Innovations organisationnelle, technologique et économique :

L'INDUSTRIE NUCLEAIRE SE REINVENTE POUR RELEVER LES DEFIS DE 2030

Juin 2016

Société Française d'Energie Nucléaire

Innovations organisationnelle, technologique et économique : **L'INDUSTRIE NUCLEAIRE SE REINVENTE POUR RELEVER LES DEFIS DE 2030**

L'industrie nucléaire, troisième filière industrielle de France[1], est à un moment charnière de son histoire. Financièrement fragilisée, elle est confrontée à un marché européen de l'électricité en crise qui n'encourage pas les investissements de long terme. A ces problèmes exogènes s'ajoutent des difficultés internes : les industriels, qui n'avaient plus construit depuis 15 ans, souffrent de retards sur les grands chantiers et doivent être recapitalisés pour faire face à leurs besoins en investissement.

Les fondamentaux et les perspectives du marché nucléaire mondial restent positifs. Pour répondre au doublement de la demande en électricité et à la lutte contre le dérèglement climatique, l'OCDE[2] prévoit un doublement de la capacité nucléaire mondiale d'ici 2050. Plus de 70 réacteurs sont déjà en chantier dans le monde, en particulier en Asie. En Europe et aux Etats-Unis, de nombreux réacteurs sont rénovés pour être exploités jusqu'à 60 ans, voire au-delà.

L'innovation est la clé de voûte du développement de l'énergie nucléaire depuis son origine. Dans un marché en croissance, soumis à une concurrence de plus en plus forte, la filière française doit aujourd'hui se réinventer et innover sur tous les champs : organisationnel, en mettant en œuvre de nouveaux modes de collaboration entre les entreprises ; technologique, en proposant une gamme de produits et services en accord avec les attentes du marché ; et économique, en proposant de nouveaux mécanismes de marché.

I. POURQUOI INNOVER ? **LES DEFIS DE LA FILIERE NUCLEAIRE POUR 2030**

L'énergie nucléaire doit garantir une électricité bas-carbone compétitive. La rénovation du parc pour une exploitation au-delà de 40 ans est l'option la plus compétitive pour les années à venir. La compétitivité des réacteurs de troisième génération doit être renforcée. A l'export, la France devra conforter sa place dans le peloton de tête des *leaders* du nucléaire mondial, sur le marché des constructions de nouveaux réacteurs et sur le marché des services aux installations existantes. Pour se différencier, elle devra soutenir un rythme d'innovation continu et répondre aux attentes du marché. Enfin, l'industrie nucléaire devra répondre aux nouvelles attentes sociétales et environnementales de la société civile.

II. INNOVATIONS ORGANISATIONNELLE, SOCIALE, ENVIRONNEMENTALE, ET TECHNOLOGIQUE : **LA FILIERE NUCLEAIRE SE MET EN ORDRE DE MARCHE**

Les grands acteurs de la filière nucléaire se réorganisent pour être plus efficaces. L'*open innovation* permet de mobiliser l'ensemble des entreprises et au-delà. La France développe des partenariats stratégiques internationaux pour maintenir son avance technologique. L'industrie nucléaire innove pour répondre aux attentes environnementales et sociétales. Elle développe les technologies nucléaires, réacteurs et usines du cycle, qui lui garantissent une avance technologique. La transformation digitale de l'industrie nucléaire permettra de réaliser des gains de compétitivité et dessinera de nouveaux modes de travail.

III. DE NOUVELLES POLITIQUES PUBLIQUES **POUR LE NUCLEAIRE DE 2030**

(1) Imaginer le modèle économique du nucléaire 2030 en donnant une visibilité aux investisseurs sur les temps longs, en réformant le marché du carbone et en prenant en compte la pollution atmosphérique évitée. (2) Repenser la réglementation pour libérer l'esprit d'innovation en réalisant un choc de simplification et en accompagnant les 2 500 entreprises à l'export. (3) Préparer demain en investissant dans la recherche.

[1] L'industrie nucléaire est la troisième filière industrielle de France derrière l'automobile et l'aéronautique (Ministère de l'Industrie)
[2] Scénario 2DS – *Nuclear Technology Roadmap* (Agence pour l'Energie Nucléaire – AEN - 2015)

I. POURQUOI INNOVER ? **LES DEFIS DE LA FILIERE NUCLEAIRE POUR 2030**

1. GARANTIR UNE ELECTRICITE BAS CARBONE COMPETITIVE

a. L'énergie nucléaire présente de nombreux atouts en termes de compétitivité

En France, le nucléaire est l'énergie la plus compétitive pour produire de l'électricité. Les 58 réacteurs permettent aux Français de bénéficier d'une électricité parmi les moins chères d'Europe, deux fois moins chère qu'en Allemagne.

Le coût de l'énergie nucléaire est composé en grande partie de coûts fixes. Le coût de production est stable dans le temps, car très faiblement dépendant des cours de l'uranium, ce qui protège la France contre de potentiels chocs énergétiques.

A l'échelle internationale, l'OCDE a confirmé[3] la compétitivité du coût de production électronucléaire par rapport aux autres énergies de base comme le gaz et le charbon.

b. La rénovation du parc pour une exploitation au-delà de 40 ans[4] est l'option la plus compétitive pour les années à venir

Le programme « Grand carénage » d'EDF prévoit de rénover les réacteurs nucléaires pour les exploiter au-delà de 40 ans, tout en préservant l'avantage économique. Le coût économique complet de production, incluant à la fois le remboursement et la rémunération de l'investissement initial, est estimé par la Cour des Comptes entre 56,4 et 61,6€/MWh sur la période 2011-2025[5]. Ce coût de production est inférieur à celui des nouvelles unités de production, qu'elles soient thermiques ou renouvelables.

Par ailleurs, le réseau de transport d'électricité est organisé autour des centrales nucléaires et ne nécessite pas d'investissement supplémentaire significatif à court terme en matière de transport et de distribution.

Le Grand carénage permettra de continuer à fournir de l'énergie en base de manière stable et continue, garantissant la sécurité d'approvisionnement énergétique du pays. Il permettra aussi le développement des renouvelables intermittentes : les réacteurs français peuvent ajuster leur production jusqu'à 80 %, à la hausse ou à la baisse, en 30 minutes.

c. La compétitivité des réacteurs de troisième génération doit être renforcée

Comme les énergies renouvelables, le nucléaire doit entrer dans une dynamique de coûts de production toujours plus compétitifs. L'atome dispose de nombreux atouts pour y parvenir.

A l'horizon 2030, si aux Etats-Unis certains réacteurs pourraient être exploités jusqu'à 80 ans[6], la France devra renouveler son parc progressivement, en s'appuyant sur l'existant, et en lissant ses investissements.

Elle pourra s'appuyer sur le retour d'expérience des quatre réacteurs EPR mis en service d'ici 2018[7]. Les importants effets de série qui en découleront bénéficieront aux projets de réacteurs au Royaume-Uni d'abord, puis permettront de répondre aux projets en cours, en Pologne, en Inde et en Afrique du Sud notamment.

En parallèle, la filière française a lancé un nouveau projet qui engage l'ensemble de la chaîne de valeur : le développement d'un nouveau réacteur, l'EPR-NM (Nouveau Modèle), dont l'objectif est de réduire les coûts

---

[3] *Projected Costs of Generating Electricity* (Agence internationale de l'énergie (AIE) et AEN - 2015)
[4] Programme Grand Carénage d'EDF
[5] Cour des comptes (2015)
[6] Aux Etats-Unis, une première demande d'autorisation d'exploitation jusqu'à 80 ans sera déposée en 2018 auprès de l'autorité de sûreté, la *Nuclear Regulatory Commission* (NRC)
[7] Quatre EPR sont en construction à Flamanville (Manche), Olkiluoto (Finlande), et deux unités à Taïshan (Chine)

entre 25 et 30 %. Le *basic design* de ce nouveau réacteur est attendu à la fin de la décennie, pour une construction à l'horizon 2030.

2. A L'EXPORT : CONFORTER SA PLACE DANS LE PELOTON DE TETE DU NUCLEAIRE MONDIAL

a. L'offre française devra répondre à la fois aux marchés de la construction de réacteurs et à ceux des services aux installations en exploitation

L'offre française doit d'abord cibler le marché de la construction de nouveaux réacteurs, un marché extrêmement dynamique mais soumis à une concurrence de plus en plus forte (Etats-Unis, Russie, Japon, Corée du Sud, Chine…). Elle doit remporter des chantiers et se positionner sur des briques technologiques sur les chantiers de ses concurrents, comme ASGE (anciennement Alstom), fournisseur de turbines du russe Rosatom.

Les industriels français doivent également cibler le marché de la fourniture de services, équipements, et combustibles aux plus de 430 réacteurs en exploitation. La mise en œuvre de nouveaux dispositifs de sûreté (sur la base du retour d'expérience de l'accident de Fukushima Daiichi), les programmes de rénovation (comparables au Grand carénage), et les travaux d'optimisation des centrales représentent la part la plus importante du marché mondial. Sur ces segments, l'industrie française est bien positionnée. AREVA NP par exemple est un acteur important de ce marché, intervenant déjà sur plus de 300 réacteurs. Il portera l'offre d'assemblages de combustibles, tandis que l'activité de New Co[8] sera consacrée au cycle du combustible (de l'approvisionnement d'uranium enrichi au recyclage des combustibles usés) à la gestion des déchets et au démantèlement des installations nucléaires.

b. L'offre française devra soutenir un rythme d'innovation continu pour se différencier

Dans un secteur qui ne dispose pas encore d'une harmonisation réglementaire internationale, il est essentiel de développer un avantage technologique et concurrentiel fort pour pénétrer certains marchés. Par-delà les transferts de technologies à venir, l'industrie française doit assurer la rémunération de sa propriété intellectuelle, comme elle le fait déjà pour les dispositifs de contrôle-commande des réacteurs.

A court terme, le rapprochement entre EDF et AREVA NP renforcera l'offre française en capitalisant sur le savoir-faire de l'exploitant le plus expérimenté du monde[9]. A moyen-terme, un des enjeux sera de soutenir davantage l'accès des PME/ETI à certains marchés étrangers.

3. REPONDRE AUX NOUVELLES ATTENTES DE LA SOCIETE CIVILE

a. Les citoyens souhaitent participer davantage aux décisions sur les grands projets

A l'heure d'Internet, des réseaux sociaux et des nouveaux médias qui bouleversent les pratiques d'information et d'expression, la société civile souhaite de plus en plus être associée aux décisions publiques. De nouvelles formes de participation apparaissent. Si les citoyens expriment leur point de vue, ils veulent être sûrs que leur implication ne sera pas vaine, mais qu'elle sera prise en compte dans le processus de décision. Il s'agit aussi d'éviter les situations de blocage, qui peuvent induire de longs délais dans la réalisation des projets.

Alors que d'importants chantiers sont à venir (renouvellement du parc, Cigéo, etc.), la filière nucléaire doit mettre en place de nouveaux dispositifs pour répondre à cette demande de dialogue avec l'ensemble des acteurs de la société civile.

Le nucléaire a développé une culture du dialogue. Depuis le début des années 2000, dix débats publics ont été organisés sur ou autour de l'atome (gestion des déchets nucléaires, Cigéo, EPR Flamanville 3, EPR Penly 3, transition énergétique, etc.). La France est d'ailleurs le seul pays disposant d'un cadre légal sur la transparence

[8] New Co, filiale à 100 % d'AREVA SA, sera constituée des sociétés AREVA Mines, AREVA NC, AREVA Projets et AREVA Business Support ainsi que de leurs filiales respectives.
[9] EDF dispose d'une expérience d'exploitation de plus de 1 900 années-réacteurs.

nucléaire[10]. Depuis 1981, les exploitants et les autorités ne sont plus les seuls acteurs de la sûreté et de la sécurité nucléaire : la société civile - élus, associations, citoyens - s'engage elle aussi par le biais des commissions locales d'information (CLI) et de l'ANCCLI, fédération des CLI.

b. Les citoyens attendent une exemplarité sur le plan environnemental

La société civile souhaite que les activités industrielles respectent l'environnement, soient sobres en matières premières, génèrent peu de déchets, réduisent leurs émissions de CO_2 et n'impactent pas la santé des populations.

L'énergie nucléaire satisfait aujourd'hui de nombreux critères environnementaux. Classée aux côtés des énergies renouvelables comme énergie bas-carbone par le Groupement intergouvernemental des experts sur le climat (GIEC), le nucléaire n'émet que très peu de CO_2[11] et pas de polluants atmosphériques tels que les particules fines. Son emprise au sol est très faible au regard de sa production d'électricité, contribuant aussi à préserver la biodiversité et l'environnement.

Depuis plusieurs années, l'industrie nucléaire, comme les autres industries, s'est fortement impliquée dans une démarche d'économie circulaire visant à utiliser de moins en moins de matières premières et à prévenir la production de déchets, conventionnels (non radioactifs), ou radioactifs : 95 % des déchets conventionnels produits par les centrales sont envoyés dans des filières de valorisation[12] et jusqu'à 96 % des matières présentes dans un combustible usé sont recyclables. La France produit 10 % de son électricité à partir de matières nucléaires recyclées.

Des progrès sont encore possibles, notamment pour valoriser les déchets radioactifs de très faible activité (TFA) dans l'industrie française. Ces déchets représentent 30 % du volume des déchets radioactifs. Dans plusieurs pays, ils sont considérés comme des déchets conventionnels et peuvent ainsi être réutilisés dans des secteurs industriels autres que nucléaire.

II. INNOVATIONS ORGANISATIONNELLE, SOCIALE, ENVIRONNEMENTALE ET TECHNOLOGIQUE : **L'INDUSTRIE NUCLEAIRE SE MET EN ORDRE DE MARCHE**

1. INNOVATION ORGANISATIONNELLE

a. La filière nucléaire se réorganise pour être plus efficace

Pour gagner en compétitivité et en efficacité, les grands acteurs de la filière se repositionnent. A terme, EDF deviendra le maître d'œuvre intégré de la construction de réacteurs. L'électricien deviendra l'actionnaire majoritaire d'AREVA NP, chaudiériste nucléaire et fournisseur de combustibles. Pour gagner en efficacité, l'ensemble des compétences pour les grands projets seront mutualisées dans une filiale commune.

Au plan de la gouvernance, EDF, le CEA et AREVA ont fondé la Plateforme France Nucléaire (PFN), une instance tripartite d'échanges sur les principaux sujets transverses de la filière en France et à l'international. A l'export, la démarche FNPM (*France Nuclear Performance Model*) permettra à l'équipe de France de partir unie à la conquête de nouveaux marchés avec une offre intégrée.

[10] La loi TSN a notamment créé l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et donné un cadre réglementaire aux Commissions locales d'information (CLI)

[11] 17 g CO2/kwh (GIEC – 2014)

[12] Conseil stratégique de la filière nucléaire (CSFN)

La culture projet se renforce au sein de la filière : EDF et ses partenaires ont conduit ces derniers mois une revue complète du projet de l'EPR de Flamanville et de son organisation autour d'un management resserré pour améliorer la maîtrise industrielle du chantier jusqu'à sa mise en service.

En parallèle, le Comité Stratégique de la Filière Nucléaire (CSFN) a engagé une action permettant aux 2 500 entreprises du secteur d'avoir une visibilité sur les chantiers et les programmes des donneurs d'ordre (optimisation du parc, étude de nouvelles générations de réacteurs et installations du cycle du combustible). Il a également permis d'établir une feuille de route partagée sur les besoins en R&D, de lancer une concertation sur la gestion des compétences et expertises dans des domaines clés, et d'identifier les formations (existantes ou celles à créer) pour développer de nouveaux savoir-faire.

b. L'*open innovation* mobilise l'ensemble des entreprises et au-delà

La filière met en place de nouveaux modes de collaboration, basés sur l'innovation ouverte.

Cette nouvelle méthode de travail permet d'accélérer les cycles d'innovation et de créer les sauts technologiques. AREVA a lancé une plateforme pour inviter les PME et start-up, parfois venues d'autres secteurs, à développer de nouvelles solutions. Cette initiative a permis de créer un écosystème de plus de 900 PME et la signature de 17 contrats.

Le projet EPR-NM est l'occasion de mettre en place des modèles nouveaux de collaboration entre les donneurs d'ordre et les entreprises de la filière, pour mobiliser les savoir-faire plus en amont des projets et bénéficier de transferts de pratiques d'autres industries, comme l'aéronautique. Il s'agit aussi de développer des solutions et de la propriété intellectuelle leur permettant de se différencier à l'export.

c. La France renforce ses partenariats stratégiques internationaux

Industrie du temps long nécessitant des moyens de recherche importants, la filière nucléaire travaille sur des projets dont la dimension implique la coopération internationale de plusieurs acteurs, industriels, PME, centres de recherches. Le partage des recherches, des résultats expérimentaux, des retours d'expérience et des informations scientifiques contribuent significativement à innover plus et plus vite.

Pour les programmes de rénovation des centrales, les principaux exploitants nucléaires, représentant deux tiers de la production électronucléaire mondiale, cofinancent un centre de recherche en France où sont menées des études sur le vieillissement des matériaux utilisés dans les réacteurs, le MAI (*Materials Ageing Institute*).

La France renforce ses partenariats stratégiques avec le Japon, la Chine, et le Royaume-Uni. Avec le Japon : AREVA et MHI ont conçu ensemble le réacteur de 1 100 MW (ATMEA1). Les Japonais participent à l'ingénierie et la R&D du projet français ASTRID, réacteur de 4e génération. La France est un partenaire historique de la Chine : dans l'Empire du Milieu, l'essentiel du parc en exploitation est basé sur la technologie française. La France est aussi en discussion avec la Chine pour la construction d'une usine de recyclage des combustibles usés. Le Royaume-Uni fait confiance à la France pour renouveler une partie de son parc nucléaire. L'aboutissement du projet Hinkley Point C constituera le noyau d'une alliance industrielle européenne.

Ces collaborations pourraient se renforcer avec l'entrée d'industriels chinois et japonais au capital d'AREVA NP et New Co.

2. INNOVATIONS SOCIALES ET ENVIRONNEMENTALES

a. Mieux associer les citoyens aux décisions sur les projets nucléaires

Le débat CIGEO, mené en 2013, a été l'occasion d'expérimenter des innovations en termes de débat public, rendues nécessaires par l'annulation des réunions publiques, après l'intervention d'associations hostiles au

projet. La CNDP[13] déporta alors le débat sur Internet. La participation fut un succès, touchant un public élargi[14].

Deux initiatives institutionnelles lancées en 2015 vont donner une impulsion nouvelle aux initiatives citoyennes de participation aux décisions concernant les grands projets nucléaires.

Le rapport parlementaire sur la démocratie environnementale[15], publié en Juin 2015, recommande d'organiser une concertation en amont des projets et du débat public sur le projet proprement dit. Cette concertation porterait sur la motivation du projet et sur l'exploration de plusieurs options. Elle ferait appel à l'éclairage d'expertises plus diversifiées.

En outre, la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte a étendu les prérogatives des commissions locales d'information (CLI) en donnant la possibilité à leur président de participer avec l'Autorité de sûreté nucléaire, aux visites d'installations nucléaires suite à un évènement significatif sûreté de niveau 1.

b. Franchir de nouvelles étapes vers l'économie circulaire

Depuis plusieurs années, l'industrie nucléaire s'est fortement impliquée dans une démarche d'économie circulaire visant à utiliser de moins en moins de matières premières et à limiter autant que possible la production de déchets conventionnels et radioactifs. Elle s'appuie sur des méthodes et des outils opérationnels et reconnus, et travaille sur l'ensemble du cycle de vie des installations (construction, exploitation, démantèlement, transport). Le programme Grand carénage, dans la mesure où il permet l'exploitation des centrales sur une durée plus longue que celle initialement prévue, constitue en lui-même un enjeu environnemental fort, permettant une utilisation optimale des ressources existantes.

A terme, des progrès sont encore possibles : la recherche sur les systèmes nucléaires de quatrième génération, comme le démonstrateur de réacteur à neutrons rapides ASTRID, permettra de recycler d'importantes quantités de combustibles usés et d'exploiter encore mieux la ressource en uranium. Ces réacteurs permettent de recycler le plutonium, de valoriser le stock français d'uranium appauvri[16], et de mettre en œuvre le multi-recyclage des combustibles usés. Ils permettent d'extraire jusqu'à 100 fois plus d'énergie par unité d'uranium et de produire de l'électricité bas carbone pendant plusieurs milliers d'années.

Pour la gestion des déchets très faiblement radioactifs (TFA), l'IRSN estime qu'une grande proportion est considérée comme « radioactive » pour des raisons administratives et ne représente qu'un risque radiologique équivalent à celui du « bruit de fond » naturel. L'Institut[17] recommande d'étudier l'intérêt économique et la maîtrise des risques d'une nouvelle filière de recyclage des aciers, comme en Allemagne, dans des secteurs produisant des objets qui ne sont pas au contact direct des populations (rails, fers à béton), pour des usages non susceptibles de générer des inquiétudes dans le public. Il est d'autant plus important d'avancer sur ce sujet que le démantèlement des installations produira à terme un volume important de ce type de déchets.

c. Des compétences et des installations à la pointe des exigences environnementales

Sur le cycle des combustibles nucléaires, la France dispose avec AREVA et l'Andra d'une chaîne industrielle complète d'approvisionnement, de la mine à la fabrication du combustible, du recyclage des combustibles usés à la gestion des déchets radioactifs, et d'un soutien capital du CEA pour la R&D.

Les installations industrielles des entreprises de la filière nucléaire sont à la pointe de la technologie et respectent les normes environnementales les plus exigeantes. La toute nouvelle usine d'enrichissement de l'uranium, Georges Besse II (Drôme), utilise un procédé industriel (« la centrifugation ») qui consomme 50 fois

---

[13] Commission nationale du débat public (CNDP)

[14] Des dizaines de réunions publiques, 150 cahiers d'acteurs déposés, 1 500 questions posées, 500 avis exprimés (dont 25 % viennent de la Meuse et de la Haute-Marne), 9 débats contradictoires organisés et plus 9 000 connexions témoignent d'une participation étendue.

[15] *Démocratie environnementale : débattre et décider* (rapport de la commission spécialisée du Conseil national de la transition écologique sur la démocratisation du dialogue environnemental)

[16] 270 000 tonnes estimées en 2012, 450 000 t à l'horizon 2035

[17] *Déchets radioactifs de très faible activité : la doctrine doit-elle évoluer ?* (IRSN - 2016)

moins d'électricité que la diffusion gazeuse et ne nécessite aucun prélèvement d'eau dans le Rhône pour son refroidissement. L'usine de conversion chimique COMURHEX II[18] en construction permettra de diviser par 10 les prélèvements d'eau dans le milieu naturel, permettra de chauffer les bâtiments grâce aux calories dégagées par les électrolyseurs, et permettra de réduire de manière significative les effluents. Pour toutes les activités « chimiques » du cycle au sens large, la filière nucléaire travaille sur des procédés réduisant l'empreinte environnementale (consommation d'eau sur les sites miniers, déchets nitratés, utilisation de produits CMR, etc.).

La communauté scientifique et technique internationale considère le stockage géologique comme la solution la mieux adaptée pour gérer les déchets les plus radioactifs sur les temps longs. Cigéo est le projet français développé par l'Andra. Actuellement dans sa phase de conception, il pourrait, s'il est autorisé, entamer sa phase industrielle pilote dès 2025, puis passer en phase d'exploitation courante, sur une période de cent ans, dès 2034. Il permettra de prendre en charge tous les déchets HA et MA-VL[19] produits et à produire par les installations nucléaires, y compris ceux que produiront l'EPR de Flamanville, ITER, et le réacteur de recherche Jules Horowitz (RJH). La caractéristique intrinsèque de la roche argileuse où sera construit le centre et les développements techniques en cours permettront de confiner la radioactivité des déchets et prémuniront l'homme et l'environnement. Des développements sont en cours pour garantir la récupérabilité des colis de déchets entreposés et ce, de manière automatique depuis une salle de conduite[20].

3. INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES

a. Innover pour exploiter dans la durée

En interne, un changement de culture a été amorcé avec le renouvellement de génération en cours. EDF a mis en place des challenges internes pour récompenser[21] l'esprit d'innovation et la créativité dont les salariés font preuve pour optimiser la compétitivité des centrales nucléaires. En 2016, plus de 200 dossiers ont été sélectionnés, ce qui démontre l'appétit des salariés pour cette initiative.

Dans un contexte d'exploitation des centrales nucléaires au-delà de 40 ans, les recherches pour améliorer les performances et la sûreté des réacteurs sont essentielles. Dans ce domaine aussi, la France est en pointe.

A Cadarache (Bouches-du-Rhône), le CEA construit le réacteur expérimental Jules Horowitz qui permettra à la filière et à ses partenaires étrangers de tester les comportements des matériaux et des combustibles sous irradiation.

Sur le site des Renardières (Seine-et-Marne), EDF développe VERCORS, une maquette à l'échelle 1/3 de l'enceinte de confinement à double paroi d'une centrale nucléaire du palier 1300 MWe pour étudier les mécanismes de dégradation des matériaux et des composants.

En parallèle, EDF réalise des maquettes numériques 3D de ses installations, permettant de mieux anticiper leur modification, et d'organiser les opérations de maintenance sur le site.

Les opérations de maintenance et de modernisation bénéficient de ces travaux de recherche, permettant de garantir un haut niveau de sûreté et d'assurer une disponibilité maximale de la centrale. Comme le montre la *World Nuclear Association* (WNA), la performance du parc mondial existant n'a cessé de croitre ces dernières décennies. Ses taux de disponibilité sont équivalents à ceux des réacteurs récemment mis en service[22].

---

[18] Exploitée par AREVA dans la vallée du Rhône, l'usine COMURHEX de Pierrelatte transforme le tétrafluorure (UF^4) provenant du site de COMURHEX Malvési en hexafluorure d'uranium (UF^6). Cette transformation est la dernière étape des opérations de conversion des concentrés uranifères avant l'enrichissement.
[19] Déchets de haute activité (HA) et déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL)
[20] Revue Générale Nucléaire n°3 (2016)
[21] Chaque année, EDF organise le Challenge du parc en exploitation
[22] *World Nuclear Performance Report 2016* (WNA)

b. D'ici 2030 : une gamme de réacteurs complète, pour répondre aux besoins du marché

La France dispose aujourd'hui d'une gamme de deux réacteurs : l'EPR (1 600MW) et l'ATMEA (1 100 MW), qu'elle doit renforcer et compléter.

Au-delà des gains attendus par les effets de série sur les projets EPR en cours et à venir, EDF et AREVA ont engagé le projet EPR nouveau modèle (EPR-NM) dont l'objectif est de maintenir le même niveau de sûreté, tout en améliorant la constructibilité et donc la compétitivité. Il s'agit de simplifier le design, de le rendre plus facile à construire, en impliquant dès la conception les entreprises de génie civil. L'EPR-NM doit aussi être plus facile à industrialiser : des actions de standardisation sont actuellement étudiées.

Après 2030, les industriels français étudient aussi la possibilité de compléter leur gamme avec des petits réacteurs modulaires (SMR), dont la technologie est similaire à celle utilisée dans les réacteurs actuels. Ces petites unités (inférieures à 300 MW), modulables, seraient plus facilement industrialisables et finançables. La Chine, la Corée du Sud, la Russie ont des projets en cours. Les Etats-Unis sont également très avancés : l'entreprise Nuscale bénéficie d'un soutien financier de plus de 200 millions de dollars du *Department of Energy* (DOE)[23] et projette de commercialiser son réacteur d'ici 2025. De son côté, le Royaume-Uni[24] a annoncé une compétition en 2016 sur la meilleure technologie SMR pour le pays. La France peut également tirer parti de son savoir-faire dans les réacteurs de recherche. Un partenariat franco-britannique regroupant EDF, EDF Energy, AREVA, DCNS, et le CEA étudie un projet de SMR dans le cadre de l'appel à projets britannique.

c. Préparer les réacteurs de demain (développement industriel : horizon 2050) et d'après-demain (2100)

Le nucléaire est une énergie jeune, pleine de potentiel : des innovations de rupture sont étudiées dans la sûreté, la gestion des matières et la production des déchets radioactifs. La recherche sur les réacteurs nucléaires de 4ème génération est en pleine effervescence. Dynamisée par l'importance des enjeux climatiques, elle s'effectue pour l'essentiel dans le Forum Génération IV[25] (GIF), présidé par la France.

L'initiative « Mission Innovation » de Bill Gates annoncée à la COP21 témoigne de la volonté de grands entrepreneurs anglo-saxons de soutenir l'innovation dans les « énergies propres »[26], dont le nucléaire. Leur vision est ambitieuse[27] et de rupture : « *rendre la fission nucléaire suffisamment compétitive et sûre pour que la société civile soutienne son développement* »[28]. En Amérique du Nord, une cinquantaine de start-ups, notamment autour du MIT, ont vu le jour. Le DOE a engagé un programme spécifique, GAIN (*Gateway for Accelerating Innovation in Nuclear*), pour les soutenir. L'administration met à leur disposition les infrastructures et experts nécessaires à la validation du concept.

La France est un grand acteur de la recherche sur ces réacteurs du futur. Elle développe son propre projet de démonstrateur, le programme ASTRID, au titre du Plan d'Investissement d'Avenir (PIA)[29]. Ce prototype de réacteur à neutrons rapides, comprend un très grand nombre d'innovations pour atteindre les niveaux de sûreté et de compétitivité qui seront attendus à l'horizon 2030/2040. ASTRID met aussi en place une démarche d'innovation collaborative avec 14 partenaires industriels, français et étrangers, notamment sur le génie civil et la constructibilité. Par ailleurs, dans les domaines de la modélisation/simulation, de l'instrumentation, et des matériaux avancés, la France dispose de savoir-faire et de moyens clés pour le développement des

[23] http://www.nei.org/News-Media/News/News-Archives/NuScale,-DOE-Sign-217M-Contract-to-Fund-SMR-Projec
[24] https://www.gov.uk/government/publications/small-modular-reactors-competition-phase-one
[25] Le GIF est une organisation intergouvernementale dont l'objectif est de promouvoir le nucléaire du futur, d'élaborer et coordonner des programmes de R&D en support aux systèmes nucléaires de 4ème génération. Le Forum a identifié six concepts prometteurs de réacteurs répondant à objectifs ambitieux à la fois en matière de durabilité, de sûreté, de compétitivité économique et de résistance à la prolifération.
[26]« clean air technologies »
27 http://www.techinsider.io/bill-gates-interview-energy-miracle-coming-2016-2?utm_content=INSIDER&utm_campaign=INSIDER&utm_source=facebook.com&utm_medium=social
[28] « Making nuclear fission cheap enough and safe enough that people broadly embrace it, so that could be scaled up », Bill gates
[29] Ce projet de réacteur du futur, financé à hauteur de 627M€, est comparable à la partie « démonstrateurs pour les énergies renouvelables (917M€).

réacteurs du futur. Elle est naturellement sollicitée par les pays étrangers, comme les Etats-Unis ou l'Inde, pour participer à la plupart de leurs projets de développement de nouveaux réacteurs.

ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) est le projet international destiné à vérifier la faisabilité scientifique et technique de la fusion nucléaire. Tout comme la fission, la fusion fera partie des énergies bas carbone à mobiliser pour lutter contre le changement climatique. La fusion a plusieurs avantages : un combustible quasi inépuisable[30] et un fonctionnement qui rend impossible des accidents semblables à ceux de Tchernobyl ou Fukushima. Cette technologie pourrait être industriellement disponible à la fin du siècle.

4. LE DIGITAL : UN MOYEN AU SERVICE DE L'INNOVATION NUCLEAIRE

a. Le digital pour accroître la compétitivité et la sûreté

Les technologies de l'industrie 4.0 arrivent à maturité, leur intégration permet aux industriels de réaliser d'importants gains de productivité[31]. Dans l'automobile et l'aéronautique, la digitalisation de tout ou partie des processus industriels a réduit de 20 à 30 % les coûts de développement.

Industrie de haute technologie, la filière nucléaire entre aussi dans cette nouvelle ère. Robotique, impression 3D, Big data, simulation numérique, objets connectés, etc. : le déploiement du digital dans le nucléaire accélère les temps de développement, ainsi que la constructibilité et l'industrialisation des projets. Ces nouvelles techniques sont utilisées pour les opérations de maintenance, la conception (cf. EPR-NM), la construction et le démantèlement des installations.

En permettant une gestion des données plus efficaces, le digital facilite l'instruction des dossiers par l'ASN en créant une continuité des données et de leur gestion sur l'ensemble de la chaîne de valeur.

b. Le digital pour favoriser une collaboration horizontale

L'introduction des technologies numériques dans l'industrie fait évoluer les modes de travail pour aller vers davantage de collaboration entre les maillons de la chaine de valeur. Les plateformes technologiques de collaboration et d'innovation permettent de rassembler les talents, les idées, les solutions et les données et d'expérimenter les solutions qui fonctionnent.

De nouveaux métiers naissent comme celui d' « architecte ». Sur le projet EPR-NM, un ingénieur est pour la première fois responsable de l'ensemble de la conception d'un produit : responsabilité dans le design, le coût, le planning, la constructibilité, l'industrialisation.

La digitalisation du secteur passe par l'arrivée de super-calculateurs qui offrent aux chercheurs et aux directions opérationnelles des horizons entièrement nouveaux pour la simulation : capacité à prédire des phénomènes extrêmement complexes influençant la durée de vie des centrales nucléaires, simulation de dizaines de milliers de scénarios pour optimiser la production et gérer les risques sur les marchés de l'énergie, etc.

Avec, la simulation peut être mieux déployée notamment pour explorer des domaines difficilement accessibles, par exemple le comportement des installations nucléaires en situation accidentelle, comprendre des phénomènes physiques et de confronter ces modèles avec l'expérience, et avoir une rétroaction sur la conception.

A l'avenir, le digital est appelé à prendre une place de plus en plus grande dans le nucléaire. Sur cette question, la France mène depuis plusieurs années une réflexion poussée et a développé des outils (maquette 3D, contrôle commande numérique…) qui marquent sa maturité et la positionnent pour des chantiers futurs.

---

[30] Le deutérium est abondant dans l'eau de mer, le tritium sera à terme produit à partir du lithium, abondant dans la croûte terrestre et dans les océans.

[31] *Digital Transformation of European Industry and Enterprises*

III. DE NOUVELLES POLITIQUES PUBLIQUES **POUR LE NUCLEAIRE DE 2030**

PRIORITE N°1 : IMAGINER LE MODELE ECONOMIQUE DU NUCLEAIRE 2030

a. Donner une visibilité aux investisseurs sur les temps longs

Un projet de centrale nucléaire est un investissement important (plusieurs milliards d'euros) dont le retour sur investissement s'effectue sur des temps longs.

Comme les autres énergies bas-carbone, en particulier les renouvelables, la rentabilité de l'investissement initial est liée à la volatilité des prix de vente de l'électricité sur la durée de vie de l'unité[32]. Les schémas fondés, sur un contrat à long-terme entre fournisseur et consommateur permettent à la fois à l'investisseur de sécuriser son prix de vente sur la durée nécessaire à rentabiliser son investissement et aussi d'assurer la stabilité des prix pour le consommateur. C'est le cas pour le projet Hinkley Point C au Royaume Uni, où le mécanisme des CFD (*contract for difference*) garantit un prix de vente de l'électricité sur 35 ans.

Trop souvent, le nucléaire est perçu par les investisseurs comme porteur de risques spécifiques, notamment celui lié au risque politique, ce qui entraîne une prime de risque significative pour l'investisseur. Toujours dans l'accord passé sur le projet Hinkley Point, le gouvernement britannique garantit une compensation financière pour l'investisseur en cas d'arrêt prématuré de la centrale pour des raisons purement politiques.

Ce modèle peut inspirer la France qui devra renouveler son parc à l'horizon 2030.

A terme, comme l'indique le Commissariat à la Stratégie[33], si les énergies bas-carbone sont amenées à être majoritaires, ce changement de structure de coûts poserait sûrement la question de la validité de la théorie de la tarification au coût marginal qui a inspiré le processus de libéralisation.

b. Prendre en compte l'ensemble des coûts induits dans le système électrique dans un mix diversifié

Dans son dernier rapport[34], l'AIE-AEN introduit le concept de « valeur » apportée par une source de production d'énergie, selon les interactions entre les différentes technologies dans le système électrique pour satisfaire la demande. Cette valeur varie en fonction de sa disponibilité, sa localisation géographique, et sa prédictibilité, lesquelles peuvent induire des investissements sur le réseau ou des coûts d'équilibrage.

Plus la part des énergies renouvelables variables sera amenée à s'accroitre en Europe, plus leur valeur diminuera du fait des coûts induits sur l'ensemble du système. Inversement la valeur apportée par l'énergie nucléaire, du fait de son fort taux de disponibilité, pourrait faire l'objet d'une rémunération spécifique dans le cadre de mécanismes de capacité[35] ou de sa manœuvrabilité.

c. Réformer le marché du carbone

La contribution apportée par le nucléaire pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et d'autres polluants atmosphériques doit aussi être prise en compte d'un point de vue économique. Le prix du carbone fixé par le mécanisme du « *cap-and-trade* » (ETS ou marché du carbone) s'est effondré durablement et ne joue plus son rôle. L'annonce, lors de la quatrième conférence environnementale, de l'instauration d'un prix plancher pour les enchères ETS est un signal positif dans le sens d'une fiscalité climatique plus juste.

---

[32] *Nuclear New Build: Insights into Financing and Project Management* (OCDE-AEN – 2015)
[33] http://www.strategie.gouv.fr/travaux/developpement-durable-technologies/union-europeenne-de-lenergie
[34] *Projected Costs of Generating Electricity* (Agence internationale de l'énergie (AIE) et AEN - 2015)
[35] *Nuclear Energy and Renewables* (OCDE/AEN – 2012)

d. Prendre en compte la pollution atmosphérique évitée

Au-delà du CO_2, l'énergie nucléaire n'émet, à la différence du charbon, ni oxyde de carbone, ni oxyde d'azote, qui ont des conséquences graves sur la santé.

Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS)[36], en 2012 la pollution atmosphérique était à l'origine de 600 000 décès prématurés, et a coûté environ 1 400 milliards d'euros aux 53 pays de la région européenne. En France, la pollution de l'air est à l'origine de 48 000 décès chaque année[37]. Les bénéfices apportés par l'énergie nucléaire en termes de pollution de l'air évitée ne sont pas pris en compte.

PRIORITE N°2 : REPENSER LA REGLEMENTATION POUR LIBERER L'ESPRIT D'INNOVATION

a. France : pour un « choc de simplification »

Un « choc de simplification »[38] vient d'être entrepris pour réduire la complexité administrative et normative qui pèse sur la compétitivité des entreprises et sur leur capacité d'innovation. L'industrie nucléaire doit faire l'objet d'un dispositif similaire pour être compétitive d'ici 2030. Ce travail est d'autant plus nécessaire, qu'elle est, pour des raisons légitimes de sûreté, soumise à une forte réglementation.

Tout en maintenant ce haut niveau d'exigence en matière de sûreté, la réglementation doit être plus accessible aux 2 500 entreprises du secteur, notamment quand il s'agit de justifier et/ou démontrer la robustesse d'un dispositif ou d'une solution technologique.

La réglementation doit favoriser l'innovation. La complexité et la lourdeur de certaines procédures incitent les industriels à privilégier des solutions déjà approuvées, plutôt que de proposer des solutions nouvelles. Le dialogue amont entre industriel et régulateur doit permettre de définir les objectifs d'une innovation, les résultats recherchés, les programmes de qualification, et *in fine* d'accélérer l'innovation.

b. Accompagner les 2 500 entreprises du secteur à l'export

L'hétérogénéité des codes et normes nucléaires à travers le monde est un frein à l'exportation. Par exemple, les codes développés en France par l'AFCEN[39] sont appliqués sur seulement 20 % des centrales dans le monde, et s'accompagnent le plus souvent d'exigences nationales supplémentaires.

Pour être plus compétitives et s'exporter davantage, les entreprises de la filière, en particulier les PME-ETI, pourraient bénéficier d'une plus grande harmonisation des normes internationales et européennes.

Pour faciliter et accélérer l'accès des entreprises aux marchés internationaux, la Direction générale des entreprises (DGE) préconise le soutien des pouvoirs publics. Une labellisation des entreprises exportatrices par les autorités françaises pourrait accélérer l'accès à certains marchés.

PRIORITE N°3 : PREPARER DEMAIN EN INVESTISSANT DANS LA RECHERCHE

Les Etats-Unis, la Chine, l'Inde, la Corée du Sud et la Russie investissent massivement dans les technologies nucléaires post-2030.

Aux États-Unis, 18 % du budget annuel du DoE est consacré au nucléaire, soit 900 M USD. Avec le programme GAIN, la puissance publique apporte aussi un soutien logistique et réglementaire aux initiatives privées sur les réacteurs du futur[40].

---

[36] Economic cost of the health impact of air pollution in Europe (OMS)
[37] Agence de santé publique (2016)
[38] http://www.gouvernement.fr/la-simplification
[39] AFCEN : Association Française pour les règles de Conception, de construction et de surveillance en exploitation des matériels des Chaudières Electronucléaires)
[40] « Nucléaire : l'heure des choix » – Institut Montaigne (2016)

Dans le domaine de la R&D, la France investit autant dans l'énergie nucléaire que dans les technologies renouvelables. En 2013[41], l'investissement public[42] dans la R&D nucléaire était de 480M€ et de 439M€ pour les renouvelables. Ces investissements doivent être préservés.

En revanche, l'Union européenne néglige l'investissement dans la fission nucléaire (50 M€) alors même que le nucléaire représentera en 2050, selon les prévisions de la commission, 20 % de l'électricité européenne. Ce chiffre doit être mis en perspective avec les montants consacrés aux renouvelables (5,9 milliards d'euros), ou à la fusion nucléaire. (2,9 Mds €).

La France et ses partenaires doivent demander une réévaluation des fonds alloués pour que la fission nucléaire joue pleinement son rôle dans la politique européenne de l'énergie et l'atteinte des objectifs climatiques.

[41] En 2010, le PIA a consacré 1 milliard d'euros au nucléaire (248,4M€ pour le projet RJH, 625M€ pour ASTRID, 75M€ pour l'ANDRA, et 50M€ consacrés à l'appel à projet dans le domaine de la recherche dans la sûreté nucléaire et radioprotection/RSNR).
[42] http://www.performance-publique.budget.gouv.fr/

A propos de la SFEN

La Société Française d'Energie Nucléaire (SFEN) est le carrefour français des connaissances sur l'énergie nucléaire. Créée en 1973, c'est un lieu d'échanges pour les spécialistes de l'énergie nucléaire français et étrangers. Elle rassemble plus de 4 000 professionnels de l'industrie, l'enseignement et la recherche.

Contacts SFEN

Valérie FAUDON – Déléguée Générale - 01 53 58 32 26 - valerie.faudon@sfen.org

Isabelle JOUETTE - Directrice de la Communication - 01 53 58 32 20 - isabelle.jouette@sfen.org

Boris LE NGOC – Responsable relations publiques - 01 53 58 32 23 - boris.lengoc@sfen.org