



L'apport de l'énergie nucléaire dans la transition énergétique, aujourd'hui et demain

La transition énergétique, à mettre en œuvre pour limiter nos émissions de gaz à effet de serre et le réchauffement climatique qui en découle, doit se traduire par :

- une diminution de notre consommation d'énergie par personne ;
- une réduction de notre dépendance aux combustibles fossiles, en priorité le charbon et le pétrole, et dans un second temps le gaz ;
- une augmentation de la part des sources d'énergie bas-carbone (énergies renouvelables et énergie nucléaire).

Ces évolutions conduiront inéluctablement à une augmentation importante de la part de l'électricité dans la production et la consommation énergétique, pour atteindre un niveau de l'ordre de 700 à 900 TWh (terawatts-heure) en 2050, presque le double de notre production électrique actuelle. Cette électricité doit être la plus décarbonée possible. Cette croissance prévisible de la demande en électricité est le plus souvent sous-estimée et minimisée dans les divers scénarios proposés pour la transition énergétique.

L'électricité a cet avantage qu'elle peut être distribuée facilement à tous les niveaux de puissance pour contribuer à satisfaire les demandes individuelles et industrielles en énergie dans tous les domaines : santé, alimentation, eau potable, transports des personnes et des marchandises, chauffage des bâtiments, développement de l'informatique et du numérique. Elle est nécessaire pour donner naissance à une économie fondée sur une utilisation accrue de l'hydrogène comme vecteur d'énergie décarbonée, si la production d'hydrogène se développait par le procédé d'électrolyse de l'eau.

Par ailleurs, cette transformation du système énergétique doit prendre en compte l'absolue nécessité de garantir la sécurité d'approvisionnement électrique du pays, ce qui impose de :

- maintenir une capacité de production d'électricité mobilisable afin de répondre aux pics de la demande ;
- assurer la stabilité du réseau électrique ;
- conserver un niveau significatif d'indépendance énergétique.

Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables intermittentes et variables, comme l'éolien et le solaire photovoltaïque, ne peuvent pas, seules, alimenter un réseau électrique de puissance de façon stable et pilotable si leur caractère aléatoire n'est pas compensé. Il faut pour cela disposer de capacités massives de stockage

d'énergie et/ou d'unités de production d'énergie électrique de secours pilotables. Le stockage massif d'énergie, autre que celui déjà réalisé au moyen des centrales hydroélectriques de pompage-turbinage, demanderait des capacités que l'on ne voit pas exister dans les décennies qui viennent. La pilotabilité, en absence de ces dernières, ne peut être assurée que par des centrales nucléaires, si l'on exclut les centrales thermiques utilisant les énergies fossiles.

Les réacteurs électronucléaires à neutrons thermiques (RNT)

Dans ce contexte, l'électronucléaire offre des avantages considérables. Les filières qui se sont imposées utilisent l'uranium, dont l'isotope 235 est le seul isotope naturel dont on sait extraire de l'énergie par fission. Les RNT, réacteurs nucléaires à neutrons thermiques (dans lesquels la fission des noyaux d'uranium est auto-entretenu par des neutrons ralentis) sont très majoritaires. Les ressources d'uranium disponibles sont suffisantes avec la technologie RNT pour au moins un siècle (dans l'hypothèse d'une demande internationale qui ne serait pas en forte augmentation). Comme on le verra plus loin, avec la technologie RNR (neutrons rapides), le stock français actuel d'uranium appauvri nécessaire pour les alimenter est suffisant pour de nombreux siècles.

Un RNT classique injecte massivement, 24 heures sur 24, au moins pendant quelque 300 jours par an, de l'électricité décarbonée dans le réseau. La production électrique nucléaire est, en effet, de toutes les sources d'énergie électrique, la moins émettrice de gaz à effet de serre (environ 6 grammes d'équivalent de CO₂ par kWh produit). C'est ce qui explique pourquoi la France, qui s'appuie essentiellement sur les énergies nucléaire et hydraulique, produit une électricité décarbonée à plus de 90%. Un parc électronucléaire de RNT assure donc la continuité de la fourniture d'électricité, à un prix limité, et possède, par ailleurs, la capacité de suivi de charge par des possibilités de baisses et montées profondes pour compenser des variations de consommation ou de production des énergies renouvelables intermittentes.

L'impact des RNT sur l'environnement

Une analyse complète du cycle de vie des systèmes électriques montre que les impacts environnementaux non radioactifs de l'électronucléaire sont le plus souvent bien inférieurs à ceux des autres systèmes. Pour ce qui concerne les impacts radiologiques, ils restent, en situation normale de fonctionnement, très inférieurs à ceux associés à la radioactivité naturelle. En revanche, ceux liés à des accidents nucléaires majeurs ont nécessité l'évacuation de territoires étendus pour éviter des expositions radiologiques hors normes et ont eu de lourdes conséquences sociales et environnementales. Le retour d'expérience de ces accidents a donné lieu à des améliorations successives de la sûreté des réacteurs. Depuis 2011, les réacteurs de type EPR, réacteurs à eau pressurisée (REP) de troisième génération, sont conçus de façon à minimiser la dissémination accidentelle de la radioactivité dans l'environnement, grâce à des dispositions technologiques et réglementaires d'augmentation de la sûreté.

Les déchets radioactifs issus des RNT

L'exploitation des réacteurs nucléaires produit des déchets radioactifs dont la gestion est plus compliquée que celle des déchets classiques des centrales à combustibles fossiles. Les déchets de moyenne et haute activité à vie longue, qui sont les plus délicats à gérer, ont un volume de l'ordre de 1,4 m³/TWh électrique pour le parc français (les volumes totaux de ces déchets depuis le début de l'ère nucléaire sont respectivement de 42 700 m³ et de 4 090 m³). L'inventaire de l'ensemble des déchets du parc nucléaire français est régulièrement tenu à jour par l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra). Cet inventaire prend en compte tous les déchets existants et, de manière prospective, les déchets qui seront produits par le fonctionnement puis le démantèlement des réacteurs actuels.

Le stockage en couche géologique profonde, dans des conditions de sûreté et de gestion réversible contrôlées par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), est bien adapté aux déchets à vie longue. Dans ce cadre, la demande de création de Cigéo (Centre industriel de stockage géologique), après vingt ans de recherche par la communauté scientifique nationale, est prête à être déposée auprès du ministère de la Transition écologique pour être examinée par l'ASN. Les installations de stockage doivent être implantées dans une couche d'argile du bassin parisien à 500 m de profondeur. La sûreté du stockage repose sur la stabilité de cette formation géologique, qui n'a pas évolué depuis plus d'une centaine de

millions d'années, et sur la rétention de la radioactivité sur une échelle de temps permettant sa décroissance jusqu'à des valeurs équivalentes à celles de la radioactivité naturelle.

La structure du parc électronucléaire français

La France a engagé un programme électronucléaire ambitieux dans les années 1970 pour assurer son indépendance énergétique et sa sécurité d'approvisionnement. Aujourd'hui, le parc EDF comporte 56 réacteurs REP, qui sont des RNT de seconde génération, assurant une puissance électrique de 60 GW et une production électrique de 380 TWh par an. Cependant, nos centrales, destinées initialement à fonctionner 40 ans, sont vieillissantes (l'âge moyen est déjà de 35 ans) et la production nucléaire française, même réduite à 50% de la production électrique totale, ne pourra être effective que si les anciennes centrales sont prolongées au-delà de 40 ans et si de nouveaux réacteurs de type EPR, la seule filière actuellement développée, sont rapidement mis en chantier. L'ASN a pris, le 25 février 2021, une position favorable pour une prolongation de 10 ans des 32 réacteurs REP les plus anciens, à l'issue d'un quatrième examen décennal et sous réserve de travaux nécessaires pour améliorer leur sûreté.

Les réacteurs électronucléaires à neutrons rapides

Dès le début du programme, la politique énergétique électronucléaire visait la possibilité d'installer un parc de réacteurs à neutrons rapides (RNR) afin de mieux utiliser les ressources en uranium et prolonger ainsi la production d'électricité électronucléaire. La stratégie française a alors consisté à retraiter le combustible utilisé des REP (le combustible UOX), pour recycler le plutonium, un élément fissile, qui s'y trouve et ne pas le mettre aux déchets. Ce recyclage est effectué une fois dans 22 REP qui peuvent être alimentés par un combustible mixte à base d'oxyde d'uranium appauvri et de plutonium, le MOX. Cette stratégie a permis à la France d'être le leader mondial dans le retraitement industriel du combustible nucléaire usé et dans l'utilisation du MOX. Elle a aussi permis de constituer des stocks importants d'uranium appauvri et de plutonium (conservé dans les combustibles usés pour éviter toute prolifération), éléments nécessaires au fonctionnement des réacteurs à neutrons rapides (RNR).

Les RNR alimentés avec un combustible de type MOX ont en effet la particularité de pouvoir multirecycler leur propre combustible utilisé pendant toute leur vie sans consommer d'uranium naturel, mais en consommant seulement de l'uranium appauvri. De ce point de vue, ils utilisent pleinement le potentiel énergétique de l'uranium, de sorte que les ressources en combustible seraient assurées pour plusieurs milliers d'années. Cependant, un parc de RNR doit être obligatoirement associé à des usines de retraitement et de fabrication du combustible. Il ne peut donc que succéder à un parc de REP, seul capable de produire suffisamment de plutonium pour sa mise en route. Les impacts environnementaux dus à l'extraction, la purification et l'enrichissement de l'uranium sont alors supprimés. Le modèle de RNR le plus mature est un réacteur utilisant du sodium liquide comme fluide caloporteur de l'énergie : le RNR-Na. Le retour d'expérience de ces réacteurs est important, notamment en France qui a exploité Phénix, Superphénix et a conduit pendant 10 ans le projet Astrid préfigurant les RNR de quatrième génération (RNR GenIV).

La Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE) a récemment repoussé au siècle prochain un déploiement des RNR, conduisant à l'abandon du projet Astrid du CEA. Comme stratégie d'attente, elle a décidé d'aller vers le multirecyclage du plutonium du combustible utilisé dans les RNT, notamment les réacteurs EPR. Cette stratégie est destinée à maintenir l'expertise de la France en matière de R&D pour aller vers les RNR. Elle peut stabiliser les quantités de combustible utilisé mais ne conduit pas à l'autonomie énergétique telle que recherchée avec les RNR.

Les RNR à sels fondus

Les RNR-Na utilisent un combustible MOX solide. Il est aussi possible d'envisager des RNR à sels fondus (RSF) utilisant un combustible liquide sous forme de sels contenant de l'uranium, du plutonium ou du thorium. Ces derniers offrent des avantages considérables tant au plan de la sûreté que des performances : grande pilotabilité, souplesse de fonctionnement, capacité à extraire l'énergie nucléaire de toute matière fissile, suivi de charge des réseaux électriques, gestion facilitée des déchets nucléaires. On note dans le monde un intérêt marqué pour de tels réacteurs. Mais le retour d'expérience sur les RSF est faible. La R&D française est en pointe sur cette thématique mais il lui reste à résoudre en particulier les difficiles problèmes chimiques associés au comportement et au retraitement des sels fondus.

RECOMMANDATIONS

Parce que l'énergie nucléaire est une énergie bas-carbone, comme les énergies éolienne et solaire, et qu'elle fournit en France, depuis des décennies, plus de 70 % de l'électricité, notre pays est l'un des plus vertueux au monde en termes de production électrique décarbonée. Dans le récent contexte politique français et européen tendant à diminuer la part de l'électronucléaire, voire appelant à sa disparition, et alors que d'autres pays misent sur cette énergie décarbonée pour augmenter leur capacité de production électrique et réduire leurs émissions de gaz à effet de serre, l'Académie recommande :

- de conserver la capacité électronucléaire du bouquet énergétique de la France par la prolongation des réacteurs en activité, quand leur fonctionnement est assuré dans des conditions de sûreté optimale, et par la construction de réacteurs de troisième génération, les EPR, dans l'immédiat. Ces derniers reposent sur la meilleure technologie disponible actuellement et offrent les meilleures garanties de sûreté ;
- d'initier et de soutenir un ambitieux programme de R&D sur le nucléaire du futur afin de préparer l'émergence en France des réacteurs à neutrons rapides (RNR) innovants de quatrième génération (GenIV), qui constituent une solution d'avenir et dont l'étude se poursuit activement à l'étranger ;
- de prendre en compte dans ce programme tous les aspects scientifiques du recyclage du combustible associés aux réacteurs, incluant la gestion des déchets radioactifs ;
- de maintenir des filières de formation permettant d'attirer les meilleurs jeunes talents dans tous les domaines de la physique, la chimie, l'ingénierie et les technologies nucléaires pour développer les compétences nationales au meilleur niveau ;
- d'informer le public en toute transparence sur les contraintes des diverses sources d'énergie, l'analyse complète de leur cycle de vie et l'apport de l'électronucléaire dans la transition énergétique en cours.