

PAR CHRISTOPHE BÉHAR



© L. GODART/CEA

directeur de l'énergie
nucléaire
du Commissariat
à l'énergie atomique

Une électricité « décarbonée » à un coût raisonnable

Produire une électricité « décarbonée » à un coût raisonnable, en assurant l'indépendance énergétique et la sécurité d'approvisionnement : tel est l'enjeu, aujourd'hui, pour lequel le nucléaire est irremplaçable, en complémentarité avec les énergies renouvelables. Leur synergie rendra plus vertueux les « mix » énergétiques à venir.

■ L'énergie est et restera tout au long du XXI^e siècle un besoin vital, facteur de développement et de croissance. Les besoins sont en constante augmentation. On estime qu'ils seront, en 2030, supérieurs de 50% aux besoins actuels, en lien avec la croissance démographique, la croissance économique et l'élévation du niveau de vie dans les pays émergents. Pour répondre à ces besoins, les contraintes sont fortes et en partie contradictoires : limitation des ressources en énergies fossiles, indépendance énergétique et sécurité d'approvisionnement, coût, limitation des émissions de gaz à effet de serre.

**D'importants
travaux au nom
de la sécurité**

REPÈRES

Le nucléaire est attractif et l'accident de Fukushima n'a pas eu d'impact significatif sur ses perspectives d'avenir. L'Allemagne a décidé l'arrêt immédiat de sept réacteurs nucléaires et l'arrêt complet de tous ses réacteurs nucléaires d'ici 2022. La stratégie du Japon reste prudente. Aucun autre pays n'a infléchi de manière spectaculaire sa politique en la matière. Certains ont même relancé leur programme, comme le Royaume-Uni. Depuis Fukushima, dix réacteurs sont entrés en service, et la construction de treize autres a démarré. Au printemps 2013, soixante-huit réacteurs étaient en construction (soixante-cinq en mars 2011), et cent soixante et un étaient planifiés (cent cinquante-neuf en 2011).

Le poids des fossiles

Aujourd'hui, plus de 80% de la consommation d'énergie primaire dans le monde repose toujours sur les énergies fossiles. Les émissions de gaz à effet de serre ont augmenté de manière considérable depuis la révolution industrielle, et cela s'est encore accru ces dernières années. Les émissions de gaz à effet de serre ont crû de 40% entre 1990 et 2009. On observe de manière corrélée une augmentation tout aussi significative de la température moyenne au niveau mondial. Or, les principaux contributeurs aux émissions de gaz à effet de serre sont précisément les énergies fossiles.

Sûreté d'abord

L'accident de Fukushima n'a pas été ignoré. La grande majorité des pays ayant un programme nucléaire ont décidé de procéder à des évaluations de sûreté très complètes sur leurs installations, pouvant conduire à d'importants travaux et à des évolutions des règlements de sûreté. En France, ces évaluations de sûreté, engagées dès 2011, se poursuivent.

Des priorités

Sur le plan de la recherche et du développement, l'accident de Fukushima n'a mis en évidence aucun champ non abordé dans le domaine de la sûreté. Il a toutefois conduit à mettre la priorité sur différents aspects.

En matière de prévention des accidents, séismes en particuliers, il faut améliorer la compréhension et la simulation de la réponse des structures, évaluer les marges existantes vis-à-vis de la ruine. En matière d'accidents graves, il faut consolider la connaissance de la répartition de l'hydrogène et modéliser les processus de développement de l'explosion.

Concernant le transport des produits de fission, il faut compléter les acquis avec des études sur le combustible « mox » et préci-



L'installation Mistra à Saclay, dédiée à l'étude du risque hydrogène.

ser les phénomènes de dépôt et de « revolatilisation ». Des études sur le corium s'imposent : comportement du corium, examen des systèmes de mitigation, modélisation des conséquences d'une explosion de vapeur sur les structures.

Continuer à innover

Pour préserver son attractivité et permettre à la France de conserver un rôle mondial dans le domaine du nucléaire, y compris en vue de gagner des marchés, il est indispensable de continuer à innover. C'est pourquoi la recherche à long terme porte sur des systèmes innovants, en rupture technologique forte par rapport au nucléaire actuel : les réacteurs de 4^e génération, qui compléteront progressivement, sur des échelles de temps longues, les réacteurs de 2^e et de 3^e génération.



Table vibrante Azalée de l'installation Tamaris à Saclay, dédiée à l'étude du risque sismique.

Une collaboration entre treize pays

Ces recherches s'effectuent dans un cadre international, le Forum Génération IV, qui regroupe treize pays signataires d'un accord intergouvernemental. Six filières ont été identifiées dans le cadre de ce forum, trois à neutrons lents, trois à neutrons rapides. Elles ont été définies selon quatre critères : durabilité, sûreté, compétitivité économique et résistance à la prolifération.

Les filières à neutrons rapides

La France a fait le choix de privilégier les filières à neutrons rapides qui présentent des atouts déterminants. Elles ont la capacité de recycler tout le plutonium sans limitation du nombre de recyclages, permettant ainsi d'avoir un cycle totalement fermé. Elles apportent une excellente utilisation de la ressource en uranium et en particulier de l'uranium dit « appauvri », déjà présent en France et ne nécessitant donc plus du tout d'approvisionnement en uranium naturel. Elles débarrassent les déchets ultimes des composants les plus nocifs sur le long terme (transmutation).

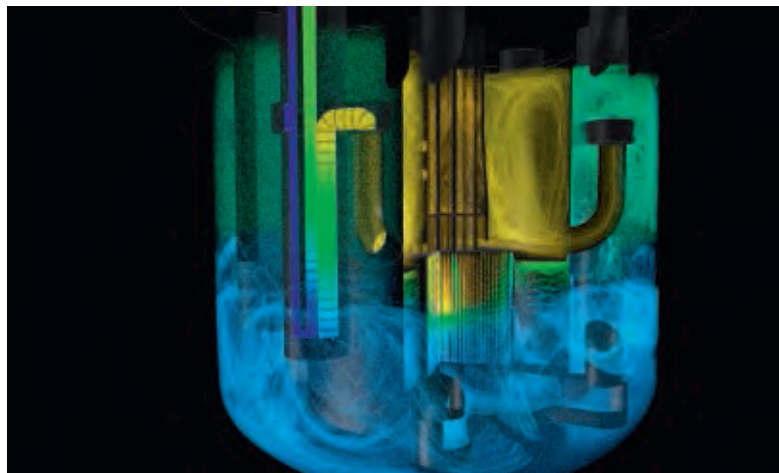
Les études réalisées ont d'ores et déjà permis d'établir que la transmutation de l'américium et du curium contribue à réduire la radio-toxicité à long terme des déchets ultimes d'un facteur cent environ.

En outre, la réduction de la charge thermique des déchets après transmutation de l'américium permet de réduire de manière significative l'emprise du stockage (de l'ordre d'un facteur 5 à 10 pour les seuls déchets de haute activité).

Refroidir au gaz ou au sodium

La France a décidé de travailler sur deux filières à neutrons rapides, avec comme fluides caloporteurs le gaz et le sodium, sur des échelles de temps différentes. Les réacteurs à neutrons rapides refroidis au gaz sont une option à long terme. Le CEA est partenaire associé d'un consortium constitué par des pays d'Europe centrale (République tchèque, Hongrie, Slovaquie, Pologne) qui porte

Des recherches menées dans un cadre international



© CEA

Mur d'images de la DEN (Direction de l'énergie nucléaire) à Saclay : modélisation pour la conception de réacteurs de 4^e génération refroidis au sodium.

sommaire. Défi scientifique et technologique, il se distingue totalement des réacteurs à neutrons rapides des générations précédentes (Phénix, Superphénix) et des réacteurs de ce type actuellement en fonctionnement dans le monde, tout en bénéficiant du retour d'expérience de leur exploitation ainsi que des outils du XXI^e siècle en termes de

- un projet de réacteur expérimental baptisé *Allegro*, présentant un potentiel intéressant mais pour lequel il reste des verrous technologiques importants à lever dans le domaine des matériaux, du combustible réfractaire et de la sûreté. Les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium sont actuellement la filière de référence étudiée par la France en raison de leur plus grande maturité technologique, résultant du retour d'expérience des réacteurs expérimentaux français et des réacteurs en exploitation en Russie et en Inde, ainsi que des réacteurs qui ont fonctionné dans le monde (au Japon et aux États-Unis).

conception, de modélisation et de calcul, de méthodes analytiques.

Sa conception et la recherche associée intègrent des axes forts de différenciation technologique, en particulier en termes de sûreté : réactivité des cœurs, interactions sodium-eau et sodium-air, problématiques liées au corium, évacuation de la puissance résiduelle. Mais aussi simplification du système afin de réduire le coût d'investissement et de faciliter l'inspection et la réparation en service en intégrant ces aspects dès la conception.

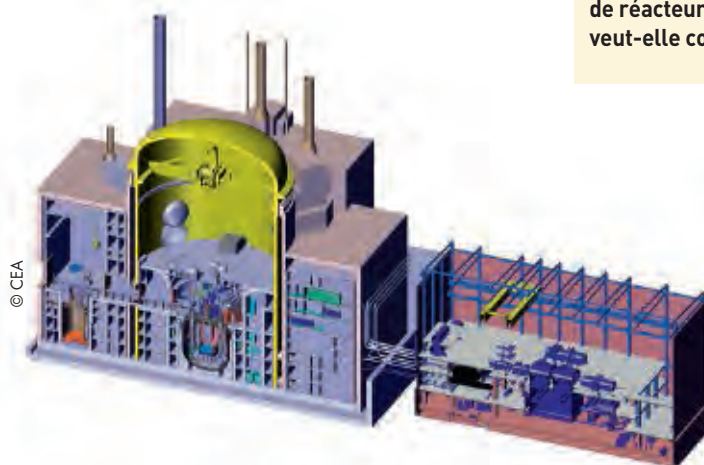
Réduire le coût et faciliter l'inspection et la réparation

Une nouvelle génération

Le projet *Astrid* est mené par le CEA en collaboration avec de nombreux partenaires industriels (EDF, Areva, Bouygues, Alstom, Astrium, Toshiba, Comex nucléaire, Jacobs, Rolls Royce) et en collaboration internationale (Inde, Japon, Russie, Corée du Sud, Chine, États-Unis, Union européenne). Il est en phase d'avant-projet

Un marché mondial

La France n'est pas la seule à travailler sur cette technologie, parmi les pays confrontés à une augmentation forte de leurs besoins énergétiques et conscients du potentiel offert par les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium, de quatrième génération. L'Inde et la Chine, mais aussi la Russie, ont pour stratégie de s'en doter le plus rapidement possible, dès 2035. Le marché pour ce type de réacteurs existe, il est mondial, la France veut-elle conquérir ces marchés ?



© CEA

Vue en coupe de l'îlot nucléaire et de la salle des machines du démonstrateur technologique Astrid.

Recycler le plutonium

Les études portent également sur le cycle du combustible associé, domaine d'excellence de la France, qui est la seule au niveau mondial à le maîtriser dans son ensemble. Il s'agit de concevoir le combustible spécifique à la technologie des réacteurs à neutrons rapides, en y intégrant le recyclage du plutonium. ■