tranches 3 et 4) en République tchèque, projetée par l'électricien national CEZ, ou encore la construction d'une nouvelle centrale, en Finlande, sur le site de Pyhäjoki, projetée par Fennovoima.

Aux deux cas principaux d'accès au marché décrits ci-dessus, il convient d'en ajouter un troisième, plus original et moins fréquent, dans lequel l'électricien, le client final, n'achète pas la centrale proprement dite, mais simplement le courant qui y est produit, dans le cadre d'un « PPA » (*Power Purchase Agreement*) et le revend ensuite *via* son propre réseau de distribution. Dans ce cas, le groupement qui construit la centrale va aussi en être le propriétaire et l'exploitant, ce qui implique qu'il assume la charge du financement du projet. Ce modèle a été retenu par l'électricien turc TEAS pour la première centrale nucléaire construite en Turquie, sur le site de Akkuyu (4 tranches jumelles de 1200 MWe chacune équipées de réacteurs russes fournis par Rosatom).

Compte tenu des différents schémas contractuels évoqués plus haut, il est nécessaire pour un acteur tel qu'Alstom d'avoir une stratégie commerciale à la fois vis-à-vis des électriciens et des fournisseurs de réacteurs et, éventuellement, vis-à-vis des architectes-ensembliers et des constructeurs locaux, potentiels partenaires d'Alstom.

DES STRATÉGIES ADAPTÉES À CHAQUE MARCHÉ : PART LOCALE OBLIGATOIRE ET TRANSFERT DE TECHNOLOGIE

Pour avoir accès à certains marchés, notamment dans les pays qui se sont lancés dans un programme électronucléaire avec l'ambition de construire des séries de centrales identiques, il est nécessaire d'être associé à des partenaires locaux et/ou de produire localement. Ainsi, pour couvrir les trois plus importants marchés en termes de GWe (ceux de la Chine, de l'Inde et de la Russie), Alstom a mis en place des stratégies adaptées. En Chine, un accord de licence a été signé avec l'un des trois grands constructeurs chinois, la *Dongfang Electric Company* (DEC), qui fabrique aujourd'hui des turbines à vapeur nucléaires, des alternateurs, des condenseurs et des groupes sècheurs-surchauffeurs (GSS) de technologies Alstom pour équiper les centrales chinoises, d'une puissance de 1 000 à 1 750 MWe. Pour chaque tranche construite en Chine, une répartition des fournitures est mise en place entre Alstom et son licencié DEC. Les technologies d'Alstom sont aujourd'hui bien représentées dans le parc nucléaire chinois en cours de construction (voir la figure ci-dessous). En Inde, c'est un contrat passé dans le cadre d'un *consortium* avec le constructeur indien BHEL (*Bharat Heavy Electricals Ltd.*) qui a été signé en 2011. Il prévoit la fourniture par le *consortium* Alstom-BHEL de turbines, d'alternateurs, de condenseurs et de groupes sècheurs-sur-

La technologie nucléaire d'Alstom Présence en Chine

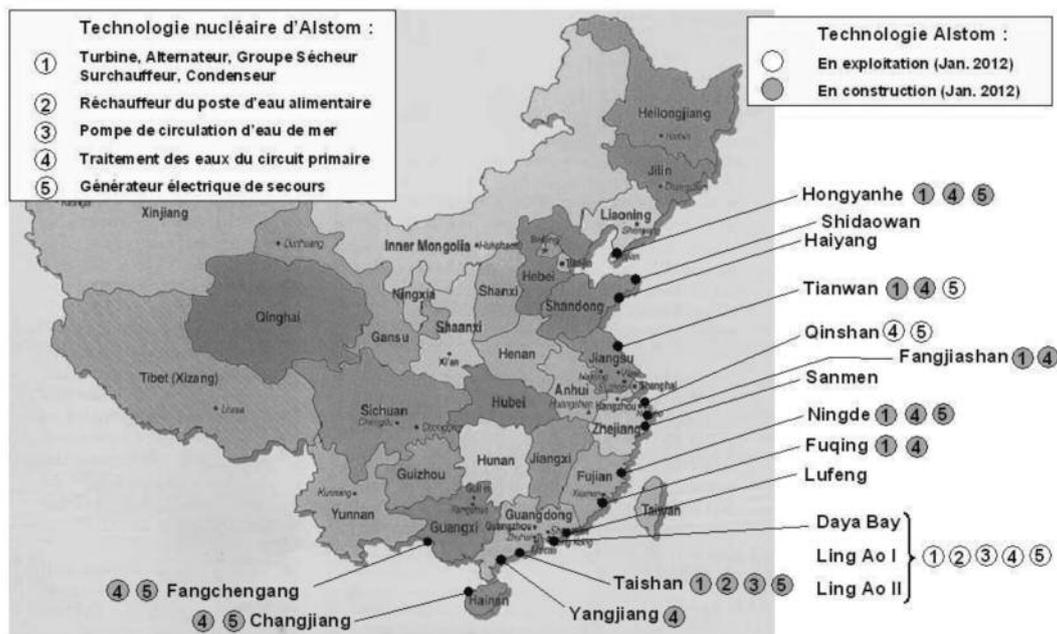


Figure 1 : La technologie nucléaire d'Alstom en Chine.

Réacteur	Fournisseur	Technologie du réacteur			Puissance électrique brute typique (MWe)	Statut	
		Eau légère		Eau lourde		En exploitation	En construction
		Pressurisée	Bouillante	Pressurisée			
EPR	Areva	X			1750		X
ESBWR	GE-Hitachi		X		1700	Non encore vendu	
APWR	MHI	X			1700		X (1)
AB1600	Toshiba		X		1550	Non encore vendu	
APR1400	KEPCO	X			1450		X
ABWR	GE-Hitachi et Toshiba		X		1350	X	
KERENA	Areva		X		1300	Non encore vendu	
AP1000	Westinghouse-Toshiba	X			1250		X
VVER1200	Rosatom	X			1200		X
ATMEA1	Areva-MHI	X			1200	Non encore vendu	
VVER1000	Rosatom	X			1100	X	
CPR1000	CGNPC	X			1100	X	
EC6	SNC-Lavalin			X	750	Non encore vendu	
PHWR700	NPCIL			X	700		X
Réacteur à neutrons rapides							
BN800	Rosatom	Caloporteur : sodium liquide			800		X
FBR500	NPCIL	Caloporteur : sodium liquide			500		X

Tableau 1 : Principaux réacteurs récents, en cours de construction, ou proposés.

chauffeurs pour les tranches 3 et 4 (de 710 MWe chacune) de la centrale de Kakrapar, dans l'Etat du Gujârât, où des réacteurs indiens à eau lourde de type PHWR700 sont en cours de construction par NPCIL (*Nuclear Power Corporation of India Ltd.*). Ce contrat en Inde prépare la mise en place d'une *joint-venture* regroupant Alstom, NPCIL et BHEL. Enfin, en Russie, Alstom a créé en 2007 une société commune avec Atomenergomash, une filiale de Rosatom (le conglomérat russe du nucléaire), dont la finalité est la fourniture d'îlots conventionnels intégrés et optimisés destinés à équiper les réacteurs à eau sous pression produits par Rosatom.

LA DIVERSITÉ DES RÉACTEURS PROPOSÉS ET SON IMPACT SUR LES ÎLOTS CONVENTIONNELS

Aujourd'hui, dix constructeurs commercialisent plus de quinze modèles de réacteurs nucléaires. Parmi ceux-ci, cinq sont des sociétés internationales : Areva, Mitsubishi Heavy Industries (MHI), Westinghouse-Toshiba, GE-Hitachi et SNC-Lavalin, qui a récemment acquis la division réacteur

d'AECL (*Atomic Energy of Canada Ltd.*). Les cinq autres sont des organisations étatiques construisant et exploitant des réacteurs : Rosatom (en Russie), CGNPC et CNNC (en Chine), KEPCO (en Corée du Sud) et NPCIL (en Inde). Pour réussir à l'international, un constructeur de réacteurs a besoin non seulement d'une technologie éprouvée mais aussi du support d'un exploitant de centrale qui pourra lui fournir l'aide nécessaire pour l'exploitation et la maintenance et investir, le cas échéant, dans des projets à l'exportation. Le tableau ci-dessus récapitule, par ordre décroissant des puissances électriques brutes produites aux bornes du groupe turbo-alternateur, les principaux modèles récents de réacteurs en cours de construction (ou proposés par les différents fournisseurs).

Les réacteurs listés (dont le fluide caloporteur est de l'eau légère ou de l'eau lourde) fournissent à la turbine une vapeur humide (titre en eau inférieur à 0,5 %) à des pressions s'échelonnant de 42 à 75 bars (a) et à des températures comprises entre 250 et 290°C, qui sont des valeurs très basses, par rapport

(1) La construction des premiers APWR (Tsuruga 3 et 4 au Japon) est à ce jour incertaine.

à celles des cycles dits fossiles. Les réacteurs à eau lourde (installés principalement au Canada, en Argentine et en Inde) sont ceux dont la pression de vapeur vive est la plus basse. La combinaison du débit massique de vapeur fourni par le réacteur, image de sa puissance thermique, et de la pression de fourniture de cette vapeur détermine le débit volumique que devra accepter la turbine et donc son « ouverture ». Compte tenu de la variété des modèles de réacteurs proposés, une vaste plage d'ouvertures est nécessaire pour pouvoir couvrir complètement le marché des réacteurs.

Dans les réacteurs à eau pressurisée (eau légère ou lourde), la présence de générateurs de vapeur et d'un circuit secondaire séparé du primaire assure à l'îlot conventionnel la livraison d'une vapeur non contaminée. Les spécificités de la turbine tiennent alors aux débits volumiques bien plus importants que dans un cycle fossile (pour produire une puissance électrique donnée, le débit volumique de vapeur nécessaire est environ cinq fois plus élevé dans un cycle nucléaire) et à la présence de gouttelettes d'eau qui obligent à sécher la vapeur après une première détente dans une turbine haute pression. Des règles de conception et des matériaux appropriés doivent être utilisés dans ces turbines pour éviter des phénomènes d'érosion et de corrosion sous tension.

En revanche, dans les réacteurs à eau bouillante, c'est l'eau du circuit primaire elle-même qui entre en ébullition dans la cuve du réacteur ; la vapeur ainsi générée alimente directement la turbine. En conséquence, l'îlot turbine perd son qualificatif de conventionnel et des dispositions techniques particulières doivent être mises en place pour minimiser les radiations et les risques de contamination. Des études de radioprotection sont menées dans l'îlot turbine afin d'y installer des protections adaptées : contrôle d'accès, murs de béton démontables et coffrages destinés à limiter les radiations, télé-opération et télésurveillance accrues des matériels pour éviter les expositions du personnel d'exploitation et de maintenance. Le maître-mot en matière de radioprotection est « ALARA » (*As Low As Reasonably Achievable*). Un soin encore plus particulier est apporté à la sélection des matériaux utilisés dans l'îlot turbine de ce type de centrale : le cobalt est prohibé (pour éviter son entraînement dans la cuve du réacteur), il est fait un emploi accru d'aciers inoxydables à haute teneur en chrome et des traitements de surface spécifiques par dépôt à l'arc sont mis en œuvre pour éviter les phénomènes de dégradation liés au pH plus faible et à la teneur en oxygène dissous plus élevée de la vapeur de ces centrales. Enfin, des mesures d'étanchéité particulières sont utilisées pour éviter les risques de fuite de vapeur dans la salle des machines, notamment aux traversées des corps de turbines par les rotors, aux plans de joints des corps et au niveau des tiges des organes d'admission de la vapeur dans la turbine.

Les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium, lorsqu'ils sont associés à un cycle de Rankine, fournissent, quant à eux, une vapeur sèche très surchauffée dont les caractéristiques sont proches d'un cycle thermique fossile classique, avec des pressions de l'ordre de 180 bars (a) et des températures voisines de 500°C, ce qui permet l'utilisation de turbines à vapeur de la gamme de celles équipant des centrales dites fossiles. Conformément aux orientations données par la loi de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs, le Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives a lancé en 2010 les études d'avant-projet sommaire du prototype de réacteur nucléaire de quatrième génération dénommé ASTRID (*Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration*) auxquelles Alstom participe pour la partie concernant la conception des systèmes de conversion d'énergie. À ce stade, deux systèmes sont en effet envisagés : un cycle de Rankine utilisant une turbine à vapeur d'environ 600 MWe et un cycle de Brayton, avec turbine à gaz, ce qui permet d'éviter l'utilisation d'un échangeur de chaleur sodium liquide/eau. Rappelons que le cycle de Rankine était déjà mis en œuvre dans les centrales françaises à neutrons rapides de Phénix et de Super-Phénix. Ce cycle est également retenu dans les centrales russes et indiennes de ce type en cours de construction (réacteurs BN800 et FBR500, voir le tableau de la page précédente).

LA VARIÉTÉ DES SOURCES FROIDES ET SON IMPACT SUR LES ÎLOTS CONVENTIONNELS

Machine thermique, la turbine à vapeur nucléaire travaille entre une source chaude (le réacteur) et une source froide (mer, lac, fleuve, atmosphère). Le rendement du cycle dépend pour une partie importante des températures respectives de ces deux sources. Tributaire de la température de la source chaude, le concepteur de l'îlot conventionnel peut en revanche chercher à retirer le maximum de profit de la source froide mise à sa disposition : eau ou atmosphère (*via* des réfrigérants atmosphériques). Une étude d'optimisation technico-économique de la source froide est menée, sur chaque projet, pour déterminer la valeur optimale des paramètres suivants : section d'échappement de la turbine, valeur(s) du vide dans le condenseur (condenseur mono-vide ou multi-vides), pincement et surface d'échange du condenseur, débit d'eau de circulation, nombre de pompes et puissance de pompage.

En Scandinavie, qui dispose d'une excellente source froide avec la mer Baltique, on justifiera facilement dans le condenseur des vides atteignant de l'ordre de 20 à 30 mbars (a), alors qu'en Inde, on obtiendra

plutôt de 70 à 80 mbars (a), avec une circulation d'eau de mer, et de 90 à 100 mbars (a) avec des tours de réfrigération atmosphérique. Pour un réacteur donné, en fonction du site d'installation de la centrale, la valeur du vide au condenseur, et donc le débit volumique de vapeur à l'échappement de la turbine, peut facilement varier du simple au triple. Or, pour avoir un bon rendement aérodynamique, la plage idéale de vitesse de sortie de la vapeur est relativement étroite. Une sortie trop rapide de la vapeur de la turbine, par exemple, reviendrait à perdre l'énergie cinétique correspondante de la vapeur dans le condenseur. Il faut donc être en mesure de proposer une section d'échappement bien adaptée à chaque projet et, pour un type de réacteur donné, cette section est susceptible de varier elle aussi du simple au triple en fonction du site où le réacteur est implanté. Cette aptitude à proposer la « bonne » section d'échappement est un facteur essentiel de succès pour pouvoir offrir aux clients les meilleures performances sur un site donné. Pour arriver à cette fin, le concepteur de turbines peut jouer sur le nombre de modules BP (basse pression), et donc sur le nombre de flux d'échappement, ainsi que sur la longueur de la dernière ailette mobile de la turbine. Le tableau ci-dessous présente les combinaisons d'échappement qu'offre aujourd'hui Alstom pour couvrir ses applications nucléaires de 800 MWe et au-delà.

LA PLATE-FORME ARABELLE™ : UNE OFFRE ADAPTÉE POUR LES ÎLOTS CONVENTIONNELS

Pour répondre à la diversité des réacteurs et à la variété des sources froides en proposant des îlots conventionnels bien adaptés à chaque réacteur et à chaque site, Alstom a développé une plateforme de solutions centrées autour de son concept de turbine à vapeur nucléaire, dénommée ARABELLE™. Au-delà d'une puissance comprise entre 800 et 1 000 MWe, les débits volumiques de vapeur sont tels qu'il est préférable de faire tourner le groupe turbine-alternateur à

demi-vitesse (c'est-à-dire à 1 500 tours/minute pour les réseaux à 50 Hz et à 1 800 tours/minute pour les réseaux à 60 Hz) pour limiter les niveaux de contraintes centrifuges subies par les ailettes et améliorer le rendement du cycle. Dans ce cas, l'alternateur entraîné par la turbine possède deux paires de pôles. Pour les centrales de 800 à 1 300 MWe, notre solution d'îlot conventionnel s'organise autour du modèle de turbine ARABELLE 1000, qui comprend un corps combiné HP-MP (haute pression et moyenne pression) suivi de deux ou trois corps BP (basse pression), en fonction du niveau de vide dans le condenseur (voir la figure 2 de la page suivante). De 1 300 à 1 900 MWe, le modèle ARABELLE 1700 est proposé, avec un corps HP-MP plus gros que celui d'ARABELLE 1000 et, cette fois-ci, trois ou quatre corps BP (voir la figure 3 de la page suivante). Pour une fréquence donnée (50 Hz ou 60 Hz), chaque corps BP peut être équipé d'une ailette terminale « courte » ou « longue » permettant d'offrir plus ou moins de section d'échappement à la turbine (voir le tableau ci-dessous). Au total, à partir d'un assez petit nombre de corps, on peut proposer une famille homogène composée de seize turbines couvrant toutes les puissances électriques de 800 à 1 900 MWe, tous les réacteurs dans cette gamme de puissances, qu'ils soient à eau pressurisée ou bouillante, et toutes les sources froides conduisant à des vides de 20 à 100 mbars (a) et ce, pour les deux fréquences de réseaux électriques, à savoir 50 Hz et 60 Hz. De plus, grâce à son corps combiné HP-MP, ARABELLE™ est la seule turbine au monde, dans cette gamme de puissance, à utiliser la détente simple flux de la vapeur, ce qui permet de mettre en œuvre des ailettes plus élancées offrant ainsi un meilleur rendement qu'un corps HP double flux.

ARABELLE™ est un acronyme : le A pour Alstom, puis RA, en souvenir de la société Rateau et de son fondateur éponyme Auguste Rateau (né sous le Second Empire et sorti premier de l'École Polytechnique en 1883, il intégra le Corps des Mines, développa des ventilateurs utilisés pour l'aération des galeries d'extraction minière, puis posa les bases de sa théorie des turbomachines - voir *les Annales des Mines*, 13^{ème} série, tome 2, 1932), BEL

			Nombre de modules Basse Pression (BP)		
			2 BP	3 BP	4 BP
Fréquence du réseau	Vitesse de rotation	Longueur de la dernière ailette	4 flux d'échappement	6 flux d'échappement	8 flux d'échappement
50 Hz	1 500 tours/mn	1 430 mm	74 m ²	111 m ²	148 m ²
		1 750 mm	104 m ²	156 m ²	208 m ²
60 Hz	1 800 tours/mn	1 190 mm	52 m ²	78 m ²	104 m ²
		1 460 mm	72 m ²	108 m ²	144 m ²

Tableau 2 : Sections d'échappement disponibles pour applications nucléaires à demi-vitesse.

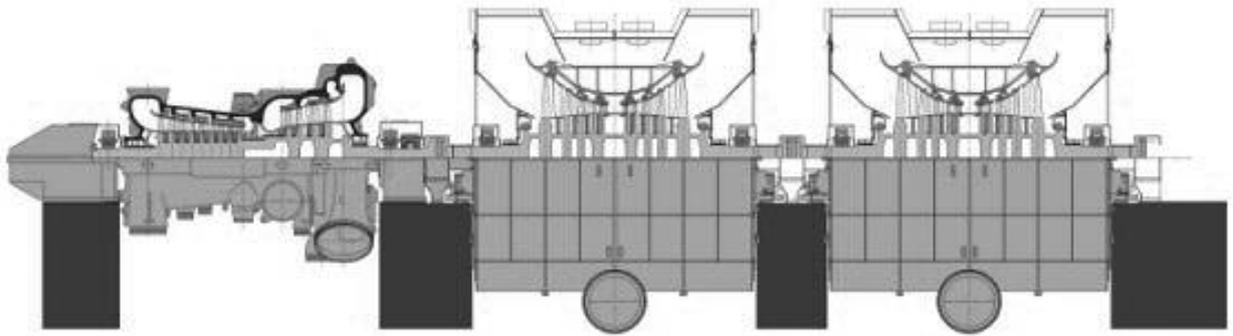


Figure 2 : Coupe longitudinale du modèle ARABELLE 1000 avec 2 corps BP.

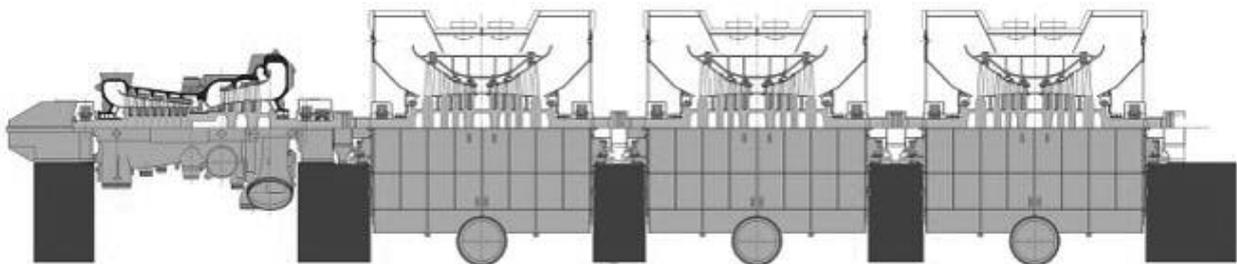


Figure 3 : Coupe longitudinale du modèle ARABELLE 1700 avec 3 corps BP.

pour Belfort, ville d'implantation de l'usine historique du groupe où furent fabriquées dans les années 1990 les quatre premières ARABELLE™ destinées au parc français d'EDF (tranches du palier N4, de 1 550 MWe chacune, installées à Chooz B1 et B2, dans les Ardennes, et à Civaux 1 et 2, dans la Vienne). Enfin, les deux lettres « LE » finales sont soit le début de Levallois-Perret, la ville où se trouve le siège d'Alstom et de son activité nucléaire, soit une manière de féminiser le mot ainsi formé pour en faire un nom de turbine attrayant...

Autour d'ARABELLE™, Alstom a développé des solutions pour tous les principaux composants de l'îlot conventionnel : alternateurs, jeux de barres, disjoncteurs et transformateurs, groupes sécheurs-surchauffeurs, condenseurs, réchauffeurs du poste d'eau et bâches alimentaires, pompes de circulation, pompes d'extraction et pompes alimentaires. Grâce à ses produits et à ses compétences en matière d'intégration et d'optimisation, Alstom est à même de délivrer des îlots conventionnels de centrales nucléaires clés en main.

COMPÉTITION, SUCCÈS RÉCENTS, AUTRES MARCHÉS

Sur les 95 GWe commandés depuis 2003, Alstom, avec son licencié chinois Dongfang, a assuré à sa technologie une part de marché de 30 %, ce qui lui vaut la première place. Viennent ensuite Siemens, avec son licencié chinois *Shanghai Electric Corporation* (18 %), puis MHI avec son licencié *Harbin Electric Corporation* (16 %). Ces résultats récents sont en ligne avec la part de marché historique d'Alstom sur ce segment. En effet, sur l'ensemble des centrales nucléaires en exploitation ou en cours de construction dans le monde, 30 % sont équipés d'un groupe turbine-alternateur de technologie Alstom et 40 % possèdent au moins un équipement de technologie Alstom (que ce soit le condenseur, les réchauffeurs du poste d'eau alimentaire ou les installations diesel de secours), ce qui illustre la forte pénétration du groupe sur ce marché.

Sur les quatre réacteurs EPR en cours de construction dans le monde, trois sont équipés d'une turbine ARA-

BELLE 1700 (Flamanville 3, Taishan 1 et 2). Dix-huit ARABELLE 1000 ont été commandées par la Chine depuis 2005 pour équiper ses centrales de type CPR1000 et les deux premières d'entre elles (Ling Ao 3 et 4) ont été mises en service industriel, respectivement en 2010 et en 2011, avec quelques semaines d'avance sur le planning (voir la photo ci-dessous). Les tests de performance de ces deux premières ARABELLE 1000, effectués récemment par le client chinois, ont montré que le niveau de puissance garanti a été dépassé. La technologie à demi-vitesse ARABELLE™, par rapport aux machines à pleine vitesse installées précédemment par Alstom sur le même site (tranches de Daya Bay 1 et 2, Ling Ao 1 et 2 fonctionnant à 3 000 tours/minute), permet de produire 8 % de puissance électrique supplémentaire, soit environ 80 MWe, toutes choses étant égales par ailleurs (mêmes réacteurs CPR1000, même site, même source froide). En Russie, la *joint-venture* créée par Alstom et Atomenergomash (AAEM) a conclu, en février 2012, un contrat pour la fourniture de deux ARABELLE 1000 et des équipements associés destinés à la nouvelle centrale nucléaire de Rosatom à Kaliningrad (deux tranches, dénommées Baltic 1 et 2, équipées de réacteurs de type VVER1200). Ce récent contrat en

Russie vient confirmer le succès commercial d'ARABELLE™.

Le marché des affaires neuves étant par nature discret, il est nécessaire pour un constructeur tel qu'Alstom d'être également actif sur le marché des rénovations et des augmentations de puissance de centrales existantes pour générer un volume d'affaires suffisant et maintenir savoir-faire et compétences dans ses bureaux d'études, ses ateliers de fabrication, ainsi que chez ses sous-traitants. À puissance thermique du réacteur inchangée, l'introduction d'une technologie moderne dans la turbine à vapeur existante – par exemple, par le changement des rotors et de la veine vapeur, avec mise en œuvre de profils d'aubage plus performants et d'étanchéités améliorées – peut permettre d'augmenter la puissance électrique produite par la centrale d'environ 3 à 5 %. D'autre part, lors d'un projet d'augmentation de la puissance thermique d'un réacteur existant (cette augmentation pouvant dépasser les 10 %), de nombreux équipements de l'îlot conventionnel se retrouvent sous-dimensionnés pour les nouvelles conditions d'exploitation, ce qui nécessite soit de les modifier, soit de les remplacer : cela représente un autre marché lié aux îlots conventionnels, sur lequel Alstom est également présent.



ARABELLE 1000 à Ling Ao 3 en Chine.

Les enjeux de la gestion des déchets radioactifs

Comme toute activité humaine, les activités nucléaires sont à l'origine de déchets. Une partie de ces déchets contient des substances radioactives et doit faire l'objet d'une gestion adaptée aux risques qu'ils présentent. Aujourd'hui, un million trois cent mille tonnes de déchets radioactifs sont présents en France. Pour plus de 90 % d'entre eux, il s'agit de déchets dits à vie courte, qui sont aujourd'hui stockés dans les stockages de surface de l'Andra. Celle-ci conçoit des solutions de stockage pour les autres déchets. Pour les déchets les plus radioactifs et à vie longue, il s'agit du projet de stockage géologique profond Cigéo, en Meuse/Haute-Marne. Mettre en place une solution de stockage pour chaque type de déchet ultime est bien sûr une condition nécessaire pour faire du nucléaire une industrie durable, mais cela ne dispense pas l'ensemble de la filière nucléaire de poursuivre ses efforts pour réduire la quantité et la dangerosité des déchets qu'elle produit. C'est particulièrement vrai pour les futures installations qui pourraient être développées (dites de quatrième génération) : il importe de prendre, dès aujourd'hui, toute la mesure des enjeux liés à la gestion de leurs déchets.

Par **Fabrice BOISSIER***

UNE POLITIQUE DE GESTION ORGANISÉE ET VOLONTARISTE

Avec la loi n°2006-739 du 28 juin 2006, la France s'est dotée d'un cadre rigoureux pour la gestion des déchets radioactifs. Cette loi comporte notamment des orientations de gestion pour l'ensemble des matières et déchets radioactifs :

– la réduction de la quantité et de la nocivité de ces déchets,

– leur entreposage comme étape préalable à leur stockage, dans des installations spécialement aménagées pour cet usage,

– leur stockage en couches géologiques profondes, comme solution pérenne, pour les déchets ultimes ne pouvant être stockés en surface ou à faible profondeur.

* Directeur de la maîtrise des risques, Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra).

La loi institue par ailleurs un Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs (PNGMDR) devant être publié tous les trois ans, dont les objectifs sont les suivants :

- dresser le bilan des modes de gestion des matières et déchets radioactifs existants,
- recenser les besoins prévisibles d'installations d'entreposage ou de stockage et préciser les capacités nécessaires, ainsi que les durées d'entreposage,
- déterminer les objectifs à atteindre pour les déchets radioactifs qui ne font pas encore l'objet d'un mode de gestion définitif. Le plan organise, en particulier, les recherches et les études à mener sur la gestion des déchets radioactifs et fixe les échéances de la mise en œuvre de nouveaux modes de gestion et de la création d'installations (ou de la modification d'installations existantes).

Cette politique de gestion s'appuie sur une identification précise des déchets radioactifs à gérer grâce à un inventaire national dont la publication est confiée à l'Agence nationale des déchets radioactifs (Andra), qui est un établissement public indépendant des producteurs de déchets. Cet inventaire est réalisé sur une base déclarative, la réglementation rendant cette déclaration obligatoire pour tout producteur et pour tout détenteur de déchets radioactifs.

L'inventaire de ces déchets présente une classification de ceux-ci en fonction de leur niveau de radioactivité (très faible, faible, moyenne ou élevée) et de leur durée de vie, qui dépend de la période radioactive des éléments contenus dans les déchets. On distingue ainsi les déchets à vie courte, qui contiennent principalement des radioéléments à vie courte (période radioactive inférieure ou égale à trente-et-un ans) et les déchets à vie longue, qui contiennent une quantité importante de radioéléments à vie longue (période radioactive supérieure à trente-et-un ans).

Les caractéristiques des déchets permettent de définir des solutions de gestion adaptées, notamment un mode de stockage ultime, afin de les isoler de l'homme et de l'environnement le temps nécessaire à ce que leur radioactivité ait diminué et ne présente plus de risque.

Les deux stockages de surface exploités par l'Andra dans le département de l'Aube permettent ainsi de stocker des déchets à très faible activité (TFA), d'une activité en général inférieure à cent becquerels par

gramme, et des déchets à faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC) dont l'activité est comprise entre quelques centaines de becquerels par gramme et un million de becquerels par gramme.

Pour les déchets à haute activité (HA), d'une activité de plusieurs milliards de becquerels par gramme, et les déchets à moyenne activité à vie longue (MAVL), d'une activité allant d'un million à un milliard de becquerels par gramme, l'Andra porte un projet de centre de stockage (appelé Cigéo) qui sera implanté à cinq cents mètres de profondeur dans une formation d'argilites actuellement étudiée au Laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne. La mise en service d'un tel centre (sous réserve de son autorisation) est prévue en 2025.

Enfin, pour les déchets à faible activité à vie longue (d'une activité inférieure à cent mille becquerels par gramme, pour les déchets de graphite, et inférieure à quelques milliers de becquerels par gramme, pour les déchets radifères), des filières de gestion industrielles doivent être proposées par l'Andra à l'échéance de la fin 2012, dans le cadre du PNGMDR.

LES PERSPECTIVES D'OPTIMISATION DES FILIÈRES DE GESTION DES DÉCHETS RADIOACTIFS

La gestion des déchets radioactifs ne se limite pas à leur seul stockage : auparavant, ceux-ci passent par plusieurs étapes allant de leur production à leur entreposage.

Il convient dès lors de s'interroger, d'un point de vue global, sur l'efficacité des modes de gestion pratiqués en regard de différents critères : bien entendu, la protection de l'homme et de l'environnement (objectif inscrit notamment dans le Code de l'environnement), mais aussi l'optimisation technique et économique, la bonne utilisation de la ressource rare que constituent les volumes de stockage. Par ailleurs, l'aménagement du territoire et l'acceptabilité pour le public des méthodes retenues sont aussi des impératifs à prendre en compte.

L'analyse critique des modes de gestion (actuels ou envisagés) des déchets radioactifs permet d'identifier des marges de progression. Cette analyse peut être menée pour chacune des étapes de la filière. Par

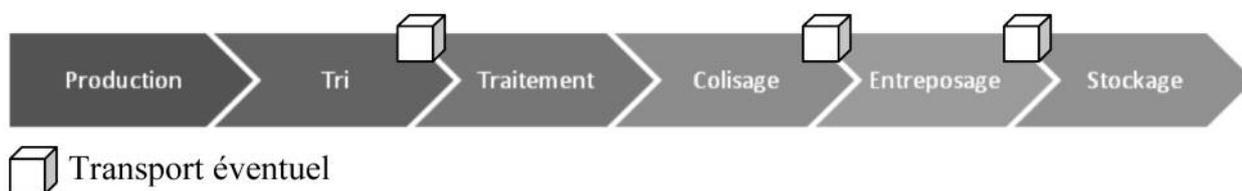


Figure 1 : Représentation schématique de la chaîne de gestion telle que donnée par le PNGMDR.

exemple, pour certains déchets présentant un spectre radioactif assez large, un développement du tri peut permettre de diminuer la proportion des déchets relevant des filières de déchets à vie longue, les plus coûteuses, grâce à une meilleure séparation des éléments comportant le plus de radionucléides à vie longue. De même, des traitements peuvent être envisagés pour modifier la forme physicochimique des déchets. Plus simplement, il est possible d'obtenir une réduction du volume des déchets par compactage, ce qui peut représenter une économie notable sur le coût du stockage final.

L'étape du conditionnement requiert une attention particulière. En effet, le type de colisage peut varier en fonction du stockage de destination. Des gains peuvent être réalisés en standardisant les conditionnements, en essayant autant que possible de développer des conditionnements polyvalents adaptés non seulement à des déchets aux caractéristiques différentes, mais aussi aux différents modes de stockage. Le conditionnement est un composant qui joue aussi un rôle important, en termes de sûreté et de radioprotection.

Chaque étape peut donner lieu à de telles opportunités. Ce travail ne peut bien évidemment se faire que grâce à une collaboration entre les acteurs intervenant aux différents stades de la gestion des déchets, chacun d'eux maîtrisant techniquement une ou plusieurs des étapes du processus.

Cette analyse doit être menée au regard de l'état des connaissances du moment, des technologies disponibles et de leurs perspectives de développement, car de nouvelles opportunités d'optimisation peuvent apparaître à tout moment. Un bon exemple est fourni par le cas des déchets de graphite issus des réacteurs de première génération (UNGG) : ceux-ci constituent un élément dimensionnant pour le stockage des déchets FAVL (ils représentent un volume à stocker de l'ordre de 75 000 m³ et sont les plus contraignants en termes d'inventaire radiologique).

Aujourd'hui, EDF mène un programme de caractérisation des graphites qui pourrait permettre d'en affiner l'inventaire radiologique et les données concernant le comportement au sein du déchet des principaux radionucléides. Par ailleurs, des résultats récents des recherches en cours sur les traitements du graphite pourraient conduire à développer un procédé permettant de séparer les radionucléides les plus impactants présents dans un résidu de traitement suffisamment concentré et donc d'un volume réduit. Si ce procédé voit le jour, ces résidus pourraient être affectés à la filière MAVL. On pourrait dès lors reconsidérer à la baisse les exigences de performance du stockage des déchets FAVL. Le coût en serait réduit d'autant, avec une performance de sûreté sans doute meilleure, du fait d'un inventaire en radionucléides nettement réduit.

LES DÉCHETS DU FUTUR

Les perspectives de la production de déchets radioactifs

L'inventaire national produit par l'Andra présente, sur la base des déclarations des détenteurs de déchets, les prévisions de la production de déchets radioactifs aux horizons 2020 et 2030.

Ces prévisions sont réalisées sur la base de l'hypothèse d'une continuité de la politique électronucléaire française, avec notamment une durée de fonctionnement des réacteurs nucléaires de cinquante ans et la poursuite du traitement des combustibles usés. Seuls sont comptabilisés les déchets produits par les installations aujourd'hui autorisées.

Ces prévisions permettent de vérifier la suffisance des exutoires pour les déchets des différentes catégories et

Catégories	Inventaire à fin 2010	Inventaire à fin 2020	Inventaire à fin 2030	Capacité de stockage existante ou prévue
Haute activité	2 700	4 000	5 400	10 000
Moyenne activité à vie longue	41 000	45 000	49 000	70 000
Faible activité à vie longue	87 000	89 000	133 000	à l'étude
Faible et moyenne activité à vie courte	830 000	1 000 000	1 200 000	1 577 000
Très faible activité	360 000	750 000	1 300 000	650 000
TOTAL	≈ 1 320 000	≈ 1 900 000	≈ 2 700 000	

Tableau 1 : Prévisions de la production des déchets radioactifs aux horizons 2020 et 2030 (les chiffres donnés sont exprimés en mètres cubes équivalents conditionnés).

		Poursuite de la production électronucléaire	Non-renouvellement de la production électronucléaire
HA	CU UOx		~ 50 000 assemblages *
	CU RNR		~ 1 000 assemblages *
	CU MOX		~ 6 000 assemblages *
	Déchets vitrifiés (m ³)	10 000	3 500
MA-VL (m ³)	70 000	59 000	
FA-VL (m ³)	165 000	165 000	
FMA-VC (m ³)	1 600 000	1 500 000	
TFA (m ³)	2 100 000	1 900 000	

Tableau 2.

* Les combustibles usés ne sont pas aujourd'hui considérés comme des déchets, ils ne sont donc pas conditionnés pour une prise en charge en stockage. Le volume moyen d'un assemblage combustible étant de 0,19 m³, ces assemblages représentent, avant conditionnement, un volume de 12 000 m³. L'Andra a vérifié la faisabilité du stockage des combustibles usés en 2005. Les concepts de conteneurs de stockage utilisés pour cette démonstration induisaient un volume de colis de stockage d'environ 89 000 m³.

d'engager éventuellement les travaux visant à garantir l'existence d'une filière pour chacun des types de déchets.

Ainsi, si l'on compare l'inventaire prévu à fin 2030 et la capacité prévue des stockages existants et en projet, on constate que les filières existantes ou en projet sont suffisantes pour les déchets à faible et moyenne activité à vie courte, ainsi que pour les déchets à destination du stockage géologique profond Cigéo (déchets à haute activité et à moyenne activité à vie longue). *A contrario*, sans une diminution drastique de leur production, une extension du stockage existant ou la construction d'une nouvelle installation de stockage seront nécessaires pour les déchets à activité très faible.

À plus long terme, l'inventaire national réalisé par l'Andra propose une prospective de production des déchets radioactifs suivant deux scénarios contrastés de politique électronucléaire : un scénario d'arrêt de la production électronucléaire et un scénario de poursuite de la production électronucléaire et du traitement des combustibles usés. Les déchets évalués sont ceux qui sont (ou seront) produits par l'ensemble du parc existant aujourd'hui, et ce jusqu'à sa fin de vie. Les déchets générés par de futures installations ne sont pas pris en compte.

Les résultats permettent d'éclairer le débat sociétal sur les choix énergétiques futurs. Ainsi, on peut retirer plusieurs constats du tableau 2 ci-dessus.

Pour les installations existantes, la production de la majorité des déchets est déjà existante ou engagée (c'est-à-dire qu'ils seront fatalement produits, par exemple, lors du démantèlement). Une sortie du nucléaire ne ferait donc pas, en tout état de cause, disparaître les déchets et des dispositions devront donc être prises pour gérer de manière sûre les déchets issus des choix industriels et énergétiques passés.

A contrario, la poursuite du nucléaire induit naturellement un flux continu de déchets qui nécessitera de

prévoir l'extension des installations de stockage existantes ou la construction de nouvelles installations, notamment pour accueillir les déchets d'un parc nucléaire futur, qui ne sont pas comptabilisés ici.

Une différence importante entre ces deux scénarios concerne les déchets à haute activité, qui changent de nature suivant le scénario considéré : dans le scénario de la poursuite de la production électronucléaire, seuls des déchets vitrifiés issus des opérations de traitement sont à stocker. Dans le scénario d'arrêt de la production électronucléaire, les combustibles usés deviennent des déchets devant être stockés en l'état. L'Andra a montré dans le dossier qu'elle a présenté en 2005 sur la faisabilité du stockage géologique profond, que le concept de stockage qu'elle développe avec le projet Cigéo est adaptable pour les déchets vitrifiés comme pour les combustibles usés, et ce dans le respect des objectifs de sûreté (tant en exploitation que de long terme). Les déchets à haute activité devant refroidir plusieurs dizaines d'années durant avant de pouvoir être stockés, la conception des tranches futures de Cigéo destinées à accueillir ces déchets au-delà de 2050 pourra être adaptée en fonction des choix de politique électronucléaire faits par la France d'ici là. C'est pourquoi l'adaptabilité du stockage fait partie du cahier des charges du projet Cigéo que développe l'Andra.

GÉNÉRATION IV, SÉPARATION- TRANSMUTATION : LE MYTHE D'UN NUCLÉAIRE SANS DÉCHETS ?

Au-delà de l'horizon du parc électronucléaire existant, la question des déchets devra être intégrée par les choix industriels qui seront faits quant au développement éventuel de nouvelles filières. On lit parfois un argument visant à conforter le développement des

réacteurs de quatrième génération, selon lequel ceux-ci permettront de résoudre le problème des déchets du nucléaire. La réalité est en fait plus nuancée...

Le principal objectif de la génération IV est une meilleure utilisation des ressources : ces réacteurs seront en mesure de consommer de l'uranium appauvri, ainsi que le plutonium généré par le cycle. C'est pour cette raison que ces éléments (uranium appauvri, plutonium contenu dans les combustibles usés, MOX) sont aujourd'hui considérés comme des matières valorisables, et non comme des déchets. La génération IV devrait donc permettre d'éviter que ces stocks importants (qui atteignaient, à fin 2010, 272 000 tonnes d'uranium appauvri et 1 700 tonnes de combustibles usés MOX) ne deviennent des déchets.

Mais à l'instar des générations précédentes de centrales nucléaires, les centrales de quatrième génération produiront des déchets d'exploitation, de maintenance et de démantèlement. De ce côté, le bilan est moins favorable : si l'on regarde parmi les déchets, ceux qui posent le plus de problèmes, à savoir les déchets à moyenne activité et à vie longue, on constate qu'au stade actuel des études, les réacteurs de quatrième génération produiraient une quantité de déchets MAVL de trois à quatre fois plus importante que les réacteurs à eau pressurisée. De plus, les déchets MAVL de structures de réacteurs à neutrons rapides auront une forte exothermicité qui nécessitera un entreposage de refroidissement, préalablement à leur stockage.

Associée à la génération IV, c'est bien sûr sur la séparation/transmutation que l'on compte pour résoudre la question des déchets à haute activité issus de combustibles usés : grâce à la séparation/transmutation, l'américium contenu dans les combustibles usés (voire les autres actinides dits mineurs autres que le plutonium : le curium et le neptunium) pourrait être recyclé dans les réacteurs de quatrième génération, à l'instar du plutonium. Quel effet aurait une telle opération sur les déchets à haute activité ?

En l'absence de séparation/transmutation, les déchets vitrifiés contiennent, d'une part, des actinides mineurs et, d'autre part, des produits de fission. Si les premiers sont séparés et réinjectés dans les réacteurs grâce à la séparation/transmutation, les déchets vitrifiés ne contiendront plus que des produits de fission (et éventuellement du neptunium et du curium, si seul l'américium est séparé).

Premier constat : les déchets vitrifiés n'ont pas disparu. Ils contiennent toujours des éléments radioactifs à vie très longue (certains produits de fission). Le contenu radioactif des déchets vitrifiés a certes diminué, mais dans des proportions bien moindres que ce que prétendent parfois les zéloteurs de la séparation/transmutation, qui affirment qu'en cinq cents ans les déchets reviendront au niveau de radioactivité de l'uranium naturel (après cinq cents ans, l'activité

radioactive d'un déchet vitrifié sans actinides mineurs est de l'ordre de 5 millions de becquerels par gramme, contre 26 000 becquerels par gramme, pour l'uranium naturel). Même si le niveau de radioactivité a été divisé par trente par rapport à un déchet vitrifié contenant des actinides mineurs, ce niveau est encore tel que seul un stockage géologique permet de gérer ces déchets.

Qu'en est-il en termes d'impact et de sûreté du stockage ? De ce point de vue, l'avantage n'est pas évident. En effet, la démonstration de la sûreté du stockage géologique dans l'argile montre que l'impact de celui-ci, à long terme, est uniquement dû aux produits de fission. Les actinides sont immobiles en conditions de stockage et sont insolubles. Ils n'ont donc pas d'impact, car ils restent dans l'argile, à cinq cents mètres de profondeur. Ce n'est que dans la situation (hypothétique) d'une intrusion humaine qu'une différence pourrait apparaître avec le cas du stockage des déchets sans séparation/transmutation, sans bien sûr pour autant supprimer les impacts sur l'homme et l'environnement dans un tel cas.

Un point positif cependant : l'allègement des déchets en actinides mineurs réduit leur exothermicité. Ainsi, leur gestion dans un stockage géologique profond s'en trouve facilitée. En supposant qu'ils soient gérés dans une installation similaire à Cigéo, une étude réalisée par l'Andra et le CEA a estimé que cela amènerait un gain important en matière d'emprise souterraine et de volume excavé pour créer des modules de stockage. Cependant, le gain est plus limité à l'échelle de l'ensemble du centre de stockage (du fait des besoins en infrastructures d'accès) et des déchets à moyenne activité et à vie longue (qui représentent un volume beaucoup plus important avec des réacteurs à neutrons rapides qu'avec des réacteurs à eau pressurisée). En comparaison du multi-recyclage du seul plutonium, la séparation/transmutation des actinides offre ainsi une réduction d'un facteur de 2 à 2,5 de l'emprise du stockage des verres à haute activité et une réduction de 30 à 40 % du volume total excavé du centre de stockage. La séparation/transmutation des actinides mineurs pourrait ainsi permettre de réduire d'environ un tiers le coût actualisé du stockage. Bien sûr, ce gain serait à mettre en regard des investissements industriels à réaliser pour mettre en place le cycle de séparation/transmutation. Il conviendra aussi de prendre en compte dans l'évaluation globale de l'intérêt de la séparation/transmutation, les risques et l'exposition induite pour les travailleurs intervenant sur l'intégralité du cycle.

CONCLUSION

La France peut se féliciter d'avoir mis en place depuis plusieurs années une politique de gestion des déchets

radioactifs qui s'efforce de trouver les solutions les plus adaptées pour gérer, en toute sûreté, les déchets produits par la filière nucléaire. Cette approche responsable ne doit pas pour autant laisser à penser que les enjeux de cette gestion pourraient ne pas figurer parmi les priorités de la filière nucléaire. Le coût associé à cette gestion n'est pas négligeable : la Cour des comptes a estimé dans son rapport publié en janvier 2012 qu'il s'élève à 28,3 milliards d'euros (de 2010) de charges brutes (ce qui représente cependant moins de 2 % du coût de production de l'électricité). Par ailleurs, la bonne prise en compte des problématiques

de sûreté à court et long terme inhérentes à ces déchets est un élément clé de l'acceptabilité sociale du nucléaire.

Aussi, il appartient à l'ensemble des acteurs de la filière nucléaire de maintenir leurs efforts pour optimiser la gestion des déchets qu'ils produisent, c'est-à-dire non seulement pour minimiser la quantité et la dangerosité des déchets, réduire les coûts associés et économiser la ressource rare que constituent les stockages de déchets radioactifs, mais aussi pour intégrer pleinement la problématique des déchets dans les choix technologiques futurs.

Le projet Cigéo

Le centre industriel de stockage géologique Cigéo est conçu pour permettre le stockage des déchets français les plus radioactifs dans une couche d'argilite du Callovo-Oxfordien (remontant à 160 millions d'années) située dans le sous-sol de la commune de Bure (une couche étudiée grâce au Laboratoire souterrain de recherche de Meuse/Haute-Marne). Ces déchets radioactifs proviennent essentiellement des centrales nucléaires et du retraitement de leurs combustibles usés.

Par **Thibaud LABALETTE***

La loi de programme du 28 juin 2006 confie à l'Andra la poursuite des études et des recherches en vue de choisir un site et de concevoir un centre de stockage, de telle sorte que la demande d'autorisation concernant ce centre puisse être instruite en 2015 et que sa mise en exploitation intervienne en 2025 (sous réserve de son autorisation).

En 2012, ce projet est entré dans sa phase de préparation industrielle. Le groupement Gaiya (Technip/Ingérop) a été retenu par l'Andra pour assurer la maîtrise d'œuvre système du projet. Les études visent à fournir les données techniques nécessaires pour préparer le débat public prévu en 2013 et présenter la demande de création de Cigéo en 2015.

L'installation souterraine est conçue de façon modulaire pour permettre la construction progressive des alvéoles de stockage et la séparation des déchets en fonction de leurs caractéristiques. Après une centaine d'années d'exploitation, son extension devrait être de l'ordre de 15 km².

Des liaisons surface-fond sont nécessaires pour acheminer le personnel, les colis de stockage, les matériels et matériaux pour les travaux ainsi que les utilités (dont la ventilation). Les transferts liés aux travaux sont réalisés au moyen de puits verticaux. Pour donner de la flexibilité au choix du site, l'Andra a étudié la possibilité de réaliser une descenderie pour le transfert des colis (voir la figure 1 de la page suivante).

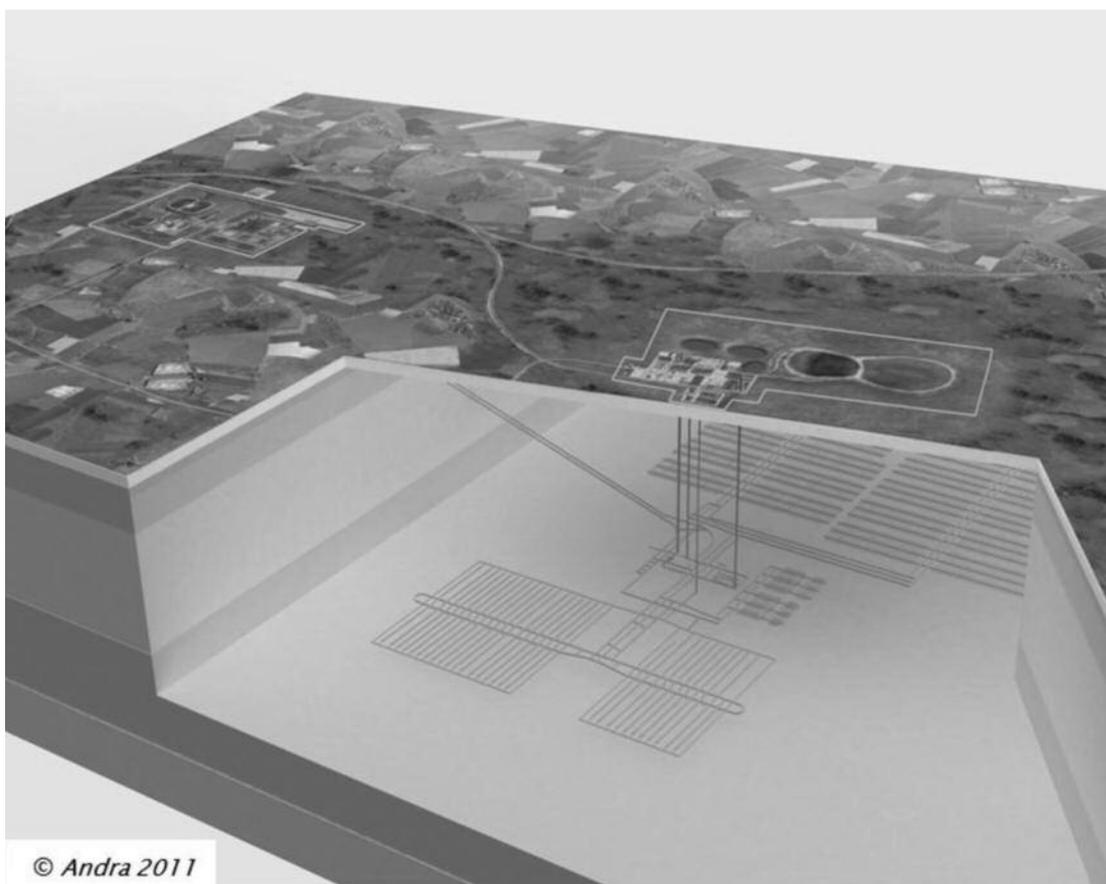
LE PROJET DE STOCKAGE

Les installations de surface du stockage comprennent notamment des installations nucléaires (dans lesquelles les colis de déchets seront réceptionnés, contrôlés et préparés avant leur mise en stockage), des ateliers industriels (pour le soutien des travaux de creusement et la maintenance), des bâtiments administratifs, une ou plusieurs zones de dépôt des déblais (les verses), dont 40 % environ seront réutilisés pour la fermeture du centre de stockage. Leur emprise est d'une superficie d'environ 300 hectares.

L'IMPLANTATION DE CIGÉO

Les études et recherches conduites par l'Andra jusqu'en 2005 ont montré la faisabilité du stockage dans la couche d'argilite du Callovo-Oxfordien. Une zone de 250 km² a été définie autour du Laboratoire, dans laquelle les résultats obtenus sur cette couche argileuse peuvent être transposés.

* Directeur des programmes - Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra).



© Andra 2011

Figure 1 : Schéma de principe du stockage (sur la base des options 2009).

L'Andra a proposé fin 2009 une zone restreinte, d'environ 30 km², pour étudier l'implantation de l'installation souterraine du stockage. La qualité géologique est un critère déterminant pour le choix d'un site. L'Andra a également mis en œuvre une démarche de dialogue avec les acteurs locaux pour identifier les critères liés à l'aménagement du territoire et à l'insertion locale à prendre en compte pour implanter Cigéo.

En 2010, le gouvernement a validé la zone proposée par l'Andra après avis de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et de la Commission nationale d'évaluation et après consultation du Comité local d'information et de suivi du Laboratoire souterrain. Les résultats de la campagne de reconnaissance approfondie (sismique 3D) réalisée ensuite sur cette zone confirment l'absence de faille, même mineure, affectant la couche géologique du Callovo-Oxfordien.

Les départements de la Meuse et de la Haute-Marne ont exprimé la volonté d'être durablement partenaires pour l'accueil du stockage. Lors du Comité de Haut Niveau du 27 février 2012 présidé par le ministre chargé de l'Énergie, il a été demandé à l'Andra d'étudier l'implantation de l'entrée de la descendrière du stockage dans la zone interdépartementale contiguë à la Meuse, côté Haute-Marne. Plusieurs scénarios sont actuellement étudiés en vue de l'implantation des installations de surface (voir la figure 2 de la page suivante). Le choix du site sera validé en 2013.

Les modalités d'insertion des installations dans leur environnement sont examinées par l'Andra en prenant en compte les attentes locales : gestion des eaux de surface et des déblais excavés, rejets, insertion paysagère, proposition d'esquisses architecturales, gestion du chantier,... Les aménagements et les équipements à développer pour permettre la construction et l'exploitation de Cigéo (infrastructures de transport, localisation du terminal ferroviaire, alimentation électrique et en eau, logements,...) sont étudiés dans le cadre d'un schéma interdépartemental de développement du territoire élaboré sous l'égide du préfet de la Meuse (qui est le préfet coordonnateur du projet) en lien avec les acteurs du territoire.

Pour l'accompagner et la conseiller dans sa mission d'information et de dialogue avec les différentes parties prenantes, l'Andra s'est dotée d'un comité d'expertise et de suivi de la démarche d'information et de consultation, qui est rattaché au Conseil scientifique de l'Agence.

LES ENJEUX INDUSTRIELS ET ÉCONOMIQUES

En tant qu'exploitant nucléaire, l'Andra est responsable de la sûreté de Cigéo. L'Agence assume donc une responsabilité particulière en matière de choix de conception et de leur mise en œuvre, qui sont engageants sur le long terme.

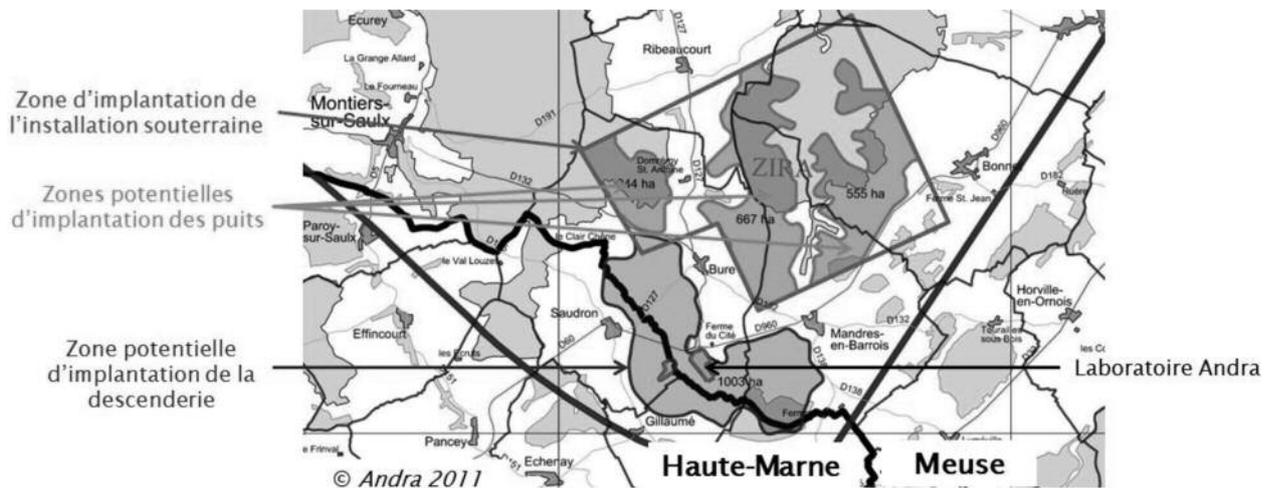


Figure 2 : Scénarios étudiés pour l'implantation de Cigéo.

Le montage industriel retenu par l'Andra pour la phase études comprend un maître d'œuvre système, architecte industriel, pour la phase esquisse (2012), qui sera accompagné de plusieurs maîtrises d'œuvre sous-systèmes, à partir de 2013, pour la réalisation des études d'avant-projet.

Dans la logique de déroulement du projet, les phases contractuelles d'études sont articulées avec les jalons réglementaires. Le calendrier prévisionnel du débat public est cohérent avec la planification des études industrielles, l'esquisse permettant de laisser des options ouvertes à la concertation. Les recommandations issues du débat seront prises en compte dans l'avant-projet.

L'organisation du projet s'appuie sur deux référentiels :
 – a) la loi du 12 juillet 1985 relative aux rapports entre la maîtrise d'ouvrage publique et la maîtrise d'œuvre privée, dite loi MOP, dont les dispositions sont applicables à la réalisation de bâtiments, d'infrastructures et d'équipements industriels,
 – b) la recommandation générale RG Aéro.000 40 utilisée par l'Andra pour structurer et piloter le projet. L'organisation mise en place par l'Andra vise à maîtriser les performances techniques du projet, les délais et les risques, à optimiser les coûts, en respectant les exigences de sûreté, de sécurité et de réversibilité, tout en prenant en compte les enjeux liés à la propriété intellectuelle des développements technologiques et à l'insertion locale du projet. Des revues de projet par des experts externes seront organisées lors du franchissement des principaux jalons des études industrielles du projet Cigéo.

Un comité industriel *ad hoc* a été mis en place par l'Andra en 2011. Il émet des avis et des recommandations au conseil d'administration de l'Agence sur toutes les questions relevant de l'activité et des projets industriels de l'Andra (dont notamment le projet Cigéo) que le conseil lui soumet.

Cigéo sera une installation nucléaire atypique, construite et exploitée durant une période dépassant

les cent ans. Cette longue durée conduit à développer les ouvrages de stockage par tranches successives d'exploitation, dans une logique de flexibilité. La définition du programme de la première tranche d'exploitation et celle du schéma directeur de développement des tranches suivantes nécessitent que soit planifiée la livraison des différents colis de déchets en étroite collaboration avec les producteurs de ces déchets (Areva, le CEA et EDF).

Les caractéristiques des premiers colis livrés déterminent les fonctionnalités des ateliers nucléaires de surface à mettre en exploitation sur le site de stockage en 2025 et les besoins industriels sur les sites d'entreposage actuels (La Hague, Marcoule, Cadarache, principalement), à prévoir en cohérence avec Cigéo. Le transport des colis de déchets depuis les sites d'entreposage jusqu'à Cigéo est placé sous la responsabilité des producteurs de ces déchets.

Une convention de coopération organise les modalités de l'interface entre l'Andra, qui est maître d'ouvrage et responsable du stockage, et les producteurs des déchets, qui sont à la fois les bénéficiaires et les financeurs de ce stockage, dans le respect des responsabilités de chacun. Cette convention permet également au projet Cigéo de bénéficier du retour d'expérience d'Areva, du CEA et d'EDF. La procédure d'évaluation du coût de Cigéo est définie par la loi du 28 juin 2006 :

- a) l'Andra propose au ministre chargé de l'Énergie une évaluation du coût du stockage,
- b) le ministre recueille les observations des producteurs de déchets et l'avis de l'ASN sur la proposition de l'Andra,
- c) le ministre arrête l'évaluation du coût et la rend publique.

Les exploitants nucléaires prennent notamment en compte cette évaluation pour déterminer les charges de gestion de leurs déchets radioactifs (voir l'article 20 de la loi du 28 juin 2006).

La référence actuelle pour l'évaluation du coût du stockage a été initiée en 2002 sur la base d'hypothèses techniques (inventaire, options de conception) et des

conditions économiques de l'époque. Elle avait conduit à estimer en 2005 un coût brut du stockage (dépenses non actualisées) compris entre 13,5 et 16,5 milliards d'euros aux conditions économiques de l'époque, soit de l'ordre de 1 % du coût de production de l'électricité. Cette évaluation inclut les coûts de construction, d'exploitation, de fermeture et les taxes répartis sur plus de cent ans. Ce chiffrage a été établi sur la base d'un inventaire de déchets correspondant à l'ensemble de la production du parc électronucléaire de la France sur quarante ans.

L'Etat a engagé le processus de mise à jour de l'évaluation du coût du stockage en vue d'arrêter une nouvelle évaluation de ce coût. L'Andra proposera un nouveau chiffrage fin 2013, qui sera fondé sur les études d'esquisse et sur l'inventaire de déchets actualisé fourni par les producteurs de déchets, et qui prendra en compte les recommandations des évaluateurs et les éventuelles modifications qui seraient apportées au projet suite au débat public.

La loi du 28 juin 2006 institue un fonds « recherche » qui a pour ressource le produit de la taxe « recherche », et un fonds « construction/exploitation », avec pour ressources les contributions des exploitants d'installations nucléaires de base (définies par des conventions).

LES ENJEUX LIÉS À LA SÛRETÉ ET À LA SÉCURITÉ

Conformément au guide de sûreté établi par l'ASN, « après la fermeture de l'installation de stockage, la protection de la santé des personnes et de l'environnement ne doit pas dépendre d'une surveillance et d'un contrôle institutionnel qui ne peuvent pas être maintenus de façon certaine au-delà d'une période limitée ». Cela implique une compréhension de l'évolution du stockage permettant de rendre celui-ci le plus robuste possible aux événements internes (défaillances de composants) et externes (intrusions d'origine humaine, événements naturels) susceptibles d'intervenir sur des échelles de temps très longues.

En se projetant jusqu'à la fermeture définitive du centre de stockage, les solutions techniques étudiées fournissent un cadre aux simulations et aux analyses de sûreté à long terme du stockage. L'Andra met également en œuvre, dès à présent, un programme d'études et d'essais portant sur les futurs scellements qui seront mis en place lors de la fermeture des ouvrages du stockage.

Si, dans son principe, la sûreté de l'exploitation du centre s'apparente à celle des installations nucléaires existantes, la partie souterraine du centre présente des caractéristiques atypiques qui ne permettent pas de se limiter à une simple transposition de ses pratiques : les volumes des installations souterraines accueillant des activités nucléaires sont sans commu-

ne mesure avec des installations de surface ; de plus, l'environnement souterrain limite l'accessibilité. La gestion de la co-activité entre les travaux souterrains et l'exploitation nucléaire doit séparer au maximum les chantiers. En matière de gestion du risque incendie, aucun référentiel existant ne peut s'appliquer en l'état compte tenu des spécificités du projet.

Le processus d'instruction de la demande d'autorisation de création de Cigéo est défini par la loi du 28 juin 2006. Par dérogation aux règles applicables aux autres installations nucléaires de base, la demande d'autorisation donne lieu à un rapport de la Commission nationale d'évaluation, à un avis de l'ASN, au recueil de l'avis des collectivités territoriales et à une évaluation par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. Une loi fixera ensuite les conditions de réversibilité du stockage.

Depuis 1996, l'ASN, l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) et le groupe permanent d'experts pour les déchets évaluent régulièrement les travaux de l'Andra au plan de la sûreté. Suite à l'instruction du Dossier 2009, des points de rendez-vous sur les enjeux de sûreté identifiés sont programmés d'ici à 2015.

LES ENJEUX LIÉS À LA RÉVERSIBILITÉ DU STOCKAGE

La loi du 28 juin 2006 indique que la réversibilité du stockage devra être assurée, à titre de précaution, pendant une durée minimale qui ne peut être inférieure à cent ans, mais sans définir les conditions de cette réversibilité. Ces conditions seront fixées par une nouvelle loi, qui devra avoir été votée pour que l'autorisation de création du centre de stockage puisse être délivrée par décret en Conseil d'Etat pris après enquête publique.

Les nombreux échanges déjà organisés avec les parties prenantes font apparaître plusieurs motivations possibles pour la demande de réversibilité, telles que la possibilité de contrôler le déroulement du processus de stockage, la préservation de la possibilité de mettre en œuvre d'autres modes de gestion, la conservation d'une possibilité d'intervention en cas d'évolution anormale, la possibilité de récupérer des colis dans le cas où les déchets qu'ils contiennent deviendraient valorisables et, enfin, le souci de ne pas abandonner le site.

Pour répondre à ces différentes attentes, l'Andra propose une approche de la réversibilité reposant sur des dispositions techniques destinées à faciliter le retrait éventuel des colis et sur un processus décisionnel permettant de piloter le processus de stockage.

Pour faciliter les échanges avec les parties prenantes en France et à l'étranger, l'Andra a proposé de définir une

échelle associée à la réversibilité. Cette échelle illustre le caractère progressif du processus de stockage et permet de définir un jalonnement décisionnel possible associé au franchissement des différents niveaux définis dans ladite échelle. Celle-ci montre également que le caractère « passif » de la sûreté du stockage augmente au fur et à mesure de l'avancement du processus de stockage. Ces travaux s'inscrivent dans le cadre du projet *Reversibility and Retrievalability* mis en place par l'Agence pour l'Energie Nucléaire (AEN, de l'OCDE), dont les résultats ont été présentés lors d'une conférence internationale (qui s'est tenue, à Reims, du 14 au 17 décembre 2010).

LA R&D

L'entrée du projet Cigéo dans une phase industrielle ne remet pas en cause la nécessité pour l'Andra de maintenir une R&D de haut niveau. En effet, des actions de R&D restent nécessaires pour préparer la demande d'autorisation de la création de Cigéo, puis sa mise en service. L'autorisation d'exploiter le Laboratoire a ainsi été prolongée jusqu'en 2030. À

plus long terme, la poursuite des actions de R&D de l'Andra permettra d'optimiser les nouvelles tranches de construction de Cigéo ainsi que les dispositifs de surveillance et de fermeture qui seront mis en œuvre. La R&D sur les déchets, leur conditionnement et leur stockage participera tant à la sûreté et à la compétitivité économique de Cigéo, en proposant des optimisations au fur et à mesure de l'exploitation du centre, qu'à sa réversibilité, en ouvrant sur des évolutions possibles. Pour ce faire, l'Andra continuera à s'appuyer sur des moyens et sur une structuration des activités de recherche qui soient cohérents avec les orientations nationales et internationales en la matière.

Les actions de recherche de l'Andra sont coordonnées avec celles des autres organismes de R&D, notamment dans le cadre du Comité de suivi des recherches, menées sur l'aval du cycle du combustible nucléaire. En parallèle, l'Agence participe à des exercices de prospective dans le domaine du nucléaire ou dans le cadre des alliances (Allenvi et Ancre) qui lui permettent de positionner ses activités scientifiques dans la perspective plus générale de la stratégie nationale de recherche et d'innovation. Enfin, la plateforme européenne *Implementing geological disposal – Technical platform* (IGD-TP) donne, au travers de son agenda

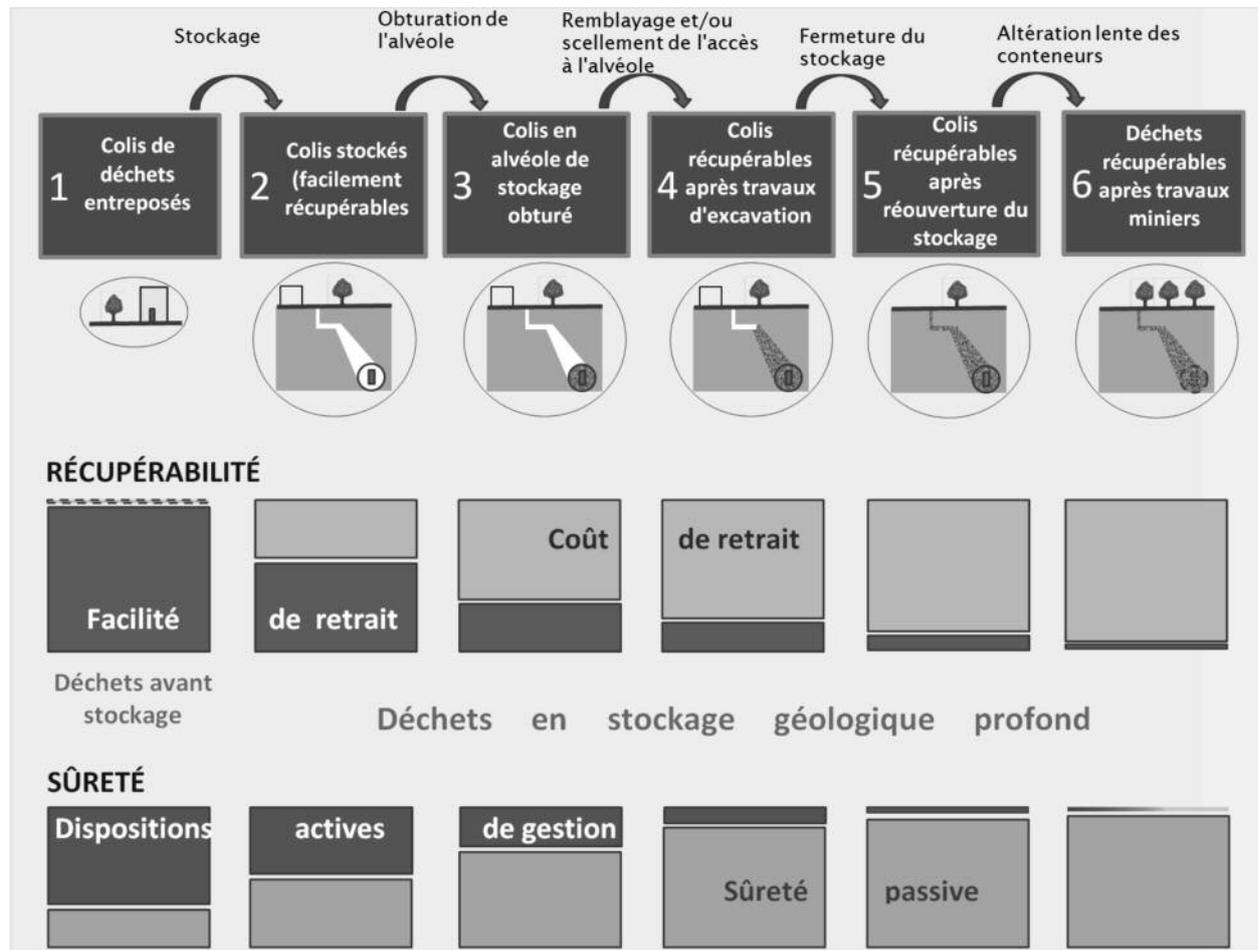


Figure 3 : Evolution de la facilité de retrait et de la passivité de l'installation en fonction du niveau dans l'échelle AEN.

stratégique des recherches, une feuille de route partagée par les homologues de l'Andra et les parties prenantes pour les quinze prochaines années.

Le conseil scientifique de l'Andra oriente le positionnement de l'Agence dans son environnement de recherche national et international, puis il en valide les choix stratégiques.

L'Andra est évaluée en 2012 par l'Agence d'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur (AERES). Il s'agit notamment de mesurer la capacité de l'Andra et de ses équipes à diriger et à orienter les études scientifiques et techniques destinées à répondre aux missions que l'Etat lui confie.

CONCLUSION

Ces nouveaux développements du projet Cigéo interviennent dans un contexte international marqué par la catastrophe de Fukushima, mais aussi par la publication de la directive 2011/70/EURATOM du Conseil de l'Europe, du 19 juillet 2011, établissant un cadre communautaire pour la gestion responsable et sûre du combustible usé et des déchets radioactifs, et par celle du rapport de la *Blue Ribbon Commission* américaine, qui retiennent le stockage en couche géologique profonde comme solution de référence pour les déchets les plus radioactifs, tout en soulignant la nécessité de retenir des démarches flexibles et adaptables pour le processus de mise en place de telles installations.

Au niveau international, la démarche française est considérée comme exemplaire, tant au plan politique que technique. Comme la France, de nombreux pays ont engagé des recherches sur le stockage géologique : c'est le cas par exemple aux États-Unis, en Finlande,

en Suède, au Canada, en Chine, en Belgique, en Suisse, en Allemagne, au Royaume-Uni ou encore au Japon. Les concepts et les milieux géologiques choisis varient en fonction des pays. Le stockage du WIPP aux États-Unis accueille depuis une dizaine d'années les déchets de moyenne activité à vie longue issus des activités de défense américaine. La Finlande prévoit de mettre en service son stockage de combustibles usés à l'horizon 2020. La demande d'autorisation de création du stockage suédois est en cours d'instruction.

Pour être un succès, le projet Cigéo doit répondre à des enjeux sociétaux, à des enjeux de sûreté et à des enjeux industriels. L'Andra est le garant d'un juste équilibre entre ces différentes préoccupations. La gouvernance externe du projet permet d'impliquer les différents acteurs et parties prenantes liés à ces enjeux sous le contrôle de l'Etat et des évaluateurs. De plus, l'Andra est dotée de moyens de conseil et d'évaluation interne qui contribuent à assurer la qualité de ses travaux.

Le débat public sur le projet Cigéo pourra notamment contribuer à échanger sur la maîtrise des risques, la réversibilité, l'insertion locale du projet, la surveillance de l'environnement et de la santé. Il permettra de donner un éclairage sur la gestion des déchets radioactifs existants et ceux à produire (30 % des déchets de haute activité et 60 % des déchets de moyenne activité à vie longue devant être stockés en profondeur sont déjà produits). La flexibilité du projet (le creusement des galeries souterraines se fait au fur et à mesure des besoins) et son adaptabilité à l'évolution du système énergétique français seront présentées lors du débat. Cela permettra une articulation avec le débat sur la transition énergétique. L'Andra prendra en compte les recommandations issues du débat public pour élaborer le dossier de demande d'autorisation de Cigéo qui sera remis en 2015.

La gestion des déchets issus du démantèlement des installations nucléaires, une activité en croissance qui reste à optimiser

Le démantèlement des installations nucléaires mises en service dans les années 1980 et 1990 va constituer un enjeu majeur dans les vingt années à venir.

Dans ce contexte, la mission de l'Andra est de concevoir, de mettre en place et d'exploiter des solutions de gestion à long terme des déchets radioactifs garantissant la protection des populations et de l'environnement, à court et à long terme, tout en offrant à ses clients producteurs de déchets les meilleures conditions économiques de prise en charge.

Par **Bruno CAHEN***

LE DÉMANTÈLEMENT DES INSTALLATIONS ET LA GESTION DES DÉCHETS INDUITS : UN DÉFI INDUSTRIEL ENCADRÉ AUX NIVEAUX INTERNATIONAL ET FRANÇAIS

Le démantèlement d'une installation nucléaire recouvre l'ensemble des opérations réalisées par l'exploitant après l'arrêt définitif de celle-ci jusqu'à l'atteinte d'un état qui limite ou supprime totalement les risques que présente le site pour l'homme et l'environnement. Ainsi le démantèlement peut conduire à déséquiper et à décon-

taminer un bâtiment qui pourra être réutilisé, mais elle peut aussi aller jusqu'à la déconstruction totale du site (équipements et bâtiments). L'assainissement des terrains fait partie intégrante du démantèlement. En France, cette opération est soumise à une autorisation préalable par décret du gouvernement, pris après avis de l'Autorité de sûreté nucléaire. Le décret fixe les modalités et les caractéristiques des opérations à conduire, ainsi que l'état final du site auquel doit aboutir l'exploitant.

* Directeur Industriel, Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra).

Avec quelques variantes, cette méthodologie est appliquée par l'Andra au démantèlement (moins complexe) d'installations non nucléaires contaminées par de la radioactivité naturelle (comme, par exemple, d'anciens sites de l'industrie du radium ou d'anciens ateliers ayant utilisé des minéraux contenant du thorium).

Sur le territoire français, les exploitants d'installations nucléaires ont adopté une stratégie de démantèlement dite « immédiate », un démantèlement opéré, le cas échéant, après quelques années de décroissance radioactive et permettant d'atteindre un état final des sites qui en permet la réutilisation aux fins d'un usage industriel (nucléaire ou non). C'est ainsi que les six anciens réacteurs de production d'électricité de la filière UNGG (1) (les réacteurs de Chooz A, de Brennilis et le réacteur Superphénix) sont en cours de démantèlement ; il en va de même pour une vingtaine d'installations de recherche, ainsi que d'installations de retraitement de combustibles usés. Cette stratégie dite immédiate présente l'avantage de réduire les risques de perte de compétences humaines et techniques entre la fin de l'exploitation d'une installation et son démantèlement.

Les programmes de démantèlement (déjà engagés ou à engager) reposent sur l'existence non seulement des techniques de déconstruction, mais aussi de filières de gestion des déchets, des compétences et des financements y afférant.

Certains exploitants et pays étrangers ont adopté une stratégie dite « différée ». Celle-ci permet de bénéficier plus largement de la décroissance radioactive avant d'entreprendre les opérations de démantèlement. L'inconvénient majeur de cette stratégie est le risque de perte de compétences ou de report de charges sur les générations futures, un risque qui s'accroît avec le temps. Les deux stratégies sont reconnues, au niveau international, par l'AIEA. Il en va de même pour une troisième stratégie qui est celle du confinement sûr. Celle-ci consiste, après l'arrêt de l'installation, à renforcer le confinement des substances radioactives au sein de l'installation plusieurs décennies durant, jusqu'à l'obtention d'un niveau de radioactivité résiduel suffisamment faible pour permettre de déclasser le site.

En ce qui concerne spécifiquement les réacteurs de production d'électricité, un rapport de l'Agence de l'Énergie nucléaire (OCDE/AEN) de 2003 présente un panorama des stratégies de démantèlement retenues dans les pays membres de cette organisation (2).

À ce jour, la France dispose d'un retour d'expériences de démantèlements de réacteurs conçus selon différentes technologies, d'installations de recherche, ainsi que d'installations intervenant dans le cycle du combustible, à Marcoule (dans le Gard) et à La Hague (dans le département de la Manche). La capacité de l'industrie française à démanteler des installations de complexités et de natures variables est établie. Les besoins de démantèlement du pays ont permis de développer des techniques de décontamination, de découpe, de traitement et de conditionnement de déchets

liquides et solides, des techniques et des installations d'entreposage et de stockage de déchets désormais bien maîtrisées par les industriels spécialisés. La robotique est venue compléter les compétences humaines et réduire les risques associés au démantèlement. Une bonne compréhension des phénomènes intervenant dans l'installation initiale et dans le stockage des déchets sur le long terme permet de réduire les impacts sur l'environnement, ainsi que les risques et les coûts. De nombreuses pistes de progrès restent à investiguer pour améliorer encore la performance des méthodes actuelles et pour réduire les risques et les impacts potentiels. Les principaux axes d'innovation en cours sont les techniques de décontamination (décontamination chimique, par laser, au moyen de particules ou de carboglace sous pression) et de découpe, la robotique, le traitement des déchets mixtes (à la fois radioactifs et chimiquement toxiques ou réactifs), l'amélioration des connaissances sur la spéciation et sur la migration de radionucléides dans les matériaux (notamment le béton et les métaux), le recyclage de déchets métalliques et de béton très faiblement radioactifs, la mesure et les systèmes d'information permettant d'optimiser les stratégies de démantèlement (réduction des doses reçues par les opérateurs, réduction des effluents et des déchets induits, réduction des durées et des coûts des interventions).

DES DÉCHETS DE TOUTES NATURES ET DE TOUTES DIMENSIONS ISSUS DES OPÉRATIONS DE DÉMANTÈLEMENT DES INSTALLATIONS NUCLÉAIRES, DONT L'ANDRA DOIT ASSURER LA GESTION INDUSTRIELLE DURABLE POUR SES CLIENTS COMME POUR LA SOCIÉTÉ DANS SON ENSEMBLE

Un volume total et un flux annuel significatifs
de déchets à faible et à très faible activité

Les déchets de démantèlement sont pour 80 % des déchets conventionnels et pour 20 % des déchets radioactifs. Ces derniers sont majoritairement de très faible et faible activité. Il s'y ajoute quelques gisements de déchets à faible activité et à vie longue (déchets de graphites, déchets contenant de l'uranium et du plutonium provenant du cycle du combustible)

(1) Uranium naturel-graphite-gaz.

(2) OCDE/AEN : Démantèlement des centrales nucléaires – Politiques, stratégies et coûts (2003).

Demi-vie / Activité	Vie très courte < 100 jours	Vie courte (VC) ≤ 31 ans	Vie longue (VL) > 31 ans
Très faible activité (TFA)	Gestion par décroissance radioactive sur le site de production puis élimination dans les filières conventionnelles	Centre de stockage TFA en surface (Aube) En exploitation 	
Faible activité (FA)		 Centre de stockage FMA-VC en surface (Aube) En exploitation	projet de stockage à faible profondeur (R&D cadrée par la loi du 28 juin 2006)
Moyenne activité (MA)			Projet CIGEO MSI prévue en 2025
Haute activité (HA)		stockage en couche géologique profonde (R&D cadrée par la loi du 28 juin 2006)	

Figure 1 : Filières de gestion des déchets radioactifs : filières existantes et filières à créer.

Catégories	Inventaire à fin 2010	Inventaire à fin 2020	Inventaire à fin 2030
Haute activité	2 700	4 000	5 400
Moyenne activité à vie longue	41 000	45 000	49 000
Faible activité à vie longue	87 000	89 000	133 000
Faible et moyenne activité à vie courte*	830 000	1 000 000	1 200 000
Très faible activité*	360 000	750 000	1 300 000
TOTAL	≈ 1 320 000	≈ 1 900 000	≈ 2 700 000

* Incluant les volumes déjà stockés par l'Andra (CSM, CSFMA et CSTFA).

Tableau 1 : Inventaire des déchets radioactifs en volume (m³) équivalent conditionné (valeurs arrondies) selon l'édition 2012 « Les Essentiels » de l'inventaire national publié par l'Andra.

et une petite quantité de déchets à moyenne activité et à vie longue (déchets activés, dont des pièces métalliques situées au cœur des réacteurs).

L'Inventaire national de l'Andra fournit les quantités de déchets déjà produits et les prévisions aux horizons 2020 et 2030 (déchets d'exploitation et de démantèlement). Il décrit les filières de gestion déjà opérationnelles et les filières en projet. C'est donc un outil qui permet de planifier les adaptations à apporter aux centres de stockage en exploitation et de dimensionner les futurs centres.

Les décennies 2010 et 2020 verront la production de déchets de démantèlement en des quantités supé-

rieures aux flux actuels, qui s'ajouteront aux flux de déchets récurrents des installations en exploitation, avec pour particularité d'être moins prédictibles et beaucoup plus variables tant sur le plan qualitatif que quantitatif (voir le tableau 1).

La durée d'exploitation d'une installation nucléaire influe peu sur le volume et sur le choix de la filière de gestion des déchets que son démantèlement générera, contrairement aux déchets d'exploitation qui sont peu ou prou proportionnels à cette durée. En revanche, selon la durée d'exploitation envisagée par l'exploitant, notamment pour les installations du parc nucléaire d'EDF, les chroniques de production de ces

déchets de démantèlement peuvent être très variables. La gestion de démantèlements concomitants plus nombreux que ce n'est actuellement le cas conduirait à des pics de production de déchets, et donc un besoin de sur-dimensionner les capacités annuelles d'accueil des installations de stockage ou d'entreposer ces déchets pour lisser la charge. Une stratégie industrielle de gestion des démantèlements suppose de lisser au maximum de tels pics, qui sont difficiles à gérer tant pour les moyens humains et matériels des entreprises qui assurent les opérations de démantèlement que pour les flottes de transport et les installations de stockage.

Au vu des prévisions figurant dans l'inventaire national 2012 de l'Andra, la capacité autorisée du CSFMA et la capacité prévisionnelle du stockage géologique profond Cigéo ont été adaptées. La capacité autorisée du CSTFA (650 000 m³) est insuffisante pour couvrir les besoins à moyen terme (qui sont d'environ 1 500 000 m³). *A contrario*, le volume total de déchets FAVL est limité (à 150 000 m³), ce qui rend le modèle économique du stockage FAVL délicat à construire. Pour réduire le volume total de déchets, la poursuite des efforts de réduction des déchets à la source, de leur densification, de leur stockage et du recyclage d'une partie d'entre eux constituent les trois axes de progrès partagés par les autorités, les producteurs et les gestionnaires de déchets radioactifs, en France comme à l'étranger.

Une nécessité industrielle : planifier et coordonner les opérations de démantèlement grâce à la conception et à l'exploitation des centres de l'Andra

La mission de l'Andra est de concevoir, de mettre en place et d'exploiter des solutions de gestion à long terme des déchets radioactifs garantissant la protection des populations et de l'environnement, à court et à long terme, tout en offrant à ses clients producteurs de déchets les meilleures conditions économiques de prise en charge. Les différentes filières ont été progressivement développées essentiellement pour les déchets radioactifs d'exploitation des installations nucléaires, de l'industrie, de la recherche et du secteur de la santé. Les déchets provenant du démantèlement d'installations et de laboratoires sont progressivement devenus une composante essentielle d'un marché appelé à se développer à l'avenir avec l'arrêt des installations électronucléaires mises en service dans les années 1980 et 1990.

Au niveau national, la loi de programme du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs a établi un cadre de travail et une structure de pilotage, avec la mise en place d'un plan

national de gestion des déchets radioactifs mis à jour tous les trois ans. La loi confie également à l'Andra la mission d'établir, avec la même périodicité, un inventaire des déchets radioactifs qui inclue les prévisions de production de déchets. Cette politique française est désormais partagée au niveau européen. La directive (3) 2011/70 Euratom du 19 juillet 2011 impose en effet aux pays membres de l'Union européenne de se doter d'outils de gestion similaires.

Plus de 90 % du volume total des déchets dont la production est prévue d'ici à 2020 disposent d'une filière de stockage opérationnelle. Les déchets de démantèlement constituent une part croissante de ces volumes. Le traitement, le conditionnement des déchets et leur évacuation doivent être réalisés au fur et à mesure de leur production.

Les déchets TFA ou FMA-VC sont accueillis dans les deux centres de traitement et de stockage qu'exploite l'Andra dans l'Est de la France : un centre de stockage dédié aux déchets à faible et moyenne activité et à vie courte (CSFMA) et un centre de stockage pour les déchets à très faible activité (CSTFA).

Les déchets FAVL ou les déchets MAVL sont entreposés dans l'attente de la mise en service industriel des filières de stockage correspondantes. L'Andra développe deux projets de stockage : un stockage géologique en couche géologique profonde pour les déchets HA et pour les déchets MAVL (il s'agit du projet de centre industriel de stockage géologique Cigéo, dont la mise en service est prévue en 2025) et un stockage à faible profondeur pour les déchets FAVL.

La planification prévisionnelle revêt une importance capitale tant pour les exploitants d'installations, qui doivent programmer leur démantèlement, que pour l'Andra, qui doit concevoir, mettre en service et exploiter les installations destinées à accueillir les déchets produits. Cette planification est réalisée à deux niveaux :

– a) au niveau **stratégique**, à travers l'inventaire national, publié tous les trois ans, qui établit des prévisions de production de déchets, dont les déchets de démantèlement, aux horizons 2020 et 2030, et jusqu'à la date de fin de démantèlement du parc actuel d'installations. L'inventaire 2012 est en cours de finalisation. Un résumé en a été publié par l'Andra en janvier 2012 (*Inventaire national des déchets et des matières radioactives édition 2012*, coll. Les Essentiels) (4).

– b) au niveau **opérationnel** : à partir des prévisions triennales établies par chaque site producteur, collectées par l'Andra et mises en regard des capacités d'ac-

(3) <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:199:0048:0056:FR:PDF>

(4) <http://www.andra.fr/download/site-principal/document/editions/450.pdf>

cueil de ses installations de traitement et de stockage, l'Andra établit le schéma directeur des constructions et de l'exploitation de ses stockages. Outre le volume, la prise en compte de la nature des déchets est importante (type d'emballage, contenu radiologique et chimique) pour optimiser la gestion des ouvrages de stockage et réduire les risques et les coûts.

Des réunions mensuelles de planification sont organisées par l'Andra avec les représentants des trois principaux producteurs de déchets radioactifs que sont Areva, le CEA et EDF afin d'ajuster leurs plannings de production, de transport, de traitement et de stockage de déchets radioactifs. L'Andra assure elle-même les prévisions et la représentation de ses autres clients producteurs de déchets (plusieurs centaines de clients produisant chacun de très faibles quantités de déchets) dans ces réunions.

Il est tout aussi essentiel qu'un producteur de déchets et l'Andra définissent conjointement les spécifications d'interface liées à son colis de déchets. La spécification de production, qui dépend du référentiel du producteur des déchets, et la spécification d'acceptation en stockage doivent être coordonnées. En outre, le producteur de déchets et l'Andra doivent intégrer mutuellement les contraintes industrielles de leur partenaire respectif dans les évolutions de leurs installations et de leurs modes opératoires. Ce développement concourant réduit les risques de surcoûts et raccourcit les délais.

Ce développement a pour objectif d'anticiper autant que possible les évolutions des référentiels des installations productrices de déchets et ceux des installations de stockage. En particulier, les spécifications de production du colis de déchets et les spécifications d'acceptation de ce colis en stockage constituent une interface critique. Cette coordination peut être relativement simple pour un déchet standard bien caractérisé et bien conditionné, mais il est plus difficile dans les cas ci-après :

- déchet insuffisamment caractérisé au regard des spécifications de l'acceptation en stockage ou de l'inventaire radiologique de ce dernier, ce qui engendre des besoins en R&D ou un surdimensionnement du colis, de l'entreposage ou du stockage afin d'assurer la sûreté de la gestion du déchet à long terme (à titre d'exemple, le gaz chlorhydrique et l'hydrogène produits par radiolyse au sein de colis de déchets anciens contenant des plastiques et des émetteurs alphas susceptibles de corroder le colis ou de constituer un mélange explosif) ;
- filière de stockage encore en cours d'étude (Cigéo, FAVL) ;
- modification de la stratégie industrielle ou des exigences applicables à l'installation génératrice du déchet ou de stockage de celui-ci. Cette situation peut apparaître à la suite d'une innovation, d'un incident ou d'un réexamen de sûreté de l'installation.

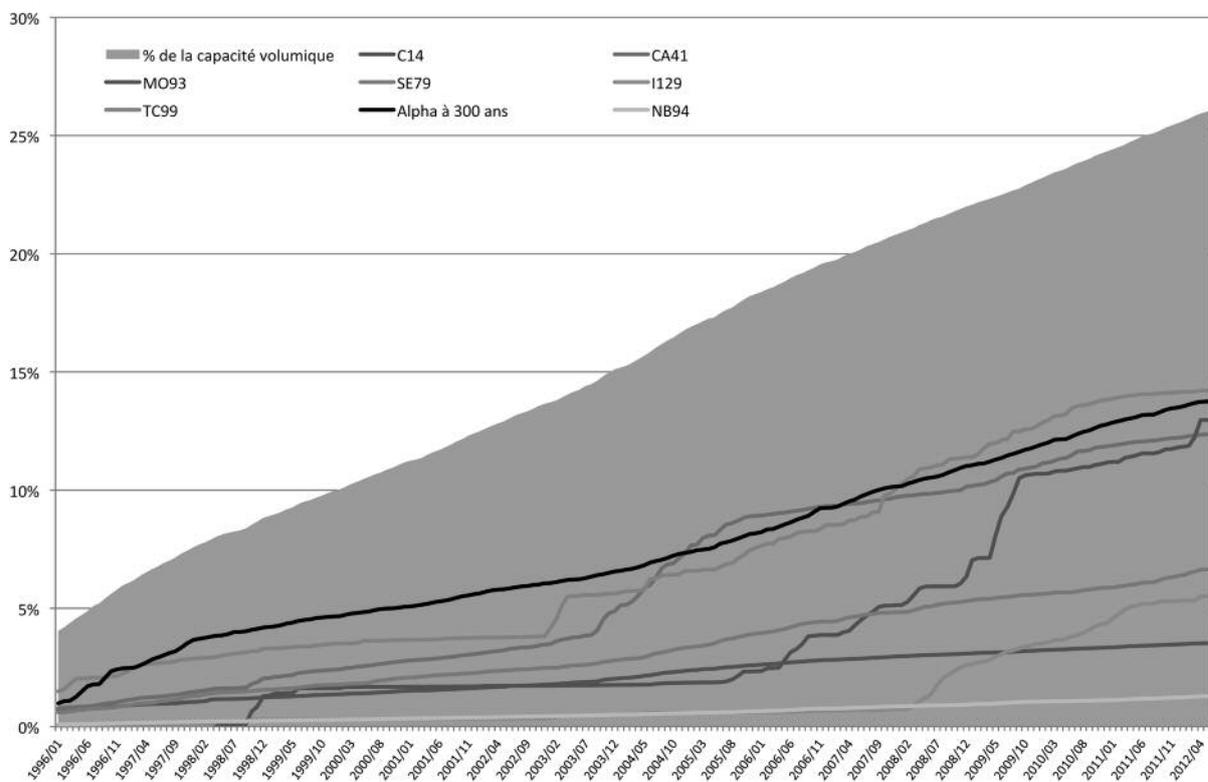


Figure 2 : Consommations comparées de capacités volumique et radiologique du CSFMA.



Photo 1 : Ouvrages de stockage du CSFMA.

EN FRANCE : UNE INDUSTRIE DE GESTION DES DÉCHETS DE DÉMANTÈLEMENT OPÉRATIONNELLE, MALGRÉ QUELQUES CHAÎNONS MANQUANTS

Les capacités de stockage autorisées (offrant les volumes et la capacité radiologique requis) constituent une ressource rare et très difficilement renouvelable. Il est difficile, long et coûteux d'ouvrir un nouveau centre de stockage. En lien avec ses clients, l'Andra gère cette capacité de manière prudente en pilotant les volumes et la capacité radiologique consommés. L'Andra applique la stratégie nationale de développement durable dans le souci de préserver sa capacité à offrir à ses clients un service de qualité au meilleur prix, sur plusieurs décennies.

Croissance du flux des colis « standards » de déchets (issus de démantèlements) à faible et moyenne activité et à vie courte, mais aussi de déchets de grandes dimensions présentant les mêmes caractéristiques

Les déchets de démantèlement sont conditionnés dans des caissons, dans des fûts métalliques à com-

pacter ou dans des colis prêts à être stockés dans des ouvrages en surface, au centre de stockage de l'Aube (CSFMA) (voir la photo 1 ci-dessus).

À la fin 2010, l'Andra avait stocké environ 25 % de la capacité de stockage totale autorisée (qui s'élève à un million de mètres cubes). La montée en puissance des programmes de démantèlement va non seulement accroître les flux livrés, mais également modifier les proportions des différentes géométries des colis standardisés. Il devrait y avoir ainsi, par exemple, un nombre beaucoup plus importants de caissons métalliques de 5 m³ ou de 10 m³, qui sont bien adaptés pour des déchets de formes très variées, alors que les déchets d'exploitation (résines, filtres, déchets du cycle du combustible,...) sont conditionnés dans des coques en béton et dans des fûts à compacter.

Grâce aux importants efforts faits depuis une quinzaine d'années pour réduire les quantités des déchets produits par l'exploitation des installations nucléaires et pour en améliorer le conditionnement, le CSFMA, qui a été conçu dans les années 1980 et sur la base d'une capacité annuelle de 30 000 m³, est suffisamment dimensionné pour lui permettre d'accueillir les déchets provenant de démantèlements supplémentaires.

Dès le milieu des années 1990, l'optimisation de la radioprotection et des coûts de démantèlement a conduit à étudier la possibilité de stocker des pièces massives sans qu'il soit nécessaire de les découper pour

pouvoir les conditionner dans des colis standards. Outre les gains économique et temporel qu'elles procurent, ces opérations évitées sur les chantiers réduisent d'autant l'exposition des travailleurs à des rayonnements ionisants.

La pertinence d'un stockage direct par rapport à un conditionnement en colis standards doit cependant être appréciée pour chaque objet, en examinant si elle est globalement optimale du point de vue des opérations de démantèlement (complexité des opérations de découpe, dosimétrie), de transport et de stockage

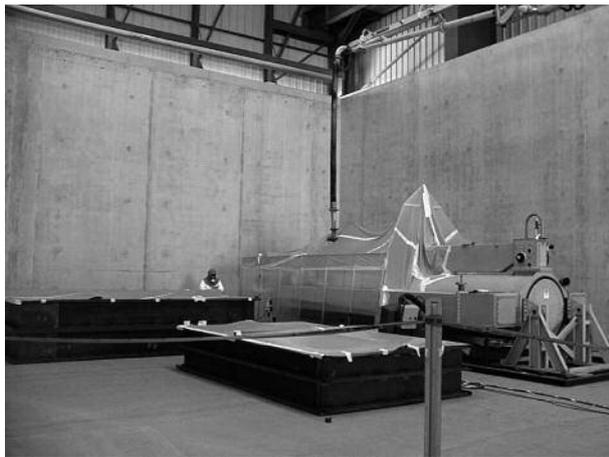


Photo 2 : Stockage en ouvrage standard d'un télémanipulateur (8 m, 20 tonnes).



Photo 3 : Stockage en ouvrage dédié d'un couvercle de cuve de réacteur à eau sous pression (90 à 120 tonnes).

(foisonnement des déchets lors de la découpe et consommation de la capacité du centre).

En réponse à la demande de ses clients, l'Andra a adapté son outil industriel pour pouvoir stocker directement des colis hors normes dimensionnelles (tels que des couvercles de cuves de réacteurs, des télémanipulateurs, des protections neutroniques de Superphénix,...) soit dans des ouvrages standards, soit dans des ouvrages développés spécifiquement et dotés de moyens de manutention et de conditionnement

adaptés (pont de 150 tonnes, équipement d'injection dans l'ouvrage).

D'autres développements sont actuellement à l'étude en vue du stockage direct de la cuve de réacteurs de Chooz A, de réacteurs de sous-marins ou d'emballages de transport déclassés. Là encore, une concertation étroite entre l'Andra et les producteurs de déchets tenant compte des responsabilités respectives des différents acteurs est nécessaire. La manière de gérer ces déchets de grande taille pourra également être discutée dans un cadre international afin de partager les retours d'expérience.

Avec l'AEN et l'AIEA, l'Andra et les producteurs de déchets participent à la construction des référentiels internationaux concernant ce domaine.

Les déchets de très faible activité

Le CSTFA, qui a été mis en service en octobre 2003, a été conçu pour permettre la prise en charge de déchets de démantèlement, jusqu'à l'horizon 2030, en fonction du cadre réglementaire applicable en France définissant le zonage déchets dans les installations nucléaires (arrêté du 30 décembre 1999, intégré en 2012 dans un arrêté interministériel plus général sur les INB). Compte tenu des principes retenus pour élaborer le zonage déchets, la radioactivité est seulement potentielle pour une partie significative du tonnage des déchets stockés au CSTFA (5) : près d'un tiers des déchets sont déclarés avec une activité massique inférieure à un becquerel par gramme.

Le stockage des déchets a lieu dans des alvéoles creusées dans une argile peu perméable qui assure leur confinement à long terme. Le fond et les parois de ces alvéoles sont tapissés avec une membrane étanche. Les déchets (pièces unitaires, GRVS (6), caissons, fûts) sont déposés dans les alvéoles et sont protégés des intempéries par une toiture mobile. Les alvéoles sont ensuite remblayées avec du sable et fermées au moyen d'une membrane. Elles sont ensuite recouvertes d'argile. Un puits de visite dans l'alvéole permet de détecter d'éventuelles infiltrations d'eau.

Comme pour le CSFMA, le stockage direct des déchets de grande dimension est possible en alvéo-

(5) L'arrêté du 31 décembre 1999 impose la mise en place d'un zonage déchets à l'intérieur des installations nucléaires de base. Fondé sur la conception, les modalités d'exploitation et l'historique de l'installation, ce zonage distingue les zones à déchets nucléaires (où les déchets sont ou peuvent être contaminés ou activés) des zones à déchets conventionnels, où il ne peut pas y avoir ni contamination ni activation des déchets. Les déchets nucléaires doivent être orientés vers une filière de gestion à traçabilité renforcée, indépendamment de leur activité.

(6) Grand récipient vrac solide (big bag).



Photo 4 : Stockage des déchets TFA.



Photo 5 : Fermeture d'alvéole et déplacement de la toiture mobile.

le standard. En 2012, l'Andra stockera ainsi deux générateurs de vapeur de Chooz A, avec des modalités adaptées aux contraintes de planning d'EDF. L'Andra étudie la création d'une alvéole dédiée à

ces déchets, qui accroîtra la capacité d'accueil globale.

Des optimisations ont été réalisées, d'autres sont en cours pour répondre à des besoins en forte crois-

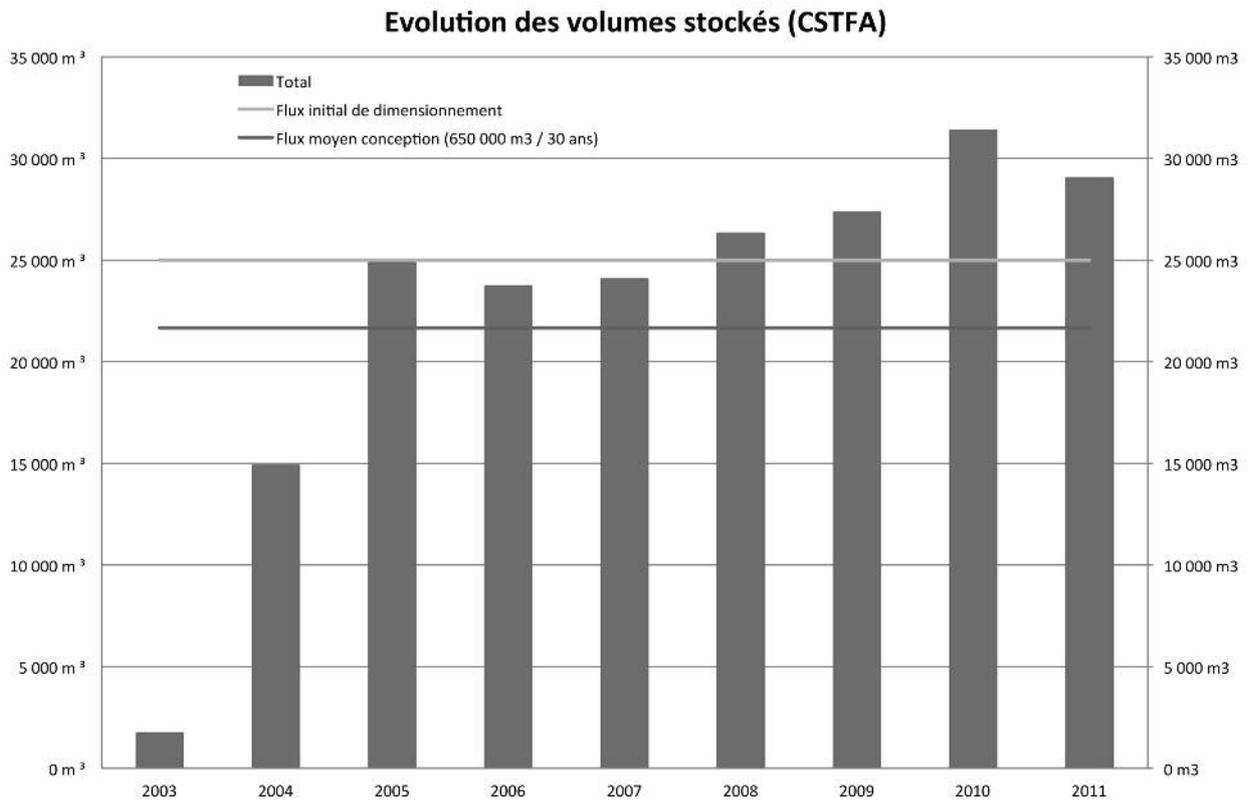


Figure 3 : Évolution des volumes stockés - CSTFA (en m³).

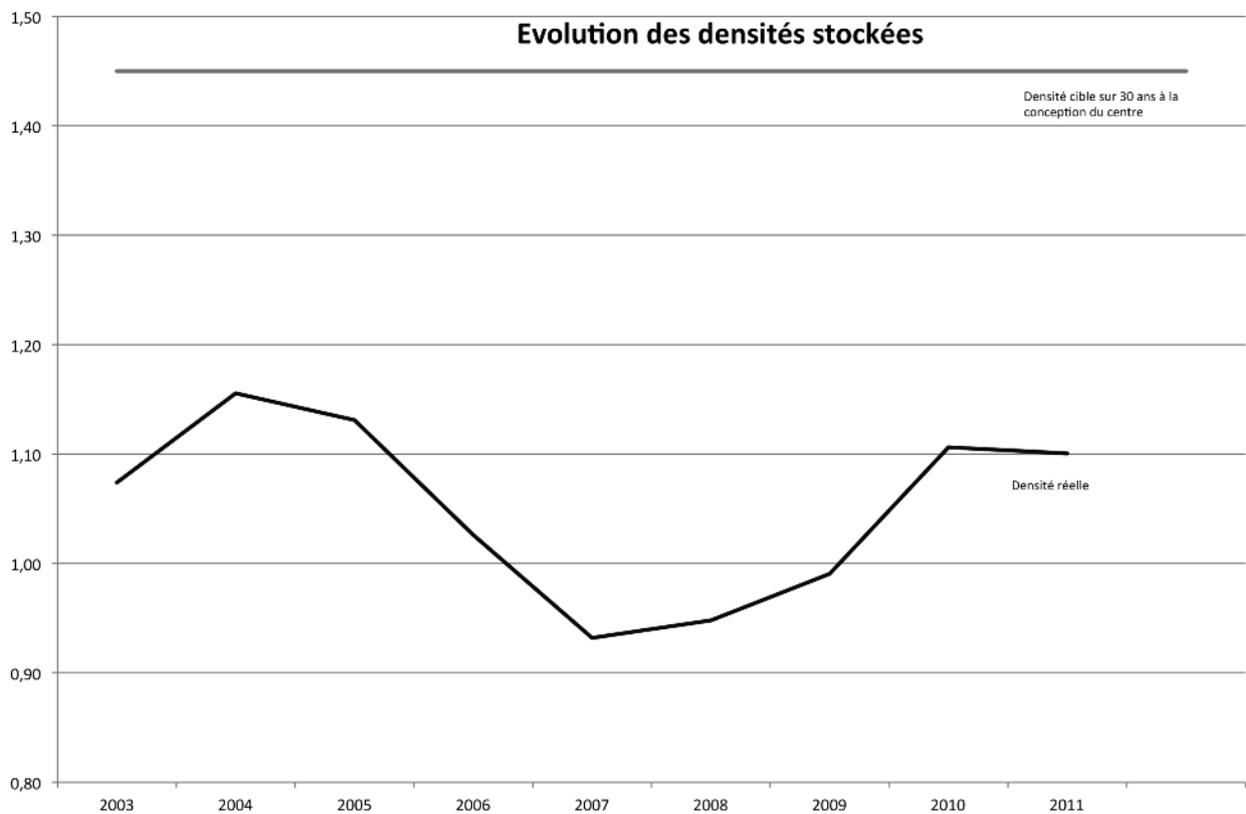


Figure 4 : Évolution des densités stockées (en m³).

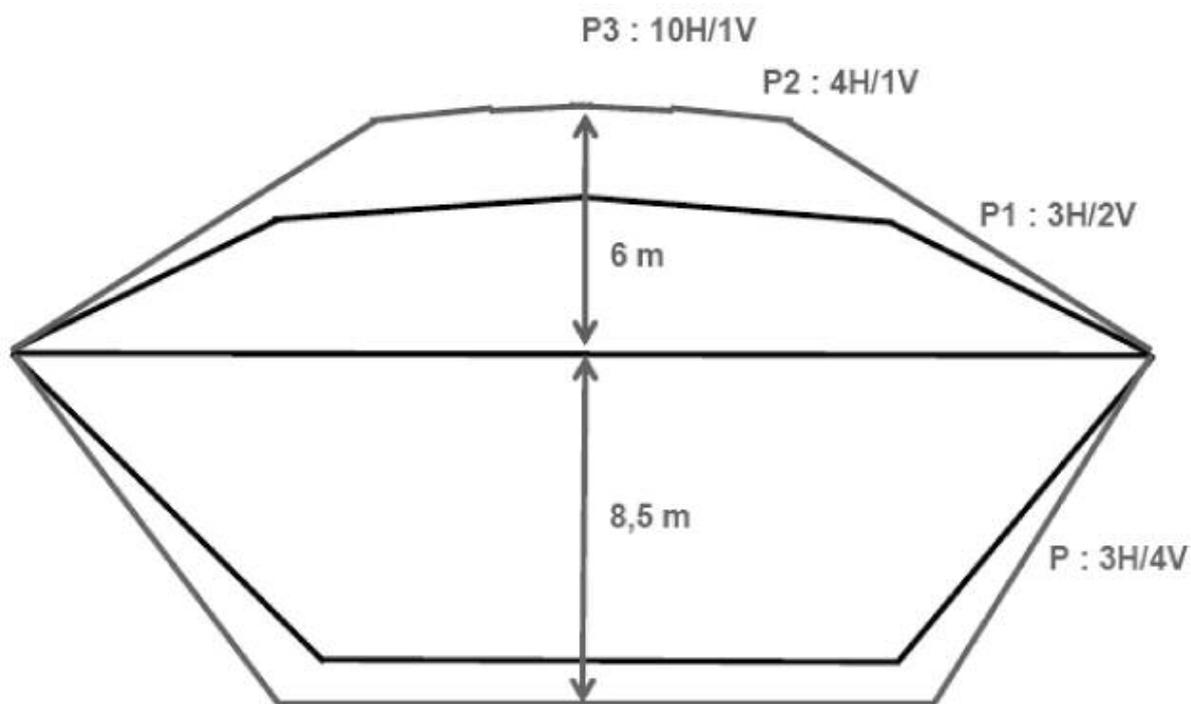


Figure 5 : Alvéole optimisée recyclée ou GNT.



Photo 6 : Vides remplis de béton.

sance et au problème que pose une densité des déchets encore trop faible.

À la fin 2011, le volume stocké au CSTFA était de 203 400 m³, soit 31 % de la capacité autorisée (650 000 m³). Le flux de conception était de 24 000

m³. Les besoins croissants des producteurs ont conduit l'Andra à optimiser l'emprise du stockage, à augmenter la compacité du stockage de 41 % (alvéoles doubles, approfondies, de pentes plus fortes) et à en modifier le mode d'exploitation pour offrir une capa-



Photo 7 : Balle sortant de la presse du CSTFA.



Photo 8 : Déchets agencés sur site.

cité de 35 000 m³ par an. D'autres pistes sont à l'étude : l'optimisation des dômes (+11 %), le recyclage des déchets de béton concassés stockables en vrac et permettant de combler les vides du stockage (économie de 7 % de volume, avec un gisement de 64 000 tonnes valorisables), ou stockables sur le site producteur.

En outre, des actions en lien avec les chantiers de démantèlement permettent d'accroître la densité des déchets. L'agencement des déchets, sur les chantiers comme au CSTFA, une meilleure utilisation des presses de l'Andra et une nouvelle déchiqueteuse, au CEA, ont permis de faire repartir à la hausse la densité des déchets (voir la figure 4 : densité 1,1 en 2011), mais la densité moyenne des déchets livrés depuis l'ouverture (0,95) reste très inférieure à l'inventaire de référence. Des pistes complémentaires sont à l'étude (presse-cisaille pour déchets métalliques, broyage et compactage de plastiques et de bois, filtres-presses pour les boues).

Environ 1 000 m³/an de déchets livrés sont incinérables, ce qui pourrait conduire à un facteur 7 de réduction de leur volume, mais le bilan économique est très défavorable. L'incinération à Centraco (7) coûte environ trente fois plus cher que le stockage au CSTFA. Les incinérateurs de déchets banals ou dangereux (300-500 €/t environ), bien que techniquement adaptés ne sont pas autorisés à traiter des déchets, même très faiblement radioactifs.

Les déchets métalliques (25 à 30 % des déchets livrés) constituent le principal gisement de déchets densifiables. Leur flux prévisionnel représente en effet près de la moitié de la capacité de stockage, en raison de leur faible densité. Une partie est recyclable, notamment les métaux qui ne sont pas contaminés ou qui pourraient être facilement décontaminés. La valorisation de ces métaux permettrait d'économiser des volumes de stockage précieux tout en répondant à des objectifs de développement durable.

Une installation de densification, mobile ou fixe, est potentiellement intéressante, mais elle présente des inconvénients et des incertitudes (disponibilité du gisement, gains réels, reprise de charge, risques). Le bilan coût/avantages reste à confirmer.

(7) Filiale d'EDF exploitant un incinérateur de déchets INB, à l'arrêt depuis septembre 2011.

(8) Jusqu'à l'accident de septembre 2011 sur son four de fusion, qui a conduit à son arrêt, Centraco fondait des déchets FA (1 500 tonnes par an) et en recyclait 55 tonnes par an. Le coût était trop élevé, pour des déchets TFA.



Photo 9 : Four de fusion (Studsvik).



Photo 10 : Virole en métal recyclé (Socodei).

Un procédé de fusion, qui suppose un découpage et un tri préalable des déchets, permettrait de densifier les déchets d'un facteur 6, voire d'en recycler une partie sous la forme d'emballages de déchets à faible et à moyenne activité (8).

En application du plan national de gestion des matières et déchets radioactifs publié par l'Etat, Areva, le CEA, EDF et l'Andra ont étudié l'intérêt d'une telle filière pour des déchets TFA et présenté les résultats de leur étude en février 2012. Le gisement recyclable en conteneur fonte est de quelques milliers de tonnes par an. Une fonderie dédiée est industriellement réalisable et économiquement viable sous certaines conditions. En particulier, les modifications nécessaires pour rendre ces conteneurs utilisables tant chez les producteurs de déchets qu'au CSFMA ne sont pas démontrées. Sous réserve de faisabilité, le coût de ces modifications pourrait compromettre la viabilité écono-

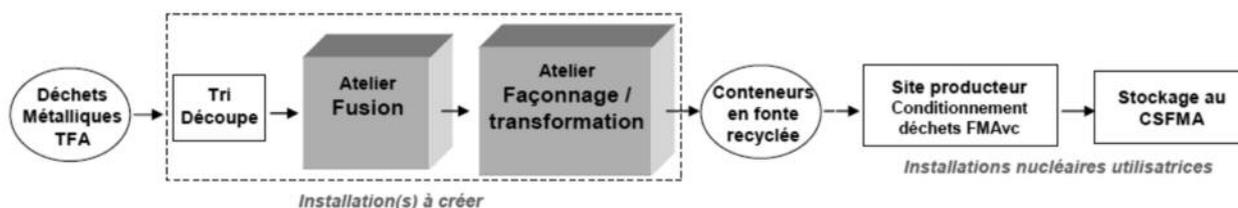


Figure 6 : Schéma de principe du recyclage de métaux en conteneurs.



(Source : EDF)

Figure 11 : Mise en place des empilements de graphite lors de la construction d'une centrale UNGG.

mique du recyclage, dont le schéma industriel de principe est décrit ci-après (voir la figure 6).

Les déchets à haute activité (HA)
ou à moyenne activité et à vie longue (MAVL)

Les déchets HA-MAVL seront produits en quantités relativement limitées par les chantiers de démantèle-

ment (il s'agit pour l'essentiel de pièces activées dans les réacteurs). Ils sont destinés à être stockés dans des formations géologiques profondes et seront conditionnés et entreposés, jusqu'à leur mise en stockage, notamment dans l'installation d'entreposage « ICEDA » qu'EDF est en train de construire. Les spécifications de conditionnement en vue du stockage donnent lieu à un dialogue entre l'Andra et les producteurs de déchets, sous l'égide de l'Autorité de sûreté nucléaire.

Les déchets FAVL

L'essentiel des déchets à faible activité issus de démantèlements sont des éléments en graphite du cœur des réacteurs de la filière uranium naturel/graphite/gaz (UNGG), représentant 24 000 tonnes. La majeure partie ne peut pas être stockée en surface compte tenu de leur contenu en carbone 14 (dont la période radioactive est de 5 730 ans) et en chlore 36 (dont la période radioactive est de 302 000 ans) sous une forme chimique risquant de migrer, dans les conditions du stockage.

Une fois conditionnés dans des colis en béton prêts au stockage, ils représenteront environ un volume de 100 000 m³. L'essentiel de ce volume (82 %) proviendra du démantèlement des empilements de graphite des réacteurs (voir la figure 2). Le reste (18 %) correspond à des déchets d'exploitation : les chemises de graphite à l'intérieur desquelles se trouvaient les éléments combustibles. Ces chemises sont actuellement entreposées sur les sites de Saint-Laurent-des-Eaux (Loir-et-Cher), de Marcoule et de La Hague.

Les producteurs de déchets et l'Andra étudient conjointement différents scénarios de gestion pour ce qui concerne les déchets FAVL. En particulier, le CEA, EDF et l'Andra ont établi un programme de R&D afin d'évaluer les possibilités de traitement des déchets de graphite permettant d'extraire et de concentrer la majeure partie du chlore 36 et du carbone 14 qu'ils contiennent. Dans le cadre du plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs, l'Andra remettra un rapport, fin 2012, portant sur les différents scénarios de gestion étudiés avec les producteurs de déchets, ainsi que sur les orientations proposées pour la suite du projet.

LE DÉFI DE LA REPRISE ET DU CONDITIONNEMENT (RCD) DES DÉCHETS RADIOACTIFS ANCIENS EN VUE DE LEUR STOCKAGE DÉFINITIF, OU COMMENT TRANSFORMER LE POIDS DU PASSÉ EN INNOVATION ?

Compte tenu de l'âge des installations et de l'impératif calendaire, le défi consiste à reprendre ces déchets, à les conditionner dans un emballage transportable et, selon les caractéristiques du déchet, à les stocker au CSFMA ou à les entreposer jusqu'à leur stockage dans l'installation Cigéo, à partir de 2025. Dans le second cas, il s'agit de minimiser le risque de dégradation de l'emballage dans l'intervalle entre le conditionnement et le stockage, ou le risque d'incompatibilités entre les diverses spécifications d'acceptation (pour l'entreposage, le transport et, enfin, le stockage).

En outre, la loi du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et des déchets radioactifs fait obligation aux responsables de déchets de type MAVL produits avant 2015 de les conditionner avant 2030.

Or, bien souvent, les paramètres archivés lors de la production des déchets, voilà de cela plusieurs décennies, sont en décalage avec les besoins de connaissance qui seraient nécessaires pour une reprise à coûts et à risques maîtrisés et pour un conditionnement optimisé. Les paramètres importants sont le spectre radiologique, les caractéristiques physico-chimiques du déchet dont la connaissance permet d'en maîtriser le comportement intrinsèque, et l'évolution en entreposage ou en stockage tant à court qu'à long terme (corrosion, gonflement, dégazage, ...).

Ces opérations nécessitent par conséquent des analyses et des développements spécifiques synonymes de délais et de coûts, mais parfois aussi porteurs d'innovations majeures (robotique, techniques de décolmatage et de décontamination, mesures *in situ* de radionucléides et techniques de conditionnement en ligne). Pour les déchets en vrac entreposés dans des fosses ou dans des cuves, outre les difficultés inhérentes aux opérations de récupération, la caractérisation et le conditionnement de ces déchets, optimisés pour orienter chaque déchet vers la filière de stockage idoine, soulèvent deux difficultés : celle de caractériser des déchets hétérogènes et anciens, et celle de conditionner *in situ* ces déchets dans des emballages qui soient compatibles avec les modes de transport, puis de stockage définitif (après une entreposage d'attente, le cas échéant). Or, ces déchets peuvent être pâteux, avec un surnageant, pulvérulents (diatomées, sels), potentiellement réactifs (magnésiens) ou dégazants à long terme (gaz de radiolyse).

Pour les déchets déjà conditionnés et entreposés dans des installations vieillissantes, l'enjeu, outre la maintenance de colis parfois dégradés, est de définir avec l'Andra la caractérisation nécessaire avant et après reprise, pour limiter les risques, le nombre d'opérations à entreprendre jusqu'au stockage et le volume de déchets à stocker. Le plus gros volume de déchets de ce type est constitué d'environ 60 000 fûts d'enrobé bitumineux entreposés au CEA, à Marcoule, dont une partie a déjà été reconditionnée dans de nouveaux fûts. Selon leurs caractéristiques, ces déchets ont vocation à être stockés au CSFMA, dans un futur centre de stockage à faible profondeur « FAVL » ou dans le futur centre Cigéo. L'orientation de ces déchets vers l'une ou l'autre de ces trois filières fait l'objet d'études menées conjointement par le CEA et l'Andra.

UNE PISTE PROMETTEUSE : L'OPTIMISATION « CYCLE DE VIE » DU DÉMANTÈLEMENT, DE LA CONCEPTION DES INSTALLATIONS NUCLÉAIRES JUSQU'AU STOCKAGE DE LEURS DÉCHETS ULTIMES

Pour les installations nucléaires futures, on pourrait imaginer une éco-conception concernant les déchets.

C'est ce à quoi la réglementation issue de la loi transparence et sûreté nucléaire du 16 juin 2006 invite les exploitants d'installations nucléaires.

Au-delà des exemples positifs de la coopération entre l'Andra et les producteurs pour la gestion des déchets de grandes dimensions et pour densifier les déchets et le stockage TFA, une plus grande intégration de la gestion des déchets, en amont, lors de la conception des installations nucléaires apporterait des avantages techniques et économiques aux exploitants de ces installations :

- intégration des opérations de démantèlement dès la conception des installations du futur (zonage déchets, infrastructures et génie civil permettant le démontage aisé des composants et un recyclage optimal des déchets conventionnels,...) ;

- minimisation des déchets induits, avec deux volets : le choix de matériaux minimisant les produits d'activation à vie longue (les isotopes chlore 36, calcium 41, niobium 94, molybdène 93,...), de composants et de surfaces facilement décontaminables pour réduire le volume des déchets induits, mais aussi faciliter et accélérer les opérations de démantèlement et réduire la dose des radiations pour les intervenants.

Par ailleurs, le fait d'associer les acteurs de la chaîne industrielle, du transport et de la gestion des déchets radioactifs à la définition de la stratégie de démantèlement permettrait d'améliorer les interfaces entre la déconstruction, les opérations de tri/traitement/conditionnement des déchets et de stockage. Cette approche limiterait les risques d'incohérence dans les spécifications ou dans les chroniques de livraison entre les déchets produits et les spécifications de leur acceptation en stockage. À ce titre, l'Andra promeut auprès de ses clients le développement d'une ingénierie concourante entre exploitants, démantelers de sites, transporteurs et industriels du traitement des déchets radioactifs dans leurs programmes de démantèlement. Dans les deux cas, l'objectif est de s'accorder pour faire converger les stratégies du producteur du déchet et de l'Andra avec celles des opérateurs intermédiaires : spécifier les interfaces « colis », définir des points d'arrêt aux jalons critiques, identifiés en commun, du démantèlement et des installations de stockage.

CONCLUSION

En France, comme dans le cadre international de l'AIEA, le démantèlement des installations nucléaires est un enjeu majeur pour les vingt années à venir et est à l'origine d'une filière industrielle *ad hoc* encore

jeune. L'industrie française est très bien positionnée sur ce marché d'avenir.

En France, la majeure partie des déchets de démantèlement sont conditionnés et stockés au fur et à mesure de leur production dans les deux centres de stockage de surface exploités par l'Andra, dont l'adaptabilité a permis d'accroître tant les flux d'accueil que la variété des déchets acceptables. Pour ces déchets représentant l'essentiel du volume, les pistes de progrès envisagées sont la poursuite de la réduction des volumes à la source, la densification et, dans le cadre de la stratégie de développement durable, le recyclage dans l'industrie nucléaire de certains déchets métalliques très peu contaminés.

Pour les déchets de graphite des réacteurs UNGG et pour les pièces activées ne disposant pas encore d'une solution de stockage, les producteurs de déchets et l'Andra examinent ensemble les procédés de traitement et de conditionnement permettant de réduire les volumes, les risques et les coûts de leur stockage, en parallèle au développement de projets de création de nouvelles filières pour la gestion de ces déchets.

La gestion des stockages en tant que ressource rare pousse à optimiser les volumes des déchets de démantèlement dans une double logique de « cycle de vie des installations de recyclage » et de « cycle de vie du matériau-déchet : du matériau sur pied dans l'installation nucléaire de base (INB) jusqu'au colis ultime des déchets stocké ». Cette industrie recèle encore des marges de progrès et d'innovation, réalisables notamment en intégrant l'ensemble des acteurs industriels intervenants, depuis la conception des installations jusqu'au stockage des déchets induits par celles-ci.

À ce titre, il existe en France des exemples pionniers de cette optimisation dans une logique de cycle industriel intégré : décontamination de pièces de grandes dimensions en vue de leur stockage, définition conjointe, dès la conception d'un réacteur, d'une stratégie de caractérisation de déchets à la source et en exploitation, optimisation de la gestion des déchets tritiés résultant du démantèlement du futur réacteur international ITER (conditionnement, entreposage et stockage).

L'équilibre n'est jamais simple à définir, en raison de la multitude des paramètres entrant dans la conception d'une installation nucléaire. La sûreté et la performance industrielle restent des éléments incontournables. Ce difficile exercice d'optimisation est d'autant plus délicat que les techniques et la réglementation applicables peuvent évoluer d'ici au démantèlement des nouvelles installations et au stockage des déchets induits par celles-ci.

GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉACTEURS NUCLÉAIRES

QUEL MODÈLE INDUSTRIEL
DANS L'AVENIR ?

De la première pile nucléaire française, Zoé, jusqu'à l'EPR aujourd'hui, l'industrie nucléaire a toujours progressé en tirant profit du retour d'expérience acquis au fil des dizaines d'années d'exploitation, en particulier en tirant les enseignements des événements les plus marquants de son histoire, comme l'accident nucléaire de Fukushima.

Les nouvelles générations de réacteurs doivent concilier à la fois l'amélioration de la sûreté et les performances économiques pour permettre au nucléaire de conserver sa légitimité et son intérêt dans le mix de production d'électricité.

Par **Claude JAOUEN*** et **Pierre BÉROUX****

Un réacteur nucléaire est un appareil dans lequel est entretenue une réaction en chaîne de fission nucléaire. Il comporte :

- de la matière fissile qui constitue le combustible, siège de la fission. Cette matière fissile est généralement constituée d'uranium 235 (U_{235}) ou de plutonium 239 (U_{239}),
- de la matière fertile, comme l'uranium 238 (U_{238}) ou le thorium 233 qui se transforme en matière fissile par l'absorption d'un neutron, suivie de l'émission d'une ou de plusieurs particules,
- d'un fluide caloporteur qui récupère la chaleur produite par la fission et la transfère vers une chaudière pour produire de la chaleur industrielle destinée (ou non) à la production d'électricité. Ce fluide caloporteur peut être de l'eau ordinaire (dite eau légère, H_2O), de l'eau lourde (D_2O), du gaz carbonique (CO_2), de l'hélium (He), ou un métal liquide, généralement du sodium (Na),

– un modérateur, pour les réacteurs dit thermiques ou « à neutrons lents » utilisant de l'uranium 235 comme matière fissile et dans lesquels les neutrons sont ralentis pour favoriser les fissions à basse énergie (inférieure à 1eV). Il s'agit d'atomes légers comme ceux de l'eau ordinaire, de l'eau lourde ou du graphite (C). Pour les réacteurs « à neutrons rapides » dans lesquels les neutrons ne sont pas ralentis pour favoriser les fissions à haute énergie (supérieure à 100 keV), il n'y a pas de modérateur ;

– des matériaux absorbants ajustables en quantité qui permettent de réguler la réaction de fission. En régime stable, il faut que le nombre de neutrons produits par la fission

* Directeur du Business Group Réacteurs et Services, Areva.

** Directeur technique et industriel de l'ingénierie nucléaire, EDF.

soit égal au nombre des neutrons capturés dans les différents matériaux constituant le réacteur. Les absorbants sont : le bore (B), le cadmium (Cd), le hafnium (Hf), le gadolinium (Ga), l'argent (Ag) et l'indium (In),

– enfin, des matériaux de structure qui servent à contenir les matières fissiles et fertiles, les modérateurs et les absorbants, et à organiser les écoulements du fluide caloporteur.

Un réacteur nucléaire se caractérise par le choix de ces différents matériaux, des choix essentiellement limités par leurs caractéristiques neutroniques et physico-chimiques. La combinaison de différents matériaux fissiles et fertiles, de modérateur (le cas échéant) et de caloporteur conduit à plusieurs familles de réacteurs, appelées « filières ».

Dans le développement des chaudières nucléaires, on distingue plusieurs phases :

– **la période 1940-1960 : la phase pré-industrielle, ou phase dite des chercheurs**

Entre l'apparition des premiers réacteurs dans les années 1940, aux Etats-Unis et au Canada, et dans les années 1950, les choix ont été dictés par la disponibilité des matières. À l'époque, seul l'uranium naturel (contenant 0,7 % d'uranium 235 et 99,3 % d'uranium 238) était disponible. Les modérateurs ne pouvaient être que des matériaux absorbant peu de neutrons, à savoir le graphite ou l'eau lourde. Le premier réacteur, la « pile » de Fermi (en 1942, aux Etats-Unis) utilisait le graphite, tandis que la première pile française, Zoé, recourait à l'eau lourde. Ensuite, les réacteurs à uranium naturel et graphite ont été utilisés pour produire du plutonium militaire, puis de l'électricité, en France et au Royaume-Uni.

À partir de 1950, la production d'uranium enrichi en uranium 235 dans les usines de séparation isotopique et la production de plutonium 239 à partir des premiers réacteurs ont permis de nouvelles combinaisons de matériaux et donc de nouveaux modèles de réacteurs, pendant que les réacteurs au graphite et à l'eau lourde gagnaient en puissance et s'industrialisaient. C'est ainsi que le premier réacteur électrogène à exister (aux Etats-Unis, en 1951) fut le réacteur EBR1 (un réacteur rapide refroidi au sodium).

– **de 1960 à nos jours : la phase industrielle**

À partir des années 1960, un petit nombre de filières se sont imposées, les chaudières industrielles productrices d'énergie que nous connaissons aujourd'hui en sont issues. Classées en fonction de leur type de caloporteur, ce sont :

– les chaudières refroidies au gaz carbonique (CO₂) ou à l'hélium (He), pour lesquelles le modérateur est du graphite,

– les chaudières refroidies à l'eau lourde (D₂O) ou à l'eau ordinaire (H₂O), les premières citées utilisant toujours l'eau lourde comme modérateur, alors que les secondes ont parfois utilisé de l'eau ordinaire ou du graphite (qui sont moins chers),

– les chaudières refroidies au sodium (sans modérateur).

Parmi ces chaudières, les chaudières refroidies et modérées à l'eau ordinaire représentent la grande majorité des chaudières construites dans le monde, du fait de leur compacité appréciée par la construction navale (sous-marins, brise-glaces, porte-avions) et du fait de leur rusticité, qui se traduit par une production massive de chaleur et d'électricité pour un coût moindre.

Néanmoins, durant cette période, la crainte d'une pénurie prochaine d'uranium et la quantité importante de plutonium disponible ont conduit à une tentative de développement industriel des chaudières rapides au sodium (notamment des chaudières Phénix et Superphénix, en France, et des chaudières BN 350 et BN 600 en Russie, pour ne parler que des chaudières les plus puissantes). En effet, du fait de la présence de quantités importantes d'uranium 238 dans l'uranium naturel ou dans l'uranium enrichi (à 4 % en U₂₃₅ environ, dans les chaudières à eau ordinaire), les chaudières à neutrons lents produisent du plutonium 239, qu'elles ne consomment qu'en partie. Ce plutonium est extrait du combustible à la fin de son séjour en chaudière et peut être réutilisé comme matériau fissile. En revanche, dans les chaudières rapides, grâce à un arrangement adéquat des matériaux, il est même possible de récupérer davantage de matériau fissile qu'il n'en avait été introduit initialement (dans ce cas, ces chaudières sont dites « surgénératrices »).

DESCRIPTION D'UNE CHAUDIÈRE NUCLÉAIRE

La chaudière nucléaire est abritée dans les bâtiments de l'îlot nucléaire de la « tranche » : le bâtiment réacteur et un ou plusieurs bâtiments y sont accolés, qui abritent les systèmes auxiliaires. Une centrale comprend généralement plusieurs tranches sur un même site. Ces bâtiments ont aussi pour fonction de contenir la radioactivité vis-à-vis de l'extérieur ; c'est pourquoi le bâtiment réacteur est aussi appelé « enceinte de confinement ». Cette enceinte résiste à la pression, aux séismes et aux missiles. Les structures internes de ces bâtiments assurent en outre les fonctions de supportage des équipements et de protection radiologique des travailleurs.

La chaudière comporte le cœur du réacteur, les circuits principaux et les circuits et systèmes auxiliaires.

Le cœur du réacteur

La chaleur produite par les fissions nucléaires se dégage au sein du combustible, qui constitue le cœur du réacteur. Ses éléments constitutifs sont essentielle-

ment le combustible, le modérateur (absent dans le cas des réacteurs rapides), le « réflecteur » (ou la « couverture », pour les réacteurs rapides), l'absorbant et, enfin, les structures internes du réacteur.

Le combustible

C'est un mélange de matériaux fissiles et fertiles, qui se présente soit sous une forme métallique, soit (plus généralement) sous la forme d'oxydes.

Il y a eu une tentative de réaliser des prototypes utilisant le combustible à l'état liquide (réacteurs homogènes à sels fondus), mais le combustible utilisé dans les réacteurs industriels est toujours à l'état solide et séparé du modérateur et du caloporteur. Pour ces derniers, on parle de réacteurs hétérogènes.

Si l'on excepte les réacteurs à l'uranium naturel alimentés en oxyde métallique et certains réacteurs rapides (uranium et carbure d'uranium), le combustible des réacteurs industriels est presque toujours de l'oxyde d'uranium plus ou moins enrichi en U_{235} , ou de l'oxyde de plutonium, ou encore un mélange UO_2 - PuO_2 .

L'oxyde sous la forme de pastilles frittées ou sous forme métallique est contenu dans des tubes appelés « gaines » dont le but principal est d'éviter la dispersion des « produits de fission » dans le caloporteur. Le choix des matériaux servant à confectionner ces gaines est limité à l'acier inoxydable pour les réacteurs rapides au sodium et pour les premiers réacteurs à eau pressurisée, à des alliages de zirconium pour les réacteurs à eau et à des alliages de magnésium pour les réacteurs graphite-gaz.

Les éléments combustible sont les plus petites unités étanches contenant le combustible. Ce sont les « cartouches » pour les réacteurs graphite-gaz, les « crayons » pour les réacteurs à eau, « les aiguilles » pour les réacteurs rapides au sodium (l'emploi du terme « aiguille » vient du fait que le tube est encore plus fin et plus long), et même les « boulets » pour certains prototypes de réacteurs à gaz à haute température.

Pour les réacteurs à eau et pour les réacteurs rapides au sodium, les éléments combustible sont rassemblés par paquets pour former des « assemblages combustible » liés mécaniquement entre eux et manipulés en bloc afin de faciliter les opérations périodiques de renouvellement du combustible.

Le modérateur

Dans les réacteurs à neutrons lents utilisant l' U_{235} comme matière fissile, le modérateur est constitué par des noyaux d'atomes légers qui ont une section efficace

de diffusion élastique convenable et une section efficace de capture faible. Il s'agit d'eau ordinaire ou d'eau lourde, dans le cas des réacteurs à eau (l'eau qui joue d'ailleurs en même temps le rôle de fluide caloporteur), ou du graphite.

Le réflecteur (la couverture)

Pour limiter la fuite de neutrons vers l'extérieur et réduire le flux neutronique sur les structures externes, le cœur du réacteur est entouré d'un matériau diffusant et peu capturant, appelé « réflecteur ». Ce matériau est généralement le même que celui utilisé pour le modérateur. Cela peut également être une structure interne métallique épaisse, qui agit comme un mur. Pour les réacteurs rapides au sodium, le cœur peut être entouré d'une couche de matériau fertile (U_{238} correspondant à de l'uranium naturel issu des usines de séparation isotopique et appauvri en U_{235}). C'est la « couverture » : les neutrons qui s'échappent du cœur sont alors réfléchis ou capturés, transformant l' U_{238} en Pu_{239} fissile.

L'absorbant

Constitué de matériaux capturant les neutrons, l'absorbant permet de régler l'allure de la réaction en chaîne par son introduction dans le cœur ou au contraire par son retrait. Ces matériaux (bore, cadmium, indium, hafnium, argent, gadolinium) sont contenus soit dans des barres (ou grappes) de contrôle qui s'enfoncent plus ou moins profondément dans le cœur, soit dans les éléments combustible eux-mêmes (sous la forme de pastilles ou de revêtements de gadolinium, par exemple, permettant ainsi de compenser progressivement la consommation de matière fissile) ou bien dilués dans l'eau, sous la forme d'acide borique (pour les réacteurs à eau ordinaire).

Le fluide caloporteur

C'est le fluide qui circule le long des éléments combustible pour évacuer la chaleur dégagée par la réaction de fission. Les fluides caloporteurs utilisés dans les chaudières nucléaires sont des liquides (eau ordinaire ou eau lourde), des gaz (gaz carbonique ou hélium), ou enfin du sodium [Ndlr : un métal dont le point de fusion est peu élevé (~ 98°C)].

La cuve (ou caisson) et les structures internes

Le cœur est maintenu dans des structures qui organisent l'écoulement du fluide caloporteur et guident les barres de contrôle. Ce sont les structures internes du

réacteur. L'ensemble est contenu dans une cuve en acier, dans les réacteurs à caloporteur liquide (et, parfois, dans un caisson en béton précontraint pour les réacteurs à caloporteur gazeux). Mais pour certains réacteurs, on utilise un faisceau de tubes sous pression appelés « tubes de force » (c'est le cas des réacteurs russes RBMK et des réacteurs canadiens et indiens à eau lourde).

Les circuits principaux

Les circuits principaux comprennent l'ensemble des circuits et de leurs organes (pompes, vannes, échangeurs de chaleur, générateurs de vapeur) permettant de transférer, *via* le fluide caloporteur, l'énergie thermique dégagée par le cœur au fluide thermodynamique (vapeur d'eau ou gaz) qui sera injecté dans la turbine d'un électro-générateur pour produire de l'électricité. Selon les modèles, les chaudières comportent un seul circuit principal (chaudières à eau bouillante et RBMK russes), deux circuits principaux (chaudières à eau pressurisée) ou trois (chaudières rapides au sodium).

Les circuits et systèmes auxiliaires

De nombreux circuits et systèmes auxiliaires sont nécessaires pour assurer la disponibilité des chaudières nucléaires et la sûreté de leur fonctionnement.

Ce sont d'abord les circuits de sauvegarde, qui sont destinés à intervenir en cas de défaillance des systèmes normaux de fonctionnement pour ramener les conséquences d'accidents éventuels en-deçà des limites acceptables pour le personnel et pour le public.

Ce sont ensuite les circuits auxiliaires proprement dits, fort nombreux, qui permettent aux circuits principaux de remplir leurs fonctions dans des configurations de démarrage, de fonctionnement en puissance et d'arrêt. Parmi ces systèmes, il faut citer les circuits de refroidissement et les circuits de collecte, de traitement, de stockage et de rejet des effluents radioactifs. Enfin, des systèmes de manutention et de stockage du combustible (neuf et usagé) permettent d'assurer le renouvellement du combustible dans le réacteur.

LES CHAUDIÈRES NUCLÉAIRES INDUSTRIELLES

À l'issue de la phase pré-industrielle, plusieurs modèles de chaudières nucléaires se sont imposés qui ont fait l'objet de réalisations industrielles (c'est-à-dire, qui ont été construits en plusieurs exemplaires). Les principales caractéristiques de ces chaudières existant dans les années 1990 sont résumées et comparées dans le tableau 1. Nous en faisons une présentation

rapide en nous référant toujours à un classement par le fluide caloporteur utilisé.

Les chaudières utilisant le sodium liquide comme fluide caloporteur

La première chaudière productrice d'électricité au monde fut le réacteur à neutrons rapides EBR1, qui a été mis en service aux Etats-Unis en 1951. Les réacteurs à neutrons rapides se caractérisent essentiellement par l'absence de réaction nucléaire provoquée par des neutrons lents ; il n'est donc pas nécessaire d'avoir un modérateur. Dans ce type de réacteur, on utilise du sodium comme fluide caloporteur, car il permet une extraction plus aisée de la chaleur produite. Le combustible est du plutonium (celui-ci pouvant provenir de réacteurs nucléaires à eau). Un des intérêts de ces réacteurs réside dans la possibilité d'y former du plutonium 239 à partir d'uranium 238 (jusqu'à former plus de plutonium qu'il n'en est consommé). Cette possibilité permet d'assurer non seulement l'extraction de 60 à 100 fois plus d'énergie d'une même quantité d'uranium naturel qu'avec les réacteurs à neutrons thermiques, mais aussi l'utilisation des minerais pauvres ou très pauvres économiquement inexploitable pour alimenter les autres filières, faisant ainsi de l'énergie nucléaire sinon une énergie inépuisable, tout au moins une source d'énergie disponible pour de très nombreux siècles.

Après la réalisation de plusieurs prototypes (Rhapsodie, en 1967, puis Phénix, en 1973), la France a construit une centrale de forte puissance (Superphénix, en 1986), qui a été arrêtée par les pouvoirs publics après sa mise en exploitation. Toutefois, de nombreuses expérimentations ont été poursuivies sur Phénix, et le CEA a lancé récemment un avant-projet pour la construction d'ASTRID, qui sera un nouveau démonstrateur de puissance dans cette filière.

Il faut enfin souligner que les chaudières rapides permettent « d'incinérer » les déchets radioactifs les plus nocifs produits par des chaudières nucléaires. En effet, les neutrons rapides cassent les atomes lourds (les actinides issus des réactions de fission). L'objectif est de ramener la durée de nocivité des produits de fission à une durée rassurante à l'échelle humaine, soit celle du millier d'années.

Les chaudières utilisant un gaz (gaz carbonique ou hélium) comme fluide caloporteur

Les chaudières UNGG (uranium naturel-graphite-gaz)

Les premières chaudières construites en France (d'une puissance de 2 365 mégawatts électriques) étaient de

Désignation	UNGG	AGR	HTR	CANDU	RBMK	REB	REP	RNR
Exemple de chaudière	Saint Laurent 1 et 2 (France)	Hinkley Point (Grande Bretagne)	Fort Saint Vrain (Etats Unis)	Darlington Candu (Canada)	Tchernobyl (URSS)	Fukushima N°5 (Japon)	Chooz B1 (N4) France	Superphénix (France)
Puissance électrique nette (MW)	390-465	600	330	935	950	1100	1450	1200
Caloporteur : Nature	Gaz Dioxyde de Carbone CO ₂	Gaz Dioxyde de Carbone CO ₂	Gaz Hélium He	Eau Eau lourde D ₂ O	Eau Eau ordinaire H ₂ O	Eau Eau ordinaire H ₂ O	Eau Eau ordinaire H ₂ O	Na 400 560 4 au milieu du cœur et 1 dans la cuve
Température d'entrée (°C)	250	290	400	276	270	278	290	
Température de sortie (°C)	400	645	770	312	280	287	325	
Pression moyenne (bar)	26	40	50	105	67	71	155	
Modérateur	graphite	graphite	graphite	eau lourde	graphite	eau ordinaire	eau ordinaire	pas de modérateur
Combustible : Matière fissile	uranium naturel	oxyde d'uranium légèrement enrichi	oxyde d'uranium moyennement enrichi	oxyde d'uranium naturel	oxyde d'uranium légèrement enrichi	oxyde d'uranium légèrement enrichi	oxyde d'uranium légèrement enrichi (1)	oxyde plutonium
Gainage associé	alliage de magnésium	acier inoxydable	graphite	Zircaloy	alliage de zirconium (Zr Nb)	Zircaloy	Zircaloy	acier inoxydable
Caractéristiques du cœur :	cylindre vertical	cylindre vertical	cylindre vertical	cylindre horizontal	cylindre vertical	cylindre vertical	cylindre vertical	cylindre vertical
Formes et dimensions (3)	$d = 17,4 \text{ m}$ $h = 9 \text{ m}$	$d = 9,1 \text{ m}$ $h = 8,3 \text{ m}$	$d = 6 \text{ m}$ $h = 4,8 \text{ m}$	$d = 7,8 \text{ m}$ $l = 6 \text{ m}$	$d = 12 \text{ m}$ $h = 7 \text{ m}$	$d = 5 \text{ m}$ $h = 3,7 \text{ m}$	$d = 3,70 \text{ m}$ $h = 4,27 \text{ m}$	$d = 3,6 \text{ m}$ $h = 1 \text{ m}$
Masse (t)	600 (U nat)	129 (UO)	20 (U et Th)	110 (U nat)	190 (UO)	135	125	35 (sans couverture)
Densité de puissancekW/L)	1	13 (U)	6	9	6	50	100	240
Taux d'irradiation(MWj/t)	5000	20 000	90 000	8 500	20 000	28 000	45 000	65 000
Consommation annuelle d'U ₃ O ₈ (2) (t)	250	230	170	160	200	200	200	< 1
Absorbant : dispositif de contrôle du cœur	barres	barres	barres + billes boriquées	barres et poison soluble	barres	barres	barres et poison soluble (bore dissous)	barres
Caractéristiques des structures du réacteur (3)	caisse en béton précontraint $d_{int} = 29 \text{ m}$ $e = 4 \text{ m}$	caisse en béton précontraint $d_{int} = 29 \text{ m}$ $h_{int} = 33 \text{ m}$ $e = 5 \text{ m}$	caisson en béton précontraint autour d'une cuve mince en acier au carbone $d = 9,4 \text{ m}$ $i = 32 \text{ m}$	faisceau horizontal de 480 tubes de force en zirconium nobium (ZrNb) $l = 6,3 \text{ m}$ $e = 0,042 \text{ m}$	faisceau vertical de 1681 tubes de force ($d = 0,088 \text{ m}$) $e = 0,004$ en alliage ZrNb (et acier inoxydable hors zone active) traversant un caisson en acier au carbone de $d = 16 \text{ m}$ et $e = 0,016$ rempli de graphite	<i>cuve épaisse en acier faiblement allié revêtu d'acier inoxydable austénique</i> $d = 6,4 \text{ m}$ $h = 22 \text{ m}$ $e = 0,16 \text{ m}$	<i>cuve épaisse en acier faiblement allié revêtu d'acier inoxydable austénique</i> $d = 4,5 \text{ m}$ $h = 11 \text{ m}$ $e = 0,23 \text{ m}$	<i>cuve mince en acier inoxydable austénique</i> $d = 21 \text{ m}$ $h = 15 \text{ m}$ $e = 0,025 \text{ m}$
Puissance électrique installée dans le monde (GW) fin 2010		8,9		22,2	10,2	84,1	248,6	0,5
Nombre de réacteurs		18		45	15	92	269	1

(1) Ou mélange uranium-plutonium (MOX).

(2) Sans recyclage, pour 1000 MW, pour un facteur de charge de 0,8 et une queue d'uranium appauvrie de 0,25 % à l'enrichissement

(3) Dimensions : d = diamètre e = épaisseur h = hauteur l = longueur.

Tableau 1 : Comparaison des modèles de chaudières industrielles - Valeurs arrondies.

ce type, dit UNGG (de l'Uranium Naturel comme combustible, du Graphite comme modérateur et un Gaz comme fluide caloporteur). Ce type de chaudière

avait un bilan neutronique très tendu, mais il présentait l'avantage d'utiliser de l'uranium naturel, et donc de ne pas dépendre d'installations d'enrichisse-

ment. Il a été abandonné après qu'une ressource uranium enrichi fut devenue disponible. EDF réalise actuellement la déconstruction des huit chaudières de cette filière présentes en France.

Les chaudières AGR (Advanced Graphite Reactor)

Ce modèle de réacteur a été construit au Royaume-Uni en plusieurs unités toujours en exploitation par EDF Energy. Il dérive du modèle que nous avons vu précédemment par l'emploi de gaines en acier inoxydable dont l'effet capturant pour les neutrons est compensé par un léger enrichissement (2 %) de l'uranium qui n'est plus utilisé sous sa forme métallique, mais sous celle de dioxyde (UO_2). Ainsi, la température de fonctionnement du réacteur et la pression du fluide caloporteur peuvent être augmentées, ce qui permet d'accroître le rendement de la chaudière.

Les chaudières utilisant de l'eau (eau ordinaire, ou eau lourde) comme caloporteur

Les chaudières à eau ordinaire (REP et REB)

Ces chaudières utilisent de l'eau ordinaire à la fois comme modérateur et comme fluide caloporteur. Elles constituent l'essentiel de la flotte mondiale des réacteurs en exploitation et des modèles en projet.

L'absorption relativement importante des neutrons par l'eau impose l'utilisation d'un combustible légèrement enrichi (de 2,5 à 3,5 % en masse d'uranium 235) et permet une utilisation réduite des ressources en uranium : moins de 0,8 % est consommé.

Pour une teneur de rejet de l'usine d'enrichissement de l'uranium de 0,25 % en masse de l'uranium 235 et en comptant une consommation spécifique d'environ un gramme d'uranium par mégawatt x jour (MWj) d'énergie thermique à l'équilibre, l'énergie extraite de l'uranium naturel est dans ce type de réacteur d'environ 6 000 MWj par tonne.

Quant au rapport entre les volumes du modérateur et du combustible, il est très faible (de l'ordre de 2,15 pour les réacteurs pressurisés et de 2,75 pour les réacteurs à eau bouillante) du fait du ralentissement brutal des neutrons par les noyaux d'hydrogène. Aussi, l'ensemble combustible-modérateur de ce type de réacteur est-il très compact.

Pour limiter l'investissement en combustible, on recherche la puissance spécifique (exprimée en mégawatt par tonne de combustible) la plus élevée, et pour une bonne utilisation de ce combustible, on tente d'accroître le plus possible le taux d'irradiation, ou « taux de combustion ».

Le combustible déchargé contient encore une quantité d'uranium 235 nettement supérieure à la teneur

isotopique naturelle, à laquelle s'ajoutent 0,85 grammes de plutonium par kilogramme d'uranium déchargé. Son traitement permet de récupérer l'uranium et le plutonium, pour les réutiliser respectivement comme uranium de retraitement et, dans le cas du plutonium récupéré, dans un combustible mixte constitué d'un mélange des oxydes UO_2 et PuO_2 (le MOX).

– Les réacteurs à eau ordinaire sous pression (REP)

Ces réacteurs ont été conçus à l'origine aux États-Unis pour la propulsion des sous-marins, du fait de leur compacité. L'eau est maintenue en phase liquide dans la cuve sous une pression d'environ 150 bars et à une température moyenne d'environ 300°C. Cette eau primaire cède sa chaleur dans un générateur de vapeur. La vapeur ainsi produite est envoyée vers la turbine.

L'eau du circuit primaire est confinée ainsi que les produits radioactifs qu'elle contient. L'absence d'ébullition dans le circuit primaire permet d'utiliser pour contrôler la réaction en chaîne une substance soluble, véritable « poison » pour les neutrons, le bore sous forme d'acide borique.

Le parc de production électronucléaire d'EDF en exploitation en France est composé de 58 réacteurs de ce type, et un 59^{ème} est en cours de construction (l'EPR de Flamanville).

EDF procède aussi actuellement au démantèlement complet du premier REP français, Chooz A (dans le département des Ardennes).

Le tableau comparatif des principales caractéristiques des chaudières REP en exploitation en France est donné par le tableau 2.

– Les réacteurs à eau ordinaire bouillante (REB)

Dans le cas de ces chaudières, la pression est limitée à la pression de saturation ; une partie de l'eau primaire est transformée en vapeur dans la cuve et cette vapeur est envoyée directement vers la turbine. La barrière (anti-radioactivité) créée par le générateur de vapeur n'existant plus, il est nécessaire, en cas d'accident sur le réacteur, d'isoler celui-ci de la turbine et d'évacuer la vapeur vers un condenseur auxiliaire de grande capacité. Il est également nécessaire de protéger la turbine vis-à-vis d'une radioactivité éventuelle, de prendre des dispositions spéciales au niveau de l'extraction de gaz du condenseur et de purifier l'eau d'alimentation avant sa réinjection dans le réacteur.

L'ébullition de l'eau, dans la cuve, interdit l'emploi de « poison soluble », ce qui nécessite une épuration très complète de l'eau, en permanence.

Malgré certains projets mis en oeuvre, lors du développement de l'électronucléaire en France, aucune installation de ce type n'a été construite sur le territoire français. Elles représentent toutefois plus de 20 % du parc installé mondial. On en trouve en particulier dans d'autres pays européens (en Allemagne, en Finlande...), ainsi qu'aux États-Unis ou au Japon.

Principales caractéristiques Main characteristics	REP 900 PWR 900		REP 1300 PWR 1300		REP N4 PWR 1500
Puissance électrique nette (MWe) Net electric capacity (MWe)	880 à 915		1300 à 1335		1455
Puissance thermique (MWth) Thermal power (MW)	2775		3800		4250
Rendement (%) Efficiency (%)	31,7 à 33,0		34,2 à 35,1		34,2
Nombre d'assemblages de combustible Number of fuel assemblies	157		193		205
Nombre de crayons par assemblage Number of rods per assembly	264		264		264
Poids d'uranium par assemblage (kg) Weight of uranium per assembly (kg)	461,7		538,5		538,5
Première charge / initial loading					
Masse d'uranium enrichi (tonnes) Weight of enriched uranium (t)	72,5		104		110,5
Enrichissement initial moyen (%) Average initial enrichment (%)	2,43		2,28		2,29
Besoin en uranium naturel (tonnes) ⁽⁶⁾ Natural uranium requirements (t)	316		423		449
Besoin en enrichissement (milliers d'UTS) Enrichissement requirement (10 ³ SWU)	225		294		312
Recharge à l'équilibre / Equilibrium reload	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Nombre d'assemblages par recharge Number of assemblies per reload	40	28 _{UO₂}	64	64	69
Masse de métal lourd (tonnes) Weight of heavy metal ⁽¹⁾	18,5	+16 _{MOX} 12,9 _{UO₂}	34,5	34,5	37,2
Enrichissement (%) Enrichement (%)	3,7	+7,4 _{MOX} 3,7 _{UO₂}	3,1	4,0	3,4
Besoin en uranium naturel (tonnes) ⁽⁷⁾ Natural uranium requirements (t)	153	+9,0 _{MOX} 107 _{UO₂}	235	310	280
Besoin en enrichissement (milliers d'UTS) ⁽⁷⁾ Enrichment requirements ⁽⁷⁾ (10 ³ SWU)	87	+0 _{MOX} ⁽⁸⁾ 61 _{UO₂}	124	182	154
Irradiation moyenne (MWj/t) Bump-up (MWd/t)	41 200	+0 _{MOX} ⁽⁸⁾ 33 800	32 100	43 500	39 000
Séjour en réacteur (mois) Fuel residence time (month)	48	36	38	54	36

- (1) Rechargement par quart de cœur (annuel) / Reload by 1/4 core
(2) Rechargement (MOX) par tiers de cœur (annuel) / Reload by 1/3 core (MOX)
(3) Rechargement par tiers de cœur (annuel) / Reload by 1/3 core
(4) Rechargement par tiers de cœur (allongé à 18 mois) / Reload by 1/3 core (18 months)
(5) Prévisionnel par tiers de cœur, susceptible de modification / Reload by 1/3 core (forecast)
(6) Pour un taux de rejet de 0,25 % / Assuming 0,25 % tails assay and no losses
(7) Pour un taux de rejet de 0,3 % / Assuming 0,3 % tails assay and no losses
(8) MOX fabriqué avec de l'U appauvri / MOX manufactured from depleted U

Sources : CEA / DSA-SEE
Mémento sur l'énergie - Edition 2002 - CEA

Tableau 2 : Caractéristiques des REP ⁽¹⁾ 900, 1300, 1500 MWe en exploitation en France
Characteristics of french PWR_s - 900, 1300 and 1500 MWe ⁽¹⁾

Les chaudières RBMK (acronyme russe pour Reactor Bolchoe Molchnastie Kipiache) (réacteur à grande puissance d'ébullition)

La première chaudière nucléaire productrice d'électricité de ce modèle fut mise en service en URSS en 1954. Ce modèle, uniquement construit en URSS (aujourd'hui présent en Russie, en Ukraine et en

Lituanie) est hybride en ce sens que le caloporteur est de l'eau ordinaire, mais que le modérateur n'est plus seulement de l'eau ordinaire (comme pour le REP ou le REB), mais principalement du graphite. L'eau ordinaire capturant plus de neutrons que le graphite, l'ébullition de l'eau tend à augmenter la puissance (un réacteur RBMK est donc *instable de par sa conception même*).

Les chaudières CANDU (Canadian Deutérium Uranium)

Ces chaudières construites en de nombreux exemplaires au Canada et en Inde (et en quelques exemplaires notamment en Roumanie et en Chine) utilisent l'eau lourde (D₂O) à la fois comme modérateur et comme fluide caloporteur. Cette conception est très favorable sur le plan neutronique. Ainsi, ce modèle se satisfait de combustible en uranium naturel sous la forme d'oxyde d'uranium gainé de zirconium, évitant ainsi le recours à une étape d'enrichissement du combustible. Économiquement, ce gain compense le coût élevé de la production de l'eau lourde nécessaire. Ces chaudières sont dites à « tubes de force » et il leur est plus difficile d'atteindre les niveaux élevés de puissance des chaudières REP et REB.

LES ÉTAPES DE L'AMÉLIORATION DE LA SÛRETÉ NUCLÉAIRE

Comme toute industrie, la production électronucléaire a progressé en tirant profit du retour d'expérience acquis au fil des dizaines d'années d'exploitation, en particulier en tirant les enseignements des événements les plus marquants de son histoire. Ainsi, l'évolution de la sûreté nucléaire est jalonnée par les accidents qui ont affecté les chaudières nucléaires ou par la conception générale des menaces : Three Miles Island en 1979, Tchernobyl en 1986, la chute des tours du World Trade Center en 2001 et Fukushima en 2011. En simplifiant, les étapes de cette évolution sont les suivantes.

Three Miles Island (1979)

À partir de l'accident de la chaudière REP de type Babcock de Three Miles Island (TMI) aux États-Unis en 1979, la sûreté nucléaire est devenue une préoccupation première. Il n'y a pas eu de conséquence environnementale et la conception générale du réacteur n'a pas été remise en cause. Au contraire, l'enceinte de confinement a bien joué son rôle. Cependant, cet accident a marqué un tournant dans la sûreté nucléaire avec l'institutionnalisation dans les pays occidentaux du « retour d'expérience ». Cela signifiait qu'à partir de cet accident, tout incident rencontré dans les chaudières allait être enregistré et faire l'objet d'une analyse approfondie non seulement pour éviter que le même incident ne se reproduise, mais aussi pour en déduire toutes les actions correctives visant à supprimer ou à réduire les causes possibles d'autres incidents d'une nature différente. De plus, ce retour d'expérience est mis en commun dans des réseaux d'exploitants nucléaires à la fois nationaux et internationaux,

comme la WANO (*World Association of Nuclear Operators*) et l'AIEA (Agence Internationale de l'Énergie Atomique). Après 1990, les pays de l'Est de l'Europe ont rejoint les pays occidentaux dans ce partage d'expérience. De ce fait, les chaudières à eau ordinaire, en particulier les chaudières à eau pressurisée, désormais les plus nombreuses dans le monde, sont devenues, et continuent de devenir chaque jour de plus en plus sûres, en bénéficiant d'un processus industriel d'amélioration continue.

Tchernobyl (1986)

L'accident de Tchernobyl survenu en Ukraine en 1986 n'affectait pas une chaudière à eau, mais une chaudière de type RBMK, d'une conception très particulière. Cependant, cet accident a eu un retentissement considérable dans l'opinion publique mondiale en raison de ses conséquences environnementales. Il a eu aussi des répercussions pour la sûreté de toutes les chaudières nucléaires, quel qu'en soit le type. L'idée s'est imposée qu'un accident affectant une chaudière nucléaire ne devait pas avoir de conséquence sur l'environnement. À partir de ce moment, il est devenu nécessaire de prendre les accidents en considération dès la conception des systèmes, et non plus seulement *a posteriori*. De là est née la notion de la génération 3. Différentes solutions ont été imaginées. Dans certains cas, les enceintes de confinement ont été renforcées pour collecter le cœur dans le cas où il fondrait et traverserait la cuve du réacteur (pour mémoire, à Three Mile Island, le cœur du réacteur a fondu, mais n'a pas traversé la cuve). Dans d'autres cas, des dispositifs visent à empêcher que le cœur d'un réacteur entré en fusion ne puisse traverser la cuve.

Parallèlement, les marges de tolérance des limites de refroidissement du cœur ont été augmentées (au détriment de l'aspect économique). C'est ainsi que Westinghouse a présenté son projet AP600 (600 MW) dont la cuve était aussi grosse que celle des plus grosses chaudières REP existantes, mais pour une puissance divisée par deux. La construction de cette chaudière n'a jamais pu être engagée et la recherche de la performance économique a conduit à ré-augmenter sa puissance, pour aboutir au modèle AP1000.

À partir des années 1990, ont été engagées les études de modèles de chaudières à sûreté renforcée, notamment de chaudières à eau ordinaire EPR, pour répondre aux exigences des autorités de sûreté nucléaire française et allemande, et de l'AP1000 pour les États-Unis (Westinghouse, ultérieurement rachetée par le japonais Toshiba). D'autres modèles de chaudières à eau ordinaire ont été développés, comme les russes VVER 1200/491 ou AES 2006, les coréennes APR1400 et les chaudières à eau bouillante ABWR, américano-japonaises (construites par General Electric, Toshiba et Hitachi).

Les attentats du 11 septembre 2001

Les attentats simultanés du 11 septembre 2001 ont mis en évidence le risque lié à la chute d'un avion de ligne. Afin de répondre aux demandes des autorités de sûreté nucléaire, ce risque est maintenant pris en compte dans la conception des réacteurs de troisième génération. Pour les autorités de sûreté nucléaire européennes, l'intégrité du confinement doit être assurée : cette protection est généralement réalisée par un renforcement des bâtiments permettant de limiter les conséquences sur le plan de la sûreté, de l'impact direct (pénétration) et de l'impact indirect (lié aux vibrations induites) de la chute d'un aéronef. Néanmoins, les exigences des autorités de sûreté nucléaire peuvent être variables. Ainsi, par exemple, l'autorité de sûreté nucléaire américaine évalue la résistance à une chute d'avion à travers la capacité de la centrale à préserver ses moyens de refroidissement et/ou l'intégrité de son enceinte.

L'accident nucléaire de Fukushima (2011)

L'accident nucléaire de Fukushima (Japon) survenu en mars 2011 marque une nouvelle étape dans le renforcement de la sûreté nucléaire. La rigueur apportée aux données inhérentes aux sites (sismicité, risques d'inondation,...) et l'augmentation des marges de sécurité prises pour la conception des réacteurs viennent renforcer la protection vis-à-vis d'éventuelles agressions externes naturelles. En outre, les approches analytiques et probabilistes visant à réduire les risques d'accident ne sont plus désormais considérées comme étant suffisantes. C'est une approche déterministe globale qui s'impose : on postule que les systèmes d'alimentation en eau et les systèmes d'alimentation électrique sont perdus et qu'il faut en retrouver de nouveaux pour assurer, dans le long terme, le refroidissement du cœur du réacteur. En particulier, des systèmes mobiles sont à prévoir pour parer à toute éventualité. Cet événement a renforcé la prise de conscience de la nécessité d'établir un lien entre la conception et l'exploitation des centrales nucléaires.

LES RÉACTEURS EN COURS DE CONSTRUCTION

De nouveaux réacteurs sont en construction. Ils prennent en compte l'évolution des exigences de sûreté, en particulier l'hypothèse d'une fonte d'une partie du cœur malgré les systèmes de sauvegarde prévus pour l'empêcher. L'objectif est qu'une fonte partielle du cœur n'ait pas de conséquence sur l'environnement. Ce sont en particulier les modèles de

chaudières à eau ordinaire pressurisée EPR, APWR, APR1400, AP1000 et VVER 120, et de chaudières à eau ordinaire bouillante ABWR (1).

Dans les trois derniers modèles de réacteur (AP1000, WER 120 et ABWR), il est fait appel à des systèmes dits passifs : une fois enclenchés, en cas d'accident, ces systèmes fonctionnent en mettant en œuvre des forces naturelles comme la gravité et la convection naturelle (ils sont dits de conception « révolutionnaire »).

L'EPR est dit, quant à lui, « évolutionnaire » en ce sens qu'il résulte d'une évolution de systèmes existants éprouvés, mais qui restent des systèmes actifs, c'est-à-dire qu'ils fonctionnent avec des pompes et d'autres organes actifs. Les systèmes actifs sont des systèmes dont le mode de fonctionnement est dit prouvé ; ils équipent en effet le parc existant. En revanche, le fonctionnement des systèmes passifs, notamment en condition accidentelle, doit être démontré. Les puissances mises en œuvre par ces systèmes passifs sont généralement inférieures à celles d'un système actif (comme, par exemple, une pompe).

Au-delà des écarts techniques et des démonstrations, quels que soient les principes retenus et les précautions apportées pour concevoir un système de sauvegarde, il est essentiel de mettre en place une défense en profondeur comportant plusieurs niveaux de protection successifs et indépendants les uns des autres.

À titre illustratif, les principales caractéristiques des chaudières industrielles à eau ordinaire de conception nouvelle en construction sont données dans le tableau 3.

Pour mémoire, alors que les pays occidentaux ont perdu leur avance dans le domaine des réacteurs à neutrons rapides, de nouvelles constructions dans ce domaine sont en cours en Russie (le BN 800) et en Inde (une chaudière de 500 MWe analogue à Superphénix). Une petite chaudière de quelques dizaines de MWe vient également d'être mise en service en Chine.

Par ailleurs, un grand nombre de réacteurs à eau pressurisée CPR1000 de la filière française du type dit de « génération 2+ » sont actuellement en cours de construction en Chine. Leur conception est analogue à celle des réacteurs de type 900 MWe français dont ils sont issus. Plus précisément, il s'agit d'un modèle dit « M310 » prenant en compte l'expérience acquise sur l'ensemble des centrales françaises, qui a été vendu à la Chine, dans les années 1980, pour son site de Daya-Bay (dans le Guangdong) - un modèle qui a fait

(1) Mises en service pour la première fois en 1996 au Japon, on peut arguer du fait que l'ABWR est un modèle de la même génération que le N4 français.

	EPR	VVER 1200 / 491 AES 2006	AP 1000	APR 1400	ABWR
Puissance thermique (MW)	4500	3200	3400	4000	3926
Puissance électrique nette (MW)	1650	1080	1117	1390	1356
Rendement	36,7%	33,8%	32,9%	34,8%	34,5%
Nombre de boucles	4	4	2	2
Diamètre de cuve réacteur (m)	4,90	4,25	4,05	4,63	7,10
Nombre d'assemblages combustibles	241 (17x17)	163 (hexagonaux 312 cr)	157 (17x17)	241 (16x16)	872 (10x10)
Matière fissile	UO ₂ (4.95% U ²³⁵)	UO ₂ (4.69% U ²³⁵)	UO ₂ (4.95 4.45% U ²³⁵) avec couverture 3.2% (8-inch)	UO ₂ (4.37% U ²³⁵)	UO ₂ (4.2% U ²³⁵)
Taux de combustion (GWJ/T)	> 60	<56	<60	50-55
Bâtiment Réacteur	Double enceinte avec peau	Double enceinte avec peau	Simple enceinte métallique + bâtiment de pro- tection		
Protection avion commercial	Oui par coque intégrale	En option, par épaississement structures	Oui mais coque limitée au bâti- ment réacteur		
Nombre de systèmes de sauvegarde	4 trains actifs	4 trains actifs et passifs	2 trains passifs intérieurs BR		
Accident grave	Récupérateur de corium sec	Récupérateur de corium sec	Maintien du cœur fondu en cuve		
Construction	Traditionnelle	Traditionnelle	Modulaire exten- sive		
Durée de vie à la construction (ans)	60	50 (à 90 % PN)	60	60	60
Nombre en fonctionnement					4 au Japon
Nombre de construction et lieux	1 en Finlande 1 en France 2 en Chine	2 en Russie	4 en Chine + 4 aux USA	4 en Corée 4 aux EAU	2 au Japon 2 à Taiwan

Tableau 3 : Réacteurs à eau ordinaire en construction de génération III.

l'objet d'améliorations par étapes. Ces améliorations sont essentiellement les nombreuses modifications apportées sur les tranches françaises, qui résultent du retour d'expérience, avec en particulier un nouveau contrôle commande complètement informatisé et une nouvelle turbine « Mirabelle » dérivée de la conception de la turbine Arabelle du N4. La construction de ce modèle se poursuit, mais en 2011 la Chine a décidé de suspendre toute décision en matière de nouvelles constructions souhaitant se donner le temps de définir les exigences complémentaires issues du retour d'expérience de l'accident de Fukushima.

L'EPR

Le réacteur EPR est le modèle le plus récent à être issu de la filière française des réacteurs à eau pressurisée, sa puissance peut aller de 1 600 à 1 700 MWe (selon les projets). Des EPR sont actuellement en construction :

- en Finlande : Olikuluoto 3 (électricien : TVO ; fournisseur clef en main : *consortium* Areva-Siemens),
- en France : Flamanville 3 (électricien-architecte-ensemblier : EDF ; chaudière : Areva ; îlot conventionnel : Alstom),

– en Chine : Taishan 1 et 2 (électricien-architecte-ensemblier : TNPJVC (70 % CGNPC, 30 % EDF) ; îlot nucléaire : Areva (et ses partenaires chinois) ; îlot conventionnel : Alstom (et ses partenaires chinois)). L'EPR est un réacteur évolutionnaire. Il embarque dès sa conception non seulement le retour d'expérience acquis sur l'ensemble du parc nucléaire français, notamment sur les réacteurs N4 (2), qui sont les derniers mis en service en France, mais aussi les améliorations réalisées sur le reste du parc lors des visites décennales successives.

Développé dans le cadre d'une coopération franco-allemande (EDF et des électriciens allemands, Areva et Siemens (3)), l'EPR intègre également des principes de conception visant une robustesse accrue (4) et des solutions technologies issues de la filière nucléaire allemande Konvoi (que nous développerons *infra*).

La conception de l'EPR répond ainsi aux recommandations des autorités de sûreté nucléaire française et allemande, ainsi qu'aux conséquences des accidents de Three Mile Island et de Tchernobyl.

C'est un réacteur dit de troisième génération, conçu dans l'objectif de renforcer la robustesse. Il vise ainsi à la fois un niveau de sûreté accru à la conception et l'atteinte des objectifs de sûreté attachés aux réacteurs de cette génération, à savoir :

- la réduction significative de la probabilité de fusion du cœur du réacteur,
- une protection renforcée face aux agressions tant internes qu'externes,
- la prise en compte des accidents graves dans leur conception permettant de s'assurer que ceux-ci n'auraient pas de conséquence à long terme sur l'environnement et sur les populations avoisinantes (notamment en cas de fusion du cœur).

Les concepts de sûreté de l'EPR sont basés sur une approche déterministe étendue aux accidents graves et enrichie d'une analyse probabiliste à la conception.

Parmi les solutions technologiques innovantes retenues dans sa conception, nous citerons :

- la présence d'un économiseur axial dans chaque générateur de vapeur procurant un gain important en termes de pression de la vapeur et contribuant ainsi à augmenter le rendement énergétique,
- un cœur entouré d'un réflecteur de neutrons favorisant une meilleure utilisation du combustible en limi-

tant le flux de neutrons quittant le cœur et visant à limiter le ralenti de la cuve dû à l'irradiation ;

- un compartiment spécifique situé à l'intérieur de l'enceinte de confinement destiné à recueillir et à refroidir le cœur fondu en cas d'accident grave (dans l'hypothèse où le cœur du réacteur entré en fusion percerait le fond de cuve).

Ces évolutions contribuent à une conception visant à garantir, dès la mise en service, une durée de fonctionnement de soixante ans.

Quatre bâtiments de sauvegarde indépendants et robustes

Le réacteur EPR dispose de quatre trains de sûreté fonctionnellement indépendants et physiquement séparés les uns des autres assurant une quadruple redondance mécanique et électrique. Leur installation dans quatre bâtiments distincts contribue à réduire le risque de défaillance simultanée des systèmes.

Chaque bâtiment de sauvegarde du réacteur abrite un train de sûreté complet comprenant :

- un système d'injection d'eau borée dans la cuve du réacteur (en cas de fuite du liquide de refroidissement),
- le système d'eau d'alimentation de secours pour les générateurs de vapeur,
- les systèmes électriques et de contrôle-commande pour ces systèmes.

Chaque train est à lui seul capable de refroidir le réacteur et peut avoir recours à de multiples systèmes de production électrique ainsi qu'à de multiples réserves d'eau afin d'assurer le refroidissement du cœur :

- quatre groupes électrogènes diesel d'alimentation de secours, chacun fournissant 100 % des besoins,
- ajout de deux groupes générateurs diesel (dits d'ultime secours) diversifiés pour renforcer la fiabilité des alimentations électriques internes,
- une sécurisation de l'inventaire en eau des systèmes de sauvegarde refroidissant le cœur du réacteur et l'enceinte de confinement,
- enfin, un réservoir d'eau (réservoir IRWST) implanté dans le bâtiment du réacteur.

En outre, d'autres systèmes viennent s'ajouter aux quatre trains de sauvegarde et renforcer la défense en profondeur, tels que l'*Extra Borating System*. Ce système se compose de deux trains séparés et indépendants capables d'injecter la quantité de bore nécessaire pour atteindre les conditions d'arrêt à froid.

Pour ce qui est de la piscine combustible, l'EPR dispose également d'un système de refroidissement dédié permettant de réaliser les fonctions d'apport de complément d'eau et de refroidissement de la piscine (celui-ci est composé de deux systèmes redondants, et d'un troisième, de secours).

(2) Il reprend notamment la conception du contrôle-commande et celle de l'interface informatisée de conduite homme-machine.

(3) De fait, la différence de modèle industriel entre le nucléaire français (modèle électricien-architecte-ensemblier) et le nucléaire allemand (modèle de fourniture clef en main) a conduit à ce qu'EDF s'implique davantage dans la conception que les électriciens allemands.

(4) Issue notamment du retour d'expérience de la proximité des bases aériennes américaines en Allemagne représentant un risque induit non négligeable de chute d'avion.

La résistance aux événements extérieurs

Une protection renforcée contre les accidents externes

L'EPR a été conçu de manière à renforcer la protection intrinsèque du réacteur contre les agressions externes. Ainsi, l'enceinte qui protège les bâtiments les plus sensibles est réalisée avec un béton renforcé. Le bâtiment réacteur est doté d'une double paroi : une enveloppe intérieure en béton précontraint et une épaisse coque extérieure en béton armé. La robustesse de cette double paroi a été élevée au niveau permettant de protéger le réacteur y compris contre la chute d'un avion commercial gros porteur. Elle protège le bâtiment réacteur, le bâtiment combustible (avec la piscine), deux des quatre bâtiments de sauvegarde et la salle de commande principale. Les deux autres bâtiments de sauvegarde et les bâtiments abritant les groupes électrogènes diesel de secours sont protégés de par leur implantation géographiquement distante.

Un radier renforcé pour résister aux séismes

Comme pour tout réacteur, chaque projet de réalisation d'un EPR tient compte des exigences réglementaires locales en termes de résistance sismique. Aussi tous les équipements relatifs aux fonctions de sûreté sont-ils dimensionnés et qualifiés pour résister aux vibrations et aux conséquences d'un séisme. Afin de renforcer encore la résistance aux séismes violents, l'îlot nucléaire de l'EPR repose sur un unique radier en béton armé de six mètres d'épaisseur.

Des systèmes résistants aux inondations

La surélévation de la plateforme d'un réacteur est la première mesure préventive contre les inondations. Elle est définie en fonction des conditions spécifiques de chaque site. Des protections supplémentaires peuvent également être mises en place sur certains sites (digues, brise-lames, etc.).

Pour l'EPR, l'enceinte de confinement du réacteur, les bâtiments de sauvegarde, le bâtiment contenant le combustible et les bâtiments abritant les générateurs diesel ont été conçus avec un niveau encore accru de résistance, pour le cas (résiduel) où le niveau d'eau viendrait néanmoins à dépasser celui de la plateforme.

La prévention des risques internes

Des recombineurs catalytiques pour prévenir le risque de détonation

Dans l'éventualité hypothétique d'un accident grave, avec fonte du cœur du réacteur et production induite

d'hydrogène, l'enveloppe intérieure de l'enceinte en béton précontraint est conçue pour résister à la pression pouvant résulter d'une combustion d'hydrogène. Des recombineurs catalytiques d'hydrogène sont installés à l'intérieur de l'enceinte pour prévenir l'accumulation d'hydrogène gazeux et le risque de détonation afférent.

Des systèmes permettant d'assurer la stabilisation du cœur fondu

En cas de fusion du cœur, toute portion de cœur fondu (ou corium) qui percerait le fond de la cuve sera récupérée dans un compartiment spécifique étanche situé en partie basse du bâtiment réacteur (le *core catcher*). Le corium y serait contenu et refroidi avec de l'eau provenant d'un réservoir également situé dans ce bâtiment. La chaleur serait ensuite évacuée afin d'éliminer le risque d'une explosion liée à la vapeur résultant d'une interaction entre le corium et l'eau.

Une double enceinte en béton pour limiter les rejets

Au cas où un accident se produirait, l'enceinte étanche qui renferme le réacteur d'un EPR bénéficierait, d'une part, d'une peau métallique qui ferait barrage à la radioactivité et, d'autre part, d'une zone annulaire (dans la double enceinte) qui permettrait de filtrer tout élément radioactif résiduel, permettant ainsi de réduire l'impact radiologique sur l'environnement et sur les populations avoisinantes.



Vue de l'enceinte.

La sûreté du réacteur EPR dans le contexte post-Fukushima

Dans le cadre des évaluations de sûreté complémentaires réalisées en France en 2011, l'ASN a considéré, pour le réacteur EPR de Flamanville 3 comme pour le reste du parc en exploitation en France, qu'il n'y avait pas de raison de sûreté justifiant d'en arrêter l'exploitation, elle a demandé à l'exploitant, EDF, de prendre des dispositions complémentaires pour



Zone de rétention du corium.



Coque externe en béton armé.

renforcer la robustesse et la résilience aux situations les plus extrêmes. Pour Flamanville 3 en particulier, l'ASN a noté que « la conception renforcée de ce type de réacteur assure déjà une protection améliorée à l'égard des accidents graves [et qu'] EDF prendra néanmoins des dispositions complémentaires visant à prolonger l'autonomie des sources électriques sur le site ».

Objectifs d'exploitation

L'objectif défini à la conception en matière de disponibilité, qui est ce que l'on attend des EPR actuellement en construction, est fixé autour de 91% pour Flamanville 3, soit une cible plus élevée que les réacteurs en exploitation. Cet objectif est essentiellement lié à la réduction de la durée des arrêts de tranches (pour recharge en combustible et maintenance) (cible : moins de 16 jours). Cela passe par une optimisation de la gestion des opérations de rechargement du combustible et de maintenance des systèmes et des équipements. En particulier, la possibilité d'un accès au bâtiment réacteur alors que le réacteur est en service (issue de la technologie Konvoi) a été retenue pour permettre de réaliser une partie de la maintenance en dehors de ces arrêts.

En matière de radioprotection, la protection du personnel d'exploitation et de maintenance contre les radiations est renforcée par le choix des matériaux et

la configuration des systèmes et composants concernés. L'objectif est ainsi de réduire la dose collective cible de radioactivité à ne pas dépasser (par réacteur et par an).

Enfin, la conception du réacteur EPR vise à réduire son impact sur l'environnement, grâce à une réduction du volume des déchets produits et à leur meilleure gestion.

Il permet également une réduction de la consommation d'uranium par kWh d'électricité produit (cible : 15%) grâce à une combinaison d'améliorations à la conception, dont font partie le réflecteur de neutrons et l'économiseur axial des générateurs de vapeur. Ces innovations visent également à réduire les quantités de déchets hautement radioactifs.

Rejets radioactifs gazeux

En fonction de leur origine et de leur composition, les déchets radioactifs gazeux sont soit filtrés, puis relâchés dans l'atmosphère, soit tout d'abord capturés par un système de traitement, puis traités et filtrés afin de réduire leur radioactivité

Déchets radioactifs liquides

Dans les réacteurs EPR, le nombre plus élevé des barres de contrôle et la taille plus importante du cœur visent à réduire les injections de bore et donc les volumes de déchets radioactifs liquides rejetés.

Enfin, leur consommation d'eau est réduite du fait d'un rendement thermique accru d'une valeur cible de 37%.

LES NOUVEAUX RÉACTEURS EN DÉVELOPPEMENT

Les nouveaux réacteurs en développement à court terme

Malgré l'accident de Fukushima et une prudence accrue, l'intérêt de l'électronucléaire persiste en raison de la perspective de pénurie de combustibles fossiles et des préoccupations relatives au réchauffement de la planète. Des programmes ambitieux de construction dans les pays émergents et dans les pays « émergés » (les BRICS, notamment), au premier rang desquels figure la Chine, et des études de nouveaux modèles de chaudière ont été engagés.

Les nouveaux modèles de réacteur doivent concilier à la fois l'amélioration de la sûreté et les performances

économiques pour que le nucléaire conserve une légitimité et un intérêt dans le mix de production d'électricité. Cette performance doit être mesurée à l'aune de la compétitivité par rapport aux autres moyens de production d'électricité (thermique à flamme-gaz, en particulier, et énergies renouvelables).

ATMEA1 (coentreprise ATMEA, entre Areva et MHI)

Fin 2007, Areva, en association avec *Mitsubishi Heavy Industries Ltd* (MHI), a créé une coentreprise de droit français (ATMEA), qui est détenue à parts égales (50 %-50 %) par les deux groupes. Son champ d'activité exclusif et mondial est de concevoir, développer, commercialiser, construire et mettre en exploitation commerciale un réacteur dans la gamme des 1 000 MWe (îlot nucléaire).

ATMEA a conçu le réacteur ATMEA1 en se fondant sur les meilleures technologies disponibles au sein des deux groupes parents pour les réacteurs de troisième génération et sur des techniques de construction modulaire mises en œuvre depuis longtemps par MHI et intégrant un arrangement spatial simplifié. L'ATMEA1 intègre les dernières avancées technologiques à la fois de l'EPR et des réacteurs japonais à eau pressurisée. Il dispose par ailleurs de spécificités de sûreté et d'exploitation propres qui en font aujourd'hui un réacteur très robuste vis-à-vis d'événements externes. Sa puissance lui permet d'être également choisi par des pays dont le réseau électrique ne pourrait pas accueillir un réacteur de forte puissance.

À l'issue d'un examen d'une durée de dix-huit mois, l'autorité de sûreté nucléaire française (ASN) a émis, le 7 février 2012, un avis positif sur les options de sûreté du projet de réacteur ATMEA1. L'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) a intégré l'analyse des premiers enseignements de l'accident de Fukushima et a conclu que les options de sûreté de l'ATMEA1 garantissent sa robustesse par rapport à des événements extrêmes de type Fukushima. Depuis 2011, ce réacteur est également en cours d'examen par l'autorité de sûreté nucléaire canadienne (CNSC, *Canadian Nuclear Security Commission*).

En 2008, l'ATMEA1 avait été examiné par l'IAEA, qui avait conclu que le *conceptual design* de ce réacteur répondait aux fondamentaux de sûreté de l'AIEA et qu'il était en ligne avec les exigences de sûreté pour le *design* des réacteurs (NS-R-1).

Les études de conception de l'ATMEA1 sont désormais terminées et les études détaillées d'ingénierie ont débuté. Areva et MHI en ont d'ores et déjà engagé la commercialisation. Plusieurs exploitants dans le monde sont en train d'en évaluer les capacités techniques et économiques.

En 2011, l'ATMEA1 a fait partie des trois modèles de réacteurs retenus par la Jordanie en vue de leur éva-

luation technique et économique détaillée dans le cadre de son projet électronucléaire. Fin avril 2012, la Jordanie a qualifié l'offre d'ATMEA et celle du Russe Rosatom en vue de poursuivre les discussions durant une seconde phase d'évaluation. Elle a notamment conclu que la technologie ATMEA1 répondrait parfaitement à ses exigences techniques et économiques.

ACE1000 (EDF, CGNPC, Areva)

Par ailleurs, EDF et Areva ont pris ensemble acte du programme prépondérant de construction de réacteurs nucléaires en Chine et du glissement du centre de gravité de l'industrie nucléaire vers ce pays que ce programme ambitieux a d'ores et déjà commencé à provoquer. En s'appuyant sur l'avantage compétitif que confère à l'industrie nucléaire française son implication dans ce pays depuis trente ans (depuis la construction de Daya Bay, mis en service en 1994, et avec la construction de dizaines de CPR1000 et de deux EPR, en passant par les quatre réacteurs de Ling Ao), EDF et Areva ont décidé de s'organiser afin d'être des acteurs de cette dynamique, d'assurer ainsi la pérennité de leur activité et de celle des fournisseurs historiques du parc nucléaire français. Ils appuient ce projet sur le développement d'un nouveau modèle de réacteur avec leur partenaire historique, l'électricien chinois *China Guangdong Nuclear Power Group* (CGNPC). Ainsi, l'ACE 1000 vise également à répondre aux besoins de marchés disposant de réseaux électriques adaptés à des réacteurs de moyenne puissance (de l'ordre de 1 000 MWe) en application de la stratégie définie en février 2011 par le Conseil de Politique Nucléaire français.

Dans ce projet, les deux électriciens EDF et CGNPC s'associent dans leur rôle d'architecte-ensemblier et de concepteur-constructeur-exploitant. Areva participe au projet en apportant sa compétence de chaudiériste et est associée aux études afférentes à l'ensemble de l'îlot nucléaire.

Ce nouveau réacteur vise les objectifs de sûreté et de compétitivité les plus élevés (objectifs de sûreté de génération 3, tels que définis par l'association des autorités de sûreté européennes WENRA + retour d'expérience post-Fukushima à la conception).

Pour cela, il intègre :

- l'expérience acquise par la filière française, dont le parc de 58 réacteurs homogènes en exploitation en France depuis vingt-cinq ans (en moyenne) constitue la plus grande expérience au monde en la matière,

- le retour d'expérience de construction, en cours de constitution en Chine, en particulier sur le modèle CPR1000 issu de cette filière française,

- enfin, le retour d'expérience du *licensing* des premières centrales de troisième génération.

L'ACE 1000 intègre, dès sa conception, les enseignements retirés de l'accident nucléaire de Fukushima.

Les nouveaux réacteurs en développement à plus long terme

À l'initiative du DOE (*Department Of Energy*) américain, le « Forum Génération IV » s'est constitué en 2000 pour développer à plus long terme une nouvelle génération de chaudières nucléaires qui satisferait aux objectifs suivants :

- assurer un développement énergétique durable, c'est-à-dire mieux utiliser les ressources nucléaires naturelles,
- assurer une meilleure sûreté et une plus grande disponibilité,
- assurer un fonctionnement encore plus économique,
- prévenir encore plus efficacement les risques de prolifération nucléaire.

Une dizaine de pays, dont la France, ont participé à la constitution de ce forum international dont l'objectif général est de mettre en commun les ressources des pays membres pour éviter des doublons en matière de recherche. L'objectif était à l'origine de disposer de cahiers des charges à l'horizon 2030.

Six concepts ont été sélectionnés, dont certains, remontant à la phase « pré-industrielle », avaient été abandonnés à l'époque, suite aux difficultés rencontrées notamment en raison des limites atteintes par la résistance des matériaux. Ces six concepts sont :

- a) le VHTR (*Very High Temperature Reactor*), réacteur à gaz à très haute température,
- b) le GFR (*Gas Cooled Fast Reactor*), réacteur rapide à gaz,
- c) le SFR (*Sodium Cooled Fast Reactor*), réacteur rapide au sodium,
- d) le SCWR (*Supercritical Water Cooled Reactor*), réacteur à eau supercritique,
- e) le LFR (*Lead Cooled Fast Reactor*), réacteur rapide au plomb,
- enfin, f) le MSR (*Molten Salt Reactor*), réacteur à sel fondu.

Une répartition entre pays a été convenue. La France a d'abord retenu le réacteur rapide à gaz, alors que le Japon retenait le réacteur rapide au sodium. Puis, face à la durée estimée du développement technologique du concept rapide à gaz, la France s'est repliée sur le concept rapide au sodium, pour lequel une expérience significative avait déjà été engrangée. C'est ainsi qu'est né le projet de chaudière ASTRID, que développe le CEA à Cadarache (dans le département des Bouches-du-Rhône). C'est un concept de chaudière dite intégrée (c'est-à-dire que le circuit primaire est contenu dans une grande cuve) qui a été retenu, dans la lignée de Phénix et de Superphénix, alors que les Japonais se sont orientés vers une chaudière dite à boucles (la cuve ne contient que le cœur, les pompes primaires et les échangeurs étant reliés à la cuve par des tuyauteries primaires, comme dans le cas des REP), dans le prolongement de leur chaudière prototype, Monju.

Le réacteur ATMEA1

Le réacteur ATMEA1 est un modèle à eau pressurisée de 1 100 MWe destiné à tous les types de réseaux et en particulier aux réseaux électriques de moyenne puissance.

Sa conception a fait appel aux meilleures technologies utilisées pour les réacteurs de troisième génération et ce réacteur répond aux dernières exigences de sûreté en vigueur aujourd'hui.

Par **Philippe NAMY***

PRÉSENTATION GÉNÉRALE

ATMEA est une co-entreprise de droit français créée en 2007 entre Mitsubishi Heavy Industries Ltd (MHI) et Areva ; elle est détenue à parts égales (50 %-50 %) par ces deux groupes. Son champ d'activité, exclusif et mondial, est de concevoir, développer, commercialiser, construire et mettre en exploitation commerciale un réacteur se positionnant dans la gamme de puissance de 1 000 mégawatts électriques (MWe).

ATMEA a conçu le réacteur ATMEA1 en se fondant sur les meilleures technologies disponibles pour les réacteurs de troisième génération et sur des techniques de construction modulaire mises en œuvre depuis longtemps par MHI et intégrant un arrangement spatial simplifié.

Le développement de ce réacteur, mené en deux ans, est terminé depuis la fin 2010. Ce modèle unique de réacteur de moyenne puissance de toute dernière génération (GENERATION 3+) est de type évolutionnaire. Il répond aux plus récentes exigences de sûreté connues à ce jour (en particulier, à des conditions accidentelles extrêmes de type Fukushima).

À l'issue d'un examen ayant duré dix-huit mois, l'autorité française de sûreté nucléaire (ASN) a émis le 7 février 2012 un avis positif sur les options de sûreté du projet de réacteur ATMEA1. En 2008, l'ATMEA1

avait été examiné par l'IAEA, qui avait elle aussi conclu positivement. Depuis 2011, ce réacteur est également soumis à l'examen de l'autorité de sûreté nucléaire canadienne, la CNSC.

Les études de conception de l'ATMEA1 sont désormais terminées et les études détaillées d'ingénierie ont débuté. Ce réacteur est en cours de commercialisation.

DESCRIPTION DU RÉACTEUR ATMEA1

Le réacteur ATMEA1 est un réacteur à eau pressurisée (REP) de moyenne puissance (1 100 MWe) et de génération III+. Développé par ATMMEA, sa puissance est de 3 150 MW thermiques.

Son circuit primaire est composé d'une cuve contenant les assemblages combustible et de trois boucles dont chacune est principalement composée d'une pompe et d'un générateur de vapeur. Le circuit primaire est doté d'un pressuriseur qui en maintient la pression. Il comporte également les systèmes de contrôle commande ainsi que les systèmes de protection associés. Cette conception du circuit primaire et

* Président d'ATMEA.

des systèmes qui lui sont associés est similaire à celle des réacteurs REP (réacteur à eau pressurisée – PWR) d'Areva et de MHI actuellement en fonctionnement dans le monde, lui conférant ainsi les caractéristiques d'une technologie éprouvée.

La structure du bâtiment réacteur en béton renforcé précontraint est revêtue, sur sa face interne, d'une protection métallique. Un espace annulaire, en partie basse du bâtiment réacteur, permet de collecter les liquides résultant de fuites éventuelles au niveau des pénétrations. En sus du circuit primaire principal, le bâtiment réacteur protège la réserve d'eau destinée à l'injection de sécurité ainsi qu'un récupérateur de corium dédié à la collecte du cœur entré en fusion dans l'hypothèse d'un accident nucléaire grave.

Le bâtiment réacteur est entouré par les bâtiments abritant les systèmes de sauvegarde et par le bâtiment abritant les combustibles. Les structures internes, les composants du réacteur, les bâtiments de sauvegarde (incluant la salle des commandes) et le bâtiment combustible sont protégés contre les risques d'agressions externes incluant la chute d'avions commerciaux gros porteurs et les explosions.

Les trois systèmes (ou trains) de sécurité redondants et pouvant chacun assumer 100 % des fonctions de sûreté du réacteur sont localisés dans trois divisions strictement séparées. Un quatrième système dénommé Division X est disponible afin de pourvoir à l'alimentation en eau de refroidissement des principaux systèmes de sûreté, en cas de situation extrême, à partir d'une source froide d'ultime secours distincte des sources de refroidissement principales. La Division X est également utilisée lors d'opérations de maintenance préventive ou curative effectuées sur l'un des trois autres trains.

Les principales caractéristiques du réacteur ATMEA1 figurent dans le tableau ci-dessous.

Les aspects économiques et environnementaux ont été largement pris en compte dès la phase de conception du réacteur afin d'en maximiser la performance. Il en résulte :

- un haut rendement thermique (de 37 %) permettant une économie de combustible et une réduction de la production de déchets radioactifs,

- une durée de vie de soixante ans permettant de mieux amortir les coûts de ce réacteur en regard de la quantité d'électricité totale qu'il aura produite,

- un facteur de disponibilité élevé (> 92 % sur la durée de vie totale de la centrale) permis par les cycles longs du combustible (allant jusqu'à deux ans) et par les arrêts courts pour rechargement (notamment grâce à la conception dite « des deux zones » qui donne la possibilité de pénétrer dans le bâtiment réacteur en fonctionnement et permet ainsi d'assurer la maintenance de certains systèmes par le recours à la Division X),

- enfin, un suivi de charge et la possibilité qu'a le réacteur de s'adapter aux variations de fréquence et de pouvoir ainsi répondre aux exigences les plus sévères des réseaux à 50Hz ou 60 Hz, donnant ainsi aux opérateurs une grande flexibilité d'exploitation.

LES COMPOSANTS DU CIRCUIT PRIMAIRE

Les générateurs de vapeur (GV) sont des échangeurs de chaleur à circulation naturelle à tubes en U. Ils intègrent les équipements de séparation et de séchage. Grâce à la double enveloppe située dans la branche froide, l'économiseur axial dirige l'injection de l'eau alimentaire dans la partie branche froide du faisceau tubulaire, la majeure partie de l'eau de recirculation étant dirigée, quant à elle, vers la branche chaude. Cette conception permet d'obtenir une pression vapeur plus importante qu'avec les GV de type bouillant de même surface tubulaire, et ainsi d'améliorer l'efficacité thermique.

Les tubes en alliage Inconel 690 et traités thermiquement (690 TT) sont largement utilisés dans les GV du monde entier ; ils offrent une excellente résistance au phénomène de corrosion primaire.

Les accumulateurs avancés permettent, de façon passive et à basse pression, le remplissage des boucles primaires à très haut débit, puis le re-noyage du cœur, à débit plus faible. L'utilisation de ces accumulateurs passifs permet d'éliminer les pompes d'injection basse

Puissance thermique	3 150 MWth
Puissance électrique	1 100 - 1 150 MWe (Net)
Efficacité thermique	35 à 37 %
Cycle combustible	de 12 à 24 mois
Chargement en combustible MOX	Possible de 0 à 100 %
Arrêts de tranche	16 jours pour rechargement normal
Facteur de disponibilité	> 92 % sur la durée de vie du réacteur (Calculé selon critères EUR)
Durée de vie du réacteur	60 ans

Tableau 1 : Caractéristiques du réacteur ATMEA1.

pression de secours, simplifiant ainsi la conception du réacteur. En effet, en cas de rupture ou de brèche dans une boucle primaire, le circuit primaire doit être très rapidement re-rempli. Les accumulateurs avancés assurent ce remplissage pendant les premières secondes avant que les pompes d'injection de sécurité moyenne pression ne soient mises en action. Les accumulateurs sont activés de façon passive par différence de pression hydrostatique, ils n'exigent donc aucun système électrique de déclenchement.

Le cœur du réacteur ATMEA1 consiste en 157 assemblages combustibles comme ceux utilisés dans les cœurs des réacteurs à trois boucles classiques conçus par Areva et/ou par MHI. Le cœur est entouré d'un réflecteur lourd radial conçu pour optimiser l'utilisation des neutrons (avec une moindre consommation de combustible) et réduire l'irradiation de la cuve du réacteur. Les boulons de fixation du réflecteur sont situés dans des zones du cœur à faible fluence, ce qui permet de réduire le nombre des opérations d'inspection en service.

Chaque assemblage de combustible consiste en des crayons combustibles disposés en réseaux carrés de 17x17 complétés par un ensemble de 24 tubes de guide de grappe de contrôle. Les crayons combustibles contiennent des pastilles de dioxyde d'uranium faiblement enrichi ou des pastilles de MOX. Le cœur du réacteur ATMEA1 peut contenir 100 % de dioxyde d'uranium ou un mélange de dioxyde d'uranium et de MOX. Pour la conception standard, la part du MOX est de 1/3, mais elle peut atteindre 100 % sans modification majeure de la conception. Les cycles du combustible peuvent varier de 12 à 24 mois.

Le réacteur ATMEA1 peut fonctionner en mode suivi de charge avec un niveau de puissance minimal de 25 %, mais il peut rapidement remonter à sa puissance nominale à la vitesse de 5 % par minute.

LA SÛRETÉ DU RÉACTEUR

La sûreté du réacteur ATMEA1 est basée sur des objectifs répondant aux critères les plus stricts exigés actuellement, à savoir une fréquence d'endommagement du cœur (CDF) inférieure à 10^{-5} , réacteur x an et une fréquence, pour les rejets radioactifs importants, inférieure à 10^{-6} , réacteur x an.

Le réacteur respecte les réglementations, codes, normes et consensus américains, ainsi que les recommandations de la Commission Internationale pour la Radioprotection (IRCP).

Sa conception est également en conformité avec les normes de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) et avec les exigences de plusieurs autorités de sûreté nucléaire qui aujourd'hui sont engagées dans l'examen de réacteurs de génération III+, comme l'EPR d'Areva ou l'APWR de MHI.

La sûreté du réacteur ATMEA1 est fondée principalement sur des analyses déterministes complétées par des analyses probabilistes.

L'approche déterministe est basée sur une application stricte du concept de « défense en profondeur » aboutissant :

- à des comportements transitoires du réacteur satisfaisants grâce aux volumes importants des GV et du pressuriseur,
- à une simplification des systèmes de sûreté et à leur séparation fonctionnelle,
- à la gestion des défaillances en mode commun par la ségrégation et par une redondance des fonctions de sûreté,
- à des marges suffisantes afin de minimiser les effets des défaillances (et en particulier celles résultant d'erreurs humaines),
- à une automatisation et à des temps étendus pour les actions des opérateurs,
- à une moindre sensibilité aux erreurs humaines grâce à des systèmes d'instrumentation et de contrôle numériques optimisés,
- enfin, à une robustesse accrue de l'enceinte de confinement.

La liste des événements pris en compte dans la conception de base de ce réacteur est celle établie par l'autorité de sûreté américaine (USNRC). Cette liste est complétée par des événements de deux types, ceux dont la probabilité est suffisamment élevée pour qu'ils soient pris en compte et ceux dont le retour d'expérience mondial démontre l'importance de leur prise en compte dans la conception. Dans toutes les analyses de sûreté, c'est l'état d'arrêt sûr du réacteur à long terme qui est pris en considération.

En plus de l'approche déterministe, les événements à basse probabilité avec défaillances multiples sont pris en compte jusqu'à la perte totale des systèmes de sûreté (conception en situations extrêmes). Une analyse probabiliste est utilisée pour définir ces événements et une approche tant déterministe que probabiliste est utilisée pour évaluer les mesures spécifiques disponibles pour la gestion de ces événements.

En conséquence, la probabilité d'accident sévère du réacteur ATMEA1 a été fortement réduite. Par ailleurs, des dispositions novatrices dans sa conception éliminent pratiquement les scénarios pouvant entraîner une défaillance précoce de l'enceinte, ce qui permet de gérer la fusion du cœur et d'éviter des rejets radioactifs importants vers l'extérieur.

La conception du réacteur ATMEA1 intègre une grande autonomie des systèmes de sécurité et permet aux opérateurs de disposer d'un temps de réponse accru. En cas de perte de l'alimentation électrique extérieure, une autonomie d'au moins sept jours est assurée pour chacun des moteurs des sources électriques de secours. La conception du réacteur intègre des options de sûreté du plus haut niveau pour proté-

ger, refroidir et confiner le réacteur dans toutes les situations, y compris en conditions extrêmes.

En matière de protection, un soin particulier a été accordé à celle des systèmes de sûreté à l'intérieur du bâtiment réacteur et des bâtiments de sauvegarde.

Le bâtiment combustible et les bâtiments abritant les systèmes de secours électriques sont protégés contre une large gamme d'agressions externes, y compris :

- les événements sismiques, avec un séisme de dimensionnement standard de 0,3 g pour les séismes de référence,
- les inondations externes, les bâtiments abritant les équipements et systèmes de sûreté sont hermétiques et étanches,
- les explosions, les missiles, les tornades et les feux.

Le réacteur ATMEA1 prend en compte la chute d'un avion militaire ou commercial gros porteur : un tel événement s'il venait à se produire n'entraînerait pas de rejet de matières radioactives excédant les limites radiologiques grâce à :

- l'intégrité structurelle des bâtiments abritant les fonctions de sûreté importantes, à savoir l'enceinte du réacteur, les bâtiments de sauvegarde, les bâtiments de sources électriques de secours et le bâtiment de la piscine de stockage du combustible usé,
- l'impossibilité que le carburant d'avion entre dans le bâtiment réacteur, le bâtiment de sauvegarde, le bâtiment combustible et les bâtiments des sources électriques de secours, prévenant ainsi tout risque de feu ou d'explosion,
- la sûreté de la mise à l'arrêt du réacteur,
- la disponibilité, sur le long terme, du refroidissement de secours du cœur et de l'évacuation de la puissance résiduelle.

Pour le refroidissement, la conception du réacteur ATMEA1 intègre trois voies indépendantes de sûreté active qui sont protégées contre les agressions externes.

Chacune de ces voies englobe principalement :

- le circuit d'injection de sécurité (SIS), qui maintient la recirculation de l'eau de refroidissement du cœur à moyenne pression lors d'une rupture ou d'une brèche de tuyauterie primaire (LOCA), les accumulateurs avancés fournissant l'eau de secours lors des premières secondes du LOCA [Ndlr : accident résultant d'une perte de réfrigérant],
- le circuit d'aspersion de l'enceinte (CSS) et le circuit de refroidissement à l'arrêt (RHRS). Ces circuits assurent le refroidissement normal à l'arrêt ainsi que l'aspersion de l'enceinte permettant de maintenir le bâtiment réacteur dans les conditions limites de sa conception, par exemple en cas de LOCA.

Chaque voie est disposée dans une zone spécifique (une division) séparée des zones ou des divisions abritant les autres trains. Ainsi, chaque train de sûreté est protégé contre la propagation de risques internes, comme, par exemple, le feu, la rupture de tuyauterie haute énergie ou l'inondation.

Le réacteur ATMEA1 dispose également d'une réserve d'eau située en partie basse de l'enceinte qui permet d'alimenter les principaux circuits de sûreté CSS et RHRS et d'assurer le refroidissement du corium, en cas de fusion du cœur.

La piscine de combustible est placée à l'extérieur du bâtiment réacteur, dans un bâtiment dédié, afin de simplifier la manutention du combustible et la manutention des châteaux de plomb lors du fonctionnement.

Le bâtiment combustible est également protégé contre les risques de chute d'avion et d'explosions.

Le refroidissement de la piscine des combustibles est assuré par deux trains redondants. En cas de situation extrême, un troisième train permet de refroidir la piscine contenant des combustibles usés.

Pour le confinement, les systèmes de sûreté et de gestion des accidents graves ont été incorporés dès la conception du réacteur ATMEA1. Ces systèmes visent à :

- prévenir la fusion du cœur à haute pression grâce à la haute fiabilité des systèmes d'évacuation de la puissance résiduelle que complètent des systèmes de protection contre les surpressions primaires,
- assurer la décharge du circuit primaire dans l'enceinte de confinement en cas de perte totale du refroidissement côté secondaire,
- récupérer et refroidir le cœur fondu dans un réceptacle d'étalement recouvert d'un matériau protecteur sacrificiel et possédant un système de refroidissement pour protéger le radier,
- prévenir la déflagration d'hydrogène en réduisant, dès le début, sa concentration dans l'enceinte à l'aide de recombineurs catalytiques passifs,
- contrôler l'augmentation de la pression dans l'enceinte grâce à un système d'évacuation de la chaleur résiduelle dédié (SAHRS) consistant en un circuit d'aspersion et en une recirculation par le récupérateur de corium ;
- enfin, collecter toutes les fuites potentielles et préserver le confinement au moyen d'un espace annulaire.

REMARQUES ET PERSPECTIVES

Le réacteur ATMEA1 intègre les dernières avancées technologiques françaises et japonaises en matière de réacteurs à eau pressurisée. Il dispose par ailleurs de caractéristiques de sûreté et d'exploitation propres qui en font aujourd'hui un réacteur très robuste vis-à-vis d'événements externes, tout en restant compétitif. D'une capacité installée de 1 100 MWe, l'ATMEA1 suscite l'intérêt de pays dont le réseau électrique ne pourrait pas accueillir un réacteur de forte puissance. L'ATMEA1 matérialise l'alliance franco-japonaise en matière de nucléaire civil par l'introduction dans sa

conception d'apports technologiques essentiels de MHI et d'Areva, par l'intégration au niveau de l'offre de l'ensemble de la chaîne logistique d'équipementiers (*Supply Chain*) de MHI et d'Areva, par l'accessibilité et la complémentarité des différentes agences gouvernementales de financement franco-japonaises et par le soutien permanent du gouvernement japonais et du METI (ministère japonais de l'Economie, du Commerce et de l'Industrie), même après Fukushima. Les perspectives commerciales de l'ATMEA1 sont prometteuses. Plus de trente exploitants de vingt-quatre pays (d'Europe, d'Asie, d'Amérique du Sud, d'Amérique du Nord et du Moyen-Orient) se sont montrés intéressés par le réacteur ATMEA1. En

Jordanie, l'ATMEA1 a été présélectionné, il fait partie des deux technologies que ce pays est en train d'évaluer (une décision est attendue fin 2012).

Le Vietnam, la Malaisie, le Brésil et le Canada constituent les pistes les plus précises à court ou à moyen terme.

En France, GDF SUEZ s'est porté candidat, en 2010, pour l'étude, la construction et l'exploitation d'un réacteur ATMEA1 dans la vallée du Rhône. En accord avec le CPN de 2011, qui demandait aux industriels de poursuivre l'optimisation de ce réacteur, GDF SUEZ a accompagné ATMEA dans la phase de revue de l'ATMEA1 par l'autorité de sûreté nucléaire française (ASN).

Les *Small Modular Reactors* (SMR)

Les SMR sont des réacteurs nucléaires d'une puissance inférieure à 300 mégawatts électriques (MWé). Fabriqués en usine sous la forme de modules, ils sont ensuite transportés et assemblés sur site. Ces réacteurs peuvent être construits seuls (une unité isolée) ou en modules assemblés pour constituer une centrale de grande puissance dite multi-modules.

Si les SMR n'ont pas encore conquis le domaine de la production d'électricité, il existe néanmoins de nombreux projets en cours de développement (notamment aux Etats-Unis et en Russie). Les modèles les plus matures de SMR sont des réacteurs à eau pressurisée dont le déploiement pourrait être envisagé au début des

années 2020.

Les promoteurs de ces SMR, qui font l'objet d'un engouement particulier aux Etats-Unis, mettent en avant leur économie, leur sûreté passive et la flexibilité qu'ils apportent en termes d'investissement, d'adaptation à la demande d'électricité et de gestion du réseau électrique. L'analyse de ces différents points montre que les SMR méritent une attention particulière notamment quant au déploiement de centrales multi-modules.

Par **Jean-Michel DELBECQ***

L'AIEA (1) définit les SMR (*Small and Medium size Reactors*) comme des réacteurs dont la puissance est inférieure à 300 MWé, pour les plus petits (*small*), et comprise entre 300 et 700 MWé, pour les *medium*. On ne s'intéressera ici qu'aux *small*, qui font aujourd'hui l'objet d'un fort regain d'intérêt. Ces réacteurs sont fabriqués en usine sous la forme de modules transportables, qui sont ensuite assemblés sur site : on les appelle *Small Modular Reactors*, dont l'acronyme est SMR. Ces réacteurs peuvent être construits seuls (unité isolée) ou en modules groupés pour constituer une centrale énergétique de grande puissance dite multi-modules.

UNE « ZOOLOGIE » DES SMR

Les SMR ne sont pas des réacteurs d'un type nouveau, il en existe de nombreux exemplaires actuellement en service dans le monde : les réacteurs de propulsion navale (d'une puissance de quelques dizaines de MWé) ainsi que des réacteurs utilisés pour la recherche scientifique en tant que sources de neutrons

* EDF R&D (1, avenue du Général de Gaulle – 92140 CLAMART).

(1) AIEA : Agence Internationale de l'Energie Atomique.

(Une remarque, à ce sujet : les réacteurs de sous-marins nucléaires ont des caractéristiques très différentes de celles des réacteurs de production d'électricité, notamment du point de vue de leur régime de fonctionnement. Cette remarque vaut également pour les petits réacteurs utilisés pour la recherche).

Jusqu'ici, les SMR n'ont pas encore conquis le domaine de la production d'électricité à l'exception de la centrale de cogénération de Bilibino, en Sibérie (composée de quatre unités (des réacteurs bouillants modérés au graphite) d'une puissance de 62 MWth (mégawatts thermiques) et de 11 MWé chacune produisant de l'électricité et de la chaleur destinée au chauffage urbain). Des petits réacteurs d'une taille plus importante existent aussi dans divers pays : en Inde (un PHWR de 220 MWé), en Chine (un CNP-300 de 300 MWé construit à Qinshan, Phase 1) et au Pakistan (un PHWR Candu de 125 MWé, à Kanupp, et un CNP-300, à Chashma). Ce sont des réacteurs d'une technologie dite classique.

Il existe aujourd'hui de nombreux projets de SMR producteurs d'électricité en cours de développement ou mis en avant par des constructeurs/développeurs. Ces constructeurs/développeurs sont des compagnies ayant déjà des références dans le nucléaire ou, au contraire, des compagnies nouvelles. Les modèles les plus matures dans cette catégorie sont des réacteurs à eau pressurisée. Ainsi, on peut citer parmi ceux-ci :

- aux États-Unis [3] : le mPower de Babcock & Wilcox (180 MWé) [16], le SMR 200 de Westinghouse (dérivé de l'AP1000, de l'ordre de 200 MWé) [17], le NuScale de NuScale (douze modules de 45 MWé chacun) [18], le HI-SMUR de Holtec International (145 MWé) [19] ;

- en Corée du Sud, le SMART de KAERI (100 MWé) [3] ;

- en Russie, la société OKBM Afrikantov (Rosatom) développe des réacteurs pour la propulsion de navires (notamment de brise-glaces) et pour la production d'électricité et de chaleur sur des barges flottantes. Elle propose déjà dans son catalogue le KLT-40S de 35 MWé, qui équipe les brise-glaces russes. Une barge flottante, l'Akademik Lomonosov, est en cours de construction et sera équipée de deux de ces réacteurs (elle sera mise en service au Kamchatka) [3, 4, 20]. OKBM Afrikantov développe aussi le SMR VBER, d'une puissance de 300 MWé [4].

Certains SMR sont également proposés avec un caloporteur métallique liquide ou gazeux, comme, par exemple, le PRISM de GE Hitachi (311 MWé, refroidi au sodium) ou le SVBR-100 de Rosatom-Gidropress (100 MWé, refroidi au plomb-bismuth) [3] : alors que les SMR précédents relèvent de la catégorie des réacteurs nucléaires de troisième génération, ceux-ci relèvent de la quatrième génération : leur maturité industrielle sera certainement atteinte à un horizon plus lointain que celle des SMR à eau (le

déploiement des premiers SMR, si une clientèle existe, est envisageable pour le début des années 2020).

Les chaudières de ces réacteurs sont de plusieurs types. Du plus classique au plus innovant, on distingue :

- les chaudières à boucles (cas des SMR de technologie classique identique à celle des réacteurs à eau de grande puissance) ;

- les chaudières compactes dont certains gros composants de leur circuit primaire (comme les générateurs de vapeur, les pompes primaires ou le pressuriseur) sont raccordés à la cuve principale par des tuyauteries très courtes (c'est le cas des réacteurs SMR russes KLT-40S et VBER 300) ;

- les chaudières intégrées dont les composants de leur circuit primaire sont intégrés dans la cuve (c'est le cas des réacteurs SMR américains mPower, NuScale et Westinghouse SMR, ainsi que du SMART coréen). La cuve est alors de grande hauteur : celle du mPower a une hauteur de 25,3 m et un diamètre de 3,96 m, celle du NuScale a une hauteur de 13,7 m et un diamètre de 2,7 m (à titre de comparaison, la cuve de l'EPR, tel celui de Flamanville, dans le département de la Manche, a une hauteur de 13 m et un diamètre de 5,40 m).

Nous invitons le lecteur à se reporter aux références bibliographiques [1], [2], [3], [4] et [5] pour une description plus détaillée de ces réacteurs dont la figure 1 de la page suivante donne quelques illustrations.

QUEL EST L'INTÉRÊT DES SMR ?

(IS SMALL BEAUTIFUL ?)

Les promoteurs des SMR mettent principalement en avant l'économie, la sûreté passive, la flexibilité en termes d'investissement, d'adaptation à la demande d'électricité et de gestion du réseau électrique de ces réacteurs. Ces points sont présentés en partant des caractéristiques des SMR : puissance, taille, intégration du réacteur, fabrication en usine, possibilité de centrales multi-modules, aspects réseaux. La sûreté apparaît dans les thèmes « taille » et « intégration ».

L'effet de taille

Depuis cinquante ans que l'énergie nucléaire se développe, la puissance des réacteurs à eau n'a fait que croître : de 100 à 150 MWé pour les premiers réacteurs (Indian Point 1, aux États-Unis), elle est passée à 1 000 MWé aujourd'hui (1 150 MWé pour l'AP1000 de Westinghouse), et même bien au-delà (1 650 MWé pour l'EPR d'Areva et 1 700 MWé pour l'APWR de Mitsubishi). Cette évolution s'explique facilement :

Light water-cooled SMRs

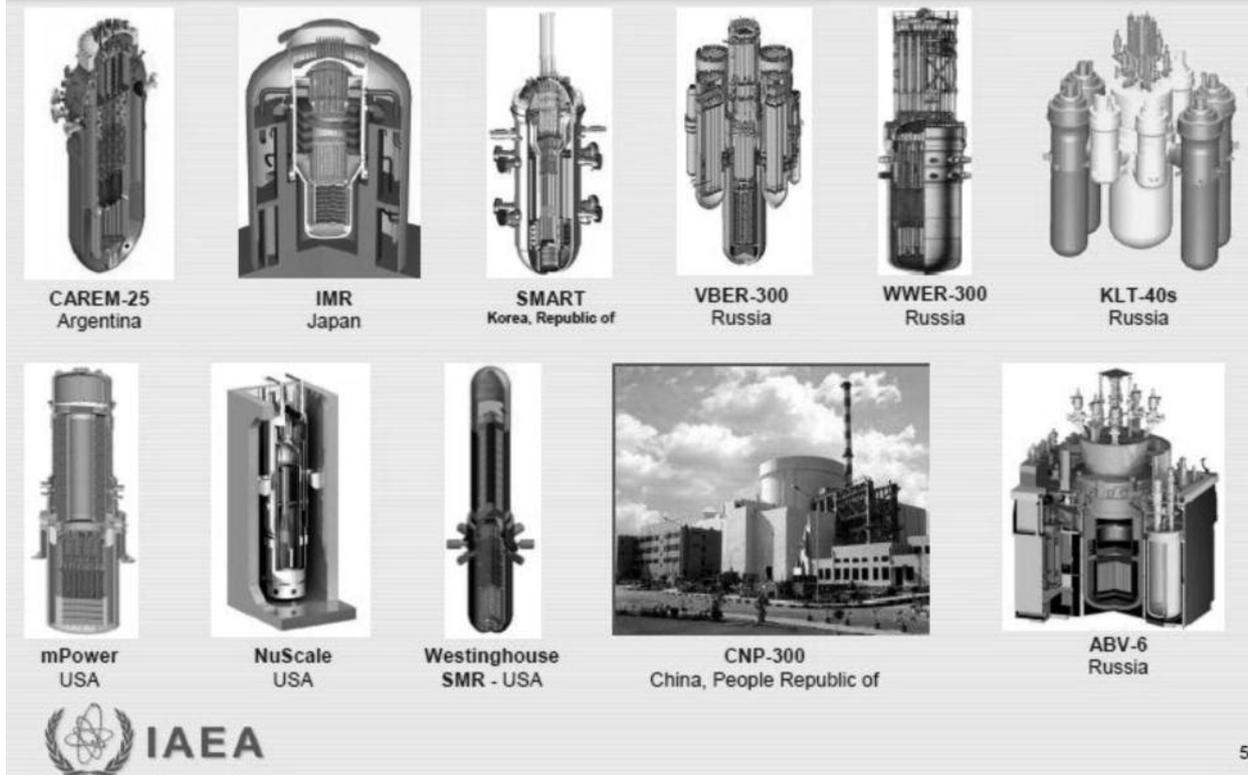


Figure 1 : Quelques SMR à eau pressurisée [1].

– les coûts fixes sont importants dans le nucléaire et l'augmentation de la puissance permet de répartir ces coûts fixes sur un plus grand nombre de MWé. Les coûts unitaires du MWé installé et du MWh produit sont alors réduits ;

– l'économie due à cet effet de taille a aussi des origines physiques. Les puissances développées dans les installations thermiques (réacteurs nucléaires ou chaudières) sont, pour une technologie donnée, proportionnelles au volume de ces dernières. De ce fait, la surface occupée au sol est proportionnelle à la puissance $2/3$ de la puissance de l'installation ($P^{2/3}$). Le dimensionnement des équipements (et donc leur masse) varie mais moins que proportionnellement à la puissance. Il faut toutefois garder à l'esprit que des discontinuités existent dans cette relation coût/puissance : ainsi, l'augmentation de la puissance impose d'augmenter le nombre des boucles primaires (trois boucles, pour 900 MWé, et quatre boucles, pour 1 300 MWé).

Cela étant, les SMR présentent aussi des atouts, leur précision « à technologie donnée » étant très importante. Ainsi, en restant dans le domaine de la physique, les échanges thermiques sont proportionnels à

la surface : un petit réacteur a un rapport surface/volume plus grand qu'un réacteur de grande puissance, et donc de plus grandes capacités d'échange thermique. Dans un petit réacteur, le rapport masse d'eau/puissance est lui aussi plus important. Il en résulte la possibilité de dégager des marges plus importantes dans le dimensionnement et d'introduire plus de passivité dans les systèmes de refroidissement, et donc de les simplifier, par exemple, en ayant recours à la convection naturelle pour le refroidissement du cœur du réacteur. La compacité des circuits et la grande hauteur des cuves des SMR, qui découle directement de l'intégration de ces réacteurs, favorisent cette convection naturelle (par effet gravitaire). On peut aussi citer à l'avantage des SMR la possibilité de retenir de façon passive le corium en cuve en cas d'un accident grave de fusion du cœur, et le bénéfice d'une grande autonomie pour l'évacuation passive de la puissance résiduelle (qui représente un avantage significatif dans le contexte post-Fukushima). On devrait donc trouver dans les SMR moins de systèmes actifs, les plus coûteux, tant à l'investissement qu'en exploitation. En outre, les SMR, du fait de leur petite taille, peuvent être enterrés : il en résulte une meilleu-

re résistance aux agressions externes (notamment aux séismes, mais les inondations continuent à représenter un risque majeur) et une plus grande facilité de protéger ce type de réacteur nucléaire contre le risque de chute d'avion (2).

L'intégration des SMR

La technologie des SMR est différente de celle des réacteurs de grande puissance, notamment du fait de leur intégration. C'est un levier fort pour contrebalancer l'effet de taille. Le caractère intégré de ces réacteurs est une rupture technologique majeure qui permet aussi d'éliminer certains initiateurs d'accidents dans l'analyse de leur sûreté (notamment les accidents initiés par des ruptures de tuyauteries primaires), ce qui est une source d'économies. À l'inverse, la passivité des SMR est souvent obtenue au prix d'une faible densité de puissance du cœur et du recours à une cuve de dimension imposante, ce qui a un coût. On notera que Westinghouse est passé de l'AP600 (un réacteur d'une puissance de 600 MWé, resté au stade du projet) à l'AP1000 (un réacteur passif, en cours de construction en Chine et aux États-Unis) et qu'elle développe aujourd'hui un SMR 200.

Il faut aussi mentionner ici un impact négatif potentiel des réacteurs intégrés : leur exploitation et leur maintenance peuvent s'avérer plus difficiles que celles d'un réacteur de grande puissance, sauf à prendre des dispositions adaptées. Ainsi, avec leur cuve dans laquelle sont intégrés tous les composants primaires, les opérations de chargement/déchargement du combustible peuvent prendre beaucoup plus de temps, s'il faut au préalable retirer les composants (les générateurs de vapeur (GV) en particulier). C'est d'ailleurs ce qui justifie pour les SMR la recherche de cycles longs (d'au moins deux ans) de gestion du combustible. L'inspection des composants pourrait être aussi plus difficile. Il n'est par conséquent pas possible d'affirmer qu'un SMR est effectivement compétitif sans avoir procédé à une étude détaillée de son *design* et de son exploitation, au moins sur les points clés susceptibles de contribuer à la réduction de leur coût de production.

En conclusion de cette analyse, on retiendra qu'un premier levier d'économies potentielles des SMR réside dans la rupture technologique que permet leur faible puissance, qui se traduit dans leur conception innovante intégrée. Leur passivité est un atout majeur, d'abord pour la sûreté, et ensuite pour les économies induites. Il ne faut cependant pas oublier l'effet de taille : à technologie identique, plus la puissance d'un réacteur est élevée, plus celui-ci est économiquement rentable.

Mais les SMR présentent d'autres avantages, potentiellement majeurs pour leur économie et leur sûreté.

La fabrication en usine des SMR et leur possible modularité

Du fait de leur taille et de leur géométrie compacte ou intégrée, les SMR permettent une fabrication dans des conditions optimales, en usines, sous la forme de modules (3) standardisés (4) qui sont ensuite transportés sur site. Il s'agit alors d'une fabrication en série qui est favorable à la qualité, et donc à la sûreté de ces réacteurs (par comparaison à une fabrication plus importante réalisée sur site), elle peut ainsi bénéficier d'un effet « programme » (les coûts amont sont répartis sur un grand nombre d'unités), d'un effet d'apprentissage important et d'un effet de productivité grâce à l'optimisation des approvisionnements et des équipements de production. Il peut en résulter des durées de construction réduites, des processus de contrôle et d'essai de nature répétitive, d'où une réduction des intérêts intercalaires et du coût d'investissement.

Leur modularité et leur transportabilité invitent fortement à l'adoption de règles de sûreté de conception des modules harmonisées ayant une maille internationale de façon à permettre l'exportabilité de ces modules entre plusieurs pays. Cela représenterait incontestablement un atout pour l'industrie nucléaire, à l'instar de ce qui existe déjà depuis de nombreuses années dans l'industrie aéronautique.

Par ailleurs, la réalisation de centrales de référence, cruciales pour la démonstration de la crédibilité du concept, serait également facilitée, le coût d'un module étant plus faible que celui d'une centrale de grande puissance.

En outre, comme le mettent en avant de nombreuses études économiques sur les SMR (notamment celle de l'Université de Chicago) [6], les risques projets sont moindres pour un réacteur de petite puissance fabriqué en usine (moindre coût en capital, durée de construction plus courte, incertitudes réduites de par la standardisation) : la prime de risque pour ces projets pourrait être plus faible et donc des taux de financement moindres.

La mise en œuvre de centrales multi-modules

L'intérêt de la mise en œuvre de centrales d'une puissance importante constituées de modules identiques de petite puissance est d'abord d'ordre financier. La mutualisation de bâtiments ou de systèmes support entre les modules est aussi un avantage potentiel.

(2) Une dalle épaisse est plus facile à réaliser que la coque « avion » de l'EPR en cours de construction.

(3) Au sens ordinaire de « morceaux ».

(4) C'est-à-dire identiques, pour l'essentiel.

Il est envisagé, aux Etats-Unis, de mutualiser des salles de commande entre plusieurs modules (5), notamment dans le projet NuScale, où la centrale est constituée de douze modules d'une puissance pour chacun, de 45 MWé.

D'autres avantages potentiels sont aussi cités notamment en termes de maintenance et de rechargement de combustible, opérations qui peuvent être réalisées en n'arrêtant que le seul module concerné.

Autres avantages des SMR

Le coût d'investissement d'un SMR est modeste, comparé à celui d'un réacteur de forte puissance : c'est la raison principale de l'engouement actuel pour les SMR aux Etats-Unis, où le coût du capital est un élément de décision plus important qu'il ne l'est en Europe.

Les SMR permettent aussi une plus grande flexibilité de gestion de la capacité nucléaire installée dans une région donnée : l'incrément d'augmentation de la puissance installée pour chaque nouvelle centrale mise en service est en effet moindre. Il en résulte une meilleure adaptation de l'offre d'électricité à la demande.

Du point de vue des réseaux électriques :

- du fait de leur petite puissance, les SMR sont potentiellement intéressants dans une région où le réseau électrique manque de robustesse (6) ou dans une région isolée (comme l'Alaska ou la Sibérie, pour citer des exemples concrets de projets) ainsi que dans des zones insulaires. Le marché des zones isolées est un marché de niche, les réacteurs adaptés étant de très petite taille (par exemple, jusqu'à 50 MWé). Un marché de niche n'est pas forcément cohérent avec la réalisation de réacteurs SMR en grande série, mais pour un tel marché le coût n'est pas un critère aussi déterminant.

- les SMR peuvent apporter une plus grande flexibilité à la gestion du réseau électrique, en termes d'arrêts de tranche (la puissance retirée du réseau par un arrêt d'un SMR est faible, par comparaison à une centrale de grande puissance).

La résistance à la prolifération

L'avantage de la résistance à la prolifération accrue des SMR est mis en avant, notamment aux Etats-Unis, qui y sont très sensibles. Mais c'est là un avantage discutable dans la mesure où il est admis qu'indépendamment de la puissance des réacteurs, le risque maximal de prolifération se situe dans les usines du cycle du combustible (notamment dans les usines d'enrichissement).

QUELS MARCHÉS POTENTIELS POUR LES SMR ? (IS SMALL ATTRACTIVE ?)

Les marchés potentiels de SMR dans le monde

Les cibles sont :

- des pays ou régions dont le réseau électrique est isolé et/ou peu robuste,
- des applications de cogénération : chaleur industrielle, dessalement,... en plus de la production d'électricité,
- des clients recherchant une flexibilité financière ou un financement initial moindre,
- la substitution du nucléaire à des moyens de production d'électricité utilisant des combustibles fossiles (centrales au charbon) et ce, pour une puissance équivalente, et sans émission de CO₂.

La plupart des études qui ont été réalisées à ce jour font apparaître un marché très limité lorsque l'on prend en compte l'aspect compétitivité économique (notamment par rapport à d'autres moyens de production utilisant des combustibles fossiles). Il est donc essentiel de démontrer la compétitivité des SMR par rapport aux autres moyens de production d'électricité. Nous y reviendrons plus loin.

Une étude réalisée en 2009 par AIEA/INPRO [7] auprès de pays futurs utilisateurs potentiels de l'énergie nucléaire dans le futur (7), montre que :

- si l'on fait abstraction des contraintes de réseau, 80 % des capacités nouvelles de production nucléaire seraient d'une capacité se situant autour de (ou supérieure à) 1 000 MWé et la répartition en nombre d'unités de production serait de 38 % en SMR et de 62 % en grands réacteurs (d'une puissance égale ou supérieure à 1 000 MWé) (8) ;
- en prenant en compte la taille du réseau électrique du pays (sans ses éventuelles interconnexions avec des pays voisins), en 2015, 1/3 des pays éligibles seraient capables d'intégrer des centrales de petite puissance

(5) C'est déjà le cas, aux Etats-Unis, par paire de centrales sur un même site.

(6) La puissance d'une centrale ne doit pas dépasser 10 % de la puissance totale desservie par le réseau.

(7) Ces pays représentent 34 % de la population mondiale, 13 % du PIB et 19 % de la production d'électricité mondiale aujourd'hui. La Chine et l'Inde ne font pas partie des pays pris en compte. En 2030, 30 % de la totalité des nouvelles capacités de production d'électricité seraient installés dans ces pays.

(8) Cette étude ne semble pas faire de différence entre une centrale constituée de quatre modules d'une puissance unitaire de 150 MWé et une centrale unique d'une puissance de 600 MWé.

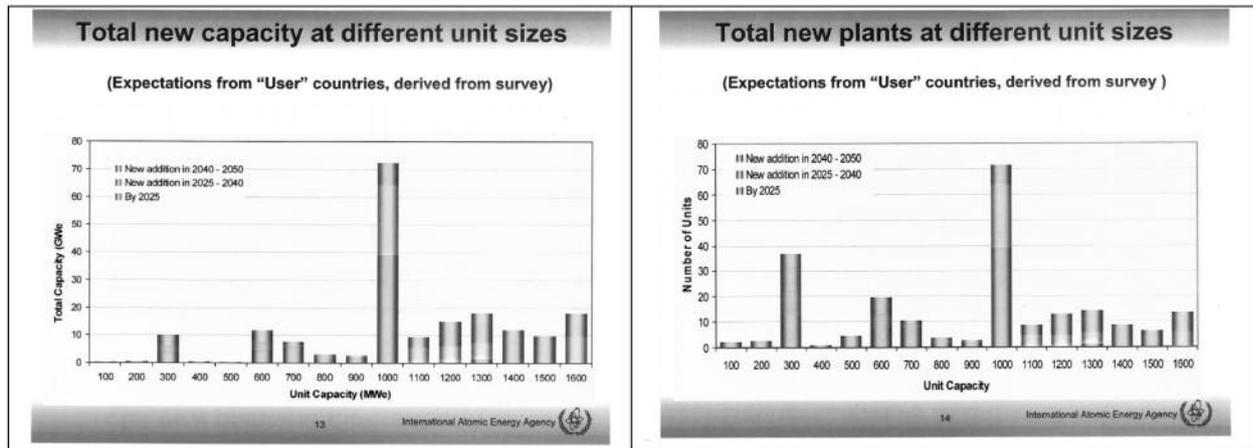


Figure 2 : Puissances nouvelles et nombre d'unités nouvelles en fonction de la puissance des unités [8].

(inférieure à 300 MWe) et 10 % de ceux-ci seraient, de plus, capables d'intégrer des centrales de moyenne puissance (supérieure à 700 MWe) ; Il est précisé qu'aucune contrainte de financement n'a été prise en compte dans cette étude. Ces résultats (hors contraintes de réseau) sont illustrés par la figure 2 (extraite de la référence bibliographique [8]).

L'engouement pour les SMR aux USA

Les SMR font actuellement l'objet d'un fort soutien politique de la part du Congrès américain et du DOE (9) et plusieurs projets sont en cours de développement chez les vendeurs. Un budget de 67 millions de dollars a été alloué pour l'année fiscale 2012 au DOE au titre du soutien technique apporté par l'Administration au *licensing* des SMR à eau légère. Ce montant s'inscrit dans une enveloppe budgétaire allouée au DOE, d'un montant de 452 millions de dollars, sur cinq ans, pour soutenir, dans le cadre d'un partenariat public-privé (à coûts partagés, 50/50), le développement et le déploiement d'ici à 2022 de deux modèles américains de SMR à eau pressurisée. Cette initiative a été lancée auprès des vendeurs américains au cours du printemps 2012 et le DOE doit annoncer les modèles retenus avant le 1^{er} octobre 2012. Le DOE a aussi annoncé, début mars 2012, avoir signé des partenariats avec les trois sociétés NuScale, Holtec International et Hyperion Power Generation pour la démonstration de SMR sur son site de démonstration de Savannah River. Un budget de 29 millions de dollars a par ailleurs été alloué à la R&D portant sur des concepts avancés de SMR.

De son côté, la NRC (10) se prépare activement à mener l'instruction de la certification des SMR, qui pourrait démarrer en 2012, pour NuScale et, en 2013, pour le mPower. Elle instruit déjà en liaison

étroite avec une *SMR Task Force* du NEI, la possibilité d'adapter la réglementation des réacteurs de grande puissance aux spécificités des SMR (plan d'urgence, sécurité, personnel d'exploitation réduit, mutualisation des salles de commande, terme source, exigences fonctionnelles du confinement).

Plusieurs motivations sont à l'origine de cet engouement pour les SMR, au-delà de l'espérance que suscite chez les fournisseurs la vente de ces centrales nucléaires et de l'intérêt financier pour les *utilities* qu'ils présentent (moindre investissement initial, progressivité de cet investissement) :

- Les SMR pourraient restaurer un *leadership* américain dans le domaine de l'énergie nucléaire (11) et permettre de créer des emplois et de reconstituer un outil industriel sur le sol américain (en localisant les usines de fabrication des modules sur le territoire américain, puis en les transportant ensuite dans les pays acquéreurs).

- L'Administration américaine a défini par ailleurs des objectifs de réduction des émissions de CO₂ dans l'atmosphère qui sont contraignantes, notamment pour les installations fédérales (réduction de 28 % de ces émissions à l'horizon 2020). Le DOE est particulièrement intéressé par le déploiement de moyens de production « zéro carbone » à proximité de ses laboratoires nationaux. Une première réalisation pourrait avoir pour initiateur l'électricien TVA, qui a signé en 2011 une lettre d'intention de commande pour la fourniture de six réacteurs SMR mPower sur le site de Clinch River pour alimenter en électricité le laboratoire national d'Oak Ridge.

(9) *Department of Energy* (ministère de l'Energie, aux Etats-Unis).

(10) *Nuclear Regulatory Commission*.

(11) Avant la récente commande de quatre AP1000 par deux *utilities* américaines, la dernière commande de centrale nucléaire aux Etats-Unis remontait à l'année 1978.

– Le DOD (12) est lui aussi intéressé pour réduire la dépendance de ses bases militaires aux États-Unis vis-à-vis d'un réseau électrique fragile [9].

– Les SMR sont aussi vus par les *utilities* comme une technologie susceptible de remplacer de nombreuses centrales au charbon vieillissantes, dans un contexte législatif de réduction des émissions de CO₂. On estime qu'aux États-Unis, c'est environ 120 GW^é de centrales au charbon construites avant 1980 qui doivent être remplacées. Toutefois, sur ce marché, les centrales au gaz sont en concurrence directe avec les SMR et ce d'autant plus qu'aux États-Unis, les prix du gaz ont chuté suite à la découverte d'importants gisements de gaz de schiste.

LA COMPÉTITIVITÉ DES SMR PAR RAPPORT AUX AUTRES MOYENS DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ – (IS SMALL CHEAPER ?)

L'économie des SMR a fait l'objet de nombreuses études récentes [6, 10, 11, 12, 15].

La compétitivité des SMR est à examiner par rapport aux moyens de production d'électricité concurrents sur les marchés visés à l'horizon post-2020, c'est-à-dire par rapport aux centrales à cycle combiné à gaz et aux ENR (plus particulièrement, à l'éolien terrestre).

– En ce qui concerne les cycles combinés à gaz, une étude de l'Université de Chicago [6] donne une fourchette comprise entre 60 et 80 dollars/MWh (13), tandis que l'étude de l'*Institute for Energy* de Petten [12] donne une fourchette se situant entre 70 et 125 euros/MWh.

– Les coûts de production de l'éolien terrestre se situent aujourd'hui dans une fourchette comprise entre 70 et 80 dollars/MWh [13] (notre référence [6] donne un coût de 90 dollars/MWh).

L'étude la plus récente sur les SMR est celle de l'Université de Chicago [6]. Elle montre en particulier toute l'importance de l'effet d'apprentissage et de la mise en œuvre de centrales multi-modules. Le taux d'apprentissage adopté est de 10 % : à chaque fois que le nombre de modules est doublé, le coût du module baisse de 10 %. Cette valeur est tirée du retour d'expérience de la Navy américaine et d'une étude faite en 2004 par l'Université de Chicago [14]. Les simplifications apportées par la sûreté passive sont elles aussi essentielles pour la réduction des coûts. Elle adopte également une prime de risque réduite pour les SMR (investissement initial moindre, délai de construction raccourci, standardisation,...). Les résultats de cette étude sont résumés dans la figure 3 de la page suivante extraite de notre référence bibliographique [6], qui donne le coût de la production d'un MWh par chacune des centrales successivement évoquées.

Dans cette analyse, la première centrale (LEAD/2) est constituée de trois modules, de 100 MW^é chacun, et

les suivantes (LEAD, FOAK-1, FOAK-2,..., NOAK) sont constituées, quant à elles, de six modules. La courbe « Upper band » (resp. « Lower band ») est associée à un coût *overnight* (14) de la « Lead Plant » de 11 000 dollars au kW (vs. 6 700 dollars/kW) et à un taux d'apprentissage agressif (par opposition à modéré), tandis que la courbe médiane est associée à un coût *overnight* de la « Lead Plant » de 7 900 dollars/kW et à un taux d'apprentissage moyen de 10 %. La bande grise représente la fourchette de coûts du MWh d'un cycle combiné à gaz (de 65 à 80 dollars/MWh). Cette étude fait donc apparaître que la compétitivité des SMR avec les cycles combinés à gaz peut être atteinte très rapidement, entre 10 et 54 modules, selon les hypothèses (15), avec une valeur moyenne de 18 modules à 80 dollars/MWh et de 54 modules à 65 dollars/MWh. Les vendeurs américains considèrent, de leur côté, que les SMR deviennent compétitifs avec les énergies concurrentes après la réalisation du 10^{ème} module.

Un autre résultat de cette même étude est le coût *overnight* de la N^{ème} (« NOAK ») centrale de six modules, soit 4 700 dollars/kW, à comparer au coût *overnight* d'une centrale de grande puissance, qui est évalué à 4 220 dollars/kW.

Enfin, les auteurs de l'étude considèrent que l'investissement que représente la construction de l'usine de fabrication des modules serait rentabilisé par un programme sur vingt ans, correspondant à la production de 240 modules (de 24 GW^é), ce qui est relativement limité si ces SMR adressent le marché des centrales de puissance *via* des centrales multi-modules SMR.

Ces études reposent, d'une part, sur la valeur du taux d'apprentissage et, d'autre part, sur le coût *overnight* d'un module SMR. Ces deux chiffres nécessitent une justification approfondie avant, éventuellement, de changer le paradigme qui prévaut dans le domaine de l'énergie nucléaire depuis cinquante ans : “*large is cheaper*” [Ndlr : les installations de grande taille sont moins coûteuses], et c'est probablement ce qui justifie les financements significatifs consacrés à des études sur cette question aux États-Unis.

(12) *Department of Defense*.

(13) Cette fourchette ne prend pas en compte les gaz de schiste.

(14) Coût dit *overnight* : coût théorique d'investissement de la centrale calculé en considérant que celle-ci aurait été construite en l'espace d'une seule nuit, c'est-à-dire sans qu'aient été générés des intérêts intercalaires, et de l'inflation.

(15) Une hypothèse retenue par cette étude est un rythme de fabrication de un module par mois.

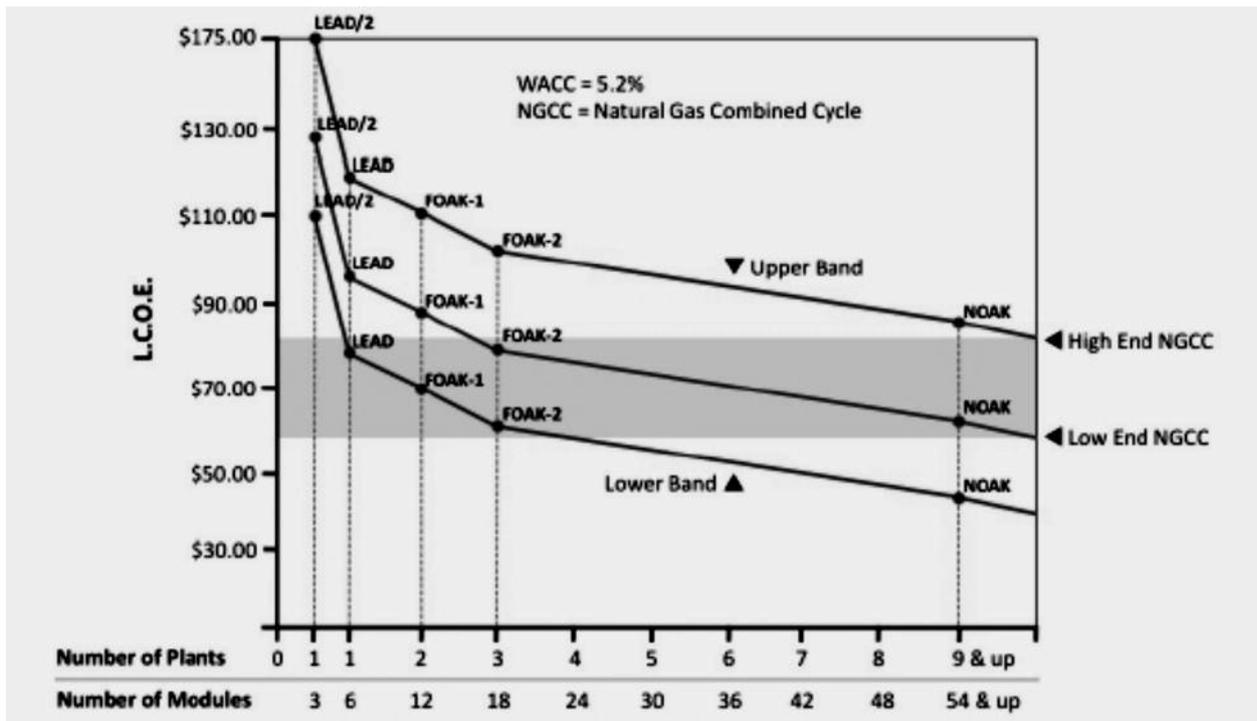


Figure 3 : Levelized Costs of LEAD and learning Plants.

CONCLUSION

Les propos tenus par Pete Lyons (16) ouvrant un séminaire du DOE consacré aux SMR, en juin 2010, résumant bien la situation en ce qui concerne les SMR [21] : « Les SMR font l'objet de l'attention des médias du monde entier. Ils sont décrits comme des centrales dont la petite taille, la simplicité de fonctionnement et la sûreté améliorée permettent leur déploiement partout dans le monde, y compris aux Etats-Unis. Mais beaucoup d'entre vous savent que la technologie nucléaire n'est pas toujours simple, sûre et fiable. Ces qualités ne sont atteintes que grâce à une conception fondée sur le retour d'expérience des centrales du passé. Des SMR peuvent être conçus pour avoir ces qualités, mais nous savons qu'il y a beaucoup de démonstrations et de preuves à apporter, pour une technologie nucléaire nouvelle. Comme le disait l'Amiral Rickover, il y a [de cela] des années, il y a de grandes différences entre un réacteur [sur le] papier et un réacteur réel ».

Les SMR sont encore des réacteurs « papier », plus ou moins avancés selon les modèles, et il reste beaucoup à faire avant qu'ils ne deviennent des réacteurs réels ayant fait la preuve de leur viabilité économique. Leur

mise à maturité industrielle prendra du temps : de l'ordre d'une dizaine d'années, pour les plus matures aujourd'hui (à savoir les SMR recourant à une technologie à eau légère). Mais ils méritent certainement qu'on leur apporte une attention particulière, tout particulièrement dans le cas d'un déploiement (générateur d'économies d'échelle) de centrales multi-modules.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Workshop on SMR Technology Assessment for Near Term Deployment, 5-9 December 2011, IAEA Programme on common technology and Issues for SMRs, M. SUBKI (Hadid). http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloads/Technology/meetings/2011-Dec-5-9-WS-SMR/Day-1/2_IAEA_Subki_SMR_Prog_WS-SMRDec2011.pdf
- [2] Status of Small and Medium Sized Reactor Designs – A supplement to the IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). <http://aris.iaea.org-September 2011-www.iaea.org/NuclearPower/Downloads/Technology/files/SMR-booklet.pdf>
- [3] <https://smr.inl.gov/>
- [4] <http://www.world-nuclear.org/info/inf33.html>
- [5] Current Status, Technical Feasibility and Economics of Small Nuclear Reactors, OECD/AEN Nuclear Development, June 2011.

(16) Pete Lyons, *Principal Deputy Assistant Secretary, Office of Nuclear Energy, DOE.*

- [6] *Small Modular Reactors – Key to Future Nuclear Power Generation in the U.S.*, ROSNER (Robert) & GOLDBERG (Stephen), Energy Policy Institute at Chicago, The Harris Scholl of Public Policy Studies, Technical Paper, Revision 1, November 2011.
- [7] Common User Considerations (CUC) by Developing Countries for Future Nuclear Energy Systems, Report of Stage 1, IAEA Nuclear Energy series n°NP-T-2.1, May 2009.
- [8] *IAEA Assistance to Nuclear Power Newcomers*, STARZ (Anne), Department of Nuclear Energy, IAEA.
- [9] *Small Nuclear Reactors for Military Installations: Capabilities, Costs, and Technological Implications*, ANDRES (Richard B.) & BREETZ (Hanna L.), INSS, February 2011.
- [10] *Competitiveness of small-medium, new generation reactors: a comparative study on capital and O&M costs*, par CARELLI (M. D.) & *al.*, Icone, 16 May, pp. 11-15, 2008.
- [11] *Small Modular Reactors DOE Initiatives and Outlook for Development*, KELLY (John E.), Platts SMR Conference, May 23, 2011.
- [12] *Economic viability of small to medium-sized reactors deployed in future European energy markets*, SHROPSHIRE (David), Institute for Energy Petten, Progress in nuclear energy 53, pp. 299-307, 2011.
- [13] *Rapport Energies 2050*, PERCEBOIS (Jacques) & MANDIL (Claude), février 2012. Site Internet : www.economie.gouv.fr
- [14] *The Economic Future of Nuclear Power*, University of Chicago, with Argonne National Laboratory, August 2004.
- [15] *A methodology for evaluating economics competitiveness of SMR*, POLIMI nuclear economics research group, Prof. RICOTTI (Marco E.) & *al.*, IFNEC, 7th IDWG, December 6-7, 2010, Rome.
- [16] <http://www.generationmpower.com/technology/>
<http://www.babcock.com/library/pdf/E2011002.pdf>
<http://www.generationmpower.com/pdf/sp201100.pdf>
- [17] http://www.westinghousenuclear.com/smr/fact_sheet.pdf
<http://www.westinghousenuclear.com/smr/index.htm>
- [18] <http://www.nuscalepower.com/>
- [19] <http://www.holtecinternational.com/divisions/smr-llc>
- [20] <http://www.world-nuclear.org/info/inf34.html>
- [21] http://www.ne.doe.gov/smrworkshop/docs/Remarks_PLyons.pdf

Le réacteur AP1000

L'année écoulée a été difficile pour l'industrie nucléaire, notamment pour les entreprises cherchant à construire de nouvelles centrales. Il est inutile de rappeler les événements survenus à Fukushima, au Japon, en mars 2011. Ceux-ci auront un impact sur l'ensemble des projets nucléaires à travers le monde pour les années à venir, cela sous différentes formes. En ce qui concerne les projets AP1000 en Chine et aux Etats-Unis, aucune interruption n'a eu lieu, même si les inspections, réglementaires lors de la construction, sont devenues plus rigoureuses, traduisant les inquiétudes légitimes du public et des autorités de sûreté. Alors que les décisions concernant la technologie future sont déjà adoptées, Westinghouse est convaincue que les caractéristiques de sûreté passive de l'AP1000 sont désormais plus attractives. N'oublions pas que Westinghouse est à l'origine du concept de réacteur à eau pressurisée qui a été adopté pour la moitié des centrales nucléaires dans le monde et qui est celui de toutes les centrales françaises en activité aujourd'hui.

Par **François HARARI*** et **Carole CHAUVIN****

QUELQUES RAPPELS HISTORIQUES AU SUJET DE L'AP1000

L'AP1000 remonte à de nombreuses années dans l'histoire de l'industrie du nucléaire. En effet, sa conception a débuté il y a vingt ans, alors que Westinghouse lançait le développement du réacteur AP600. À ce jour, nous maîtrisons la conception du réacteur d'une puissance de 1 100 mégawatts, déjà en construction en Chine, commandé aux Etats-Unis et grand favori sur de nombreux marchés.

Même si, à cette époque, l'industrie du nucléaire connaissait un ralentissement, les dirigeants de Westinghouse étaient convaincus que le meilleur était

encore à venir, certains qu'ils étaient qu'une approche nouvelle de la sûreté servirait de tremplin à cette renaissance. Dans cette optique, un programme de développement a été initié, assurant dialogue et concertation avec les exploitants et les autres partenaires internationaux de premier plan, qui a abouti à la conception de l'AP600, à la fin des années 1990. Cette conception a reçu le « Certificat de Conception » de l'autorité américaine de sûreté, la NRC (*Nuclear Regulatory Commission*), en décembre

* Vice-président et Managing Director de Westinghouse France-Benelux et Afrique du Sud.

**Communications Lead, Westinghouse France.

1999. Néanmoins, à cette époque, les producteurs d'électricité ne semblaient pas miser sur le nucléaire, non pas pour des raisons de sûreté ou d'hostilité de l'opinion publique, mais du fait du prix du gaz, qui était alors au plus bas, ce qui influençait largement les choix en matière d'investissement.

Plutôt que de baisser les bras face à une telle situation, Westinghouse, qui venait à l'époque d'être acquise par British Nuclear Fuels (BNFL), a décidé de relancer les activités de conception de réacteurs. Le défi était de rendre l'AP600 plus compétitif, c'est-à-dire de faire en sorte qu'il produise davantage d'énergie sans apporter de changement majeur à sa conception initiale.

Les résultats se sont avérés très probants. En réévaluant les marges de sécurité, Westinghouse a réalisé que la puissance du réacteur pouvait être sensiblement accrue sans pour autant compromettre les niveaux de sûreté exigés. Une telle augmentation de puissance pouvait donc être atteinte en opérant des modifications mineures n'impliquant pas de réévaluation intégrale du dossier de sûreté. En effet, les fondements des deux conceptions sont quasiment identiques. Toutefois, le cœur du réacteur a été rehaussé, passant d'une hauteur d'environ 3,66 m à 4,26 m, et d'autres composants, tels que le générateur de vapeur, ont donc dû être redimensionnés. Au final, le réacteur fournit plus de puissance que son nom ne l'indique : en effet, il produit plus de 1 100 mégawatts. Un réacteur AP1000 peut à lui seul générer suffisamment d'électricité pour alimenter quelque deux millions de foyers, avec une faible émission de carbone dans l'atmosphère.

PRIORITÉ N°1 : LA SÛRETÉ

Suite aux événements de Fukushima, la sûreté est naturellement passée au premier plan lors de la construction d'un réacteur. Or, il y a de cela plus de vingt ans, Westinghouse avait déjà choisi la voie de la prudence. En effet, à l'époque, nos ingénieurs avaient décidé de minimiser tout risque d'accident en intégrant dans leurs conceptions les phénomènes naturels, dont on sait qu'ils sont omniprésents. En effet, au lieu de recourir à des systèmes de sûreté extrêmement complexes et interdépendants, nos ingénieurs ont pris en compte des phénomènes naturels, tels que la gravité, la circulation naturelle, l'évaporation, ... pour garantir au mieux la sûreté de nos réacteurs et ce, en toute circonstance. De fait, la toute dernière conception de Westinghouse, l'AP1000 ne dépend en termes de sûreté ni des alimentations externes ni de l'eau de refroidissement. En cas d'incident, aucune intervention humaine n'est nécessaire pendant au minimum soixante-douze heures ; puis passé ce délai, une intervention simple suffit pour garantir une sûreté permanente de la centrale.

CARACTÉRISTIQUES DE CONCEPTION

Bien qu'une technologie REP typique soit au cœur même du réacteur AP1000 (à savoir une centrale à deux boucles délivrant une puissance thermique nominale de 3 415 MW), l'ensemble du concept repose sur deux principes clés qui le démarquent des autres réacteurs, sa sûreté passive et une construction modulaire.

La première caractéristique, la sûreté passive, est un élément clé de l'AP1000 qui se base sur les phénomènes naturels, tels que la gravité, la circulation naturelle, l'évaporation, ... pour préserver la sûreté du réacteur et qui permet, par conséquent, de minimiser tout risque d'incident.

La sûreté passive offre de nombreux atouts.

Grâce à la fiabilité de l'AP 1000 et à la prise en considération de ces phénomènes naturels qui garantit une « sûreté intégrée », la responsabilité de la sûreté n'incombera plus aux seuls systèmes standard assurant une surveillance quotidienne du cœur. Il ne sera donc plus nécessaire que ces systèmes soient fabriqués en de multiples exemplaires, en respectant des normes de qualité drastiques.

En procédant ainsi, l'inventaire général des pièces est nettement réduit par rapport à celui qu'imposerait une conception classique de « sûreté active », dans laquelle chaque système de sûreté doit être quadruplé, ce qui accroît les coûts et la complexité, lors de la construction, de l'exploitation et de la maintenance. Ainsi, la conception de l'AP1000 permet une réduction :

- de 50 % du nombre des vannes,
- de 38 % des pompes de sûreté,
- de 80 % des tuyauteries et câblages,
- de 45 % de la superficie du bâtiment antisismique par rapport à un réacteur à eau pressurisée (REP) conventionnel de puissance équivalente.

Cet inventaire réduit permet une construction plus rapide de ce type de réacteur, élément clé de la dimension économique de ce projet.

La seconde caractéristique de l'AP1000, sa construction modulaire, est également essentielle pour maintenir un planning de construction court et réaliste. La centrale, le réacteur et les bâtiments associés sont construits à partir d'environ trois cents modules (une combinaison de grands modules structurels et de modules mécaniques de plus petite taille).

Les modules structurels peuvent atteindre la taille d'un bâtiment de quatre ou cinq étages et peser plusieurs centaines de tonnes chacun. Nombre de ces modules sont constitués de parois et de supports en acier et, une fois mis en place dans le bâtiment réacteur, ils sont remplis de béton afin de constituer les parois, les sols et les structures portantes pour les composants et systèmes principaux. Ils sont généralement construits par ensembles de sous-modules, hors site,

puis transportés jusqu'à celui-ci par voie maritime, ferrée ou routière. Une fois sur site, ils sont assemblés pour obtenir le module complet, avant installation grâce à des matériels de levage. Les modules mécaniques sont généralement plus petits, il s'agit des réseaux de vannes, des pompes, des tuyauteries, etc. Dans tous les cas, la fabrication et les essais hors site des modules du réacteur permettent de garantir de meilleures conditions de propreté et donc une meilleure qualité finale. Par ailleurs, davantage d'activités peuvent être menées en parallèle, ce qui favorise le respect du planning de construction.

CERTIFICATIONS RÉGLEMENTAIRES

Naturellement, le concepteur du réacteur ne peut évaluer à lui seul la sûreté d'une centrale. Toute centrale nucléaire doit être jugée sûre par les inspecteurs des autorités nationales compétentes. Dans ce contexte, la centrale AP1000 a récemment connu des développements majeurs. Tout d'abord, le 14 décembre 2011, les régulateurs britanniques, *The Office for Nuclear Regulation and the Environment Agency*, ont annoncé que le réacteur AP1000 avait reçu une pré-certification lors du processus *Generic Design Assessment* (GDA), qui est la procédure d'évaluation de la conception des réacteurs dont la construction est envisagée au Royaume-Uni. Ce processus est l'aboutissement de quatre années d'une analyse de la conception, de plus en plus exhaustive et exigeante, permettant d'identifier tout problème grave pouvant survenir, bien en amont de la construction et de l'exploitation de la centrale. La NRC a annoncé quelques jours plus tard avoir attribué à l'AP1000 le « Certificat de Conception Finale ». Cette décision a représenté une étape clé dans le processus d'autorisation de la construction de centrales, aux Etats-Unis, sur les sites nucléaires devant recevoir un réacteur AP1000 (en Géorgie et en Caroline du Sud). Enfin, le 9 février 2012, la NRC a approuvé la licence d'exploitation du premier AP1000 aux Etats-Unis, pour une durée de trente ans, qui est construit sur le site de Vogtle, en Géorgie, et est exploité par la *Southern Company*.

LES COMMANDES DE RÉACTEURS AP1000

À ce jour, le carnet des commandes d'AP1000 comprend dix tranches sous contrat. Quatre de ces tranches sont d'ores et déjà en cours de construction en Chine et six autres sont sous contrat aux Etats-Unis, où les travaux de préparation des sites sont déjà bien avancés et où le béton du bâtiment nucléaire sera coulé, dans le cas du premier site américain, au cours de l'année 2012.

Il y a deux sites de construction en Chine : Sanmen, au sud de Shanghai, et Haiyang, au sud-est de Pékin. Il s'agit de deux sites côtiers où est prévue l'installation de deux tranches AP1000, même si chaque site est en mesure d'en accueillir davantage.

Le site principal est celui de Sanmen, où la première coulée de béton a été réalisée conformément au planning, en mars 2009. La centrale doit être mise en service fin 2013. La seconde tranche se trouve à Haiyang, la troisième à Sanmen et la quatrième à Haiyang. Le délai de réalisation entre chaque tranche varie de six à huit mois.

Outre ces quatre tranches sous contrat, Westinghouse est en pourparlers avec la Chine pour dix autres réacteurs, même si l'implication de Westinghouse serait moindre, car la Chine souhaite gagner en indépendance et en autosuffisance. Ce point était un élément clé de l'offre initiale, qui misait sur le transfert de technologie de Westinghouse à la Chine.

LE RESPECT DU PLANNING : L'EXEMPLE DE SANMEN (CHINE)

L'obtention des autorisations réglementaires et le lancement des opérations en temps et en heure ne représentent que la moitié du processus. Les centrales doivent ensuite être construites et exploitées. Dans une industrie où la construction dans les délais impartis est difficilement réalisable, les progrès réalisés sur les AP1000 en cours de construction sont encourageants. Les réacteurs américains récemment approuvés par les autorités font suite à quatre autres réacteurs déjà en construction en Chine, dont le premier devrait produire de l'électricité fin 2013, ce qui répond exactement au délai convenu avec les clients chinois lors de la signature du contrat, en mars 2007. Il convient de noter que l'avancement de la construction satisfait parfaitement au planning fixé, ce qui est d'autant plus remarquable qu'il s'agit de la première centrale de ce type à être construite dans le monde. Une telle expérience permet de gagner la confiance des clients potentiels en Chine, et dans d'autres pays désireux de commander un jour une centrale AP1000. Ils savent ainsi que leurs propres projets suivront dans les pas de constructions couronnées de succès.

Naturellement, un tel succès n'est pas dû au hasard. Une conception détaillée, en amont, alliée à une approche simplifiée et à un inventaire réduit des équipements (atout principal de la sûreté passive) y ont largement contribué. Le recours à une construction modulaire est primordial pour l'ensemble structurel de la centrale et pour les équipements, tels que les tuyauteries, les pompes et les vannes. Opter pour cette solution, plutôt que pour une construction intégrale *in situ*, permet de travailler, en parallèle, sur de nombreux systèmes ; ainsi, même en cas de problème dans

un secteur donné, il ne sera pas nécessaire de suspendre la réalisation de l'ensemble du projet.

L'AVANCÉE DES CONSTRUCTIONS

Le planning général des constructions réalisées en Chine a été établi en accord avec les clients en février 2007. La coulée du béton à Sanmen 1 en représente le premier jalon majeur. Cette coulée, longue et compliquée, était prévue pour la fin mars 2009 ; elle a été achevée dans les délais, à savoir le 31 mars.

Aujourd'hui (plus de deux ans après), l'avancée des travaux est toujours conforme au planning et plus de la moitié de la durée de construction prévue (à savoir cinquante mois, entre la coulée du béton et le chargement du combustible) pour Sanmen 1, la tête de série, s'est écoulée à ce jour. Le combustible sera chargé à la mi-2013, conformément aux objectifs fixés, et la centrale pourra être mise en service à la fin de cette même année. Le respect du planning, pour la toute première centrale de ce type à être construite, représente un immense succès pour toutes les personnes impliquées. Tous les efforts possibles continuent à être déployés afin de poursuivre sur cette lancée.

La construction modulaire a largement contribué au respect du calendrier. L'enceinte de confinement est un élément clé de l'AP1000. Il s'agit d'une enveloppe étanche, en acier, constituée de quatre anneaux (d'un diamètre d'environ 40 mètres) et dotée d'extrémités bombées, à son sommet et à sa base. La base de l'enceinte de confinement est constituée de nombreux segments épais en acier auxquels une forme précise est conférée avant de procéder au soudage. Lors de la première opération de ce type, il s'est avéré difficile de fabriquer et d'assembler les pièces en respectant les tolérances prévues. Le premier module terminé devait être installé en juin 2009, mais c'est avec six mois de retard, en décembre 2009, que son installation a eu lieu. Toutefois, tandis que la base de l'enceinte de confinement était en cours de finalisation, d'autres opérations (par exemple, sur les anneaux de l'enceinte) étaient menées simultanément et sans encombre. Par conséquent, une fois la base de l'enceinte de confinement mise en place, il a été possible de rattraper

totalemment le retard pris et, en juin 2010, le planning général était à nouveau respecté.

Avec une approche plus conventionnelle de la construction, un retard de cet ordre aurait eu tendance à s'aggraver : les équipes sur site auraient été démobolisées, ou affectées à d'autres tâches, les conditions climatiques favorables n'auraient pas pu être mises à profit, etc.

La construction des autres tranches en Chine satisfait également au planning. Dans certains cas, elle est même en avance grâce au retour d'expérience des projets précédents. Ainsi, par exemple, la fabrication de la base de l'enceinte de confinement, qui avait occasionné des retards à Sanmen 1, est désormais réalisée dans un bâtiment avec une structure dédiée, puisqu'il avait en effet été constaté que les variations de chaleur et d'humidité avaient largement contribué aux problèmes survenus auparavant.

Compte tenu des difficultés à respecter le planning et le budget dans tout projet nucléaire de cette envergure, il est essentiel de considérer le programme AP1000 en Chine non pas seulement comme un succès, mais bel et bien comme une conjonction de plusieurs succès distincts.

De même, aux Etats-Unis, bien que le béton pour bâtiments nucléaires n'ait pas encore été coulé sur les sites AP1000 prévus, nombre d'opérations ont été lancées, qui sont toujours en cours, comme notamment la préparation des sites, celle des infrastructures routières et ferrées, du béton et des tuyauteries d'eau de refroidissement. Tout comme en Chine, Shaw Group est le partenaire de Westinghouse aux Etats-Unis dans le cadre du *consortium* AP1000, ce qui permet de tirer directement parti du retour d'expérience acquis en Chine pour mener à bien les projets américains.

De manière générale, malgré un long parcours, parfois semé d'embûches, les perspectives pour Westinghouse et son réacteur AP1000 semblent très prometteuses (1).

(1) Pour plus d'informations, le lecteur est invité à consulter le site de la société Westinghouse : <http://ap1000.westinghousenuclear.com/index.html>

Quelles sont, en France, les perspectives de la construction de gros composants pour les centrales nucléaires ?

La France s'est dotée d'une industrie de construction de gros composants pour les centrales nucléaires et a veillé à son maintien en dépit du ralentissement des commandes qui a suivi l'accident nucléaire de Tchernobyl. Après l'accident de Fukushima, qui est survenu au moment où tous les industriels se préparaient à une relance du nucléaire et qui a conduit certains gouvernements à revoir leurs perspectives de développement de l'énergie nucléaire, la question de l'avenir de cette industrie est désormais posée.

Par **Claude TRINK** et **Jean-Luc VO VAN QUI***

ENTRE 2008 ET 2012, DEUX RENVERSEMENTS
DES PERSPECTIVES DU DÉVELOPPEMENT
DE L'INDUSTRIE NUCLÉAIRE SE SONT PRODUITS

Après l'accident de Tchernobyl, en 1986, un « hiver nucléaire » s'est abattu sur l'industrie de ce secteur, qui a conduit à un très fort ralentissement dans la construction de centrales nucléaires et donc à une réduction des capacités de fabrication et des compétences. En France, seul un petit marché de la maintenance et du remplacement de pièces a permis de conserver une activité minimale.

À partir de 2008, les perspectives de relance du nucléaire ont été jugées très importantes et s'est développée, de par le monde, la crainte de ne pouvoir y satisfaire et de se heurter, de fait, à des goulots d'étranglement dans des domaines critiques. De nombreux programmes d'investissement ont alors été lancés pour y répondre.

En 2011, l'accident de Fukushima a conduit à un renversement des perspectives de développement au moment même où ces programmes arrivaient à leur terme. Ainsi, les pays occidentaux ont été conduits à

* Ingénieurs généraux des Mines.

une révision de leurs projets de construction de centrales nucléaires.

Certains pays (l'Allemagne, l'Italie, la Belgique, la Suisse) ont affiché clairement leur décision de se retirer progressivement de la production d'électricité d'origine nucléaire. Le Japon, où la dernière centrale encore en fonctionnement a été elle aussi arrêtée le 6 mai 2012 pour des raisons de maintenance, n'a pas encore décidé de sa politique nucléaire et le gouvernement japonais vient seulement d'autoriser une centrale à redémarrer.

D'autres pays ont indiqué qu'ils poursuivraient une politique d'équipement en nouvelles centrales, mais à un rythme qui reste à clarifier : en Europe, la France, la Grande-Bretagne, la Finlande, la Pologne, la République tchèque, la Lituanie et la Roumanie ; les Etats-Unis (qui viennent d'accorder une autorisation de construction d'une nouvelle centrale en Géorgie).

De facto, seule l'Asie semble aller résolument de l'avant : la Chine, la Corée du Sud (où sept réacteurs sont en construction, six ont déjà un site et six autres sont prévus), l'Inde...

Or, ces derniers pays veulent promouvoir leur propre industrie nucléaire : même s'ils achètent à l'extérieur une tête de série, ils veulent réaliser le plus grand volume de fabrication en interne et « nationaliser » les réacteurs suivants. En outre, certains de ces pays sont devenus des concurrents sérieux à l'exportation, cela d'autant plus que les pays clients savent faire jouer la concurrence en profitant d'un contexte tendu qui leur permet de conclure des marchés qui ne sont pas nécessairement rentables pour le fournisseur.

Dans ce nouveau contexte post-Fukushima, le marché accessible pour nos industriels semble désormais être (tout du moins, à court terme) davantage celui de la modernisation des centrales nucléaires à la fois sous l'angle de l'amélioration de leur disponibilité et de celle de la sûreté, que celui de la construction de nouvelles unités. Cependant, il convient de noter que, si les nouvelles exigences de sûreté vont se traduire par des investissements (renforcement des radiers, dispositifs de secours,...), ceux-ci concerneront peu les gros équipements nucléaires.

Les principaux marchés de modernisation pour la construction d'équipements lourds sont les générateurs de vapeur (GV). Le choix initial de l'alliage des tuyaux d'échange de chaleur s'est avéré inadapté : des fissures se forment, ce qui conduit à obturer les tuyaux affectés ; lorsqu'un nombre important de tuyaux a été obturé, l'efficacité du GV est significativement diminuée et la question de son remplacement se pose.

Aussi, EDF a défini un programme (étalé dans le temps) de remplacement de la plupart de ses GV.

Ainsi, en 2009, EDF a lancé un appel d'offres pour la fourniture de trois triplets (des réacteurs comportant trois générateurs de vapeur) de GV du palier 900 MW. Trois entreprises y ont répondu : Areva,

Mitsubishi Heavy Industries (MHI) et Westinghouse. Cependant, Westinghouse ne disposait pas, à l'époque, des qualifications fixées en interne par EDF pour la fabrication de GV de remplacement. Au final, ce marché a été attribué, pour deux triplets à Areva et, pour un triplet, à MHI. EDF a souhaité ainsi maintenir une capacité mondiale de production de GV de remplacement et disposer de plusieurs fournisseurs en vue notamment des fournitures futures de GV de remplacement pour les paliers 1 300 MW. Notons qu'EDF avait déjà acheté deux triplets, chez MHI, en 2004 et en 2008.

EDF vient de passer commande (un marché de 1,3 milliard d'euros) du remplacement des GV de onze tranches de 1 300 MW (avec 4 GV par réacteur) ; huit tranches ont été attribuées à Areva et trois tranches à Westinghouse.

Il reste encore six tranches de GV à remplacer.

DÉSORMAIS, L'OFFRE DE GROS ÉQUIPEMENTS SEMBLE EXCÉDENTAIRE

Pendant longtemps, le marché des gros équipements pour le nucléaire a comporté, en raison des exigences de qualité, un « ticket d'entrée » lourd, ce qui restreignait le nombre des intervenants. Ce n'est plus le cas aujourd'hui : d'une part, les exigences de « fabrication locale » ont créé de nouveaux concurrents dont les coûts sont très compétitifs et dont la qualité ne cesse de s'améliorer et, d'autre part, les exigences en termes de sûreté ne s'avèrent pas un obstacle pour les derniers entrants, car la volonté de s'adapter aux normes peut remédier à l'absence d'expérience et les plus expérimentés ne sont pas nécessairement ceux qui acceptent le mieux les exigences des autorités de sûreté.

Au plan mondial, les capacités de production de grands équipements nucléaires ont été considérablement développées, dans la perspective de la relance du nucléaire, et sont désormais opérationnelles. Ainsi, rien qu'en Chine, le nombre des fabricants qualifiés ASME est passé de 6 en 2009 à 26 en 2012 (source Nuclear World), dont :

- Harbin Power Plant Equipment Corporation (QHD) Heavy Equipment Co., Ltd. ;
- Shenyang Turbo Machinery Co, Ltd. ;
- Dalian DV Valve Co., Ltd. ;
- China First Heavy Industries ;
- Bohai Shipbuilding Heavy Industry Co., Ltd. ;
- Harbin Boiler Co., Ltd. ;
- Harbin Electric Motor Factory, AC/DC Electromotor Limited Liability Company ;
- Shanghai Heavy Machinery Plant Co., Ltd. ;
- Shanghai No.1 Machine Tool Works Ltd. ;
- Shanghai Electric Nuclear Power Equipment Co., Ltd. ;
- Shanghai Valve Factory Co., Ltd. ;

Pays ou région	Entreprise	Presse de forgeage lourd à la mi-2009	Forgeage lourd Horizon 2013	Poids maximal des lingots en tonnes (en 2013)
Japon	Japan Steel Works (JSW)	14 000 t	14 000 t x 2	600 (650)
	JCFC		13 000 t à partir de 2010	500
	MHI	Sans objet (utilise des forges pour fabriquer ses cuves).		
Corée du Sud	Doosan	13 000 t	17 000 t à compter de 2010	540
Chine	CFHI	15 000 t, 12 500 t	idem	600
	Harbin Boiler	8000 t	idem	
	Shanghai (SEC)	12 000 t	16 500 t	600
	China Erzhong + Dongfang	12 700 t, 16 000 t	idem	600
Inde	L&T	9 000 t	15 000 t	600 (en 2011)
	BHEL		10 000 t	
	Bharat Forge		14 000 t	
Europe	Areva, Sfarsteel	11 300 t	idem	250
	Sheffield	10 000 t	15 000 t ?	500 ?
	Pilsen Steel	100 MN (10200 t)	12 000 t	200 (250)
	Vitkovice	12 000 t		
	Saarschmiede	8 670 t	12 000 t (en 2010)	370
	ENSA	Sans objet		
USA	Lehigh	10 000 t	idem	270
Russe	OMZ Izhora	12 000 t	15 000 t	600
	ZiO-Podolsk			
Afrique du Sud	DCD-Dorbyl			

Source : Nuclear World

Tableau 1 : Capacités de forgeage par pays et entreprises.

- CNNC SUFA Technology Industry Co., Ltd. ;
- Neway Valve (Suzhou) Co.,Ltd ;
- Shangdong Nuclear Power Equipment Manufacture Co., Ltd. ;
- Zhejiang Jiuli Special Material Technology Stock Limited Corporation ;
- Dongfang (Guangzhou) Heavy Machinery Co., Ltd. ;
- Dongfang Electric Group ;
- Dongfang Boiler Group Co., Ltd. ;
- China Erzhong Group (Deyang) Heavy Industries Co., Ltd.

Il en est de même pour les capacités de forgeage, avec des objectifs de taille maximale de lingots devant largement dépasser les 250 tonnes de Creusot Forge (Areva).

En Europe aussi, il y a eu des investissements, même si certains projets, comme ceux de Sheffield Forgemasters (UK), n'ont pas abouti. Par exemple, l'italien Mangiarotti a lourdement investi dans le nucléaire :

- Mangiarotti, créé en 1930, a aujourd'hui 60 % de son activité dans le domaine nucléaire ;
- Il a fabriqué des éléments lourds pour EDF (Flamanville), des GV pour la centrale américaine de Palo-Verde et des éléments pour les réacteurs AP1000 en Chine ;
- à partir de 2009, il a investi 120 millions d'euros pour construire une nouvelle usine principalement dédiée aux gros équipements nucléaires à Monfalcone (région du Frioul-Vénétie), qui doit entrer en service en 2012.

Compte tenu des capacités existantes et d'une demande incertaine, sauf dans des pays de moins en moins ouverts aux achats externes, il existe un réel risque de surcapacité chez les industriels occidentaux.

DANS CE CONTEXTE, L'INDUSTRIE FRANÇAISE RISQUE DE VOIR CERTAINS DE SES ATOUTS SE TRANSFORMER EN HANDICAPS

Areva a fait le choix stratégique de l'intégration sur l'ensemble de la filière, des mines d'uranium au retraitement du combustible, de l'ingénierie des équipements à leur fabrication, de leur installation à leur démantèlement. Cette stratégie permet de tirer parti de l'investissement dans une centrale et de son exploitation, en offrant un service complet et en maîtrisant l'ensemble des opérations. Ce choix stratégique est adapté à un marché de construction de centrales en expansion : l'intégration permet de mieux tenir les délais dans un marché tendu, elle permet aussi de conserver plus de valeur ajoutée, enfin, elle évite d'être trop prisonnier de certains fournisseurs (à défaut de capacités propres dans certains domaines, Areva a ainsi réservé des capacités chez différents fournisseurs, tel JSW, pour le forgeage de pièces de grandes dimensions).

Cependant, cette stratégie d'intégration peut se révéler être une faiblesse dans un contexte moins porteur. En effet, dans un marché tourné vers les pièces de remplacement, les besoins d'ingénierie sont limités et les charges des services d'ingénierie, réparties sur un volume moindre, peuvent peser sur les coûts. En outre, les clients peuvent d'autant plus facilement faire jouer la concurrence que leurs commandes sont ponctuelles : c'est l'opportunité pour eux d'essayer de nouveaux fournisseurs et de diversifier leurs approvisionnements. Enfin, le fait que les nouveaux clients étrangers exigent un contenu en fournitures locales va à l'encontre de l'intégration sur le territoire national. Cette stratégie d'intégration n'est pas la seule possible. On trouve plusieurs types d'acteurs ayant des modèles économiques différents. Dans le domaine des grands composants, à côté des ingénieries intégrées disposant d'installations de forgeage et d'assemblage de composants, telles qu'Areva ou MHI, il y a :

- les ingénieries pures (par exemple, Westinghouse qui a été rachetée à 100 % par Toshiba, ou bien General Electric, qui a racheté Hitachi) ;
- les fournisseurs indépendants :
 - les chaudronniers qui fabriquent des composants nucléaires et qui travaillent souvent aussi pour d'autres secteurs industriels : ENSA (Espagne), Mangiarotti (Italie), Babcock & Wilcox (Canada), Doosan (Corée), DE et SEC (Chine) ;
 - les forges (voir ci-dessus).

Dans un contexte de surcapacités, ces acteurs peuvent être mieux positionnés : les premiers parce qu'ils peu-

vent faire jouer la concurrence entre sous-traitants pour réduire leurs prix, et les seconds parce qu'ils ont d'autres débouchés que le nucléaire.

Notons en outre que, parmi les clients (c'est-à-dire les producteurs d'électricité), certains, tels EDF ou Kepco (Corée), disposent d'une solide base d'ingénierie qu'ils utilisent afin de définir de manière précise les réacteurs et les composants qu'ils souhaitent commander.

La commande de onze quadruplets de GV passée par EDF en juillet 2011 (que nous avons mentionnée plus haut) illustre les différents modèles économiques en concurrence. Huit quadruplets ont été confiés à Areva, dont une partie de la fabrication est effectuée en France : l'ingénierie d'Areva se trouve à Paris et à Chalon-sur-Saône (mais aussi en Allemagne) ; les lingots sont coulés par la filiale Industeel d'Arcelor-Mittal, au Creusot, puis ils sont forgés par Creusot Forge, filiale d'Areva ; les assemblages sont effectués dans l'usine de Chalon-sur-Saône, certains assemblages sont sous-traités à ENSA (Espagne) en raison de contraintes de délais de livraison ; enfin, certaines pièces sont forgées par JSW (Japon) en raison d'exigence sur la taille des lingots et de la forge.

En revanche, Westinghouse, qui a remporté la commande de trois quadruplets de GV, effectue l'ingénierie et doit organiser entièrement l'approvisionnement auprès de fournisseurs extérieurs disposant des qualifications ASN et EDF (les noms de ces fournisseurs n'ont pas encore été rendus publics, mais le nom du chaudronnier italien Mangiarotti a été mentionné).

Enfin, il ne faut pas oublier que l'industrie nucléaire française ne se réduit pas au groupe Areva, mais qu'elle comprend aussi de nombreux fournisseurs de petite et de grande tailles (par exemple, Valinox, qui est leader mondial sur les tubes pour échangeurs, avec 50 % du marché, devant le japonais Sumitomo (25 %) et le suédois Sandvik (25 %)). Certes, Areva peut avoir sur eux un effet d'entraînement, notamment si une certaine solidarité nationale joue au sein de la filière, mais les deux parties peuvent aussi avoir des stratégies indépendantes, chacune recherchant une diversification, qui de ses marchés, qui de ses fournisseurs.

COMPTE TENU DES INCERTITUDES PESANT SUR LE RYTHME DE LANCEMENT DES EPR, UNE ADAPTATION DE LA STRATÉGIE DES ACTEURS FRANÇAIS DOIT ÊTRE ENVISAGÉE

Dans ce secteur des grands composants nucléaires, les déterminants sont des commandes en petit nombre, de très gros poids unitaires et des cycles de fabrication très longs. Ainsi, pour un EPR, la production documentaire et de supports de fabrication représente cin-

quante-cinq mois pour un GV et cinquante-trois mois pour une cuve, et la fabrication en atelier des composants exige trente-sept mois dans les deux cas. Il est donc possible d'avoir une certaine visibilité à moyen terme.

Si des commandes d'EPR étaient passées dans les mois qui viennent, la charge de l'industrie nucléaire française ne soulèverait pas de problème particulier, sauf éventuellement, pour trouver des sous-traitants étrangers afin d'étaler des pics de commandes. En revanche, si les commandes tardent (notamment celles concernant les centrales du Royaume-Uni), la question d'une évolution de la stratégie globale des acteurs français se posera.

Dès à présent, des ajustements de capacités ont été décidés. Au-delà se pose la question du recours à d'autres solutions.

L'une d'entre elles est l'anticipation des commandes. Areva souhaiterait pouvoir anticiper les commandes pour pouvoir lisser la charge de ses unités. Cette approche présente des risques si la commande espérée ne se concrétise pas, elle coûte en immobilisations. Elle se heurte surtout à un obstacle réglementaire, car les autorités de sûreté sont réticentes à accepter des fabrications qui n'ont pas été effectuées sous le contrôle de l'exploitant. Ainsi, l'ASN a clairement indiqué son opposition au lancement de fabrications en anticipation de choix de sites, lorsque l'opérateur futur n'est pas clairement identifié.

Une autre voie est la diversification. Rappelons que les concurrents d'Areva ne fabriquent pas que des équipements nucléaires lourds et qu'ils sont structurellement diversifiés. Des efforts de diversification pour les pièces moulées et les pièces forgées ont déjà été engagés. Ces opérations de diversification peuvent nécessiter du temps. Elles ont le mérite d'occuper l'outil de production et donc de permettre son maintien, mais la rentabilité de ces opérations peut être délicate.

Pour les forgés, les marchés complémentaires pourraient être les turbines à gaz, la pétrochimie, les conteneurs de transport/stockage de combustibles nucléaires usagés, la mise en forme et les moules pour l'injection plastique. Ainsi, un investissement dans une presse de 9 000 tonnes

associée à un manipulateur de 200 tonnes a été décidé à cet effet, pour Creusot Forge ; opérationnelle fin 2013, elle remplacera la presse actuelle de 7 000 tonnes, qui date de 1954, et permettra de forger des lingots de 15 à 260 tonnes, tout en réduisant le nombre des opérations. Pour les moulés, les marchés complémentaires sont notamment l'éolien *offshore*.

LES ENJEUX ET LES CHOIX À VENIR

Le maintien d'une capacité industrielle et de compétences en France (indépendamment de la taille du parc français existant) en matière de fabrication de gros équipements nucléaires est un enjeu significatif non seulement en termes d'activités, d'emplois, de commerce extérieur, mais aussi en termes de maintien des qualifications et de sûreté du parc existant.

La question qui se pose est de savoir jusqu'à quel point on peut ajuster les capacités à la baisse pour adapter l'offre à la demande, sans pour autant sacrifier l'avenir.

Si la commande d'un nouvel EPR, par exemple pour la Grande-Bretagne, n'est pas lancée fin 2013, cela aura un impact important sur le plan de charge : la décision est entre les mains d'EDF et du gouvernement britannique. Dans ces conditions, la dernière commande pour le remplacement des GV des réacteurs 1 300 MW apparaîtra cruciale pour le plan de charge de l'industrie nucléaire nationale. Il reste six quadruplets de GV à changer et EDF devrait lancer les consultations d'ici dix-huit mois, compte tenu de son souci de passer les commandes très en amont, en articulation avec le programme des visites décennales et les perspectives de durée de vie des centrales. Le sujet de la prise en compte dans les procédures d'achat, à côté des critères traditionnels (prix, disponibilité, diversification des fournisseurs, localisation,...), des objectifs de préservation sur le long terme de l'outil industriel, qui sont dans l'intérêt de tous, risque de se poser rapidement, de manière très concrète.

Nucléaire : quelle approche industrielle pour préserver l'atout français ?

Du choix stratégique fait par la France du nucléaire dans les années 1970 est née une organisation industrielle qui, grâce à une définition claire des rôles et responsabilités de chacun des acteurs, est un gage de maîtrise industrielle et de sûreté dans le secteur considéré. Des atouts qui permettent à l'industrie française nucléaire d'être très présente à l'international et de pouvoir ainsi maintenir son savoir-faire et ses capacités industrielles.

Par **Hervé MACHENAUD***

Après les deux chocs pétroliers de 1973 et de 1979, la France a fondé son choix de l'énergie nucléaire sur la nécessité d'assurer son indépendance énergétique et de maîtriser le coût de son électricité. C'est à ces fins qu'EDF s'est vu confier la responsabilité de réaliser et d'exploiter un parc de cinquante-huit réacteurs nucléaires, représentant une puissance installée de 63,1 gigawatts, et assurant plus de 85 % de la production d'électricité d'EDF, un parc qui hisse la France au rang de deuxième puissance électronucléaire mondiale (derrière les Etats-Unis). Une industrie nucléaire française a ainsi été tissée, autour d'EDF, du CEA, d'Areva, d'Alstom et de plusieurs centaines de PME et PMI, mais aussi d'une autorité de sûreté nucléaire compétente et indépendante et de son appui technique, l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN).

La France dispose désormais en matière de nucléaire d'un savoir-faire technologique et opérationnel de premier rang, sûr et efficace, couvrant l'ensemble des métiers. Cette filière d'excellence est en effet l'une des rares filières nucléaires au monde à assurer une couverture complète de la chaîne allant de la recherche jusqu'à la production d'électricité en passant par la conception, la construction et la déconstruction de réacteurs, ainsi que par la maîtrise du cycle du combustible nucléaire. Aujourd'hui, en France, 240 000 hommes et femmes travaillent pour le nucléaire, induisant eux-mêmes plus de 400 000 emplois sur l'ensemble du territoire (et bien plus encore en raison du faible prix de l'électricité dont bénéficie notre économie). Par ses seuls emplois directs,

*Electricité de France (EDF).

le nucléaire constitue le troisième secteur industriel français, après ceux de l'automobile et de l'aéronautique. Reconnu pour son professionnalisme et son expérience, le nucléaire français a vocation à jouer un rôle de premier plan dans un secteur qui se mondialise.

LE MODÈLE NUCLÉAIRE FRANÇAIS : UNE ORGANISATION INDUSTRIELLE ABOUTIE ET RECONNUE...

Disposer d'une organisation industrielle, cohérente, dans laquelle les rôles sont clairement définis et complémentaires, est primordial pour la réussite d'une filière. C'est d'une organisation présentant ces caractéristiques dont la France s'est dotée dans les années 1970. Sur le plan institutionnel, les pouvoirs publics ont la responsabilité de définir la politique énergétique et de s'assurer du cadre industriel et économique qui en permet la mise en œuvre. Une autorité de sûreté nucléaire indépendante et forte définit les objectifs de sûreté et en contrôle l'application. L'exploitant a la responsabilité de concevoir et de mettre en œuvre des solutions permettant d'atteindre ces objectifs. Il lui appartient de confirmer ce qui est industriellement possible et contribue, en retour, à éclairer la définition des objectifs dans le cadre économique donné en vue de garantir la meilleure sûreté, dans la durée.

Sur le plan de l'organisation industrielle, la France a confié, d'une part, au CEA la R&D nucléaire et à l'IRSN, qui en est l'émanation, le rôle d'appui technique de l'Autorité de sûreté nucléaire, l'ASN, et, d'autre part, à EDF le rôle de concepteur, de constructeur et d'exploitant des centrales nucléaires sur la base d'une technologie de réacteurs à eau pressurisée. EDF rédige les spécifications, qualifie les fournisseurs et leurs équipements, elle pilote la construction des centrales, puis les exploite.

EDF s'appuie sur des fournisseurs, qui sont des groupes français d'envergure internationale, parmi lesquels, bien évidemment, on trouve Framatome, le concepteur et le fournisseur-ensemblier de la partie centrale et complexe des centrales nucléaires qu'est leur chaudière, elle-même héritée d'une licence initiale de la société Westinghouse. Cogema s'était vu confier le cycle du combustible, depuis l'approvisionnement en uranium jusqu'au retraitement du combustible usé en passant par la fabrication des assemblages combustibles. Framatome et Cogema ont fusionné il y a quelques années, formant Areva, qui couvre désormais les deux périmètres précités.

Citons aussi Alstom, notamment pour les groupes turbo-alternateurs, ainsi que Bouygues, Vinci et Eiffage, pour le génie civil (cette liste est loin d'être exhaustive).

Enfin, l'Andra (Agence nationale de gestion des déchets radioactifs) garantit que le stockage final des déchets

produits par l'activité nucléaire est réalisé dans les meilleures conditions économiques, environnementales et de sûreté possibles.

La filière nucléaire française, c'est aussi plusieurs centaines de PME ayant construit et exporté des équipements de centrales nucléaires tout en développant des capacités permettant de répondre aux besoins des centrales en exploitation et de tous les acteurs de la filière. Plus précisément, ce réseau industriel est constitué d'une vingtaine d'entreprises de taille intermédiaire, de près de deux cents PME/PMI spécialisées dans le nucléaire et d'environ quatre cents PME/PMI impliquées pour une partie de leur activité dans la filière.

De manière générale, EDF a toujours noué avec ces entreprises des partenariats industriels fidèles et solitaires, mais par principe, non exclusifs, afin de stimuler la performance et d'éviter les faiblesses de la dépendance technologique.

... QUI S'ÉPANOUIT DANS LE CADRE D'UNE POLITIQUE ÉNERGÉTIQUE COHÉRENTE ET STABLE

Seconde caractéristique essentielle, la France a poursuivi une politique énergétique cohérente et stable depuis quarante ans, qui a permis à chaque acteur de jouer pleinement son rôle, d'investir et de se développer. EDF a ainsi pu mener un programme de construction nucléaire bénéficiant d'un effet de série particulièrement bénéfique.

La France dispose ainsi aujourd'hui d'un parc homogène de cinquante-huit réacteurs (cinquante-neuf, bien-tôt) répondant aux plus hautes exigences de sûreté et construit à un coût se situant bien en-deçà de celui des parcs nucléaires américain, allemand ou japonais. Indice – pour ne pas dire preuve – de sûreté de ce parc : celui-ci, au cours de ses 1 500 années-réacteurs d'exploitation, n'a connu aucun incident de niveau supérieur à 2 sur l'échelle INES (*International Nuclear Event Scale*) [Ndlr : échelle internationale utilisée pour classer les événements nucléaires et radiologiques en fonction de leur gravité]. C'est un parc qui présente un taux de disponibilité durablement supérieur à 90 % pendant les pics hivernaux de consommation d'électricité.

UNE ORGANISATION APPORTANT UNE GARANTIE DE MAÎTRISE INDUSTRIELLE

Cette organisation industrielle - cette claire répartition des rôles - est la principale garantie d'une maîtrise industrielle. Elle réunit les conditions permettant la mise en œuvre de la boucle de retour d'expérience entre l'exploitation, la conception et la construction

des installations nucléaires, d'une part, et l'interaction avec le tissu de fournisseurs, d'autre part, laquelle est garante de faisabilité industrielle et de performance. Placé au cœur de ce retour d'expérience, l'exploitant pilote cette démarche qui aboutit à une amélioration continue et à la révision périodique des référentiels de sûreté et permet ainsi à l'ensemble du parc de réacteurs de progresser de façon homogène.

LA FILIÈRE NUCLÉAIRE FRANÇAISE DISPOSE DE TOUS LES ATOUTS POUR MAÎTRISER LA SÛRETÉ, DONT L'EXPLOITANT EST LE PREMIER RESPONSABLE

Cette organisation industrielle est donc garante de la sûreté. Elle a fait la démonstration de sa pertinence et de sa solidité à l'occasion de la prise en compte de l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima : dès les premiers jours de cet accident, EDF a immédiatement pris l'initiative de s'investir dans une démarche de retour d'expérience. Elle a ainsi engagé des revues de sûreté de tous ses réacteurs nucléaires sous le contrôle de l'ASN, à la demande du gouvernement et en cohérence avec le cadre européen. Cette démarche est sans doute unique au monde, de par son ampleur et son caractère systématique.

Une telle analyse rapide et approfondie de la sûreté des centrales nucléaires n'est possible que grâce à un certain niveau de maîtrise industrielle. Cette maîtrise repose sur un modèle dans lequel EDF, le propriétaire-exploitant, est son propre architecte-ensemblier (AE) : son ingénierie (environ cinq mille personnes en appui à quelque vingt mille personnes employées par les exploitants de centrales) est en capacité de mettre en œuvre cette boucle d'amélioration continue, c'est-à-dire :

- la connaissance du tissu industriel, l'identification et la qualification des fournisseurs potentiels,
- la spécification des équipements et leur qualification à partir du retour d'expérience et des besoins de l'exploitation,
- le contrôle de l'organisation-qualité et la surveillance des fabrications chez les fournisseurs,
- enfin, la boucle de retour vers les fournisseurs permettant d'améliorer avec eux les processus et les équipements.

EDF est au centre de la boucle d'amélioration continue de son outil de production. Dès lors, elle peut, d'une part, assumer sa responsabilité totale envers l'Autorité de sûreté nucléaire à chacune des étapes de la vie de la centrale et, d'autre part, avoir une connaissance et une maîtrise précise de l'installation qui lui permet d'exploiter celle-ci pendant plusieurs dizaines d'années tout en la maintenant au niveau des dernières exigences de sûreté et de performance. Cette politique a permis la

mise au point d'un corpus de normes et de spécifications d'un rayonnement équivalent à celui initié par les Américains au début de leur propre programme nucléaire et auquel se réfèrent les exploitants japonais et coréens.

Grâce à cette maîtrise, EDF procède à des révisions périodiques de sûreté de ses réacteurs nucléaires, avec (notamment à chaque visite décennale) une intégration d'améliorations intéressant les équipements et les organisations, en fonction des évolutions de l'environnement et des connaissances scientifiques. Avec l'expérience, le niveau de sûreté du parc augmente donc, progressivement et de façon homogène. Le risque de fusion du cœur sur le parc français, pourtant déjà très faible, a été réduit d'un facteur 10. Cette efficacité a été d'autant plus forte que le développement du parc français s'est fait par paliers successifs standardisés. Ainsi, les trente-quatre réacteurs du palier 900 mégawatts, qui sont les plus anciens, connaissent actuellement l'intégration de modifications correspondant à leur troisième visite décennale. Les premiers réacteurs français, ceux de Tricastin, du Bugey et de Fessenheim, ont déjà intégré les améliorations de sûreté correspondantes, notamment en matière de renforcement des matériaux et d'optimisation des procédures d'exploitation.

D'ailleurs, la France n'est pas isolée dans l'application de ce modèle dans lequel l'exploitant porte les compétences qui lui permettent de maîtriser l'outil industriel dont il assume la sûreté. Les pays où l'industrie nucléaire est la plus dynamique, à commencer par la Russie et la Chine, ont adopté ce même modèle d'exploitant architecte-ensemblier de ses installations. Et c'est aussi le cas aujourd'hui au Royaume-Uni, où EDF a la capacité d'assumer la responsabilité d'exploitant nucléaire. Les Etats-Unis ont, quant à eux, créé, dans les années 1990, l'*Institute of Nuclear Power Generation* (INPO) pour compenser la parcellisation de l'exploitation entre un grand nombre de petites compagnies électriques. Cet Institut est responsable de l'évaluation, de la formation et du partage du retour d'expérience pour tous les opérateurs nucléaires américains.

Enfin, le Japon, tirant les enseignements non seulement de l'accident de Fukushima, mais aussi de plusieurs années de réflexion sur la responsabilité des exploitants, travaille à la création d'une organisation similaire à celle de l'INPO afin de fédérer les retours d'expérience de ses dix électriciens nationaux.

QUEL PROJET POUR LE PARC NUCLÉAIRE FRANÇAIS, CET ATOUT INCOMPARABLE POUR L'ÉCONOMIE NATIONALE ?

Les évaluations de sûreté menées sur les centrales nucléaires françaises en 2011 sont dites complémentaires, car elles complètent le dispositif habituel de vérification périodique de conformité au référentiel de

sûreté et elles vont alimenter la réévaluation (au minimum) décennale de ce référentiel. À ce titre, il est important de les situer dans le projet industriel que mène EDF pour le parc nucléaire français et qui consiste à valoriser l'existant pour préparer le futur.

Valoriser le parc nucléaire existant...

Avoir la possibilité d'utiliser le parc nucléaire existant, c'est bénéficier d'un actif industriel que la France a mis quarante ans à construire et à améliorer progressivement, qui procure, avec le meilleur niveau de sûreté, une électricité peu chère (d'un coût de l'ordre de 5 c€/kWh, soit la moitié de ce que coûterait tout nouveau moyen de production), qui permet à la France d'être dans le peloton de tête des pays peu émetteurs de CO₂ et la met à l'abri des aléas politiques et économiques internationaux. Fermer de manière anticipée certaines centrales nucléaires reviendrait à passer par pertes et profits des actifs existants, à détruire les emplois correspondants, à renchérir et à délocaliser notre production d'électricité au profit d'importations de gaz et de charbon émetteurs de CO₂. Ce serait la perte d'un des avantages comparatifs de l'industrie française.

Ce souci de l'intérêt français porte d'abord sur une bonne gestion, dans la durée, de son patrimoine industriel.

EDF investit ainsi actuellement environ 12 milliards d'euros chaque année dans l'entretien et la modernisation de son parc nucléaire en exploitation en France. Convaincue de l'intérêt, tant pour le bon usage des ressources financières que pour la sûreté, d'investir dans la durée de fonctionnement du parc nucléaire existant, EDF avait ainsi, bien avant l'accident de Fukushima, déjà lancé un programme majeur de rénovation. Le parc en exploitation a vingt-cinq ans de moyenne d'âge, ce qui est peu pour un outil industriel. En même temps, cela signifie que les premières centrales atteignent leur troisième visite décennale et que les autres l'atteindront dans les toutes prochaines années. Or trente ans, c'est le moment de rénover, de remplacer des composants (générateurs de vapeur, alternateurs, transformateurs,...) et de moderniser certains équipements, pour ouvrir une nouvelle période d'exploitation d'une trentaine d'années.

D'ailleurs, le réacteur ancien présente par rapport à un réacteur de facture plus récente un avantage essentiel, en matière de sûreté : son caractère éprouvé, la démonstration par l'expérience de sa fiabilité, ses années de mise au point et d'améliorations incrémentales et sa maîtrise par les équipes exploitantes. À condition de l'entretenir et de l'améliorer selon une démarche industrielle, le parc existant présente ainsi un avantage incontestable non seulement en matière

d'utilisation des ressources économiques, mais aussi en matière de sûreté nucléaire.

La rénovation du parc français a déjà commencé, avec les troisièmes visites décennales du palier 900 MW. Ces investissements vont croissant, ils connaîtront un pic vers 2020. Il s'agit là d'un programme d'une ampleur industrielle comparable au programme de construction initiale des centrales nucléaires françaises. EDF s'attache à donner un maximum de visibilité à ses partenaires fournisseurs afin de leur permettre de proposer des solutions technologiques et organisationnelles et de préparer la capacité industrielle nécessaire pour relever ce défi à la fois technique, organisationnel et humain.

...pour construire d'ores et déjà le parc futur

Ces investissements sont l'occasion de renouveler des dizaines de milliers d'emplois dans l'industrie : le nucléaire s'est construit avec le programme des années 1970-1980, c'est-à-dire avec des générations d'hommes et de femmes dont beaucoup partent aujourd'hui à la retraite. C'est donc l'opportunité d'offrir aux jeunes générations des emplois industriels dans la métallurgie, la mécanique et l'électronique, dans des territoires parfois désindustrialisés. Ces dernières années, Areva a embauché près de dix mille jeunes et EDF recrute actuellement de l'ordre de deux mille jeunes chaque année pour conduire et maintenir ses réacteurs.

Surtout, cela permet à la France, dans l'Europe de demain, d'effectuer sereinement ses choix énergétiques sur la base d'équipements éprouvés et d'industries adaptées : développer la nouvelle génération de réacteurs nucléaires (« Gen3 » : le modèle EPR et de nouveaux modèles) et entretenir une culture industrielle indispensable à l'émergence éventuelle de nouvelles technologies photovoltaïques, de nouvelles techniques de stockage de l'électricité, ou de capture et de stockage du CO₂.

LES PROJETS NUCLÉAIRES INTERNATIONAUX : UNE OPPORTUNITÉ POUR ENTREtenir ET DÉVELOPPER L'EXPERTISE NUCLÉAIRE FRANÇAISE

Pour éviter que la France ne perde progressivement, mais irrémédiablement, son savoir-faire et les capacités industrielles associées indispensables pour mettre en œuvre la boucle d'amélioration d'un outil industriel tel que son parc nucléaire, il convient de continuer à les développer en les faisant intervenir là où l'industrie est la plus active. C'est même une condi-

tion nécessaire à un renouvellement du parc nucléaire français, le moment venu.

Globalement, il est de la responsabilité de l'exploitant de s'assurer de l'existence et de la qualité de la capacité industrielle et de la capacité collective de recherche et d'innovation indispensables pour mettre en œuvre cette boucle d'améliorations.

Dans une activité comme la production nucléaire, il est évident qu'une telle capacité a une dimension locale. C'est une opportunité d'activité économique, et donc d'emplois, pour les industriels en France. Mais avec le ralentissement des constructions de centrales en France, l'activité se concentre sur l'exploitation et la maintenance du parc en fonctionnement, qui constitue un socle trop limité pour l'entretien des compétences tant chez EDF que chez ses fournisseurs (comme l'illustrent les efforts développés sur le chantier de Flamanville 3, tête de série de l'EPR).

Une telle capacité industrielle doit donc passer par sa mise en œuvre là où, dans le monde, l'industrie nucléaire est la plus active et la plus dynamique. L'export est une opportunité d'activité économique et d'emplois en France, il est surtout une condition de son maintien parmi les meilleurs, et probablement de sa survie, en tant que pays innovant en matière de nucléaire civil.

À ce propos, il convient d'éliminer l'idée selon laquelle le monde aborderait une période de sortie du nucléaire. La renaissance du nucléaire dont les médias se faisaient l'écho il y a encore un an n'avait pas plus de réalité que le soi-disant retournement dont il est question depuis un an.

Ainsi, l'Allemagne a simplement profité de l'accident de Fukushima pour relancer une politique de renoncement à l'énergie nucléaire qu'elle avait adoptée il y a déjà plusieurs années et dont elle a seulement accéléré la mise en œuvre par une décision prise dans l'émotion des premiers jours suivant cet accident. L'Italie a elle aussi renoncé à un programme nucléaire qui avait des difficultés à voir le jour et ce, bien avant l'accident de Fukushima.

D'autres pays européens (comme la Belgique ou la Suisse), qui n'avaient pas de perspectives particulières de développement de nouvelles installations nucléaires, ont confirmé leur renoncement à l'énergie du nucléaire à une échéance assez lointaine.

Aux États-Unis, les perspectives d'un programme de construction de centrales nucléaires sont assez limitées, mais cela n'a rien à voir avec l'accident de Fukushima, dont les Américains tirent d'ailleurs des enseignements particulièrement pragmatiques et limités. Ces perspectives sont avant tout liées à l'abondance de gaz non conventionnels à bon marché et au ralentissement économique.

Quant au Japon, enfin, il est beaucoup trop tôt pour pronostiquer ce qu'y sera la politique énergétique.

Mais il s'agit là finalement d'exceptions, face à nombre de pays qui ont annoncé (ou confirmé) leur

programme nucléaire au cours des derniers mois ; parmi eux, la Russie, l'Inde, le Brésil, l'Afrique du Sud, ou encore plusieurs pays d'Europe, comme la Pologne, la Finlande et la République Tchèque. La Grande Bretagne, où le groupe EDF assure un rôle de premier plan, avec sa filiale *EDF Energy*, a continué en 2011 de mettre en place sa politique énergétique visant à favoriser l'engagement de la construction de nouvelles centrales nucléaires.

Cette continuité n'est pas surprenante, car les enjeux fondamentaux demeurent inchangés : un besoin croissant en électricité lié au rattrapage économique de pays très peuplés qui dépassera, et de loin, les meilleurs résultats en matière d'efficacité énergétique, l'accès à l'électricité de plus d'un milliard de personnes, la lutte contre le changement climatique, la raréfaction des ressources fossiles seules à même, avec le nucléaire, d'assurer la production massive et continue d'électricité et la nécessité d'une énergie abondante bon marché dans des pays développés en difficulté économique (et donc sociale).

LES ENJEUX D'UNE PRÉSENCE ACTIVE DANS LES PROGRAMMES NUCLÉAIRES CHINOIS

S'il est vrai que l'industrie nucléaire se développera dans les pays où les programmes sont les plus dynamiques, cela sera tout particulièrement le cas en Chine, qui a engagé la construction du plus grand parc du monde : quinze réacteurs nucléaires en exploitation et trente en construction, en ligne avec un objectif de 70 à 100 gigawatts installés en 2020, et au moins la mise en service de dix nouveaux réacteurs par an au cours des années suivantes.

Une présence active de la filière nucléaire française en Chine répond donc à un double enjeu. C'est, tout d'abord, la volonté d'EDF d'assurer la pérennité de son ingénierie permettant le maintien en condition et le renouvellement à terme du parc nucléaire français. C'est aussi, dans un même souci de pérennité et de développement, l'assurance pour elle d'être accompagnée par le tissu industriel nucléaire français.

Pour accéder à ce marché, la France dispose d'un atout de premier rang : son histoire de trente ans de coopération autour du partenariat qu'EDF a nourri avec l'électricien nucléaire CGNPC en l'aidant à construire les centrales de Daya Bay sur la base du modèle de réacteur 900 MW français, puis celle de Ling Ao, tête de série du CPR 1000 (une évolution de Daya Bay intégrant les dernières améliorations dont bénéficie l'ensemble du parc français) et en devenant aujourd'hui le premier investisseur étranger dans des centrales nucléaires en Chine (avec la construction de deux EPR à Taishan) (1). Ce faisant, EDF propage

(1) TNPJVC : coentreprise EDF (30 %) - CGNPC (70 %).

l'usage des normes françaises, facilitant ainsi l'accès pour ses fournisseurs français au marché chinois.

Depuis quinze ans, l'association PFCE (2) regroupe plus de soixante-dix PME fournisseurs qualifiés d'EDF impliquées dans le nucléaire chinois, dans son sillage et dans celui de grands fournisseurs, tels qu'Areva et Alstom. Ces PME participent aujourd'hui à la construction d'une vingtaine de réacteurs CPR 1000, ainsi qu'à celle des deux EPR de Taishan. Le chiffre d'affaires dégagé par les seules PME est de près de 100 millions d'euros pour chaque CPR 1000 construit par les Chinois dans leur pays, et 350 millions d'euros sont déjà acquis sur les EPR de Taishan. Ces PME embauchent des personnels pour 80 % d'entre elles : elles ont créé vingt-cinq emplois en moyenne par entreprise, induisant de deux à trois emplois chez leurs sous-traitants.

En restant liée avec notre filière technologique, la Chine induirait ainsi à terme de dix mille à vingt-cinq mille emplois français et un milliard d'euros de chiffre d'affaires annuel, pour les seules PME. Au-delà de la Chine, cette stratégie a pour vocation d'ouvrir des opportunités dans le monde. C'est d'ailleurs dans cette optique qu'à été créé le Partenariat France-Monde Electricité (PFME).

Au-delà, EDF est régulièrement sollicitée dans l'optique d'accompagner le développement de programmes nucléaires de pays, que ceux-ci soient ou non de nouveaux entrants. Si l'accident de Fukushima a changé quelque chose à ce sujet, il a certainement renforcé la prise de conscience de la responsabilité de l'exploitant, et donc de l'utilité de s'appuyer sur l'expérience d'un opérateur comme EDF et sur sa capacité à coordonner les contributions des acteurs industriels, grands et petits, pour assurer la maîtrise industrielle requise.

La filière nucléaire française est aujourd'hui en ordre de bataille pour relever les défis à venir. Ces défis

constituent une formidable opportunité pour l'activité, l'entretien et le développement de notre filière nucléaire.

Le Comité Stratégique de Filière, dont les travaux ont débuté en juillet 2011, a été constitué pour contribuer à la compétitivité industrielle de la France par la consolidation et l'épanouissement de la filière industrielle nucléaire française prise dans sa globalité. C'est un espace pour se donner de la visibilité et construire ensemble les conditions de notre performance.

Son premier rapport a été remis à la Conférence Nationale de l'Industrie : il formalise les enjeux de la filière nucléaire française et pose ses premiers constats et orientations, fruits d'un effort collectif et d'une réelle coopération qui s'est instaurée au sein de ses cinq groupes de travail.

Le Comité Stratégique de Filière nucléaire a ainsi lancé une étude auprès des entreprises exerçant des activités dans la filière afin de pouvoir définir des pistes pour la consolidation et le développement de ses performances. Le CSFN réfléchit à des synergies entre acteurs de la filière, mais aussi à une structuration du panel des formations liées aux différents corps de métiers nécessaires. La cohésion entre les PME et les grands groupes du secteur s'est renforcée ; elle se matérialise d'ores et déjà par de nombreuses recommandations concrètes destinées à renforcer l'attractivité de l'offre française. On peut citer parmi celles-ci la création d'une structure commune de promotion, qui sera testée en 2012 sur deux salons internationaux, en Inde et à Manchester (au Royaume-Uni). En ce qui concerne la réflexion sur la R&D, le groupe de travail *ad hoc* a pu constituer une vision partagée des grands enjeux de la R&D déclinés en objectifs concrets et incluant les contributions et apports des PME et des entreprises de taille intermédiaire (ETI).

Ce premier rapport est la preuve concrète du nouvel élan donné à l'industrie nucléaire française. Il appartient à tous ses acteurs d'entrer pleinement dans le temps de l'action et de la réalisation opérationnelle de nos ambitions.

(2) Partenariat France Chine Electricité.
www.pfce-online.com

Le Pôle Nucléaire Bourgogne : une association d'énergies pour développer l'industrie des composants nucléaires

QUEL MODELE INDUSTRIEL
DANS L'AVENIR ?

Le Pôle Nucléaire Bourgogne est un pôle de compétitivité à vocation mondiale.

Il a pour ambition d'innover, de former et de fédérer pour accroître durablement le *leadership* de la filière nucléaire française tout en développant la fertilisation croisée entre secteurs industriels de haute technicité (aéronautique, énergie, transports).

Par **Gérard KOTTMANN***

UN SILLON PATIEMMENT TRACÉ

Le Pôle Nucléaire Bourgogne (PNB) a été labellisé par l'Etat en 2005 lors de la création des pôles de compétitivité français. À l'époque, neuf membres fondateurs avaient initié ce projet visant à attirer l'attention des services publics sur les défis d'une industrie confrontée à une renaissance annoncée alors qu'elle sortait d'une longue traversée du désert : Areva, Sfarsteel (entretemps racheté par Areva), EDF, Valinox Nucléaire (groupe Vallourec), le CEA, l'ENSAM Cluny (aujourd'hui, Arts et Métiers ParisTech

Cluny), l'Université de Bourgogne et les IUT de Chalon-sur-Saône et du Creusot.

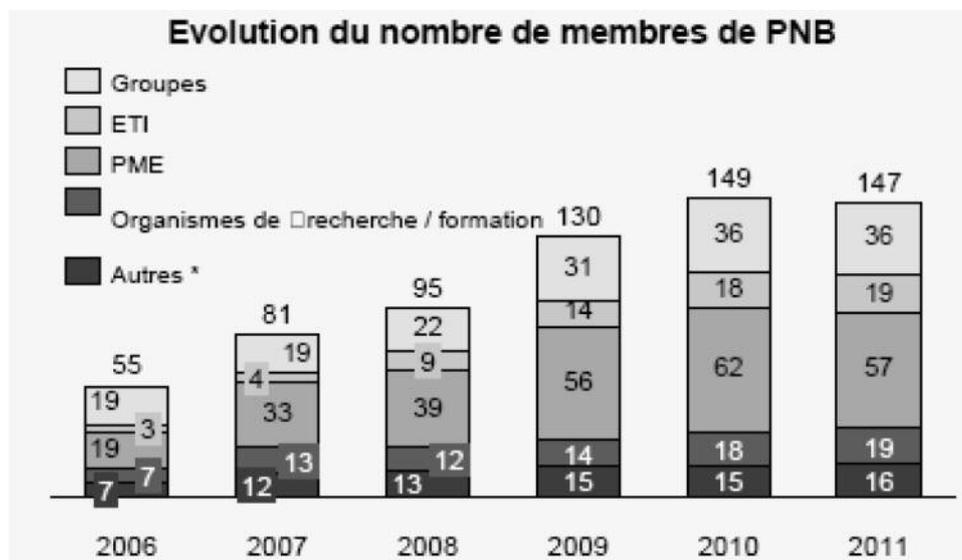
Durant les trois premières années, compte tenu du contexte, l'effort du pôle s'est porté tout particulièrement sur les aspects industriels et les ressources humaines. Du fait du manque de recrutements et des réductions d'effectifs, dans les années 1990, les pyramides des âges étaient en effet dangereusement déséquilibrées ; les compétences et le savoir-faire de la première génération d'ingénieurs, de techniciens et autres

* Valinox, Président du Pôle Nucléaire Bourgogne (PNB).

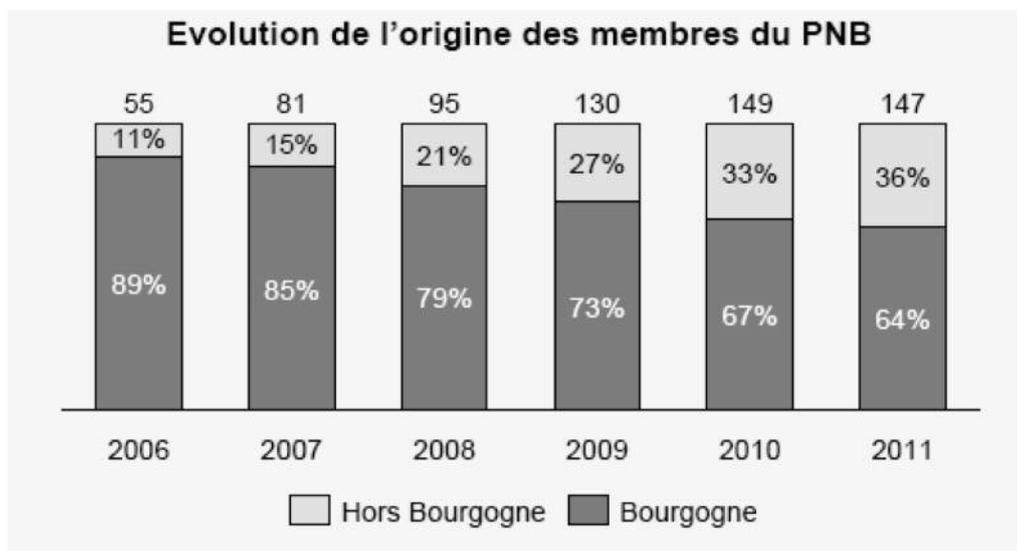
spécialistes risquaient d'être perdus. Les aspects Recherche & Développement, pris en compte dès l'origine, ont été plus délicats à mettre en place, ils ont d'abord concerné l'amélioration des techniques de production. Le challenge était triple : la « renaissance » du nucléaire nécessitait des équipes de recherche fortes et très compétentes en matière de métallurgie, alors même que cette discipline souffrait d'un déficit d'image auprès des jeunes, le ministère de l'Industrie attendait des projets de recherche qu'ils aient des retombées scientifiques et industrielles à court ou à moyen terme, alors que les temps de développement dans le domaine du nucléaire sont très longs, enfin, le montage des projets de R&D devait remplir un double objectif ambitieux, d'une part, faire participer les PME à ces projets dont les retombées économiques sont le plus souvent lointaines et, d'autre part, finan-

cer ces projets *via* les modes de financement classiques (ANR, FUI,...). Le tout, avec des moyens financiers faibles, du moins au début, du fait de la réticence de certains groupes politiques à soutenir une association explicitement axée sur le nucléaire.

Mais heureusement, le PNB a rencontré très rapidement un grand succès auprès des acteurs industriels et académiques, pour lesquels il a représenté le forum qui leur manquait. Ses neuf membres fondateurs se sont retrouvés quarante, un an après la création du pôle, puis quatre-vingt, deux ans plus tard, pour afficher aujourd'hui près de cent cinquante membres, et ce grâce uniquement à des candidatures spontanées motivées par la notoriété croissante du PNB. En parallèle, celui-ci a vu croître son audience en dehors de la région Bourgogne : les adhérents du territoire bourguignon restent certes majoritaires (avec 64 % du



Graphique 1.



Graphique 2.

total), mais environ une cinquantaine de membres sont originaires d'autres régions de France (notamment l'Alsace, Rhône-Alpes, PACA, la Normandie, le Nord-Pas-de-Calais, ...).

En particulier, le pôle intègre 76 PME et ETI, majoritairement du secteur de la métallurgie (chaudronniers et usineurs, notamment), des métiers relevant de la conception (BE mécanique et ingénierie, notamment) et du contrôle. Ces PME et ETI (entreprises de taille intermédiaire) sont, pour moitié, installées en Saône-et-Loire : cela s'explique par l'histoire du tissu industriel de ce département, qui est associé à la vie de Framatome, avec les bassins industriels du Creusot et de Chalon-sur-Saône. Pour les mêmes raisons, ce bassin concentre 20 % des entreprises du secteur du contrôle non destructif (CND) en France. Le PNB a cartographié leurs compétences réelles, ce qui permet de connaître leur capacité à intégrer des projets en matière de R&D.

Des avancées significatives ont été accomplies depuis la reconnaissance du pôle (en 2005) tant dans le domaine de la R&D que dans ceux de la formation ou des actions à l'international. Le PNB a même été cité en exemple pour ses actions de formation dans une publication récente du ministère de l'Industrie. L'équipe d'animation du pôle s'est renforcée grâce au déblocage de financements locaux et à des aides plus importantes. Mandaté par le préfet de région dans le cadre des Etats Généraux de l'Industrie, en 2010, le PNB a animé une réflexion, avec ses membres et ses financeurs, pour apporter une contribution, dont les principales recommandations ont été prises en compte lors de la constitution du Comité stratégique de filière nucléaire (CSFN) en 2011 (le Président du PNB a été nommé membre du comité de pilotage du CSFN).

Le maintien du label « Pôle de compétitivité » du PNB a été officialisé par le CIADT du 11 mai 2010. Sur la base d'une nouvelle feuille de route stratégique pour les années 2010 à 2012, un contrat de performance PNB/Etat/Collectivités a été signé, le 25 juillet 2011, à Chalon-sur-Saône, lors de la visite du ministre de l'Industrie, M. Eric Besson, en présence de M. Henri Proglia, Président d'EDF, et de M. Luc Oursel, Président d'Areva (une visite au cours de laquelle a été officialisée la création du Comité stratégique de filière nucléaire).

UNE FEUILLE DE ROUTE CLAIRE POUR UN POSITIONNEMENT STRATÉGIQUE AMBITIEUX

Chaque année, le bureau du PNB, composé de son Président, de ses Vice-présidents et de son Délégué général, se réunit en séminaire, fin août, pour préparer les échéances de l'année à venir et lancer les prin-

cipales actions. Le séminaire de 2009 était consacré à la redéfinition des objectifs et à la mise en place des moyens nécessaires. L'ambition du pôle y a été clairement réaffirmée.

Innover, former et fédérer pour accroître durablement le *leadership* de la filière nucléaire française tout en développant des fertilisations croisées avec des secteurs industriels de pointe.

Pour l'ensemble du cycle de vie des centrales nucléaires existantes et à venir – conception, fabrication, exploitation, maintenance et déconstruction (hors béton et cycle de vie du combustible) –, trois domaines d'innovation stratégiques ont été clairement identifiés (voir la figure 1 de la page suivante) :

- l'éco-réalisation et la durabilité des composants lourds ;
- les contrôles pour composants hautes performances ;
- les techniques de maintenance et de déconstruction en milieu hostile.

Le conseil scientifique (présidé par le représentant du CEA) a choisi de se réunir sous deux formes distinctes : sous la forme d'un conseil scientifique stratégique (pour porter avis et orienter la stratégie scientifique du pôle) et sous une forme restreinte (pour labelliser les projets de R&D présentés au pôle et pour orienter les actions de ce dernier). Ce travail d'analyse, qui a débouché sur des domaines d'innovation stratégique, a été complété d'une analyse croisée des champs disciplinaires importants pour faire progresser les travaux dans ces domaines d'innovation. Une identification fine des verrous et des ruptures technologiques est facilitée par la connaissance approfondie des entreprises membres par l'équipe du PNB et une cartographie des compétences des PME et des ETI adhérentes, qui est formalisée depuis 2009.

Ce travail sera complété (ou réorienté) en fonction des travaux de la filière dans le cadre du Comité stratégique de filière nucléaire.

Outre la place, cruciale, des projets de R&D, une importance particulière est accordée au développement des échanges avec les acteurs nationaux du secteur et aux manifestations scientifiques et techniques.

Ci-dessous sont citées les principales actions conduites au plan opérationnel :

- recrutement des nouveaux conseillers technologiques (des appuis indispensables, en particulier pour les PME), qui permettent un vrai développement des projets de R&D. De plus, le pôle s'adjoint des expertises mises à disposition par ses grands acteurs en appui à ses conseillers technologiques (expertises et veille technologique) ;
- développement des rencontres avec des laboratoires extérieurs (Centre des Matériaux Pierre-Marie Fourt, Institut Jean Lamour, Université de Metz, UTT, labo-

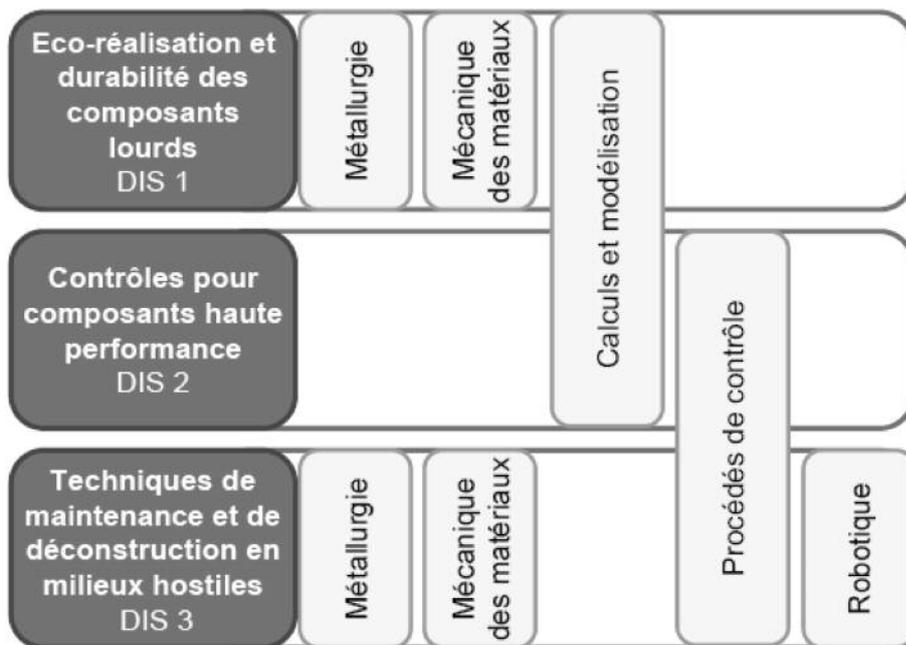


Figure 1 : Les domaines d'innovation stratégiques définis par le pôle nucléaire Bourgogne.

ratoires de l'Université de Bourgogne, Femto, LCND de l'Université d'Aix Marseille,...), ainsi que des rencontres avec d'autres pôles de compétitivité (Astech, EMC2, Materalia, Microtechniques, ViaMéca,...) ;

- organisation de journées techniques (contrôle non destructif, soudage, modélisation, traitement technique, nocivité des défauts, usinage, *speed business*,...) et de journées Jeunes scientifiques ;

- travail de maturation de plateformes d'innovation et, plus largement, investissement dans les réflexions portant sur les investissements d'avenir (Idex, Labex, Equipex, PFMI, IRT,...). Plusieurs projets ont ainsi été soutenus ou labellisés par le PNB. Le pôle a été également à l'origine de l'Espace Multi-Sites Métallurgiques de Bourgogne (EM2B), une plateforme d'enseignement, de recherche et de transfert développée en réseau sur quatre sites bourguignons dès 2007, qui est destinée, en particulier, à mutualiser des équipements de haute technologie.

Plus récemment, le PNB s'est investi dans les réflexions et dans les exercices de priorisation des thématiques de R&D au sein de la filière nucléaire en lien avec l'ANCRE et le Conseil stratégique de filière nucléaire.

Les résultats du pôle, exprimés en nombre de projets de R&D, sont en forte progression, avec près de 80 projets travaillés en 2011 ayant fait l'objet de 34 labellisations. Plusieurs projets ont été déposés lors de l'appel à projets du Fonds Unique Interministériel (FUI) de la fin avril 2012.

En outre, le PNB collabore activement avec d'autres pôles de compétitivité (ASTECH, Materalia...), des *clusters* d'entreprises d'autres régions (Nucleopolis,

Vallée de l'énergie) et des acteurs étrangers, notamment en Europe (Royaume-Uni).

L'accident nucléaire de Fukushima, en mars 2011, et la nécessaire prise en compte du retour d'expérience, ainsi que la sensibilité de la population et celle des décideurs politiques amènent aujourd'hui notre pôle à élargir son positionnement en y intégrant une grille de lecture empreinte d'une sûreté et d'une sécurité accrues.

LE RENOUVELLEMENT DES COMPÉTENCES, UNE CIBLE PRIORITAIRE

Au fil des ans, le PNB, en collaboration avec les écoles et l'Université de Bourgogne, a labellisé dix formations initiales à différents niveaux : licences pro « laser » et « mécatronique » (IUT du Creusot), « ingénierie et contrôle des matériaux et des structures » (IUT de Châlon-sur-Saône), BTS « environnement nucléaire », mastère « énergie du futur » (Arts et Métiers ParisTech) et mastère QESI (Université de Bourgogne).

Pour contribuer à la revalorisation du territoire et des métiers oubliés de la métallurgie, le PNB a édité une bande dessinée promouvant les formations bourguignonnes qui mènent aux métiers du nucléaire, en collaboration avec l'IUMM (2010).

Une action de sensibilisation a été menée auprès des PME pour intégrer en leur sein les mastérants et les doctorants qui est en cours, avec pour objectif d'aider celles-ci à progresser dans le domaine de l'innovation et à créer des liens qui soient plus naturels

avec le monde universitaire en concertation avec le pôle de recherche et d'enseignement supérieur (PRES) de l'Université de Bourgogne-Franche-Comté et avec les écoles doctorales associées.

La réalisation la plus emblématique du PNB reste la création de l'*International Nuclear Academy* (INA), un institut de formation continue des managers (cadres et ingénieurs) de l'industrie nucléaire. Cette initiative du PNB a été lancée en 2009 pour répondre, d'une part, aux attentes du marché international relatives à la relance de l'énergie nucléaire et, d'autre part, au besoin de formation continue des cadres et managers venant d'autres secteurs d'activité. L'INA a organisé ses premiers séminaires en 2009 et en 2010, il développe des séminaires courts en langue anglaise et des séminaires spécifiques portant notamment sur les codes et sur les normes (RCCM et ASME), il construit aujourd'hui des formations plus longues en coordination avec l'Université de Bourgogne, le CNAM et des acteurs étrangers.

Son objectif est double :

- préserver et transmettre le savoir-faire français, reconnu pour sa démarche axée sur la qualité et la sécurité ;
- former aujourd'hui, grâce au retour d'expérience de la région, pour gérer les centrales nucléaires de demain.

L'INA s'appuie pour cela sur les compétences des acteurs locaux de la filière nucléaire répartis sur tout le territoire régional, notamment sur le savoir-faire technologique régional spécialisé dans la conception, la fabrication et la maintenance des composants lourds des centrales nucléaires, et également sur le réseau d'acteurs de l'enseignement supérieur.

Les chiffres 2011 traduisent la montée en puissance de l'INA depuis son inauguration (en 2009, en présence de M. Nobuo Tanaka, le directeur général de l'AIEA) :

- 8 sessions de formation, dont 1 INTRA ;
- 108 participants, soit 280 jours x stagiaires ;
- 59 entreprises facturées (dont 29 localisées en Bourgogne et originaires de 5 pays différents).

L'INA a de nouveaux projets en vue, dont la préparation d'un mastère « énergie nucléaire », avec Supelec et le CNAM (ouverture en 2012).

L'OUVERTURE À L'INTERNATIONAL, UN AXE NATUREL

La concentration en Bourgogne de l'industrie des gros composants de l'îlot nucléaire et des services associés est le résultat de l'histoire : lorsque le gouvernement a lancé le programme nucléaire français, la présence en Bourgogne de l'aciérie et de la forge du Creusot a tout naturellement amené Framatome et ses sous-traitants à s'installer à proximité. Cela a abouti à une concentration de compétences unique au monde, qu'est

venue encore renforcer la construction du CETIC, un centre de formation sans équivalent qui est doté d'éléments d'un îlot nucléaire (des maquettes en grandeur réelle) où les opérateurs de centrales peuvent envoyer leurs équipes en formation. Le *Burgundy Nuclear Partnership* s'est rapidement fait connaître à travers des conférences, notamment en Inde, aux États-Unis, en Corée, ainsi, bien sûr, qu'en Europe.

Dès 2006, le PNB a emmené 11 PME dans une opération de promotion en Grande-Bretagne incluant un premier contact avec les industriels anglais pour discuter d'éventuelles collaborations. Les dernières actions en date ont vu l'accueil d'une délégation sud-africaine (2011) et d'une délégation finlandaise (2012) (des liens ont été établis, de longue date, avec l'association FINNUCLEAR).

Le pôle poursuit ses rencontres avec des acteurs en Grande-Bretagne dans la perspective de la construction de quatre EPR dans ce pays par EDF Energy : récemment, une convention a été signée avec le NAMRC (*Nuclear Advanced Manufacturing Research Centre*) de Sheffield, qui résulte d'un partenariat entre les universités de Sheffield et de Manchester. Par le biais de son école dédiée à la formation continue (l'*International Nuclear Academy*), le PNB organise des sessions conjointement avec le *Dalton Institute*, qui est le principal acteur britannique en matière de R&D, d'ingénierie et de sciences des matériaux au service de l'industrie nucléaire (il est rattaché à l'Université de Manchester).

Un exemple des retombées de cette dynamique : lors du salon international « PowerGen 2011 » tenu en mars 2011 à Milan, la société israélienne AcousticEye, qui a développé une technique de contrôle innovante, se présente au stand du PNB. Suite à ce salon, le PNB organise en septembre 2011 une journée d'information consacrée spécifiquement à cette société AcousticEye à destination des membres du PNB, avec des résultats concrets :

- dix membres du PNB y ont participé,
- des informations contribuant à la veille technologique ont été diffusées à destination des membres du PNB,
- des liens ont été créés entre les entreprises françaises et AcousticEye : celle-ci et la société Profile CI ont signé un accord d'exclusivité en décembre 2011 pour la distribution en France de l'appareil développé par AcousticEye.

En février 2012, le PNB a signé des conventions de coopération avec le PFCE (Partenariat France-Chine Electricité) et avec le PFME (Partenariat France Monde Electricité) pour s'associer à la grande exportation. Ce premier partenariat se cristallise dans une mission commune, en Afrique du Sud.

Enfin, le pôle parraine, depuis plusieurs années, un village Industrie nucléaire au Salon Industrie (qui se tient alternativement à Paris et à Lyon), prémices d'un futur salon nucléaire en France de portée potentiellement internationale.



FinNuclear Delegation
AREVA Chalon/St-Marcel, march 14th 2012

Photo 1 : Membres de l'association finnoise FINNUCLEAR.

CONCLUSION

La création du PNB a surpris : il existe donc encore en France une industrie lourde aux compétences uniques dans le monde et ce, sur un territoire plus connu pour la qualité de ses vins. Une industrie qui représente un atout majeur pour l'exportation d'un savoir-faire engrangé grâce au programme nucléaire français. Une industrie qui doit aujourd'hui

constamment progresser pour rester leader, face à la montée en puissance des nouveaux accédants à l'énergie nucléaire, qui veulent développer leur propre secteur. L'action du PNB à travers ses projets innovants et ses actions de formation offre un socle au Comité stratégique de filière nucléaire pour développer la sécurité des installations, cimenter les relations entre sous-traitants et grands donneurs d'ordres et pouvoir chasser « en meute » les grands contrats à l'exportation.

BIOGRAPHIES DES AUTEURS

ANDRÉ-MITSIALIS Sylvie

Experte en communication scientifique et technique, Sylvie André-Mitsialis est diplômée du Celsa (Paris Sorbonne). Après avoir été responsable éditoriale du spécialiste européen de l'armement terrestre, Giat Industries, elle a rejoint l'association de prévoyance Bayard en 1993, avant de devenir conseil indépendant durant deux ans. Elle rejoint le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) en 1997 en tant que responsable de publications au sein de la direction des ressources humaines. À partir de 1999, elle dirigera la communication des projets du CEA/Cadarache avant de piloter, depuis 2006, la communication de l'Agence Iter France.

Dans le cadre de ses fonctions, elle a en particulier été responsable de la communication de projets soumis à l'acceptabilité du public dans le cadre de débats publics et de concertations, du dossier de candidature européenne « ITER à Cadarache » et du débat public ITER.

ANGLARET Philippe

Philippe Anglaret est diplômé de l'Ecole Polytechnique (X70) et de l'ENSPM. Il a commencé sa carrière chez GAAA (Groupement pour les Activités Atomiques et Avancées). Il a ensuite passé une grande partie de sa carrière chez Cegelec, où il a été successivement responsable du département nucléaire, puis du secteur des Equipements industriels (BEI, devenu Convertteam). Il a été ensuite Président directeur général de FCI (Framatome Connectors International). Il est actuellement responsable du Business Développement de l'activité nucléaire d'Alstom.

BÉHAR Christophe

Christophe Béhar est ingénieur (diplômé de l'Ecole Centrale de Paris – 1982).

En 1984, il entre au CEA (Saclay) pour travailler sur la séparation isotopique de l'uranium. Il y occupe divers postes à responsabilité au sein du Département des Procédés d'enrichissement. En octobre 2000, il est nommé directeur (au sein de la direction des Applications militaires) des Matières, de la Surveillance et de l'Environnement. Puis en janvier 2004, il devient directeur du Centre CEA/DAM-Île-de-France. Depuis avril 2009, Christophe Béhar est directeur de l'Énergie nucléaire.

BÉROUX Pierre

Diplômé de l'Ecole Centrale des Arts et Manufactures, Pierre Bérroux a rejoint EDF en 1983. Il justifie de près de trente années d'expérience dans le secteur de l'industrie nucléaire.

De 1983 à 1998, il a exercé différentes responsabilités à la direction de l'Ingénierie d'EDF dans le cadre de la conception et de la construction des paliers 900, 1300 et 1500 MWe ; il a notamment eu la responsabilité de contrats Framatome pour la chaudière nucléaire.

De 1998 à 2003, il a été le conseiller du Président d'EDF pour les affaires industrielles : production, ingénierie, transport. En 2003, Pierre Bérroux est nommé directeur du Contrôle des risques du groupe EDF, il étend le champ de cette direction à l'ensemble des risques du groupe.

En 2010, il rejoint la direction de l'Ingénierie nucléaire en tant que directeur chargé de l'évolution des futurs réacteurs ; au cours de cette période de redéploiement de l'industrie nucléaire, il est chargé de redéployer les ressources permettant à EDF de jouer, dans un contexte international, le rôle d'architecte-ensemblier.

BOISSIER Fabrice

Fabrice Boissier est ingénieur des Mines, ancien élève de l'Ecole normale supérieure. Il est actuellement directeur de la Maîtrise des risques à l'Andra, l'Agence nationale des déchets radioactifs. Ses fonctions comprennent notamment la sûreté des stockages exploités ou en projet, et la coordination des contributions de l'Andra au Plan national de gestion des matières et déchets radioactifs.

Dans ses fonctions précédentes, Fabrice Boissier avait en charge des problématiques environnementales et énergétiques. De 2006 à 2009, il a été directeur du département Géothermie du BRGM. Précédemment, il a été adjoint au directeur de la Direction régionale de l'Industrie, la Recherche et l'Environnement (DRIRE) de la région Languedoc-Roussillon, en charge du contrôle des installations classées et de la police des mines.

CAHEN Bruno

Bruno Cahen est diplômé de l'Ecole Polytechnique et du Corps des Mines.

Bruno Cahen est directeur industriel de l'Andra (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs), un EPIC chargé de développer et de mettre en œuvre les solutions industrielles de gestion à long terme des déchets radioactifs pour les producteurs

français de déchets radioactifs. Il gère les activités industrielles et commerciales de l'Andra en France : prestations de gestion de déchets et d'études, exploitation de trois sites INB et ICPE, projets de procédés et d'installations, collecte, traitement et conditionnement de déchets, décontamination de sites pollués.

Avant d'occuper les fonctions de directeur industriel, il a été directeur de la Maîtrise des risques, de 2006 à 2009.

De 2002 à 2006, il était en charge du bureau des Risques technologiques majeurs à la DGPR, il a au titre de ses fonctions piloté l'élaboration du nouveau cadre législatif que constitue la loi du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages. Cette loi prévoit l'élaboration de plans de prévention des risques technologiques (PPRT) ainsi que l'élaboration des outils de gestion de maîtrise des risques industriels, issus du retour d'expérience de l'accident survenu à Toulouse en 2001. Avant d'occuper le poste précité, il a été durant trois années directeur adjoint de la DRIRE Alsace, chef du service de l'Environnement industriel.

CHAUVIN Carole

Carole Chauvin a intégré Westinghouse en 2007 au poste de Communications Lead pour Westinghouse France.

Avant de rejoindre Westinghouse, Carole Chauvin a occupé des postes de chargé de communication et de *marketing* opérationnel dans le secteur de l'énergie et des télécoms.

Carole Chauvin a obtenu un mastère au sein de l'ESC Rennes School of Business ainsi qu'un diplôme en *business* administration de l'Open University (Royaume-Uni).

DELBECQ Jean-Michel

Ingénieur de l'Ecole Polytechnique (1970) et Ingénieur des Ponts et Chaussées (1975), Jean-Michel Delbecq est entré à EDF après 8 années d'exercice au sein de l'Administration des Ponts et Chaussées. De 1983 à 1995, il a dirigé au sein du SEPTEN (Service d'Etudes des Projets Thermiques et Nucléaires) la division en charge d'études de mécanique des structures pour les centrales nucléaires d'EDF, puis le département en charge d'études de physique industrielle pour les centrales nucléaires et leur combustible. Il a ensuite évolué vers la direction Recherche et Développement d'EDF, d'abord comme directeur adjoint du service d'Informatique et de Mathématiques appliquées, puis comme directeur du service Réacteurs nucléaires et Echangeurs, une unité en charge d'études et de recherches pour les centrales nucléaires (physique des réacteurs, combustible, gestion des déchets, durée de fonctionnement, études matériaux, études probabilistes de sûreté, facteurs humains,...). Il a été ensuite directeur scientifique

d'EDF R&D et il est, depuis 2004, responsable du programme d'EDF sur les systèmes nucléaires du futur, en particulier ceux de la quatrième génération.

DELMESTRE Alain

Alain Delmestre est directeur général adjoint et membre du comité exécutif de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). Il est également directeur de la Communication et de l'Information des publics de l'ASN.

Il a occupé différentes responsabilités dans le domaine de la communication au sein de l'Administration (ministère de l'Industrie, ministère des PTT). Alain Delmestre est administrateur civil hors classe.

FUROIS Timothée

Timothée Furois est adjoint au chef du bureau chargé des Politiques publiques et des Questions de tutelle des entreprises et des établissements publics, au sein de la sous-direction de l'Industrie nucléaire à la direction générale de l'Energie et du Climat du ministère chargé de l'Ecologie. Il est en charge du suivi de l'organisation de l'industrie nucléaire et, en particulier, des problématiques liées à la cohérence du cycle du combustible et de la prolongation de la durée d'exploitation des centrales nucléaires.

Timothée Furois est diplômé de l'Ecole Polytechnique, de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, et est ingénieur des Ponts, des Eaux et des Forêts.

GAUCHÉ François

François Gauché est polytechnicien (X94), ingénieur en chef des Mines.

Depuis 2010, il est chef de programme Réacteurs de quatrième génération, direction de l'Energie nucléaire au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives.

Précédemment, il a été :

- directeur de l'Agence ITER-France, au Commissariat à l'énergie atomique, centre de Cadarache (2006-2010) ;
- responsable du projet cyclotron Arronax, à l'École des mines de Nantes, SUBATECH, CNRS (2004-2006) ;
- chef de la division Installations nucléaires, Energie, Mines, adjoint au directeur de la direction régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement (DRIRE) de la région Alsace, ministère délégué à l'Industrie (2000-2004).

HARARI François

Diplômé de l'Ecole spéciale militaire de Saint-Cyr (1977) et de l'Ecole de guerre (1990), le commandant

François Harari a servi pendant seize ans dans l'armée française comme officier d'infanterie et comme instructeur en arme blindée, en France et en Allemagne. Il a rejoint Transnucléaire en 1990, comme chef de projet pour l'organisation d'un système de logistique nucléaire. Il devient ensuite directeur général de l'entreprise Transports Célestin (1994), puis des Etablissements Lemaréchal (1998), filiales d'Areva spécialisées dans le transport international de matières nucléaires. En 2007, il quitte Areva pour Westinghouse, comme responsable du développement des activités pour les installations nucléaires en France. En 2010, il est nommé directeur Europe des opérations de terrain, à Nivelles (Belgique). En novembre 2011, il devient Vice-président et directeur général de Westinghouse France-Benelux et Afrique du Sud.

IRACANE Daniel

Daniel Iracane est diplômé de l'École Polytechnique. Après une thèse en physique théorique et un peu plus de dix années consacrées à des travaux de recherche en physique fondamentale, Daniel Iracane s'est orienté vers l'énergie nucléaire.

Pendant cinq ans, Daniel Iracane a été responsable des activités concernant le comportement des déchets nucléaires et leur entreposage.

À partir de 2000, Daniel Iracane s'est investi dans la gestion des grandes infrastructures de recherche du CEA et est devenu responsable du projet de réacteur de recherche Jules Horowitz, un réacteur nucléaire d'essai de haute performance pour les matériaux. En tant que directeur de programme, Daniel Iracane a développé le partenariat international permettant le financement du projet, a piloté le projet jusqu'au démarrage de la construction du réacteur et a lancé les activités nécessaires à son exploitation.

Depuis 2010, Daniel Iracane est directeur adjoint de la direction des Relations internationales du CEA.

JAOUEN Claude

Ancien élève de l'École Centrale de Paris et docteur ingénieur, Claude Jaouen a rejoint le SGN (Business Unit Ingénierie) en 1980. Après dix années d'études et de développements dans différents domaines du cycle du combustible nucléaire et deux années d'activités projets à l'international, il est nommé, en 1992, directeur des Études et Développements de l'établissement SGN de Cherbourg, puis directeur régional, en 1995. En 1997, il rejoint l'établissement Areva-La Hague, comme directeur technique, puis, en 2000, il devient directeur adjoint de l'établissement. En juillet 2001, il est nommé directeur des Systèmes d'information pour le groupe Areva. En 2003, il devient directeur délégué d'Areva NP, en charge de la Business Unit Combustible. En 2006, il devient directeur délégué d'Areva en charge de l'étude et de la mise en

œuvre des évolutions organisationnelles des ingénieries du groupe. Il est par ailleurs directeur de la Business Unit Ingénierie et PDG de SGN, et il supervise la Business Unit Conseil et Systèmes d'Information. En juin 2007, il devient directeur adjoint de la Business Unit Réacteurs, dont il prend la responsabilité en mars 2008. En janvier 2010, il est nommé directeur adjoint du Business Group « Réacteurs et Services », dont il a pris la direction en juillet 2011.

KNOCHE Philippe

Philippe Knoche est diplômé de l'École Polytechnique, où il a obtenu une maîtrise en Science des matériaux ; il est également diplômé de l'École des Mines.

Il commence sa carrière en tant que rapporteur *anti-dumping* de la Commission européenne. Il intègre ensuite le *consortium* de Réalisation, en tant qu'assistant du Président du conseil de surveillance.

Il rejoint le groupe Areva en 2000. Après avoir occupé le poste de directeur de la Stratégie du groupe, il est nommé en 2004 directeur de la Business Unit chargée du traitement du combustible usé. En 2006, il devient directeur du projet OL3.

En 2009, Philippe Knoche est nommé Chief Operating Officer d'Areva NP.

En janvier 2010, il prend en charge la direction du Business Group Réacteurs et Services et devient membre du comité exécutif du groupe.

Le 1^{er} juillet 2011, Philippe Knoche est nommé directeur général délégué.

KOTTMANN Gérard

Gérard Kottmann est titulaire du diplôme d'ingénieur de l'École Centrale de Paris (promotion 1974) et du diplôme de Sciences Po Paris, section Relations Internationales (promotion 1976).

En 1983, il a rejoint le groupe Vallourec (Leader mondial de la fabrication de tubes sans soudures pour des applications énergie) pour développer l'activité du groupe dans le domaine des tubes pour chaudières à combustibles fossiles.

Après avoir occupé différentes fonctions tout d'abord comme directeur commercial pour Vallourec Industries, puis comme directeur de la division Energy de Vallourec & Mannesmann Tubes, une *joint-venture* franco-allemande créée en 1997, il est aujourd'hui :

- directeur général de Valinox Nucléaire (filiale à 100 % du groupe Vallourec), leader mondial de la fabrication de tubes en alliages nickel pour les générateurs de vapeur des centrales nucléaires ;
- Président directeur général de Valinox Nucléaire Guangzhou Co. Ltd, usine en cours de construction en Chine ;
- Président du Pôle Nucléaire Bourgogne, un pôle de compétitivité comptant plus de 150 adhérents : socié-

tés industrielles, laboratoires et instituts de formation. Ce pôle est créé en 2005 à l'initiative d'Areva, d'EDF, de Valinox Nucléaire, de Sfarsteel, du CEA, de l'Université de Bourgogne et de l'ENSAM (Ecole d'ingénieur de Cluny) ;

- membre du conseil d'administration de l'International Nuclear Academy et du conseil d'enseignement de l'INSTN.

LABALETTE Thibaud

X-Ponts, Thibaud Labalette a rejoint l'Andra en 2006 comme directeur des projets Cigéo et FAVL (recherche d'un site de stockage pour accueillir les déchets de faible activité à vie longue), puis en qualité de directeur des Programmes. Il assure notamment le pilotage stratégique de Cigéo (interfaces avec l'Etat, avec Areva, le CEA et EDF, préparation du débat public, préparation de la demande d'autorisation de création,...). Au sein du ministère de l'Equipement, il était précédemment responsable du service d'aménagement des grandes infrastructures en Seine-et-Marne (desserte de Roissy et de Marne-la-Vallée, élargissement de la Francilienne, déviation de Meaux,...).

LANDAU Pierre

Pierre Landau est chargé de mission auprès du Président du directoire d'Areva, Secrétariat Exécutif, Areva.

LEBLANC Elvire

Après un cursus en physique (University diploma in Physics, University of Kent, Angleterre - 1991) et l'obtention d'un magistère de Physique fondamentale de Paris XI (1992), Elvire Leblanc a débuté ses études de recherche à l'Institut d'Astrophysique Spatial du CNRS, puis a intégré le CEA en 1994 pour poursuivre, au sein du Laboratoire National Henri Becquerel, ses travaux sur le développement de bolomètres pour la métrologie de la radioactivité. Après une expérience d'ingénieur-chercheur, puis de chef de projet, Elvire Leblanc a été responsable du programme Instrumentation du département des Technologies du Capteur et du Signal en 2008, où elle a contribué à l'émergence au sein de ce département des activités de recherche sur les Nouvelles Technologies pour l'Energie (NTE). Elle a ensuite rejoint la direction de l'Institut du LIST, où elle a été responsable du développement du programme NTE pour quatre départements. En 2011, avec l'objectif de contribuer à la stratégie de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, au sein de la direction du CEA et des tutelles, Elvire Leblanc a rejoint la direction Stratégie et Programme du CEA, où elle est aujourd'hui responsable du domaine scientifique des Nouvelles Technologies pour l'Energie. Dans le cadre de ses activités scienti-

fiques, Elvire Leblanc a contribué au Strategic Research Agenda de l'ETPS (*European SmartGrids Technology Platform*), aux initiatives européennes EERA Smart Grid, EERA Smart Cities, E2BA (*Energy Efficient Building Association*), à la définition des axes de recherche stratégiques pour les futurs appels européens FP8-ICT Energie au sein de MESR/DGRI, au sein de groupes de travail à l'ANCRE (Groupe de travail Efficacité Energétique Bâtiment), au Comité Stratégique de filières Eco-Industries COSEI SEISE (systèmes électriques intelligents et stockage) coordonné par le ministère chargé de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, le ministère chargé de l'Industrie et le ministère chargé de l'Ecologie.

Elle a réalisé plusieurs conférences et interventions sur les thématiques des Nouvelles Technologies pour l'Energie, tant à l'INSTN qu'à l'IHEST.

LEDERMANN Patrick

Patrick Ledermann est diplômé de l'Ecole Polytechnique et de l'Ecole des Mines de Paris. Directeur de l'activité nucléaire d'Alstom Power depuis octobre 2007, il a successivement dirigé le Bureau de Contrôle de la Construction Nucléaire (BCCN), l'Etablissement de traitement des combustibles usés d'Areva-La Hague, le développement et les projets du cycle de combustible d'Areva, et il a été directeur adjoint de l'Energie nucléaire au CEA.

LOUËT Charles-Antoine

Depuis 2011, Charles-Antoine Louët est sous-directeur de l'Industrie nucléaire à la direction générale de l'Energie et du Climat (DGEC) au ministère chargé de l'Ecologie. Il est notamment chargé de la tutelle du CEA, de l'Andra et d'Areva, de la politique nationale en matière de déchets radioactifs, du soutien du nucléaire français à l'export et du contrôle du financement des charges de long terme. Il était auparavant chef du bureau de la Production électrique à la DGEC (2009-2011) et chef de la division de Lyon de l'Autorité de sûreté nucléaire (2005-2009). Charles-Antoine Louët est ancien élève de l'Ecole normale supérieure et est ingénieur du Corps des Mines.

MACHENAUD Hervé

Diplômé de l'Ecole Polytechnique et de Sciences-Po, Hervé Machenaud rejoint le groupe EDF en 1982 pour conduire la construction en France de la centrale nucléaire de Paluel, puis celle de Daya Bay en Chine. Son parcours le conduit à piloter la conception, la construction et le démarrage du palier N4 à Chooz et Civaux, qui reste à ce jour l'un des plus avancés au monde, étant notamment doté d'une conduite totalement informatisée innovante. À partir de 2002, il est, à Pékin, directeur de la branche Asie-

Pacifique, dont le rôle est de valoriser le savoir-faire industriel d'EDF, notamment dans le domaine du nucléaire, et de lui assurer, par un rôle actif sur le marché chinois, l'accès à l'expérience et aux innovations technologiques de la zone géographique considérée. En 2010, il devient directeur exécutif du groupe EDF, en charge de la production et de l'ingénierie

MANDEMENT Olivier

Olivier Mandement est diplômé de l'Institut National Polytechnique de Grenoble et de l'Université de Stanford. Il a débuté sa carrière d'ingénieur dans l'industrie minière et métallurgique en Nouvelle-Calédonie. Depuis qu'il a rejoint Alstom en 1998, il a occupé, au sein de la division « Power », diverses fonctions liées aux appels d'offres internationaux de turbines à vapeur et à la réalisation de projets notamment à la centrale nucléaire de Laguna Verde au Mexique.

MANDIL Claude

Claude Mandil est ancien élève de l'École Polytechnique et ingénieur général au Corps des Mines.

En poste administratif en Lorraine puis en Bretagne de 1967 à 1974, il est nommé à la DATAR (aménagement du territoire) de 1974 à 1977, puis, de 1978 à 1981, il est directeur régional de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement à Nantes pour la région des Pays de la Loire.

En 1981, Claude Mandil rejoint le cabinet du Premier Ministre comme conseiller technique chargé de l'Industrie, de la Recherche et de l'Énergie. En 1983, il devient directeur général, puis Président directeur général de l'Institut de Développement Industriel (IDI), un fonds d'investissement public, dont il organise la privatisation avec participation des salariés en 1986. De 1988 à 1990, il dirige le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM).

De 1990 à 1998, Claude Mandil est directeur général de l'Énergie et des Matières premières au ministère chargé de l'Économie. À ce titre, il négocie l'adhésion de la France à l'AIE en 1991 et devient le premier représentant de la France au sein du conseil des gouverneurs de cette agence, un conseil qu'il préside en 1997 et en 1998. Il représente également la France au sein du groupe de travail du G7 sur la sûreté nucléaire, un groupe dont il assure la présidence en 1996.

Après un bref passage à Gaz de France comme directeur général délégué, Claude Mandil devient Président directeur général de l'Institut Français du Pétrole (IFP) de 2000 à 2003, avant d'être élu directeur général de l'AIE, fonction qu'il occupe jusqu'à sa retraite en août 2007.

Claude Mandil est administrateur de Total. Il conseille plusieurs entreprises et gouvernements. Il est Docteur Honoris causa de la Katholieke Universiteit Leuven (Belgique).

MOURLON Sophie

Ancienne élève de l'École Polytechnique et de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Sophie Murlon est actuellement directrice générale adjointe à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). Elle a occupé précédemment différentes fonctions dans les services déconcentrés des ministères chargés de l'Environnement et de l'Industrie, ainsi qu'à l'ASN.

NAMY Philippe

Philippe Namy est diplômé de l'École des Mines de St-Étienne et de la Harvard Business School. Il débute sa carrière en 1972 au sein de la division Thermo-hydraulique de Framatome. Après un séjour de deux ans aux États-Unis, il est nommé responsable sûreté du projet Koeberg, puis adjoint au chef de projet. Il prend la responsabilité du développement des activités de services nucléaires pour les États-Unis et fonde au début des années 1990 le FROG (*Framatome Owners Group*), dont il sera le secrétaire. Au début des années 2000, Philippe Namy devient responsable du Management des risques et de l'organisation de la société FCI (*Framatome Connectors International*). Puis, il prend en charge le *business development* de l'activité Réacteurs au sein de la direction commerciale d'Areva NP, où il contribue à la création d'ATMEA. À la mi-2010, il devient responsable de l'ensemble du *business development* d'ATMEA. Début 2012, il est nommé Président & CEO d'ATMEA.

OURSSEL Luc

Luc Oursel est diplômé de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris et ingénieur en chef des Mines.

Il débute sa carrière en 1984 à la direction régionale de l'Industrie et de la Recherche de la région Rhône-Alpes, comme chef de la division Énergie et Sous-sol. En 1988, il rejoint la direction du Gaz, de l'Électricité et du Charbon, au ministère chargé de l'Industrie. Il exerce les fonctions de chef du service Électricité, puis d'adjoint au directeur du Gaz, de l'Électricité et du Charbon. En 1991, il intègre le cabinet du ministre de la Défense comme conseiller technique, chargé des Affaires industrielles, des Programmes d'armement et de la Recherche.

À partir de 1993, il rejoint Schneider Electric en qualité de directeur général de SAE Gardy, puis de directeur général de Schneider Shanghai Industrial Control. En 1998, il devient Président directeur général de Schneider Electric Italia, puis, en 2001, directeur industriel de Schneider Electric.

En 2002, il intègre le groupe Sidel comme directeur général adjoint en charge de Sidel Solutions (ventes, services, ingénierie). Directeur des filiales internationales de Geodis depuis septembre 2004, il en devient le directeur général en 2006.

En janvier 2007, Président d'Areva NP et membre de son comité exécutif ainsi que du comité exécutif nucléaire d'Areva, Luc Oursel est nommé par le conseil de surveillance, lors de sa séance du 22 mars 2007, membre du directoire d'Areva. En novembre 2009, il est nommé directeur général adjoint, en charge des opérations du nucléaire et, en janvier 2011, il est nommé directeur général délégué, en charge du Marketing, International et Projets.

Le 30 juin 2011, il est nommé Président du directoire par le conseil de surveillance d'Areva.

Luc Oursel est également membre du comité de l'Energie atomique, membre du conseil de surveillance de l'IPMED, membre du conseil d'administration du Conseil français de l'Energie, Président de la SFEN (Société Française de l'Energie Nucléaire) et Président de la Fondation Georges Besse.

Il a été administrateur de Souriau, de 2006 à 2011, et de Safran, de 2009 à 2011.

PAMELA Jérôme

Jérôme Pamela est ingénieur diplômé de l'Ecole Polytechnique (promotion 1974) et docteur es sciences. Il est entré au CEA en 1977 au sein du département de Physique des particules élémentaires. Il rejoint le département de Recherche sur la fusion contrôlée en 1984, où il contribue au développement de faisceaux de particules destinés à chauffer les plasmas de fusion, et dirige les premières études de site à Cadarache pour préparer l'accueil d'ITER. En 1996, il prend la direction de ce département de recherche à Cadarache et de l'association Euratom-CEA sur la fusion.

En septembre 1999, il part en Angleterre pour diriger le programme européen JET qui associe les laboratoires d'une vingtaine de pays européens. En septembre 2006, il rejoint Garching en Allemagne pour diriger le programme européen de recherche en fusion EFDA. Ce programme qui implique la Commission européenne, des laboratoires et des institutions relevant des 27 Etats membres de l'Union européenne et de la Confédération Helvétique, rassemble plus d'un millier de chercheurs.

Depuis le 1^{er} janvier 2010, Jérôme Pamela dirige l'agence ITER France.

PERCEBOIS Jacques

Jacques Percebois est Professeur à l'Université Montpellier I. Agrégé des Facultés d'Economie, Docteur d'Etat en Economie (Paris X), diplômé de l'Institut d'Etudes Politiques de Grenoble, il a enseigné à l'Université de Grenoble avant de rejoindre celle de Montpellier. Fondateur et directeur du CREDEN (département de l'UMR CNRS ART-Dev n°5281), il dirige un mastère en Economie et Droit de l'Energie qui fête, en 2012, ses vingt ans d'existence.

Doyen honoraire de la Faculté d'Economie, il a écrit de nombreux ouvrages et articles scientifiques parmi lesquels : *Energie : économie et politiques*, en collaboration avec Jean-Pierre Hansen, Editions de Boeck, novembre 2010, 780 pages, préface de Marcel Boiteux et avant-propos de Jean Tirole. Cet ouvrage a reçu deux prix : le prix 2011 du « meilleur ouvrage d'économie à destination des étudiants » décerné par l'AFSE et le prix 2011 du « meilleur ouvrage d'économie de l'énergie » décerné par l'AEE.

Jacques Percebois a reçu *the 2006 Award for Outstanding Contributions to the Profession of Energy Economics* décerné par l'IAEE (Association Internationale des Economistes de l'Energie) lors du Congrès de Florence.

Il enseigne également à l'Ecole des Mines de Paris et à l'Institut Français du Pétrole (EN). Il est membre du conseil d'administration de GRTGaz (administrateur indépendant) et membre de la CNE (Commission Nationale des Etudes et recherches sur la gestion des déchets radioactifs). Il a été membre de la commission Champsaur I (loi NOME) et de la commission Champsaur II (ARENH). Il est également membre du conseil d'administration de l'AFG Compétence II a été Président de la commission « Energies 2050 » mise en place par le ministre chargé de l'Energie (la commission a rendu son rapport en février 2012).

POMMERET Stanislas

Après avoir suivi un cursus d'ingénieur à l'Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées (1987) dans le domaine de l'énergie électronucléaire, Stanislas Pommeret a poursuivi ses études à l'Université de Paris Sud 11, où il a obtenu une Diplôme d'Etudes Approfondies en physique fondamentale (1988), un doctorat en Chimie Physique (1991) et une Habilitation à Diriger les Recherches (1998). Ses activités scientifiques se sont concentrées sur les effets des rayonnements sur la matière. Au cours de sa carrière, il a contribué à la production de plus de 90 articles scientifiques. Depuis son entrée au CEA en 1993, il a été successivement : ingénieur-chercheur, responsable d'équipe, puis chef de laboratoire. Il a contribué à l'émergence d'une communauté scientifique CEA dans son domaine scientifique en créant du lien entre les équipes focalisées sur les objectifs technologiques du CEA et celles focalisées sur des objectifs cognitifs. Pendant cette vie scientifique, il a effectué deux longs séjours aux Etats-Unis : le premier en tant que volontaire du service national actif (VSNA, d'une durée de 16 mois : 1989-1990) au Radiation Laboratory, Notre-Dame University, Indiana ; le second séjour d'une durée de 12 mois (de 2001 à 2002) en tant qu'Invited Scientist, Argonne National Laboratory, Illinois. Il s'est impliqué dans la vie scientifique française à travers une participation active au sein de sociétés savantes et l'organisation de

nombreuses manifestations scientifiques. Depuis 2011, il préside la division de Chimie Physique commune à la Société Chimique de France et à la Société Française de Physique. En 2008, il a souhaité s'impliquer dans le management de la recherche en rejoignant la direction de la Stratégie et des Programmes du CEA, où il suit plus particulièrement les activités de recherche fondamentale, et notamment celles concernant les grands instruments et leur écosystème.

RIVIÈRE Emmanuel

Emmanuel Rivière est directeur de département au sein de l'unité Stratégies d'opinion de l'institut TNS Sofres. Il justifie d'une expérience de vingt années dans le domaine des études de l'opinion liée aux sujets de société.

Il est co-auteur du livre *Faut-il croire les sondages ?* (2008, éditions Prométhée). Il contribue depuis 2006 à *L'état de l'opinion*, la publication annuelle de TNS-Sofres.

Il enseigne à Paris I (Master communication politique et sociale) et au Celsa (communication des institutions publiques).

TRINK Claude

Claude Trink est ingénieur général des Mines et ancien élève de l'Ecole Polytechnique. Il a été jusqu'à récemment Commissaire à la réindustrialisation de la région Picardie. Il est Président d'un centre de

recherches appliquées sur les matériaux composites (PPE).

Au sein du Conseil général de l'Economie, de l'Industrie, de l'Energie et des Technologies (CGEIET), ses domaines d'intervention concernent le nucléaire civil, les énergies renouvelables, les processus d'innovation, ainsi que le développement économique des territoires.

VO VAN QUI Jean-Luc

Jean-Luc Vo Van Qui est ingénieur général des Mines, en poste au Conseil général de l'Economie, de l'Industrie, de l'Energie et des Technologies depuis 2008.

Diplômé de l'Ecole Polytechnique (promotion 1973), il débute sa carrière en tant qu'ingénieur de fond aux Houillères de Lorraine, puis rédacteur à l'US Environmental Protection Agency. En 1979, il est responsable du développement industriel et de la sécurité minière à la direction régionale de l'Industrie du Nord-Pas-de-Calais. En 1982, il devient l'adjoint pour la chimie du directeur des Industries chimiques, textiles et diverses au ministère de l'Industrie. En 1988, il est directeur régional de l'Industrie et de la Recherche de la région Picardie. En 1990, il revient au ministère de l'Industrie en qualité de responsable du Développement industriel et technologique régional. En 2002, il est nommé directeur des Technologies et Transferts sensibles au Secrétariat général de la Défense nationale.

FOR OUR ENGLISH-SPEAKING READERS

NUCLEAR POWER IN THE FUTURE

Issue editor: Claude Trink

Editorial

Pierre Couveinhes

Foreword

Claude Trink

Factors that shape the future

The perception in 2012 of nuclear risks in France: Before and after Fukushima

Emmanuel Rivière and Alain Delmestre

For the French Nuclear Safety Authority (ASN), the Fukushima catastrophe marked the year 2011. This major event reminds us that the risk of such an accident can never be eliminated regardless of how many precautions are taken. There is, quite clearly, a “before” and an “after” Fukushima. Owing to this catastrophe, fundamental questions arise that reach beyond the accident at Tepco’s plant in Japan. In this context, the ASN has a leading role to play by fostering not only accountability in matters related to nuclear safety and radiation but also a “risk culture” among citizens.

The prospects for nuclear safety

Sophie Mourlon

The 11 March 2011 accident at the Fukushima Daiichi nuclear power plant in Japan, after a violent earthquake followed by a tsunami, proves that, despite the precautions actually taken, an accident can never be left out of consideration, whence key questions ranging beyond the specific characteristics of the Fukushima reactors. According to the French Nuclear Safety Authority (ASN), drawing all the lessons from this catastrophe might take up to ten years, but is necessary for improving nuclear safety around the world. The ASN will be on watch, as it has been for other decisive factors that determine nuclear security, namely: the ageing of installations, the requirements to be applied to new reactors, research projects in the nuclear industry for developing a “fourth generation” of reactors, the coherency of the fuel cycle, the management of nuclear wastes and the dismantling of installations. In this context and regardless of the energy options retained, the ASN recalls that nuclear power must be safe. The accountability and independence of control authorities are of primordial importance.

The CEA’s role

Christophe Béhar

Given the growing scarcity of fossil fuels, the need for security in the energy supply and the necessity of limiting greenhouse gas emissions, it has become indispensable to have competitive, sustainable sources of energy, among them nuclear power. The French Commissariat à l’Énergie Atomique (CEA), a major player in the field of carbon-free energy, is trying to develop

such a source from the atom. Since its creation, the CEA has staked out a position at the crossroads between science and industry. In collaboration with corporate leaders and academics, it is working to improve the competitiveness of the existing park of nuclear facilities and to develop both a fourth generation of nuclear installations and procedures for processing spent fuel.

The ASTRID project

François Gauché

ASTRID, an acronym for “advanced sodium technology reactor for industrial demonstration”, refers to a prototype for a fast-neutron reactor that, cooled with sodium, breeds sufficient power for industrial purposes. It will be the first reactor of this sort in the world to meet the standards for “fourth-generation” nuclear reactors. This ambitious project, under a French act passed in June 2006 on the sustainable management of nuclear material and wastes, is preparing our country’s future in the energy field.

ITER, a key phase for placing fusion in the energy mix of the future

Jérôme Pamela and Sylvie André-Mitsialis

Energy is an issue in the spotlight, rightly so since it preoccupies public opinion. A new era has opened during which energy will be expensive in comparison with its cost since the start of the industrial revolution. It is, therefore, essential to conduct research on developing a new, safe and abundant, source of energy within the time span of a generation. Besides renewable sources of energy and atomic fission, fusion might, during this century, come to replace part of the worldwide consumption of electricity, which is now generated from fossil fuels. Representing more than half the planet’s population, 34 countries have joined efforts in the ITER project to clear the last hurdle to research on the mass production of a sustainable source of energy.

From basic science to social issues: The CEA’s role in atomic energy and alternative sources of energy

Daniel Iracane, Stanislas Pommeret and Elvire Leblanc

By force of circumstance, thoroughgoing changes are under way in the ways we consume and produce energy. R&D must respond to these changes by making technological innovations and proposing solutions that are safe, competitive, economic with regard to natural resources and respectful of the environment. The French Commissariat à l’Énergie Atomique Acteur (CEA) has a leading role to play...

The conclusions of “Énergies 2050”, a report on the prospects for nuclear energy in France

Jacques Percebois and Claude Mandil

Eric Besson, former minister of Industry, Energy and the Digital Economy, asked a committee to analyze the various possibilities for France’s energy policy in 2030 and beyond. The conclusions and recommendations are presented herein. With respect to the supply of electricity, this committee worked on four scenarios: *a)* maintaining the existing park of nuclear plants; *b)* accelerating the passage to the third or even fourth generation of nuclear reactors, *c)* gradually reducing the share of nuclear power; and *d)* closing down all nuclear power stations.

*Governance in nuclear power imagined for France***Charles-Antoine Louët and Timothée Furois**

Energy is a key to development. It helps satisfy basic needs, provide conveniences to human beings and sustain economic activities. It forces hard choices upon us however, since there is no ideal source of energy. The first article of the French Code of Energy sets four objectives for energy policy: guarantee the security of the energy supply, maintain a competitive price for energy, preserve the environment and human health (in particular by fighting against climate change), and safeguard the country's social and territorial cohesion by providing all citizens with access to energy. Nuclear power is a part of the country's energy policy. Public authorities oversee the conditions of its use while seeking to continually improve them. This is the objective of governance in the field of nuclear energy.

The nuclear industry: Momentum between diversified markets*Upstream in the nuclear industry's chain of production: Uranium mines and preparation of the fuel***Philippe Knoche**

Technological innovation lies at the core of the nuclear fuel cycle. The various phases for producing fuel involve a constantly evolving know-how and technology. Spent fuel is the outcome of a long period of developments, sophisticated simulations and ongoing feedback so as to optimize operations and the handling of accidents. As much can be said about current processes for producing nuclear fuel. Since the Fukushima calamity, the major issue for the coming years will be to guarantee a higher level of safety for both the personnel and general population. Optimizing productivity, ensuring a stable energy supply to customers and constantly lowering the environmental impact are still the fundamental determinants of the nuclear industry's future.

*A year after Fukushima: A panorama of the market for new reactors***Luc Oursel and Pierre Landau**

The nuclear accident in Fukushima has, once again, placed nuclear safety at the center of the preoccupations of the public, policy-makers and corporate leaders in the nuclear industry. Regardless of competitiveness-cost, of the advantages that nuclear power has as an independent source of energy and as a positive factor in the fight against global warming, this industry's future depends on setting steep safety requirements. To survive and thrive, the nuclear industry must be safe and transparent.

*The market for steam turbine generators around the world***Olivier Mandement, Philippe Anglaret and Patrick Ledermann**

As a discrete market (in the mathematical sens of the word) with irregular sales from one year to the next, the market for steam turbine generators in nuclear plants requires working out a strategy adapted to each project. The diversity of the reactors proposed (technology, thermal power, the thermodynamic characteristics of the steam supplied), the variety of the cold sources to be used (ranging from the Baltic

Sea to the Indian Ocean) and the different frequencies of electricity grids (50 or 60 Hz) necessitate developing platforms of solutions. Furthermore, the requirement that local businesses have a share in contracts often entails partnerships. After pointing out the diversity of this market, the effort is made to point out its principal characteristics.

*The stakes in managing radioactive waste***Fabrice Boissier**

Like any human activity, the nuclear industry produces wastes. The wastes containing radioactive substances have to be managed as a function of the related risks. Nowadays, 1,300,000 tons of radioactive wastes have accumulated in France. More than 90% of them have short half-lives and are stored on the ground by ANDRA (Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs). This national agency for managing radioactive wastes also designs solutions for stocking the other wastes. Those with long half-lives will be stored deep underground at Cigéo in the Meuse and Haute-Marne districts. Implementing a storage solution for each type of waste is necessary for the nuclear industry's sustainability, but it does not dispense the latter from pursuing its efforts to reduce the quantity and danger of the wastes produced. This holds in particular for the so-called "fourth generation" of future installations. It is important to take stock of all the issues related to managing nuclear waste.

*The Cigéo project***Thibaud Labalette**

Cigéo is a deep geological site designed for stocking the most radioactive nuclear wastes in a layer of clay shale dating from 160 million years ago and located in the commune of Bure. The Laboratoire Souterrain de Recherche de Meuse/Haute-Marne conducted the geological study. These wastes mainly come from nuclear power stations and the reprocessing of spent fuel.

*Managing the wastes coming from the demolition of a growing number of nuclear power plants is still to be optimized***Bruno Cahen**

Dismantling the nuclear facilities that went into service during the 1980s and 1990s is a major issue for the coming twenty years. The National Agency for Managing Radioactive Wastes (ANDRA) has the task of designing and implementing solutions for the long-term management of radioactive wastes. These solutions should protect the population and environment in the short and long runs while offering to the producers of wastes favorable economic conditions for stocking them.

Which industrial model for the future?*Generalities about nuclear reactors***Claude Jaouen and Pierre Bérour**

From Zoé, the first nuclear fuel rod, till the current EPR, the nuclear industry has always advanced by profiting from the feedback from dozens of years of experience and operations, in particular by drawing lessons from the most significant events in its history, such as the Fukushima accident. The new generations of reactors must improve

safety and economic performance so that the industry maintain its legitimacy and its share in the production of electricity.

The ATMEA1 reactor

Philippe Namy

ATMEA1 is a new 1100 MWe pressurized water reactor for all types of electricity grids in the mid-power range. Its design has incorporated the best technology used for third-generation reactors. ATMEA1 meets up to the latest safety requirements.

Small modular reactors

Jean-Michel Delbecq

Small modular reactors (SMRs) are nuclear reactors of less than 300 megawatts (MWe). The modules are built in a factory and then shipped to the site for assembly. Reactors can be built in isolated units or in modules that are assembled to form a multimodular power plant with a higher output in megawatts. Although SMRs have not yet won the electricity production battle, several projects are under development, notably in Russia and in the United States, where there is what we might call an infatuation with them. The maturest SMRs are pressurized water reactors that could be deployed in the early 2020s. SMR supporters emphasize the savings, the “passive” safety and the flexibility with respect to: investments, adaptation to the demand for electricity and management of electricity grids. When these different points are analyzed, SMRs, in particular, the deployment of multimodular power stations, turn out to be worthy of attention.

The AP1000 reactor

François Harari and Carole Chauvin

The past year has been hard on the nuclear industry, in particular on the firms trying to build new plants. Needless to mention the March 2011 events at Fukushima in Japan, which will have an impact on all plans for nuclear facilities around the world for years to come. The AP1000 projects in China and the United States have not been interrupted even though the regulatory inspections during construction have become stricter — evidence of the legitimate preoccupations of both the public and authorities. Although decisions have been

adopted about the future technology, Westinghouse is convinced that the AP1000’s “passive” safety makes it more attractive. Let us not forget that Westinghouse was at the origin of the concept of pressurized water reactors, an idea adopted for half the nuclear power stations in the world and for all the plants now active in France.

What are, in France, the prospects for building big components for nuclear power plants?

Claude Trink and Jean-Luc Vo Van Qui

France has maintained an industry for building major components for nuclear power plants despite the slowdown in new orders since the Chernobyl disaster. The Fukushima accident, which occurred as the industry was preparing for a new spurt of growth, has led some governments to review policies for developing nuclear energy. This industry’s future is now under discussion...

Nuclear power: Which industrial approach will preserve a French asset?

Hervé Machenaud

France’s strategic decision in favor of nuclear energy in the 1970s has given rise to an organization of this industry with clearly defined roles and responsibilities for all parties. This is a wager for controls and safety, assets that enable the French nuclear industry to be present on the international scene and thus maintain its know-how and capacities.

The Pôle Nucléaire Bourgogne for developing the nuclear components industry

Gérard Kottmann

The Pôle Nucléaire Bourgogne is a “competitive pole” – high-technology cluster – in Burgundy with an international calling. It aims at innovating, educating and federating in order to place the French nuclear industry in a leading position while fostering a cross-fertilization between high-tech industries (aeronautics, energy, transportation).

AN UNSERE DEUTSCHSPRACHIGEN LESER

DIE ATOMENERGIE DER ZUKUNFT

Koordinierung der Beiträge von Claude Trink

Leitartikel

Pierre Couveinhes

Vorwort

Claude Trink

Strukturierende Faktoren für die Zukunft

Die Wahrnehmung des atomaren Risikos in Frankreich im Jahr 2012 : „ Es gibt ein Vor-Fukushima und ein Nach-Fukushima“

Emmanuel Rivière und Alain Delmestre

Für die französische Behörde für nukleare Sicherheit (*Autorité de sûreté nucléaire*), ASN, wurde das Jahr 2011 durch die Nuklearkatastrophe von Fukushima geprägt. Dieses verheerende Unglück zeigt, dass trotz der Vorsichtsmaßnahmen ein Unfall nie ausgeschlossen werden kann. Fest steht, es gibt ein „Vor-Fukushima“ und ein „Nach-Fukushima“. Tatsächlich stellen sich angesichts dieses Ereignisses grundsätzliche Fragen, die weit über den Unfall des Kraftwerks der Gesellschaft Tepco in Japan hinausgehen.

In dieser Sachlage kommt der ASN eine entscheidende Rolle zu, denn sie hat nicht nur die Entwicklung einer höheren Transparenz in Fragen der nuklearen Sicherheit und des Strahlenschutzes, sondern auch die Schaffung einer Risikokultur in der französischen Gesellschaft zu fördern.

Die Aussichten hinsichtlich der atomaren Sicherheit

Sophie Murlon

Der Unfall, der am 11. März 2011 im Kraftwerk von Fukushima Daiichi in Japan infolge eines Tsunamis nach einem heftigen Erdstoß geschah, bestätigt, dass trotz aller Vorsichtsmaßnahmen ein Unfall nie ausgeschlossen werden kann, und dies wirft grundsätzliche Fragen auf, die weit über die Besonderheiten der Reaktoren von Fukushima hinausweisen.

In Frankreich ist die Behörde für nukleare Sicherheit, ASN, der Auffassung, dass die Auswertung der Lehren aus dieser Katastrophe bis zu zehn Jahren dauern könnte, und dass sie notwendig ist, um die atomare Sicherheit weltweit zu verbessern. Dieses Ziel gehört ebenso zu ihrem Aufgabenbereich wie die übrigen Themen, die für die atomare Sicherheit von strukturierender Bedeutung sind : das Altern der Anlagen, die Anforderungen an die neuen Reaktoren, die Forschungsprojekte zur Entwicklung einer „vierten Generation“ von Reaktoren, die Kohärenz des Kernbrennstoffkreislaufs, die Endlagerung des Atommülls und der Rückbau der Anlagen. In diesem Zusammenhang - und welche energetischen Programme auch immer beschlossen werden mögen - besteht die ASN darauf, dass Atomenergie, wenn sie denn genutzt werden soll, auch sicher sein muss, und dass in dieser Hinsicht die Transparenz und Unabhängigkeit der Kontrolle von fundamentaler Bedeutung sind.

Die Rolle des Commissariat à l'énergie atomique (CEA)

Christophe Béhar

In einem Kontext der Verknappung von fossilen Ressourcen und angesichts der Notwendigkeit, die Versorgungssicherheit

zu gewährleisten und die Emission von Treibhausgasen zu begrenzen, erweist es sich als unumgänglich, über wettbewerbsfähige und nachhaltige Energiequellen zu verfügen, zu denen die Atomenergie gehört.

Als bedeutender Akteur auf dem Gebiet der kohlenstofffreien Energiequellen widmet sich das CEA der Aufgabe, im Nuklearsektor eine nachhaltige und wettbewerbsfähige Energie zu entwickeln.

Seit seiner Gründung nimmt das CEA seinen Platz im Schnittpunkt zwischen Wissenschaft und Industrie ein. In Zusammenarbeit mit Industriellen und Forschern arbeitet es an der Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit des gegenwärtigen Bestands an Kernkraftanlagen, an der Entwicklung der nuklearen Systeme der vierten Generation und an den Verfahren zur Wiederaufbereitung verbrauchter Brennelemente.

Das Projekt ASTRID

François Gauché

ASTRID ist das Akronym aus *Advanced Sodium Technology Reactor for Industrial Demonstration*. Es handelt sich also um einen Prototyp des natriumgekühlten Reaktors schneller Neutronen, der von ausreichender Leistungskraft ist, um repräsentativ für einen industriellen Elektrizitätserzeuger zu sein. Er ist der erste dieses Typs in der Welt, der die Kriterien der vierten Generation von Kernreaktoren erfüllt. Es ist ein ehrgeiziges Projekt, das im Rahmen des französischen Gesetzes vom Juni 2006 zum nachhaltigen Umgang mit nuklearem Material und Atommüll verwirklicht wird.

ITER : eine entscheidende Etappe zur Eingliederung der Kernfusion in den Energiemix der Zukunft

Jérôme Pamela und Sylvie André-Mitsialis

Die Energiefrage ist von entscheidender Bedeutung und es ist legitim, dass sie die Öffentlichkeit stark beschäftigt. Eine neue Ära hat begonnen, in der die Energie im Vergleich zu den Energiekosten seit dem Beginn des Industriezeitalters teurer sein wird. Aus diesem Grund ist es wichtig, innerhalb eines Zeitraums von höchstens einer Generation nach der Erschließung einer neuen, sicheren und ergiebigen Energiequelle zu suchen.

Neben den erneuerbaren Energien und der Kernspaltung könnte die Kernfusion im Laufe dieses Jahrhunderts dazu beitragen, einen Teil des weltweiten Energieverbrauchs zu ersetzen, der heute durch fossile Brennstoffe gewährleistet wird. 34 Länder, die mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung repräsentieren, haben sich zur Zusammenarbeit entschlossen, um das Ziel der letzten Etappe der Forschung zu erreichen, die zur Produktion von reichlicher und nachhaltiger Energie im Rahmen des ITER-Projekts führen soll.

Von der wissenschaftlichen Grundlagenforschung zu den gesellschaftlichen Herausforderungen : die Rolle des Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (Commissariat für Atomenergie und alternative Energien)

Daniel Iracane, Stanislas Pommeret und Elvire Leblanc

Unter dem Zwang der Verhältnisse vollziehen sich tief greifende Veränderungen in unserer Art, Energie zu verbrauchen und zu produzieren. Die Akteure der Forschung

und Entwicklung auf diesem Gebiet müssen auf diese Notwendigkeiten mit technologischen Innovationen antworten und energetische Lösungen vorschlagen, die sicher, wettbewerbsfähig, sparsam im Ressourcenverbrauch und umweltfreundlich sind.

Die Ergebnisse des Energieberichts 2050 über die Perspektiven der Atomenergie in Frankreich

Jacques Percebois und Claude Mandil

Dieser Artikel stellt die Ergebnisse und Empfehlungen der Kommission vor, die von Eric Besson, dem Minister für Industrie, Energie und numerische Ökonomie, damit beauftragt wurde, die verschiedenen möglichen Szenarien für die französische Energiepolitik bis 2030 und darüber hinaus zu analysieren.

Hinsichtlich des Stromangebots hat diese Kommission über vier mögliche Entwicklungen nachgedacht : a) die Verlängerung des Betriebs der aktuellen Atomkraftwerke, b) die Beschleunigung des Übergangs zur dritten Generation der Kernreaktoren oder sogar zur vierten Generation, c) eine allmähliche Reduzierung der Kernenergienutzung und schließlich d) das Szenario eines vollständigen Ausstiegs aus der Atomstromproduktion.

Energiepolitische Regierungskunst für Frankreich

Charles-Antoine Louët und Timothée Furois

Energie ist ein zentraler Entwicklungsfaktor. Sie trägt zur Befriedigung der lebenswichtigen Bedürfnisse, zum Wohlergehen der Menschen und zur Unterstützung der wirtschaftlichen Tätigkeit bei. Sie zwingt uns auch zu schwierigen Entscheidungen, denn eine ideale Energie gibt es nicht. Der erste Artikel des *Code de l'énergie* legt die vier Ziele der französischen Energiepolitik fest : die Garantie der Versorgungssicherheit, die Sicherung eines wettbewerbsfähigen Energiepreises, der Schutz der menschlichen Gesundheit und der Umwelt (insbesondere der Kampf gegen die Verschlimmerung des Klimawandels) und die Bewahrung des gesellschaftlichen und territorialen Zusammenhalts durch die Gewährleistung des Zugangs zur Energie für alle.

Die Kernenergie ist einer der Bestandteile der französischen Energiepolitik. Die Staatsorgane bestimmen die Nutzungsbedingungen, indem sie für ihre ständige Verbesserung zugunsten der Bevölkerung Sorge tragen. Dies ist das Ziel der Regierungskunst im Bereich der Kernenergie.

Der nuklearsektor : eine dynamik zwischen diversifizierten märkten

Zu den Voraussetzungen der Atomwirtschaft (Uranbergwerke und Aufbereitung des Brennstoffs)

Philippe Knoche

Die technologische Innovation ist für den Kernbrennstoffkreislauf wesentlich. Die verschiedenen Etappen, die zur Aufbereitung der Brennelemente führen, beruhen auf einem Know-how und auf Technologien, die einer beständigen Entwicklung unterliegen. Heute sind die abgebrannten Brennelemente das Ergebnis einer langen Periode von Entwicklungen, von hochspezialisierten Modellierungen und von beträchtlichem Erfahrungswissen. Ihre Eigenschaften sind sowohl auf operationeller Ebene als

auch hinsichtlich störfallbedingter Zufälle optimiert. Dasselbe gilt für die gegenwärtigen Aufbereitungsverfahren.

In einem Post-Fukushima-Kontext wird die Hauptaufgabe für die kommenden Jahre darin bestehen, ein immer höheres Sicherheitsniveau für die in der Atomwirtschaft Beschäftigten und für die Bevölkerung zu garantieren. Die Optimierung der Leistungsfähigkeit, die Gewährleistung der Versorgungssicherheit für die Verbraucher und die fortschreitende Verringerung der Auswirkungen auf die Umwelt bleiben die grundsätzlichen Leitlinien für die Zukunft der Nuklearindustrie.

Ein Jahr nach Fukushima, ein Überblick über die Märkte neuer Reaktoren

Luc Oursel und Pierre Landau

Der atomare Unfall von Fukushima hat die nukleare Sicherheit wieder ins Zentrum der Besorgnisse der öffentlichen Meinung, der politischen Entscheidungsträger und der Kraftwerksbetreiber gerückt. Unabhängig von der Relation zwischen Kosten und Wettbewerbsfähigkeit, unabhängig von den Vorteilen hinsichtlich der Unabhängigkeit in Energiefragen und unabhängig von dem Beitrag zum Kampf gegen die Klimaerwärmung hat die Atomenergie nur Zukunft, wenn sie den höchsten Sicherheitsanforderungen genügt. Für ihren Fortbestand muss der Nuklearsektor sicher und transparent sein.

Die weltweiten Märkte der herkömmlichen Inseln

Olivier Mandement, Philippe Anglaret und Patrick Ledermann

Als diskreter Markt im mathematischen Sinne dieses Ausdrucks mit einem von Jahr zu Jahr unregelmäßigen Geschäftsvolumen verlangt der Markt der herkömmlichen Kraftwerksinseln die Entwicklung einer besonderen Strategie für jedes Projekt. Die Verschiedenartigkeit der vorgeschlagenen Reaktoren (Technologie, Wärmeleistung, thermodynamische Eigenschaften des erzeugten Dampfes), die Vielfalt der kalten Quellen, die ausgenutzt werden müssen (von der Ostsee bis zum Indischen Ozean) und die Frequenzunterschiede der verschiedenen zu speisenden Stromnetze (50 Hz oder 60 Hz) erfordern die Entwicklung wahrer Lösungsstrategien. Hinzu kommen die Erfordernisse lokaler Marktanteile in gewissen Verträgen, sodass es oft notwendig ist, Partnerschaften mit lokalen Akteuren einzugehen. Angesichts der Vielgestaltigkeit dieses Marktes müssen wir jedoch versuchen, die Hauptcharakteristika herauszustellen.

Die Herausforderungen im Umgang mit dem radioaktiven Abfall

Fabrice Boissier

Wie jede menschliche Tätigkeit erzeugen die mit der Kerntechnik verbundenen Tätigkeiten auch Abfälle. Ein Teil dieser Abfälle enthält radioaktive Substanzen und muss deshalb durch ein Management entsorgt werden, das den entstehenden Risiken entspricht. Heute gibt es in Frankreich 1 300 000 Tonnen radioaktiver Abfälle. Für mehr als 90 % unter diesen handelt es sich um so genannte kurzlebige Abfälle, die heute in oberflächennahen Endlagern der *Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs, Andra*, aufbewahrt werden. *Andra* konzipiert Lagermöglichkeiten für die anderen Abfälle. Für die hochradioaktiven und langlebigen Abfälle ist eine tiefe geologische Lagerlösung, *Cigéo*, in den Departements Maas, Haute Marne vorgesehen. Die Einrichtung von Endlagern für jeden Abfalltyp ist natürlich eine notwendige Bedingung, um aus der Kerntechnik eine

nachhaltige Industrie zu machen, doch entbindet dies die gesamte Nuklearwirtschaft nicht davon, ihre Bemühungen zur Verminderung der Quantität und der Gefährlichkeit der erzeugten Abfälle fortzusetzen. Dies trifft besonders auf die zukünftigen Anlagen zu, die entwickelt werden könnten (die sogenannte vierte Generation) : es ist wichtig, schon heute das ganze Ausmaß der Herausforderungen bewusst zu machen, die auf das Entsorgungsmanagement zukommen.

Das Projekt Cigéo

Thibaud Labalette

Das geologische industrielle Endlager *Cigéo* ist dazu vorgesehen, die Entsorgung des radioaktivsten französischen Atommülls in einer Schicht des Callovo-Oxfordium Tonsteins (der 160 Mio Jahre zurückreicht) zu ermöglichen, die im Untergrund der Gemeinde Bure liegt (eine Schicht die von dem unterirdischen Labor *Laboratoire souterrain de recherche de Meuse/Haute-Marne* erforscht wurde). Die radioaktiven Abfälle kommen hauptsächlich aus Atomkraftwerken und Wiederaufbereitungsanlagen.

Die Entsorgung von Abfällen aus dem Rückbau nukleartechnischer Anlagen, ein Wachstumssektor, der optimiert werden muss

Bruno Cahen

Der Rückbau von kerntechnischen Anlagen, die in den 1980er und 1990er Jahren in Betrieb genommen wurden, wird in den kommenden zwanzig Jahren eine große Herausforderung darstellen. In diesem Zusammenhang ist die *Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs, Andra*, damit beauftragt, langfristige Lösungen für die Entsorgung von radioaktiven Abfällen zu entwickeln und durchzuführen, die kurz- und langfristig den Schutz der Bevölkerungen und der Umwelt gewährleisten und gleichzeitig den Kunden, die ihre Abfälle entsorgen wollen, die besten wirtschaftlichen Bedingungen für die Übernahme dieser Aufgabe bieten.

Welches industriemodell für die zukunft ?

Allgemeines zu den Atomreaktoren

Claude Jaouen und Pierre Béroux

Vom ersten französischen Kernreaktor, *Zoé*, bis zum EPR-Reaktor der Gegenwart hat die Atomindustrie stets Fortschritte gemacht, indem sie aus dem Erfahrungswissen, das im Laufe von Jahrzehnten akkumuliert wurde, Nutzen zog, insbesondere aus den Lehren der bedeutendsten Ereignisse ihrer Geschichte, wie es der nukleare Unfall von Fukushima war.

Die neuen Reaktorgenerationen müssen sowohl die erhöhten Sicherheitsanforderungen als auch wirtschaftliche Leistungskraft miteinander vereinbaren, um die Legitimität der Kernkraft und ihre Bedeutung im Energiemix für die Stromproduktion sichern zu können.

Der Reaktor ATMEA1

Philippe Namy

Der Reaktor ATMEA1 ist ein Druckwasserreaktor von 1 100 MWe, der für alle Netztypen bestimmt ist, insbesondere für Stromnetze mittlerer Leistung.

Seine Bauart beruht auf den besten Technologien für die Reaktoren der dritten Generation und dieser Reaktor

entspricht den neuesten heute geltenden Sicherheitsanforderungen.

Die kleinen modularen Reaktoren (SMR)

Jean-Michel Delbecq

Die SMR (*Small Modular Reactors*) sind Kernreaktoren, deren Leistung unter 300 MWe liegt. Sie werden in einem Fertigungswerk in Form von Modulen hergestellt, die anschließend zum Standort transportiert und dort zusammengebaut werden. Diese Reaktoren können als einzelne gebaut (als eine Einheit) oder als zusammengesetzte Module, die ein so genanntes Multi-Modul-Kraftwerk von großer Leistung ergeben.

Die SMR haben zwar die Sphäre der Stromproduktion noch nicht erobert, doch nichtsdestoweniger existieren zahlreiche Entwicklungsprojekte (insbesondere in den USA und in Russland). Die ausgereiftesten SMR-Modelle sind Wasserdruckreaktoren, deren Verbreitung ab 2020 in Betracht gezogen werden könnte.

Die Bauträger dieser kleinen Reaktoren, für die in den USA großes Interesse besteht, loben ihre Wirtschaftlichkeit, ihre passive Sicherheit und ihre Flexibilität bezüglich der Investition, der Anpassungsfähigkeit an die Stromnachfrage und des Stromnetzmanagements. Die Analyse dieser verschiedenen Punkte zeigt, dass die kleinen Reaktoren besondere Aufmerksamkeit verdienen, insbesondere der Bau von Multi-Modul-Kraftwerken.

Der Reaktor AP1000

François Harari und Carole Chauvin

Das zurückliegende Jahr war für die Atomwirtschaft schwierig, insbesondere für die Unternehmen, die neue Kraftwerke zu bauen gedenken. Es erübrigt sich, an die Geschehnisse von Fukushima, in Japan, vom März 2011 zu erinnern. Diese werden unter verschiedensten Formen auf Jahre hinaus Auswirkungen auf sämtliche atomare Projekte in der ganzen Welt haben. Was die Projekte AP1000 in China und in den Vereinigten Staaten angeht, ist es zu keiner Unterbrechung gekommen, auch wenn die Überprüfungen, die in der Konstruktionsphase nach den Bauvorschriften vorgenommen werden, strenger geworden sind, um den legitimen Besorgnissen der Öffentlichkeit und der Sicherheitsbehörden zu entsprechen. Während die Entscheidungen zur zukünftigen Technologie schon getroffen sind, ist *Westinghouse* davon überzeugt, dass die Eigenschaften von AP1000 hinsichtlich der passiven Sicherheit in Zukunft noch attraktiver sind. Vergessen wir nicht, dass das Konzept des Wasserdruckreaktors von *Westinghouse* stammt und für die Hälfte der Atomkraftwerke in der Welt übernommen wurde und für alle heute in Betrieb befindlichen französischen Kraftwerke bestimmend war.

Welche Aussichten bestehen in Frankreich für den Bau von großen Bauteilen für die Atomkraftwerke ?

Claude Trink und Jean-Luc Vo Van Qui

Frankreich hat sich mit einer Industrie zum Bau von großen Bauteilen für Atomkraftwerke ausgerüstet und hat sich trotz des Rückgangs der Aufträge nach dem Unfall von Tschernobyl entschlossen für den Fortbestand dieser Tätigkeit ausgesprochen. Nach dem Unfall von Fukushima, der zu einem Zeitpunkt geschah, als alle Industriellen sich auf eine Wiederbelebung dieses Sektors vorbereiteten, und der gewisse Regierungen dazu veranlasste, die Perspektiven der

Entwicklung der Atomenergie zu überdenken, erhebt sich nunmehr die Frage der Zukunft dieser Industrie.

Kernenergie : welche industrielle Strategie ist nötig, um den französischen Trumpf zu bewahren ?

Hervé Machenaud

Die Strategie Frankreichs, sich in den 1970er Jahren für die Kernenergie zu entscheiden, schuf die Grundlagen für die Entwicklung einer Fertigungsorganisation, die dank der klaren Definition der Rollen und Verantwortlichkeiten der verschiedenen Akteure ein Beweis für industrielle Beherrschung und für Sicherheit in diesem Sektor ist.

Es sind Trümpfe, die es der französischen Atomindustrie erlauben, auf internationaler Ebene eine wichtige Rolle spielen

und somit ihr Know-how und ihre industriellen Kapazitäten bewahren zu können.

Der Pôle Nucléaire Bourgogne : ein Zusammenschluss von Energien zur Entwicklung einer Industrie nuklearer Komponenten

Gérard Kottmann

Der *Pôle Nucléaire Bourgogne* ist ein Kompetenzzentrum von globaler Bedeutung. Er hat den Ehrgeiz, zu innovieren, auszubilden und zu vereinigen, um dauerhaft die führende Position des französischen Nuklearsektors zu stärken und um gleichzeitig die wechselseitige Entfaltung von industriellen Sektoren von hochgradigem technischen Charakter zu fördern (Luftfahrt, Energie, Verkehrswesen).

A NUESTROS LECTORES DE LENGUA ESPAÑOLA

EL SECTOR NUCLEAR DEL FUTURO

El dossier fue coordinado por Claude Trink

Editorial

Pierre Couveinhes

Prefacio

Claude Trink

Eventos que influyen en el futuro

La percepción del riesgo nuclear en Francia, en 2012. "Existe un antes y después de Fukushima"

Emmanuel Rivière y Alain Delmestre

Para la Autoridad francesa de Seguridad Nuclear (ASN), el año 2011 se vio marcado por el accidente nuclear de Fukushima. Este grave accidente demostró que a pesar de las precauciones que se pueden tomar, los accidentes no se pueden excluir por completo. Es evidente que hay un "antes de Fukushima" y un "después de Fukushima." De hecho, este accidente plantea cuestiones fundamentales que van mucho más allá del accidente que se produjo en las instalaciones de la empresa Tepco en Japón.

En este contexto, la ASN debe desempeñar un papel preponderante, no sólo a favor del desarrollo de la transparencia en materias de seguridad nuclear y protección radioactiva, sino también del desarrollo de la cultura del riesgo entre la población francesa.

Las perspectivas en materias de seguridad nuclear

Sophie Mourlon

El accidente ocurrido el 11 de marzo de 2011 en la central nuclear de Fukushima Daiichi, en Japón, como consecuencia de un fuerte terremoto seguido por un tsunami, confirma que a pesar de las precauciones tomadas, los accidentes no se pueden excluir nunca. Esto plantea cuestiones fundamentales que van mucho más allá de las características particulares de los reactores de Fukushima.

En Francia, la Autoridad de Seguridad Nuclear (ASN) considera que es indispensable analizar todas las lecciones dejadas por este desastre, lo que podría tardar hasta diez años, para poder mejorar la seguridad nuclear en todo el mundo. La Autoridad se encargará de ello, como lo hace con otros temas importantes para la seguridad nuclear: el envejecimiento de las instalaciones, los requisitos aplicables a los nuevos reactores, los proyectos de investigación en el sector para el desarrollo de la "cuarta generación" de reactores, la coherencia del ciclo del combustible, la gestión de los residuos nucleares y el desmantelamiento de las instalaciones. En este contexto, y cualesquiera que sean los escenarios energéticos seleccionados, la ASN recuerda que la energía nuclear debe ser segura, y que para ello, la transparencia y la independencia del control tienen una importancia fundamental.

El papel del Comisariato francés para la Energía Atómica (CEA)

Christophe Béhar

En un contexto de rarefacción de combustibles fósiles y frente a la necesidad de garantizar la seguridad del abastecimiento y limitar las emisiones de gases de efecto invernadero, es necesario contar con fuentes de energía competitivas y sostenibles, entre las que se encuentra la energía nuclear.

Actor importante en el campo de las energías libres de carbono, el CEA trata de desarrollar una energía sostenible y competitiva en el campo nuclear.

Desde su creación, el trabajo del CEA oscila entre la ciencia y la industria. De esta forma, en colaboración con los industriales y científicos, trata de mejorar la competitividad del parque nuclear existente, desarrollar sistemas nucleares de 4ª generación y optimar los procesos para el reprocesamiento del combustible usado.

El proyecto ASTRID

François Gauché

ASTRID es la sigla en inglés del Reactor avanzado con tecnología de sodio para la demostración industrial. Se trata de un prototipo de reactor de neutrones rápidos (RNR) enfriado con sodio, de una potencia suficiente para poder ser considerado como un demostrador electrógeno industrial. Será el primero de su tipo en el mundo que cumple con los criterios de la 4ª generación de reactores nucleares. Se trata de un ambicioso proyecto que se inscribe en el marco de las operaciones previstas por la ley francesa de junio de 2006 sobre la gestión sostenible de las materias y residuos nucleares. De esta forma se prepara el futuro energético francés.

El Reactor Termonuclear Experimental Internacional (ITER). Una etapa clave para incluir la fusión en las energías del futuro

Jérôme Pamela y Sylvie André-Mitsialis

La cuestión energética se encuentra a menudo entre las primeras preocupaciones de la opinión pública. Una nueva era ha comenzado en la que la energía costará más dinero, en comparación con su coste desde los inicios de la era industrial. Esto hace que la investigación sobre el desarrollo de nuevas fuentes de energía, segura y abundante, sea indispensable, a más tardar para la próxima generación.

Junto a las energías renovables y la fisión nuclear, en el nuevo siglo la fusión podría ayudar a reemplazar una parte del consumo mundial de electricidad, actualmente producida con combustibles fósiles. Treinta y cuatro países que representan más de la mitad de la población del planeta unen sus esfuerzos para dar el último paso en la investigación para la producción masiva y sostenible de energía en el contexto del proyecto ITER.

De las ciencias fundamentales a los problemas de sociedad. El papel del Comisariato francés de energía atómica y de energías alternativas

Daniel Iracane, Stanislas Pommeret y Elvire Leblanc

Por la fuerza de las circunstancias, se están realizando cambios profundos en nuestros modos de consumo y producción de energía. Los actores de I + D en este campo deben responder

a estas necesidades mediante la innovación tecnológica, proponiendo soluciones energéticas seguras, competitivas, económicas en recursos naturales y protectoras del medio ambiente.

Las conclusiones del informe Energies 2050 sobre las perspectivas del sector nuclear en Francia

Jacques Percebois y Claude Mandil

Este artículo presenta las conclusiones y recomendaciones de la Comisión encargada por Eric Besson, Ministro de Industria, Energía y Economía Digital, del análisis de las diferentes posibilidades para las políticas energéticas de Francia para el año 2030 y más allá.

En el campo del suministro de electricidad, esta comisión ha trabajado en torno a cuatro escenarios de desarrollo: a) la prolongación del funcionamiento de los reactores nucleares existentes, b) el aceleramiento de la transición a la tercera generación de reactores nucleares, incluso a la cuarta generación, c) una reducción gradual de la energía nuclear y, finalmente, d) un abandono completo de la energía nuclear.

El modo de gestión del sector nuclear adoptado en Francia

Charles-Antoine Louët y Timothée Furois

La energía es un elemento esencial para el desarrollo: ayuda a satisfacer las necesidades básicas y la comodidad de los seres humanos al mismo tiempo que apoya la actividad económica. Pero nos impone también decisiones difíciles, ya que no existe una fuente de energía ideal. El primer artículo del Código de Energía francés establece los cuatro objetivos de su política energética: garantizar la seguridad del suministro, mantener precios competitivos, proteger la salud de la población y el medio ambiente (especialmente evitando el agravamiento del cambio climático) y fomentar la cohesión social y territorial, garantizando el acceso a la energía a toda la población.

La energía nuclear es un componente de la política energética de Francia. El gobierno reglamenta sus condiciones de uso, prestando la debida atención a la mejora continua en beneficio de los ciudadanos. Tal es el objetivo de la gestión de la energía nuclear en Francia.

El sector nuclear, una dinámica entre mercados diversificados

Minas de uranio y preparación del combustible, los elementos precursores de la energía nuclear

Philippe Knoche

La innovación tecnológica es crucial para el ciclo del combustible nuclear. Las diferentes etapas que conducen a la fabricación de combustible implican conocimientos y tecnologías en constante evolución. Los combustibles utilizados en la actualidad son el resultado de un largo periodo de desarrollo, de modelizaciones muy precisas y de un retorno de experiencia exhaustivo. Estos combustibles tienen características óptimas, tanto a nivel operativo como accidental. Lo mismo sucede con los procesos de fabricación actuales.

En un contexto post-Fukushima, el principal desafío para los próximos años será garantizar un nivel de seguridad cada vez más alto tanto para el personal del sector como para la población. Maximizar la productividad, garantizar la estabilidad del suministro a los clientes y reducir constantemente el impacto sobre el medio ambiente siguen

siendo requisitos fundamentales para el futuro de la industria nuclear.

Un año después de Fukushima, panorama del mercado de los nuevos reactores

Luc Oursel y Pierre Landau

El accidente nuclear de Fukushima ha reposicionado la seguridad nuclear como una de las primeras preocupaciones de la opinión pública, de los responsables políticos y de los industriales del sector. Sin importar la relación competitividad/costes, sus beneficios en términos de independencia energética o su contribución a la lucha contra el calentamiento global, la energía nuclear sólo tiene un futuro si se respetan las más altas exigencias de seguridad. Para garantizar su perennidad, la energía nuclear debe ser segura y transparente.

El mercado de los islotes convencionales en el mundo

Olivier Mandement, Philippe Anglaret y Patrick Ledermann

El mercado de los islotes convencionales de centrales nucleares, mercado discreto en el sentido matemático de la palabra, con un volumen de negocios irregular de un año a otro, requiere el desarrollo de una estrategia específica para cada proyecto. La diversidad de los reactores propuestos (tecnología, potencia térmica, características termodinámicas del vapor suministrado), variedad de fuentes disipadoras que se deben explotar (del Mar Báltico al Océano Índico) y las diferentes frecuencias de las redes eléctricas por alimentar (50 o 60 Hz) necesitan el desarrollo de verdaderas plataformas de soluciones. Además, los requisitos de cuotas de mercado locales en ciertos contratos requieren a menudo la creación de alianzas con actores locales.

Tras identificar la diversidad de este mercado, el artículo trata de identificar sus principales características.

Los problemas de la gestión de los residuos radioactivos

Fabrice Boissier

Al igual que cualquier actividad humana, las actividades nucleares producen residuos. Algunos de estos residuos contienen materiales radiactivos y deben ser objeto de una gestión adecuada de riesgos. Actualmente, 1'300.000 toneladas de residuos radiactivos existen en Francia. Más del 90% de ellos son residuos de vida corta, que por el momento se almacenan en almacenes de superficie de la Andra (Agencia Nacional para la Gestión de Residuos Radioactivos). Este organismo diseña soluciones de almacenamiento para los demás residuos. Para los residuos más radioactivos y de larga vida, existe el proyecto de almacenamiento geológico profundo CIGEO, en el departamento de Meuse/Haute-Marne. Implementar una solución de almacenamiento para cada tipo de residuo final es un requisito previo para que el sector nuclear sea una industria sostenible, pero esto no exime a toda la industria nuclear de continuar sus esfuerzos para reducir la cantidad y peligrosidad de los residuos producidos. Esto es particularmente cierto para las instalaciones futuras que podrían crearse (llamadas de 4ª generación). Es importante tener en cuenta, desde ahora, todos los problemas relacionados con la gestión de sus residuos.

El proyecto Cigeo

Thibaud Labalette

El centro industrial de almacenamiento geológico CIGEO está diseñado para permitir el almacenamiento de los residuos franceses más radiactivos en una capa de argilita callovo-

oxfordiana (de hace 160 millones de años) en el subsuelo de la ciudad de Bure (una capa estudiada gracias al laboratorio subterráneo de Investigación del departamento de Meuse/Haute-Marne). Estos residuos radioactivos provienen principalmente de las centrales nucleares y de reutilización del combustible usado.

La gestión de los residuos provenientes del desmantelamiento de instalaciones nucleares, una actividad creciente que se debe mejorar

Bruno Cahen

El desmantelamiento de instalaciones nucleares puestas en servicio en los años 1980 y 1990 será un tema importante en los próximos veinte años.

En este contexto, la misión de la Andra es diseñar, instaurar e implementar soluciones a largo plazo para la gestión de residuos radiactivos con el fin de garantizar la protección de la población y del medio ambiente, tanto a corto como a largo plazo, brindando al mismo tiempo a sus clientes productores de residuos las mejores condiciones económicas posibles.

Modelos industriales para el futuro

Generalidades sobre los reactores nucleares

Claude Jaouen y Pierre Bérour

Desde la primera pila nuclear francesa, Zoe, hasta el EPR de hoy en día, la industria nuclear ha progresado siempre aprovechando el retorno de experiencia adquirida a lo largo de varias décadas de funcionamiento; en especial aprendiendo de los hechos más importantes de su historia, como el accidente nuclear de Fukushima.

Las nuevas generaciones de reactores deben tratar de mejorar la seguridad y aumentar el rendimiento económico para que el sector nuclear pueda mantener su legitimidad y valor entre los diferentes tipos de generación de electricidad.

El reactor ATMEA1

Philippe Namy

El reactor ATMEA1 es un modelo a agua presurizada de 1.100 MWe para todo tipo de redes y en particular las redes eléctricas de potencia media.

Su diseño utiliza las mejores tecnologías de los reactores de tercera generación. Este reactor cumple los últimos requisitos de seguridad vigentes en la actualidad.

Los reactores modulares pequeños o Small Modular Reactors (SMR)

Jean-Michel Delbecq

Los SMR son reactores nucleares con una capacidad de menos de 300 megavatios de energía (MWe). Fabricados en forma de módulos, transportados y ensamblados *in situ*. Estos reactores se pueden construir solos (una unidad) o en módulos ensamblados para formar una central de gran potencia o central multi-módulos.

Aunque los SMR todavía no han conquistado el campo de la generación de energía, existen muchos proyectos en desarrollo (en especial en EE.UU. y Rusia). Los modelos más avanzados de SMR son reactores de agua a presión cuyo despliegue podría comenzar en los años 2020.

Los promotores de estos SMR, que son objeto de un especial interés en los EE.UU., destacan su economía, seguridad pasiva y flexibilidad que ofrecen en términos de inversión, la adaptación a la demanda de electricidad y de gestión de la red eléctrica. El análisis de estos puntos demuestra que los SMR merecen especial atención, sobre todo en lo que concierne al despliegue de centrales multi-módulos.

El reactor AP1000

François Harari y Carole Chauvin

El año pasado fue un año difícil para la industria nuclear, especialmente para las empresas que buscaban construir nuevas centrales. No hace falta recordar la catástrofe de Fukushima, Japón, en marzo de 2011 la cual tendrá un impacto en los próximos años sobre todos los proyectos nucleares mundiales. Por su parte, los proyectos de AP1000 en China y Estados Unidos no han presentado ninguna interrupción, incluso si las inspecciones obligatorias durante su construcción se han vuelto más estrictas, lo cual refleja las preocupaciones legítimas de la opinión pública y de los entes reguladores de la seguridad. Aun cuando las decisiones sobre la tecnología futura ya se han tomado, Westinghouse cree que las características de seguridad pasiva del AP1000 ahora son mejores. Cabe recordar que Westinghouse está detrás del concepto de reactor de agua a presión que ha sido adoptado por la mitad de las centrales nucleares en el mundo, en particular por todas las centrales francesas actualmente en funcionamiento.

¿Cuáles son las perspectivas francesas de la construcción de grandes componentes para las centrales nucleares?

Claude Trink y Jean-Luc Vo Van Qui

Francia se ha dotado de una industria de construcción de grandes componentes para las centrales nucleares y sigue invirtiendo en ellas a pesar de la reducción en los pedidos producida por el accidente nuclear de Chernóbil. Tras el accidente de Fukushima, que tuvo lugar cuando todos los fabricantes se estaban preparando para un renacimiento del sector nuclear y que ha llevado a algunos gobiernos a revisar sus perspectivas de desarrollo de energía nuclear, surge el interrogante del futuro de esta industria.

Sector nuclear, ¿qué enfoque industrial adoptar para conservar la especificidad francesa?

Hervé Machenaud

A partir de la decisión estratégica de Francia de invertir en el sector nuclear en la década de los años 1970 nació una organización industrial que, gracias a una clara definición de roles y responsabilidades de cada actor, es una garantía de control industrial y de seguridad en el sector.

Estas ventajas permiten que la industria nuclear francesa esté muy presente en el mercado internacional y, por lo tanto, mantenga su *know-how* y sus capacidades industriales.

El clúster nuclear de Borgoña, una asociación de energías para desarrollar la industria de los componentes nucleares

Gérard Kottmann

El clúster nuclear de Borgoña es un centro de competitividad de nivel mundial.

Su objetivo es innovar, desarrollar y centralizar para aumentar de forma duradera el liderazgo de la industria nuclear francesa, al mismo tiempo que se desarrolla la fertilización cruzada entre sectores industriales de alta tecnología (aeronáutica, energía, transporte, etc.).

BULLETIN D'ABONNEMENT

A retourner accompagné de votre règlement
aux Editions ESKA <http://www.eska.fr>
12, rue du Quatre-Septembre - 75002 Paris
Tél. : 01 42 86 55 73 - Fax : 01 42 60 45 35

Je m'abonne pour 2012 aux Annales des Mines :

Réalités Industrielles

4 numéros	France	Etranger
au tarif de :		
Particuliers	<input type="checkbox"/> 88 €	<input type="checkbox"/> 107 €
Institutions	<input type="checkbox"/> 114 €	<input type="checkbox"/> 138 €

Réalités Industrielles + Responsabilité & Environnement

8 numéros	France	Etranger
au tarif de :		
Particuliers	<input type="checkbox"/> 168 €	<input type="checkbox"/> 202 €
Institutions	<input type="checkbox"/> 211 €	<input type="checkbox"/> 273 €

Réalités Industrielles + Gérer & Comprendre

8 numéros	France	Etranger
au tarif de :		
Particuliers	<input type="checkbox"/> 168 €	<input type="checkbox"/> 202 €
Institutions	<input type="checkbox"/> 211 €	<input type="checkbox"/> 273 €

Réalités Industrielles + Gérer & Comprendre + Responsabilité & Environnement

12 numéros	France	Etranger
au tarif de :		
Particuliers	<input type="checkbox"/> 214 €	<input type="checkbox"/> 271 €
Institutions	<input type="checkbox"/> 317 €	<input type="checkbox"/> 379 €

Nom

Fonction

Organisme

Adresse

Je joins : un chèque bancaire à l'ordre des Editions ESKA
 un virement postal aux Editions ESKA,
CCP PARIS 1667-494-Z
 je souhaite recevoir une facture

DEMANDE DE SPÉCIMEN

A retourner à la rédaction des Annales des Mines
120, rue de Bercy - Télédock 797 - 75572 Paris Cedex 12
Tél. : 01 53 18 52 68 - Fax : 01 53 18 52 72

Je désire recevoir, dans la limite des stocks
disponibles, un numéro spécimen :

- de la série **Réalités Industrielles**
- de la série **Gérer & Comprendre**
- de la série **Responsabilité & Environnement**

Nom

Fonction

Organisme

Adresse

Publié par
**ANNALES
DES
MINES**
Fondées en 1794

Fondées en 1794, les Annales des Mines comptent parmi les plus anciennes publications économiques. Consacrées hier à l'industrie lourde, elles s'intéressent aujourd'hui à l'ensemble de l'activité industrielle en France et dans le monde, sous ses aspects économiques, scientifiques, techniques et socio-culturels.

Des articles rédigés par les meilleurs spécialistes français et étrangers, d'une lecture aisée, nourris d'expériences concrètes : les numéros des Annales des Mines sont des documents qui font référence en matière d'industrie.

Les Annales des Mines éditent trois séries complémentaires :

**Réalités Industrielles,
Gérer & Comprendre,
Responsabilité & Environnement.**

RÉALITÉS INDUSTRIELLES

Quatre fois par an, cette série des Annales des Mines fait le point sur un sujet technique, un secteur économique ou un problème d'actualité. Chaque numéro, en une vingtaine d'articles, propose une sélection d'informations concrètes, des analyses approfondies, des connaissances à jour pour mieux apprécier les réalités du monde industriel.

GÉRER & COMPRENDRE

Quatre fois par an, cette série des Annales des Mines pose un regard lucide, parfois critique, sur la gestion « au concret » des entreprises et des affaires publiques. Gérer & Comprendre va au-delà des idées reçues et présente au lecteur, non pas des recettes, mais des faits, des expériences et des idées pour comprendre et mieux gérer.

RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

Quatre fois par an, cette série des Annales des Mines propose de contribuer aux débats sur les choix techniques qui engagent nos sociétés en matière d'environnement et de risques industriels. Son ambition : ouvrir ses colonnes à toutes les opinions qui s'inscrivent dans une démarche de confrontation rigoureuse des idées. Son public : industries, associations, universitaires ou élus, et tous ceux qui s'intéressent aux grands enjeux de notre société.

L'INDUSTRIE
AU
CONCRET