

## « L'énergie nucléaire au XXIème siècle : Quels avenir ? »

### 1°) Le nucléaire dans des termes temporels divers

Le parc nucléaire actuel a été construit entre 1977 et 1999 avec des réacteurs prévus pour fonctionner 40 ans, mais avec des marges de construction. Les nouveaux réacteurs de 3<sup>ème</sup> génération EPR ont une durée de vie garantie par le constructeur de 60 ans. Aux Etats-Unis, il est prévu de prolonger la durée de vie de certains réacteurs jusqu'à 80 ans. Dans le domaine du cycle du combustible, la durée de vie d'une usine de traitement comme celle de La Hague est également importante, de l'ordre de 40 à 50 ans. La décision de construction d'un réacteur nucléaire ou celle de faire évoluer un parc électrique relève donc d'une stratégie de long terme, compatible avec les constantes de temps de tels projets.

Si ces aspects temporels de long terme constituent des questions essentielles pour le développement de l'énergie nucléaire, ils ne sont pas les seuls à devoir être pris en compte : une fois construit un réacteur nucléaire, on peut encore en optimiser le fonctionnement, notamment via le combustible et son cycle. Dans le passé déjà, les très nombreux travaux menés en bonne part au CEA ont permis de passer par étapes successives des premières gestions par 1/3 avec un taux de combustion de 33000 MWj/t aux gestions d'aujourd'hui. Cette dimension moyen-terme de la gestion d'un parc et des usines du cycle associées se retrouve non seulement dans la gestion du combustible, mais également dans le souci de maintenir un facteur de disponibilité important et d'intégrer les évolutions de sûreté pour offrir une électricité compétitive et sûre.

Enfin à plus court terme, il est clair que l'exploitation du parc, ainsi que les actions de démantèlement en cours mobilise une part importante des ressources d'un électricien.

Réfléchir de façon continue et cohérente dans le court, moyen, long et très long terme, est une spécificité du nucléaire qui fait naturellement appel à des démarches de prospectives pour étayer ses décisions et orienter ses choix. Ce besoin d'une vision prospective est très présent à la DEN : elle est nécessaire à l'orientation et à la priorisation des travaux de R&D, afin que celle-ci, en retour, permettent de soutenir les clients à court/moyen terme et de préparer l'avenir à long terme.

### 2°) Les champs de la prospective du nucléaire

Comme elle doit faire face à différents enjeux temporels, la démarche prospective doit également tenir compte de différents domaines : technologique, économique, industriel, sociétal et politique.

Construire une vision prospective de l'énergie nucléaire nécessite de partir de "visions du monde" intégrant notamment :

- La lutte contre les gaz à effet de serre
- La demande énergétique et électrique
- Les nouveaux usages potentiels du nucléaire (cogénération) ou de l'électricité (production d'H2, mobilité,...)
- Les aspects liés à la concurrence et à sa régulation

- Les aspects géographiques (Europe et monde)
- Les déterminants sociaux : coûts, accidents (sûreté), déchets, transparence, peurs...
- Les cadrages politiques et économiques de l'offre et de la demande électrique

La prospective nucléaire doit intégrer les améliorations possibles dans les domaines techniques, économiques et de sûreté du parc actuel. Elle doit également s'interroger sur le potentiel dans ces mêmes domaines de nouvelles filières nucléaires comme les RNR (à sodium, mais aussi au gaz, au plomb). Elle doit également s'intéresser aux perspectives des énergies concurrentes ou complémentaires, ou à des techniques nouvelles susceptibles d'en rendre certaines plus acceptables socialement (par ex. la séquestration du carbone).

D'une manière plus générale, elle doit s'efforcer d'analyser la structure du mix énergétique susceptible de prendre place en France et dans le monde, d'en comprendre les moteurs sous-jacents et les incertitudes. Même si l'objectif est de préciser l'évolution du parc électrique français, une vision purement nationale est insuffisante : la lutte contre le changement climatique, la consommation de l'uranium, la R&D sur les différentes formes d'énergie et leur industrialisation se mènent au plan mondial. S'il est très important de construire une comparaison multicritère des différentes techniques susceptibles de produire de l'électricité aujourd'hui, il est tout aussi important de se forger une idée de leur évolution dans l'avenir. Ceci suppose de s'interroger sur les évolutions techniques possibles, mais aussi sur leur niveau d'industrialisation (plus ou moins grandes séries selon la demande mondiale) et sur des facteurs tels que la facilité de financement, l'acceptabilité sociale ou le coût de la tonne de CO<sub>2</sub> émise. Dans ce domaine les études de prospectives sont irremplaçables pour évaluer les avantages relatifs des différentes technologies et évaluer leurs vitesses de déploiement. Enfin, un éclairage important peut être celui de la sécurité énergétique qui renvoie aux questions de géopolitique et au degré de coopération des états en faveur du nucléaire (par ex. les centres de traitement régionaux envisagés par l'AIEA, ou de stockage définitif des déchets de haute activité à vie longue).

Il existe donc un fort besoin d'analyse et de réflexion prospectives pour guider la R&D.

### **3°) Le nucléaire à court et moyen termes**

Parmi les questions actuelles relevant du court/moyen terme certaines sont d'une importance considérable et font souvent la une de l'actualité. C'est par exemple la question de la prolongation de la durée de fonctionnement du parc actuel qui a émergé voici quelques années. L'action "grand carénage d'EDF" qui va consister à moderniser les 58 réacteurs du parc d'EDF représenterait un investissement de l'ordre de 90 milliards d'euros d'ici 2033 (selon le récent rapport de la Cour des Comptes).

Vous savez sans doute tous le rôle très important de la DEN, qui contribue fortement par ses travaux, à cet enjeu national (en particulier sur le vieillissement des matériaux).

Les réacteurs d'EDF produisent de l'électricité à un coût très compétitif de l'ordre de 60€/MWh, et on peut rappeler, comme l'a exposé la Cour des Comptes fin mai, que cette compétitivité tient compte de la totalité des dépenses nécessaires y compris la gestion des déchets, le démantèlement et les coûts de prolongement. Elle tient également compte des incertitudes qui subsistent encore sur les coûts de démantèlement ou de stockage des déchets, dont l'impact ne remet pas en cause ces résultats. En conséquence arrêter trop tôt un réacteur pour le remplacer par un nouveau moyen de

production (ou perdre sa production) est coûteux. En particulier, des études d'impact ont montré que cela se traduisait au total par un manque à gagner de 1 à 3 milliards d'euros pour un réacteur de 1 GWe. Ce manque à gagner dépend de la nature du remplacement (nucléaire, charbon, gaz, ENR, achat d'électricité à l'étranger), de la durée d'exploitation dont aurait été capable –avec travaux- le réacteur arrêté de façon anticipée (10 à 20 ans), et il tient bien sûr compte des dépenses évaluées par EDF pour le grand carénage.

Ainsi, les travaux de prospective de parc, en y incluant les aspects réglementaires, peuvent-ils être déclinés par des analyses économiques qui montrent qu'il est judicieux de prolonger l'exploitation de ce parc aussi longtemps que la sûreté est assurée. Le seul cas où ce résultat apparaîtrait fragile, serait celui d'un monde dans lequel aucune garantie de durée d'exploitation ne serait donnée suite aux travaux effectués.

Un autre axe important pour le court/moyen terme est celui de la diminution du coût d'investissement des réacteurs. La construction d'un réacteur EPR à Flamanville a clairement montré que la supply-chain industrielle n'était plus aussi performante que par le passé, ce qui a généré des surcoûts importants, caractéristiques d'une tête de série. Il est donc très important d'éclairer les industriels sur les programmes futurs de façon à faire baisser les coûts en bénéficiant des effets de série, ce qui passe par la définition d'un programme d'investissement clair en matière d'EPR, et nécessite une vision du futur, fondée notamment sur une démarche prospective destinée à préciser l'évolution du parc nucléaire dans les prochaines décennies, et son cadencement. L'enjeu est d'aider à construire le monde de demain, pour le bénéfice de tous, en offrant des solutions compétitives et sûres.

Toujours dans un cadre court/moyen terme, une autre question d'importance est d'adapter le parc nucléaire actuel à des demandes nouvelles liées par exemple à l'introduction d'EnR intermittentes. La question à instruire est bien entendu d'évaluer les capacités des réacteurs nucléaires à faciliter l'introduction des EnR : on peut penser en particulier au suivi de charge déjà existant en France. Celui-ci pourrait être étendu de façon à faciliter la synergie entre réacteurs nucléaires et énergies intermittentes. Nous nous trouvons donc face à un nouveau domaine d'études : il ne s'agit plus d'optimiser un réacteur nucléaire, mais d'optimiser un parc contenant un mix électrique en évolution, et d'évaluer ses marges de progrès en la matière

Pour importante que soit cette prospective à court et moyen terme, elle ne doit pas faire oublier que les analyses menées dans ce cadre résultent d'une recherche d'optimisation d'un existant qui a été décidé dans les années 70. La question fondamentale qui se pose au-delà est celle du remplacement complet du parc nucléaire actuel qui inclut les attentes vis-à-vis du nouveau parc et la transition entre le parc actuel et le nouveau. C'est clairement une prospective de long terme.

#### **4°) Le nucléaire dans le long terme**

A cette échelle de temps, l'enjeu premier est la place du nucléaire dans le monde à l'horizon de la seconde moitié de ce siècle. C'est une question de prospective difficile car elle nécessite plusieurs niveaux d'analyse. Tout d'abord, il faut définir des « futurs possibles » (les futuribles » dont Hugues de Jouvenel va vous parler dans quelques minutes) de l'état du monde, y évaluer les besoins en énergie primaire, la part de l'électricité dans cette énergie primaire et enfin la part du nucléaire dans ce mix électrique. Pour ce faire, il faut définir et valider les critères de choix qui conduiront à privilégier telle ou telle énergie.

D'autres évolutions ou ruptures technologiques ou sociétales doivent être examinées, comme l'arrivée de stockages d'électricité à très bas prix ou les espaces dans lesquels évolueront nos petits enfants : réel, virtuel, réalité augmentée... avec des impacts directs sur les transports locaux où les besoins en énergie du « Cloud » de cet horizon qui aura atteint ou non la taille du nuage de Magellan... La dimension géographique par continent est aussi de grande importance. Le développement des besoins énergétiques dans le monde et notamment en Asie, puis en Afrique, va conduire à un renforcement de la demande électrique, elle-même adossée à la démographie, l'élévation du niveau de vie... sans compter des phénomènes de société tels que l'urbanisation accrue, les besoins de mobilité, la diminution de la taille des ménages... et la lutte contre le réchauffement climatique qui limitera, souhaitons-le, très fortement le recours aux énergies carbonées.

Même si, bien entendu, les incertitudes sont fortes à très long terme, la croissance rapide de la demande électrique mondiale semble acquise pour les prochaines décennies, l'AIE par exemple constate que de 1971 à 2012, la consommation d'énergie primaire mondiale a été multipliée par 2,4 (1,4 pour le pétrole, 2,5 pour le charbon et 2,8 pour le gaz), tandis que la consommation d'électricité a été multipliée par 3,6 en 40 ans.

Ainsi une forte augmentation de la demande en électricité est supposée dans de nombreuses études prospectives, sauf pour les variantes peu crédibles d'efficacité énergétique extrême et de bouleversements sociologiques radicaux. L'accroissement serait de l'ordre de 50% à 100% d'ici 2050, et pourrait atteindre un facteur de 3, voire beaucoup plus, en 2100 !

La part du nucléaire dans le mix électrique nécessite aussi une analyse poussée. En examinant cette question, force est de constater que l'énergie nucléaire dispose de nombreux atouts :

- c'est une énergie compétitive, nous l'avons vu précédemment, et qui peut le rester ; outre les avantages qu'elle présente pour les ménages dont 10% en France sont dans la précarité énergétique, et pour la compétitivité économique des entreprises, il faut également souligner qu'elle présente un autre avantage important pour les industriels : elle assure un coût de production stable et facile à anticiper,
- c'est une énergie décarbonée et la pression sur les questions de climat s'amplifiera probablement dans le futur,
- c'est une énergie pour laquelle, il est possible de faire des stocks de combustibles et qui peut assurer une indépendance et une sécurité énergétique très importante.

Les inconvénients (à tout le moins perçus) de cette énergie sont bien connus. Je ne les rappellerai pas. Par contre, je souhaite souligner que la R&D contribue à l'amélioration de la situation et que nous sommes très impliqués pour augmenter la sûreté des réacteurs du futur, améliorer la gestion des déchets ou augmenter considérablement les services rendus par les usines de recyclage.

Dans ces conditions les perspectives pour le nucléaire apparaissent bonnes à long terme. On constate d'ailleurs que dans la très grande majorité des études de prospectives des organismes tels que l'AIE, l'AIEA, le WEC, ... la part du nucléaire s'accroît avec le temps... au sein d'une production d'électricité elle-même en croissance.

Cependant, si beaucoup de pays font le même constat, une forte demande en uranium va se faire jour. Les ordres de grandeur évoqués m'amènent à penser que la mauvaise utilisation actuelle de

l'uranium naturel n'est probablement pas durable à l'horizon du siècle. Il nous faudra, dès que prête, mettre en service une filière de RNR de génération IV. C'est la vision française pour préparer l'avenir et éloigner la pénurie d'uranium. Elle est partagée par de grands pays comme la Chine, la Russie, l'Inde ou le Japon qui ont des programmes importants relatifs aux RNR-Na. François Hollande et le Premier Ministre japonais Shinzo Abe viennent d'ailleurs de signer tout récemment un accord prévoyant la participation du Japon au développement du démonstrateur technologique Astrid et aux travaux de R&D sur cette filière.

Compte tenu des moyens importants à investir en R&D, il est probable qu'un nombre limité de consortia sera capables de proposer un design de RNR et d'usines du cycle associés. Il y aura donc des alliances industrielles nouvelles qui vont se faire jour. Une analyse prospective de cette évolution du paysage industriel est également à mener pour orienter les coopérations d'abord au niveau de la R&D, puis ensuite au niveau industriel proprement dit.

La R&D doit continuer avec détermination à préparer le long terme, qu'il s'agisse des réacteurs du futur, de la gestion des déchets, ou du cycle du combustible, avec des questions liées à l'incinération des déchets et à leur vitrification. Mais ce n'est pas tout. Il nous faut travailler à gagner de nouveaux espaces dans la synergie entre les EnR et le « socle nucléaire » de notre pays, ou des nouveaux réacteurs ailleurs dans le monde.

## **5°) Conclusions**

La technologie nucléaire fait partie des "invariants" des scénarios pour le 21<sup>ème</sup> siècle, c'est-à-dire qu'elle est présente dans l'essentiel des scénarios publiés : on peut citer le cas récent des scénarios de l'ANCRE qui vous seront présentés plus tard au cours de cette journée.

Au final, nos avens, les futuribles du XXIème siècle, me semblent dans leur grande majorité des espaces non seulement favorables mais qui aspirent à disposer de technologies nucléaires. Les atouts actuels du nucléaire et la recherche que nous mènerons à court, moyen et long termes sont à mon sens capables de faire des nucléaires du futur une bonne part des « sources d'énergie propres et illimitées de 2100 » dont rêve Laurence Tubiana, membre bien connue du Conseil national de la transition écologique (CNTE). Je compte sur vous tous, mes collègues ici présents, pour que notre génération apporte tout ce dont elle est capable pour atteindre ce formidable objectif.

Mais développer la technologie et accompagner les industriels d'aujourd'hui ou faire émerger ceux de demain n'est pas tout. Les travaux de Bianka Shoai, thésarde d'I-tésé qui a brillamment soutenu en mars dernier, ont montré combien est et sera importante la politique énergétique pour que le nucléaire, qui n'est pas une énergie banale, se développe. Son analyse a porté sur les facteurs déterminants des stratégies des électriciens européens dans les prochaines décennies. Elle montre en particulier que même dans les scénarios avec une politique climatique forte, et un nucléaire concurrentiel, la part de cette énergie dépendra néanmoins significativement des incitations des gouvernements. Ce résultat est particulièrement net en ce qui concerne la stabilité de la régulation. Sans un tel soutien (qui est le schéma historique dans presque tous les pays développés ayant un parc nucléaire jusqu'à présent) le nucléaire aurait moins de perspectives de progression.

Pour ma part, je pense qu'il faut aller graduellement mais résolument vers une programmation européenne de l'énergie, qui respecte les choix des états, mais permette aussi de construire une transition coordonnée, tout en développant l'autonomie énergétique de l'Europe. C'est à ce prix, qui

est un prix politique mais qui permettrait d'économiser plusieurs centaines de milliards d'euros au plan européen, que nous disposerons d'une énergie propre, sûre, économique et sans souci d'approvisionnement.

Cette journée sur le thème de la prospective constitue pour moi un des nombreux jalons de ce « l'acis routier » sur lequel nous sommes engagés. Nous suivons le bon le cap, nous avançons aux côtés de nos collègues en charge des autres énergies bas carbone. Je compte sur l-tésé pour nous aider à faire les meilleurs choix, à identifier à l'avance les carrefours majeurs, à gérer les incertitudes et à nous aider à construire le bouquet d'options techniques qui nous apportera une haute performance industrielle et une grande résilience aux chocs externes.

Je vous remercie de votre attention.