

# 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<sup>e</sup> 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.