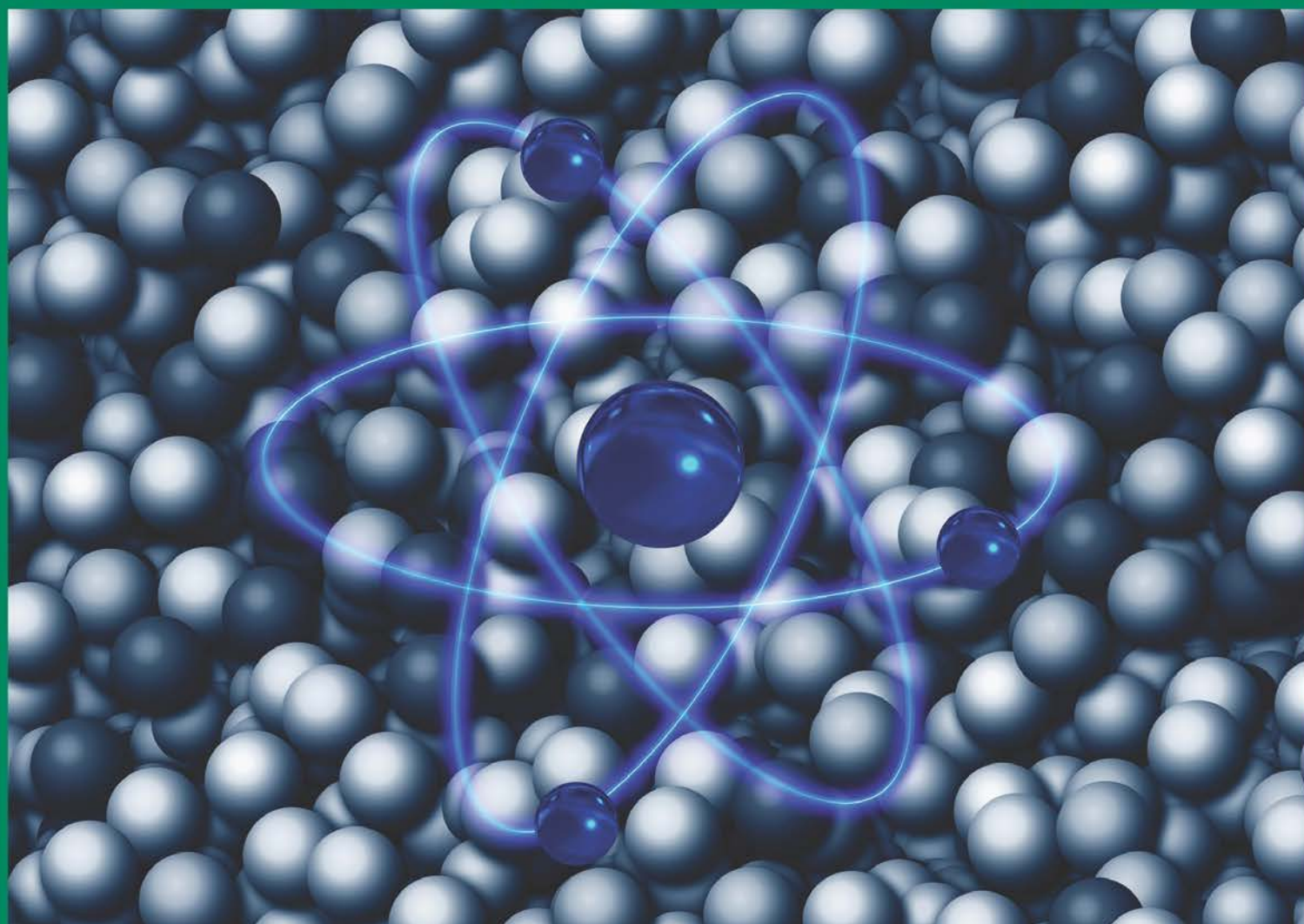


# RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

« Se défier du ton d'assurance qu'il est si facile de prendre et si dangereux d'écouter »  
Charles Coquebert, Journal des mines n°1, Vendémiaire An III (septembre 1794)



## Le nouveau nucléaire



N°113  
JANVIER 2024

Publiées avec le soutien  
de l'Institut Mines Télécom

UNE SÉRIE DES  
**ANNALES  
DES MINES**  
FONDÉES EN 1794

## RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

ISSN 2271-8052 (en ligne)

ISSN 1268-4783 (imprimé)

Série trimestrielle - N°113 - Janvier 2024

### Rédaction

Conseil général de l'Économie (CGE)  
Ministère de l'Économie, des Finances  
et de la Souveraineté industrielle et numérique  
120, rue de Bercy - Télédock 797  
75572 Paris Cedex 12  
Tél. : 01 53 18 52 68  
<http://www.annales.org>

**Grégoire Postel-Vinay**  
Rédacteur en chef

**Alexia Kappelmann**  
Secrétaire générale

**Daniel Boula**  
Secrétaire général adjoint

**Magali Gimon**  
Assistante de rédaction et Maquettiste

**Myriam Michaux**  
Webmestre et Maquettiste

**Frédérique Linque**  
Webmestre et Maquettiste

### Publication

**Photo de couverture**  
Photo libre de droits téléchargée  
sur le site Pixabay  
(<https://pixabay.com/fr/illustrations/atome-%C3%A9lectron-neutron-1222516/>)

**Iconographie**  
Daniel Boula

**Mise en page**  
Magali Gimon

**Impression**  
Duplprint Mayenne

### Membres du Comité de rédaction

**Pierre Couveinhes**  
Président du Comité de rédaction

**Patricia Blanc**

**Paul-Henri Bourrelier**

**Mireille Campana**

**Fabrice Dambrine**

**Dominique Dron**

**Jean-Luc Laurent**

**Richard Lavergne**

**Philippe Merle**

**Michel Pascal**

**Didier Pillet**

**Grégoire Postel-Vinay**

**Claire Tutenuit**

**Benjamin Vignard**

---

La mention au regard de certaines illustrations du sigle « D. R. » correspond à des documents ou photographies pour lesquels nos recherches d'ayants droit ou d'héritiers se sont avérées infructueuses.

Le contenu des articles n'engage que la seule responsabilité de leurs auteurs.

04

**Préface**

Joël BARRE

05

**Introduction**Vincent LE BIEZ et  
Paul de LAPEYRIÈRE**À quel besoin répond  
un programme de  
nouveau nucléaire ?**

08

**L'évolution de la demande  
en électricité décarbonée**

Pierrick DARTOIS et Marie SUDERIE

15

**La décarbonation du secteur aérien  
au défi de l'accès à l'énergie décarbonée**

Thibaud NORMAND

20

**Financement du nouveau nucléaire et  
gestion des risques dans des économies  
sous contrainte carbone**

Jan Horst KEPLER

27

**Réduction des consommations  
et décarbonation : les deux piliers  
de la stratégie française  
pour l'énergie et le climat**

Sophie MOURLON

**Retrouver le chemin  
de la maîtrise industrielle  
et de l'excellence technique  
au sein de la filière nucléaire**

31

**Suites aux difficultés rencontrées  
sur Flamanville, le plan excell d'EDF**Alain TRANZER et  
Anne-François de SAINT SALVY

Sommaire

37

**Le renforcement de la qualité  
industrielle chez Framatome**

Bernard FONTANA

41

**EPR2 : améliorer la constructibilité  
de l'EPR grâce au retour d'expérience**

Gabriel OBLIN

46

**Le programme Match ou  
comment la filière nucléaire  
se projette dans l'avenir**

Olivier BARD

49

**Relance du nucléaire : un plan Marshall  
pour sécuriser les compétences**

Hélène BADIA

54

**HEFAÏS, la formation soudage  
par excellence**

Corentin LELIEVRE

**Le nouveau nucléaire au service  
de la réindustrialisation du pays**

59

**Le nucléaire au service de la  
réindustrialisation de la France**

Hubert VIRLET

63

**Réussir la décarbonation  
de l'industrie française grâce à  
l'atout compétitif du nucléaire**

Nicolas de WARREN

67

**Orano, leader du cycle du combustible,  
pourrait doubler voire tripler  
ses investissements pour  
accompagner la relance du nucléaire**

Claude IMAUVEN

71

Comment renforcer  
la dynamique d'innovation  
de la filière nucléaire française ?

Jean-François DEBOST et Bernard SALHA

75

Le modèle du New Space est-il l'avenir  
des petits réacteurs modulaires ?

Antoine CHESNE

## **Gouvernance et acceptabilité sociale du nucléaire**

79

Les évolutions de l'opinion publique  
sur le nucléaire en France et en Europe

David LÉVY et Henri WALLARD

83

Une nouvelle dynamique  
autour du nucléaire au sein  
de l'Union européenne

Pierre JÉRÉMIE

87

Les évolutions législatives pour  
accélérer les projets nucléaires

Pierre GUILLOT et Anne-Cécile RIGAIL

91

Les enjeux en matière de sûreté  
d'une relance du nucléaire en France

Julien COLLET

94

La gestion responsable et durable  
des déchets radioactifs en France

Pierre-Marie ABADIE

100

Nouveau nucléaire,  
participation et décision :  
une difficile mise en cohérence

Michel BADRÉ

103

Quelles conditions pour relancer  
durablement le nucléaire en France ?

Yves BRÉCHET

109

Traductions des résumés

114

Biographies des auteurs

Ce numéro a été coordonné  
par Vincent LE BIEZ

# Préface

Par Joël BARRE

Délégué Interministériel au Nouveau Nucléaire, en charge de la supervision des programmes industriels de nouveau nucléaire en France

La France entretient avec l'énergie nucléaire un rapport sans équivalent parmi les autres pays du monde. Depuis l'impulsion donnée par le Général de Gaulle aux lendemains de la Seconde Guerre mondiale, avec l'ordonnance du 18 octobre 1945 créant le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA), en passant par le plan Messmer lancé en 1974, jusqu'à l'annonce d'un programme de construction de réacteurs nucléaires faite par le président de la République à l'occasion de son discours du 10 février 2022 à Belfort, le nucléaire occupe une place de premier plan dans la politique énergétique française.

Certes, les trois dernières décennies ont été moins porteuses pour l'atome en France et ont pu faire croire que le sort du nucléaire était en sursis. Dans un contexte de relative abondance énergétique et de moindre préoccupation quant à la souveraineté énergétique, les accidents de Tchernobyl (1986) et Fukushima (2011) ont conduit une part croissante de l'opinion publique, en France et dans le monde, à s'opposer au nucléaire comme source d'énergie. Le changement de cap s'est opéré en plusieurs étapes au cours des dernières années : d'abord le discours du président de la République au Creusot en décembre 2020 indiquant que l'avenir énergétique de la France passait par le nucléaire et lançant le projet de nouveau porte-avions à propulsion nucléaire, puis la remise par EDF à l'État d'une proposition concernant la construction de 6 réacteurs de technologie EPR2 à l'été 2021, confortée par l'étude technico-économique « Futurs énergétiques 2050 » publiée par RTE à l'automne 2021, et enfin le discours de Belfort en février 2022 traçant la perspective d'un programme de construction de 6 réacteurs de type EPR2, porté par EDF, et la mise à l'étude de la construction de 8 réacteurs additionnels.

Cette nouvelle donne énergétique se caractérise par l'émergence progressive d'un consensus autour d'un mix électrique bâti sur du nucléaire et des énergies renouvelables (hydraulique, solaire, éolien), combinaison apparaissant désormais comme la meilleure solution pour répondre aux enjeux de souveraineté, de réindustrialisation et de réduction des émissions de gaz à effet de serre. La crise Covid et la guerre en Ukraine sont naturellement pour beaucoup dans cette évolution, ayant mis au grand jour les limites de la dépendance à des énergies et des chaînes de valeur situées à l'extérieur des frontières européennes. Cette prise de conscience dépasse d'ailleurs largement les frontières hexagonales, comme en témoigne la multiplication d'annonces de nouveaux projets nucléaires en Europe et dans le monde ces dernières années.

Même si le nucléaire reste un sujet clivant au sein de l'Union européenne, force est de reconnaître qu'une nouvelle dynamique a été créée depuis les débats difficiles autour de son inclusion dans la taxonomie des activités ayant un impact favorable sur l'environnement jusqu'à la constitution, à l'initiative de la ministre de la Transition énergétique, Agnès Pannier-Runacher, d'une alliance des pays favorables à l'énergie nucléaire qui compte désormais 14 États participants sur les 27 qui composent l'Union européenne. Concernant la France, outre les annonces faites en faveur du nucléaire civil de forte puissance – dont l'analyse des enjeux occupera l'essentiel de ce numéro des *Annales des Mines* –, il faut également mentionner celles, dans le cadre de France 2030, visant les petits réacteurs modulaires innovants (SMR & AMR). C'est donc une grande politique nucléaire d'ensemble qui est à nouveau impulsée dans notre pays.

Pour mener à bien cette grande politique nucléaire, et en premier lieu le programme Nouveau Nucléaire France (NNF) de construction de nouveaux réacteurs EPR2, l'État renforce son implication sur l'ensemble des volets stratégiques. Cela se traduit en particulier par la relance des Conseils de politique nucléaire (CPN) sous l'autorité du président de la République, par l'augmentation des moyens alloués au CEA et à l'ASN afin de les doter, en nombre suffisant, des précieuses compétences pour accompagner la relance de cette politique, ainsi que par la création, par décret du 7 novembre 2022, d'une Délégation Interministérielle au Nouveau Nucléaire (DINN). Avec cette délégation, que j'ai l'honneur de diriger, il ne s'agit nullement de se substituer à EDF qui assure les rôles de maître d'œuvre, de maître d'ouvrage et de futur exploitant du programme NNF, mais de jouer un rôle de supervision, qui suppose un lien étroit avec EDF et l'ensemble de la filière nucléaire française, afin de s'assurer que ce programme soit une grande réussite industrielle. Cette mission passe également par une coordination des services administratifs compétents, la mobilisation de l'ensemble de la filière et de tous ceux qui sont amenés à la rejoindre au cours des prochaines années pour réussir sa montée en charge, une contribution aux réflexions sur le cadre juridique, réglementaire et économique le plus adapté au déploiement de ce vaste programme, et enfin, à l'information du public sur ses différents enjeux.

Il me reste à remercier les contributeurs du présent numéro des *Annales des Mines* pour leurs articles qui alimentent précieusement la réflexion sur l'avenir de notre politique énergétique et sur les conditions de réussite de ce grand défi industriel.

# Introduction

Par Vincent LE BIEZ

Adjoint au Délégué interministériel au nouveau nucléaire

Et Paul de LAPEYRIÈRE

Chargé de mission à la Délégation interministérielle au nouveau nucléaire

Après un hiver pour l'industrie nucléaire, long de presque trois décennies dans les pays occidentaux, l'heure serait-elle venue du « nouveau nucléaire » ? Ce terme recouvre en pratique plusieurs réalités : de nouveaux réacteurs, dits de troisième génération, dont la technologie est déjà maîtrisée et qui répondent à de fortes exigences de sûreté, des réacteurs de technologies nouvelles, dites de quatrième génération visant à utiliser plus efficacement les ressources en matières fissiles et à générer moins de déchets nucléaires, ou encore des réacteurs de petite taille (SMR) dont le modèle économique est basé sur la production de série plutôt que sur l'effet de taille qui avait prévalu jusqu'alors.

Le nouveau nucléaire se distingue du nucléaire existant, c'est-à-dire la base installée (principalement au cours des décennies 1970 à 1990) qui est la deuxième source mondiale d'électricité décarbonée derrière l'hydroélectricité (mais la première en Europe, aux États-Unis ou au Japon) et dont la prolongation de la durée de vie en toute sûreté représente un défi industriel et énergétique majeur. C'est ce qu'on appelle le Grand Carénage pour le parc nucléaire français d'EDF, avec l'ambition d'amener les réacteurs actuels à 60 ans et au-delà. S'il n'en sera pas question dans le présent numéro des *Annales des Mines*, il est important de préciser que les enjeux et la dynamique nouvelle en faveur du nucléaire ne se réduisent pas au nouveau nucléaire.

## Le nouveau nucléaire, pour quoi faire ?

Le nouveau nucléaire s'inscrit dans une politique énergétique qui fait de la décarbonation par l'électrification l'un de ses axes clés. Il s'agit donc à la fois d'accompagner une hausse structurelle de la production d'électricité décarbonée mais aussi de commencer à préparer le renouvellement de la base nucléaire installée.

Pour être menée à bien, la transition énergétique implique donc des quantités considérables d'électricité bas-carbone. Selon toute vraisemblance, cette demande continuera à croître fortement dans les prochaines années, comme le montrent les travaux de prospective réalisés par RTE, afin de faire face à l'aggravation de l'urgence climatique et à l'impératif de renforcer notre sécurité d'approvisionnement dans un contexte géopolitique et géoéconomique des plus instables. Il reste à préciser les besoins auxquels devront répondre les projets de nouveau nucléaire. Dans leurs articles, Pierrick Dartois et Marie Suderie se prêtent à l'exercice ardu et évaluent jusqu'à 850 TWh la consommation électrique de la France en 2050 tandis que Thibaud Normand s'attache à décrire le rôle attendu des énergies électriques (renouvelables et nucléaires) dans la stratégie de décarbonation du transport aérien.

Le nucléaire, comme les renouvelables, étant une source d'énergie très capitalistique, son déploiement suppose de pouvoir mobiliser des quantités considérables de capitaux à des taux compétitifs, sujet qu'aborde Jan Horst Keppler de l'Agence pour l'Énergie Nucléaire (AEN). Cela passe par la question de la bonne allocation des risques entre les industriels et les pouvoirs publics, à travers un cadre de régulation adapté permettant de déclencher les investissements nécessaires.

L'État, de manière plus générale, est attendu pour « mettre en musique » cette transition énergétique ambitieuse. Le discours de Belfort du président de la République en février 2022 a permis de fixer la stratégie générale, qu'il convient désormais de décliner à travers la nouvelle programmation pluriannuelle de l'énergie, texte aux enjeux majeurs sur lequel revient Sophie Murlon, directrice générale de l'Énergie et du Climat.

## Mener à bien le chantier du siècle

La filière nucléaire française a beaucoup souffert de l'absence de programme d'ampleur au cours des dernières décennies, ce qui l'a privée de visibilité industrielle sur le temps long. Les projets qui ont été lancés sur cette période n'ont été que des réacteurs unitaires (Olkiluoto 3, Flamanville 3) ou au mieux des paires (Taishan, Hinkley Point C), qui ont certes permis de reconstituer certaines compétences, mais pas de façon suffisamment industrielle. Si tous les feux semblent désormais au vert pour relancer durablement le nucléaire, des efforts sont encore nécessaires pour retrouver, avec humilité, le chemin de la maîtrise industrielle et de l'excellence technique au sein de la filière nucléaire. Inutile de le nier, les dépassements de coûts et de délais observés sur les chantiers EPR précédents, ont

jeté le doute sur la capacité de la filière industrielle française à rééditer les prouesses des années 1970 et 1980. Ces projets constituent toutefois le socle à partir duquel une nouvelle page du nucléaire doit désormais s'écrire, en capitalisant sur le retour d'expérience.

Ce retour aux meilleurs standards industriels concerne au premier chef EDF, qui est à la fois le maître d'ouvrage, le maître d'œuvre et l'exploitant des nouveaux réacteurs nucléaires et qui a déployé depuis 2020, en réponse au rapport de Jean-Martin Folz sur les difficultés rencontrées sur l'EPR de Flamanville, le plan excell dont nous parlent Alain Tranzer et Anne-François de Saint-Salvy dans leur article. S'agissant du principal industriel de la filière nucléaire, Framatome, en charge de la conception et de la réalisation de la chaudière nucléaire, le renforcement de la qualité industrielle a été érigée comme la priorité de l'entreprise, ainsi que nous le décrit son président Bernard Fontana. Gabriel Oblin nous explique comment le produit EPR2 a été conçu à partir du retour d'expérience des projets EPR précédents, afin d'en améliorer en particulier la constructibilité, dans une logique de construction de série de ce modèle en France pour renouveler progressivement notre parc nucléaire.

Ce programme Nouveau Nucléaire France (NNF), consistant en la construction par EDF de 6 EPR2, réalisés par paire sur les sites de Penly, Gravelines et Bugey, fait l'objet, depuis mars 2023, d'une revue de programme associant des experts indépendants, des experts d'EDF et des membres de la délégation interministérielle au nouveau nucléaire (DINN) afin d'évaluer la maturité technique, industrielle et organisationnelle du programme et de s'assurer qu'il intègre bien le retour d'expérience des précédents projets EPR.

La réussite du programme NNF et des autres projets nucléaires d'EDF, d'Orano, du CEA et de l'Andra passe par une mobilisation collective de toute la filière. Comme nous l'explique le directeur général du Gifem Olivier Bard, cet effort de mobilisation a donné lieu à un travail inédit, le programme Match, qui vise à assurer l'adéquation des capacités de la filière avec ses besoins industriels et humains à un horizon de 10 ans.

Pour remédier à la perte de compétences liée à la fragilisation du tissu industriel au sens large de ces dernières années, Hélène Badia revient pour nous sur les moyens mis en œuvre par la filière, à travers l'Université des Métiers du Nucléaire, pour attirer et préparer les jeunes générations aux métiers du nucléaire, avec un objectif très ambitieux de recruter 100 000 personnes au cours des 10 prochaines années. Corentin Lelièvre poursuit la réflexion en nous partageant la méthode mise en œuvre par l'école Héfaïas pour former les futurs soudeurs.

## Le nouveau nucléaire au service de la réindustrialisation du pays

Même si les premiers réacteurs EPR2 ne sont pas attendus avant l'horizon 2035-2040, c'est bien aujourd'hui que se dessine le succès de ce programme dont Hubert Virlet rappelle qu'il constitue une opportunité considérable au service de la réindustrialisation de la France. Ainsi, les décisions prises aujourd'hui seront structurantes pour la compétitivité de l'économie française et la prospérité des Français dans les décennies à venir. Nicolas de Warren revient en particulier sur le partenariat historique entre production nucléaire et industries électro-intensives qui a structuré le paysage industriel français et sur la nécessité de le faire perdurer, dans un contexte de concurrence mondiale, pour décarboner l'industrie de façon compétitive.

Et au-delà des seuls réacteurs, Claude Imauven nous rappelle que l'effort industriel que suppose le nouveau nucléaire concerne également le cycle du combustible nucléaire, en particulier les investissements futurs destinés à développer les capacités minières, à accroître les capacités d'enrichissement ou à préparer le renouvellement des installations de l'aval du cycle qui permettent de traiter et de recycler le combustible nucléaire utilisé.

Comme toutes les autres filières industrielles, la capacité d'innovation du secteur nucléaire est essentielle pour accroître la performance et l'attractivité de la filière, tout en préparant les ruptures technologiques nécessaires pour aller vers la neutralité carbone en 2050. Jean-François Debost et Bernard Salha reviennent sur les moyens de renforcer cette dynamique d'innovation au sein de la filière nucléaire française.

France 2030 a donné un véritable élan en faveur des projets nucléaires innovants (SMR/AMR) qui ont vocation à diversifier les applications de l'énergie d'origine nucléaire (production de chaleur ou d'hydrogène décarboné). Dans ce contexte de recherche de rupture technologique, il n'est pas inutile de tirer les leçons issues d'autres secteurs industriels. À partir de l'exemple du New Space, Antoine Chesne explore l'avenir du modèle des SMR.

## Pour une relance durable du nucléaire

Industrie du temps long, le nucléaire a besoin de s'appuyer sur un large soutien dans l'opinion publique, qui s'était fortement érodé suite aux accidents de Tchernobyl (1986) et de Fukushima (2011). Henri Wallard et David Lévy expliquent comment le tournant climatique et la guerre en Ukraine ont conduit à une hausse très nette du soutien au nucléaire en France et en Europe.

À ce titre, le poids croissant de l'Alliance européenne du nucléaire, initiée par la ministre de la Transition énergétique Agnès Pannier-Runacher, vient appuyer, sur le plan politique, cette dynamique favorable pour le nucléaire en Europe et permet, comme l'écrit Pierre Jérémie, des avancées significatives ouvrant des perspectives claires pour la prochaine mandature européenne. Cette impulsion forte de la France, qui entraîne désormais derrière elle une

majorité d'États membres de l'UE, permet de valoriser ses atouts et ses ressources propres et lui confèrent une responsabilité de premier plan.

Sur le plan national, les dispositifs introduits par la récente loi d'accélération du nucléaire<sup>1</sup> permettent, comme le rappellent Anne-Cécile Rigail et Pierre Guillot, divers allègements pour accélérer et sécuriser juridiquement les constructions de futurs réacteurs. Julien Collet le souligne, tous ces nouveaux projets nucléaires, qu'il s'agisse de l'EPR2 ou des nouveaux réacteurs innovants, ne s'accompagnent d'aucune révision à la baisse du niveau d'exigence de sûreté. L'Autorité de Sûreté Nucléaire met en place des modalités d'échange et de travail adaptées avec ces différents projets, qui posent des questions nouvelles ou réinterrogent les doctrines en vigueur en matière de sûreté.

Pierre-Marie Abadie revient quant à lui sur l'action de l'Andra pour assurer la gestion responsable des déchets radioactifs en France, en particulier avec le projet de centre de stockage géologique profond Cigéo pour lequel l'Andra a demandé une autorisation de création début 2023 et qui doit accueillir les déchets de haute et moyenne activité à vie longue, à l'origine de 99 % de la radioactivité totale.

Enfin, pour conclure ce numéro des *Annales des Mines* consacré au nouveau nucléaire, la parole est donnée à deux grands témoins du nucléaire, avec des angles de vue différents. Fort de son rôle de président de la commission particulière du débat public consacré au programme NNF et aux EPR2 de Penly, Michel Badré s'interroge sur la façon de mieux garantir au public son droit à être informé et, en particulier, à obtenir des réponses aux questions légitimes qu'il soulève. De son côté, Yves Bréchet expose les conditions nécessaires pour inscrire la relance du nucléaire en France dans la durée et insiste sur la nécessité de relancer une filière à neutrons rapides pour assurer la soutenabilité de la politique nucléaire sur des échelles de temps longues.

Puissent les réflexions de ce numéro des *Annales des Mines* contribuer à nous faire prendre conscience des principaux enjeux et des multiples défis à relever pour faire du nouveau nucléaire un grand succès pour notre pays et l'une des solutions majeures à la décarbonation de notre économie.

---

<sup>1</sup> Loi n°2023-491 du 22 juin 2023 relative à l'accélération des procédures liées à la construction de nouvelles installations nucléaires à proximité de sites nucléaires existants et au fonctionnement des installations existantes.



# L'évolution de la demande en électricité décarbonée

Par Pierrick DARTOIS

Doctorant en cryptographie post-quantique au centre Inria de l'Université de Bordeaux

Et Marie SUDERIE

Directrice de cabinet adjointe à la Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (DGCCRF)

Sortir des énergies fossiles tout en réindustrialisant la France conduit à électrifier fortement les usages d'ici 2050. S'il existe des alternatives à l'électricité décarbonée, telles que la biomasse, leur gisement est trop limité pour couvrir les besoins futurs. Selon nos estimations, la consommation électrique de la France pourrait atteindre jusqu'à 850 TWh en 2050. Pour répondre à une telle demande électrique, une relance ambitieuse du nucléaire est indispensable.

## Introduction

Aujourd'hui, le rôle majeur de l'électricité dans l'atteinte de la neutralité carbone en 2050 et des objectifs climatiques européens pour 2030 (Fit-for-55) fait de plus en plus consensus parmi les grands acteurs de l'énergie et les pouvoirs publics. L'évolution des prévisions de RTE en atteste. Tandis que le bilan prévisionnel 2017 estimait que la consommation électrique devait baisser ou au mieux se stabiliser à l'horizon 2035 (RTE, 2017), le rapport Futurs énergétiques 2050 (RTE, 2021) estimait qu'elle devait croître progressivement pour atteindre 550 à 750 TWh d'ici 2050 (contre 475 TWh aujourd'hui). Le dernier bilan prévisionnel (RTE, 2023) estime que la consommation pourrait atteindre 580 à 640 TWh dès 2035 dans le scénario de référence. Dans les scénarios de l'ADEME (ADEME, 2022), la consommation d'électricité ne pourrait baisser d'ici 2050 qu'avec des efforts de sobriété considérables.

Si l'électricité est aussi importante, c'est non seulement parce qu'elle contribue à l'atteinte de nos objectifs climatiques, mais aussi parce qu'elle est devenue un enjeu stratégique dans le contexte géopolitique actuel. Produire de l'électricité en France, permet de s'affranchir des combustibles fossiles importés et de réindustrialiser le pays. En nous appuyant notamment sur notre étude « Couvrir nos besoins énergétiques » éditée par la Fabrique de l'Industrie (Dartois et Suderie, 2023), nous expliquerons le rôle de l'électricité dans la transition énergétique et sa déclinaison dans différents secteurs.

## Électrifier pour décarboner

Guidée par des objectifs communautaires et nationaux, la France doit réduire ses émissions de 50 %

d'ici 2030, par rapport au niveau de 1990 et atteindre la neutralité carbone en 2050. Bien qu'elle dispose déjà d'un des mix électriques les moins carbonés parmi les pays développés, principalement grâce à sa production nucléaire, l'électricité ne représente qu'un quart de sa consommation énergétique. En 2021, les énergies fossiles représentaient 58 % de la consommation d'énergie finale. Pour atteindre ses objectifs climatiques, la France doit y substituer des énergies bas carbone (électricité, biomasse et chaleur renouvelable).

La stratégie française pour l'énergie et le climat (SFEC) envisage d'y parvenir grâce à une baisse de la consommation d'énergie finale de 44 % d'ici 2050 grâce à des gains d'efficacité énergétique et la sobriété, une électrification des usages (à hauteur de 56 %), le développement de la chaleur renouvelable (pompes à chaleur) et un très fort recours à la biomasse (2 fois le niveau de consommation actuel). Plusieurs acteurs, notamment RTE et France Stratégie (2021), alertaient sur l'ambition très forte de l'ex-stratégie nationale bas carbone (SNBC), ancêtre de la SFEC, en matière de mobilisation de la biomasse. Bien que l'ambition de la SFEC soit plus modeste que la SNBC (340 TWh contre 460 TWh), l'ambition reste élevée et la production française de biomasse pourrait ne pas couvrir les besoins nationaux. Produire des agrocarburants et du biogaz pourrait entrer en concurrence avec l'alimentation humaine, et par ailleurs, l'augmentation des prélèvements de bois pour la production d'énergie pose question en raison de la dégradation des puits de carbone forestiers depuis 2014 (CITEPA, 2023). C'est pourquoi la SFEC nuance ses propres estimations : « Il convient de souligner que les objectifs fixés dans le présent document pour la production de chaleur renouvelable, de biogaz ou de biocarburants, sont étroitement liés à la disponibilité suffisante de biomasse. Ces objectifs ne pourront pas

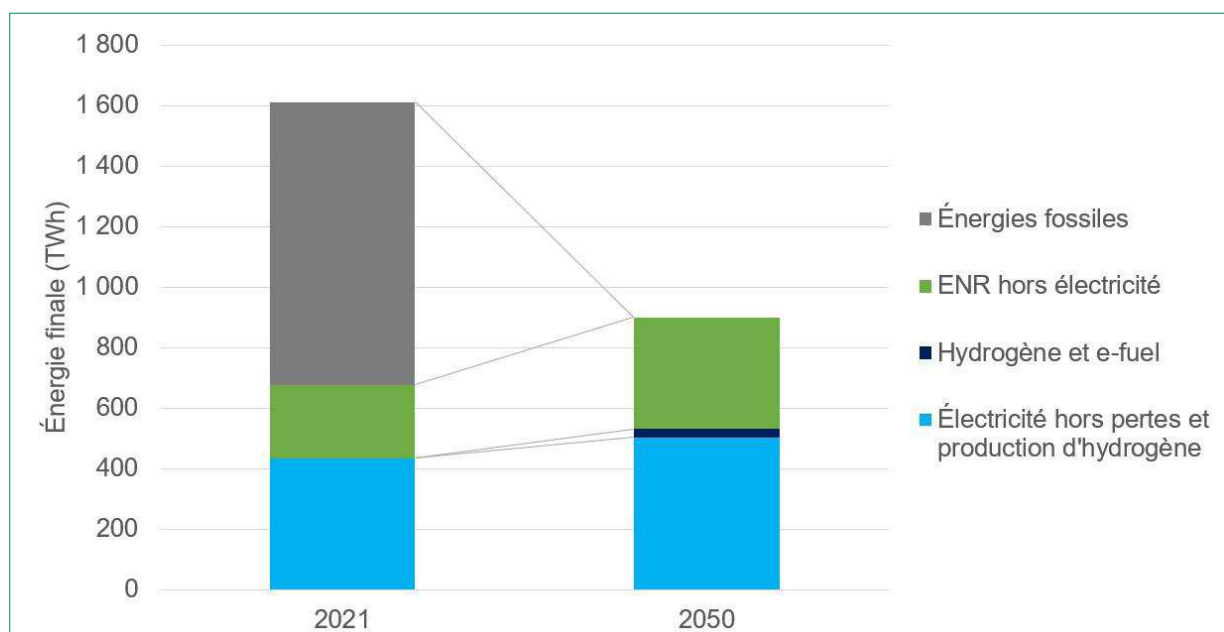


Figure 1 : Consommation d'énergie finale en 2021 et en 2050 selon les projections de la SFEC (Source : ministère de la Transition énergétique, 2023).

tous être atteints en cas d'évolutions défavorables de cette disponibilité. » (SFEC, 2023, p. 87).

À moyen terme, les documents de la planification écologique publiés par le Secrétariat Général à la Planification Écologique alertent déjà sur les tensions d'approvisionnement en biomasse à l'horizon 2030 (SGPE, 2023). Sur la base de ces considérations, nos modélisations (Dartois et Suderie, 2023) ont été volontairement prudentes sur la biomasse agricole, et en particulier sur le biogaz<sup>1</sup>, ce qui implique une électrification accrue.

### Dans le bâtiment et les transports, l'électricité est le vecteur énergétique le plus efficace

Le secteur du transport routier a consommé 466 TWh en 2021, dont 92,5 % de carburants fossiles (SDES, 2023). Compte tenu des contraintes très fortes sur la biomasse, l'électrification de ce secteur est indispensable à sa décarbonation, notamment parce que l'électricité est le vecteur énergétique le plus efficace. Tandis que le rendement d'un moteur thermique se situe autour de 30 %, celui d'un moteur électrique peut atteindre 90 %. Le vecteur hydrogène parfois promu comme une alternative est moins efficace en raison des pertes de conversion. L'électricité doit être convertie en hydrogène par électrolyse (avec rendement de 65 à 70 %), l'hydrogène stocké et transporté, puis reconverti en électricité par une pile à combustible à bord du véhicule

(avec un rendement de 50 %). Le rendement global (du puits à la roue) est comparable à celui des véhicules thermiques. Le bilan est encore pire pour les carburants de synthèse dont la production nécessite elle-même de l'hydrogène combiné avec du CO<sub>2</sub> issu de la gazéification de la biomasse ou capturé à la sortie de sites industriels émetteurs<sup>2</sup>. L'usage le plus rationnel de ces deux derniers vecteurs énergétiques est de les réserver en priorité aux secteurs particulièrement difficiles à électrifier (transport aérien, maritime et fluvial...).

Ainsi, dans nos travaux de modélisation (Dartois et Suderie, 2023), le parc de véhicules légers est quasi-complètement électrifié à l'horizon 2050 et nous avons retenu un mix technologique diversifié pour les poids lourds (électricité pour les courtes et moyennes distances, biogaz et hydrogène pour les longs trajets). En 2050, le transport routier consomme 125 TWh d'électricité directement et pour la production d'hydrogène et 19 TWh de biogaz. L'électrification de ce secteur permet donc d'importantes économies d'énergie mais nécessite de mettre en service de nouvelles sources d'électricité bas carbone.

Dans le secteur du bâtiment, l'électrification devrait aussi s'imposer à l'horizon 2050. Si l'isolation permet de réduire des consommations énergétiques de 30 % dans le cas d'une rénovation performante (RTE et ADEME, 2020), elle ne peut suffire à elle seule à décarboner un secteur très consommateur d'énergies fossiles (213 TWh de gaz et 80 TWh de fioul en 2021).

<sup>1</sup> En revanche, elles étaient sans doute trop optimistes sur le bois-énergie, car elles s'inscrivaient dans la trajectoire de la SNBC, sur la base d'une étude de l'INRA et de l'IGN (2017) qui devrait être révisée prochainement.

<sup>2</sup> Sur le sujet des carburants de synthèse, nous recommandons la lecture du rapport de l'Académie des technologies sur les carburants d'aviation durables et son complément plus récent (Académie des technologies, mars 2023 ; Académie des technologies, octobre 2023).

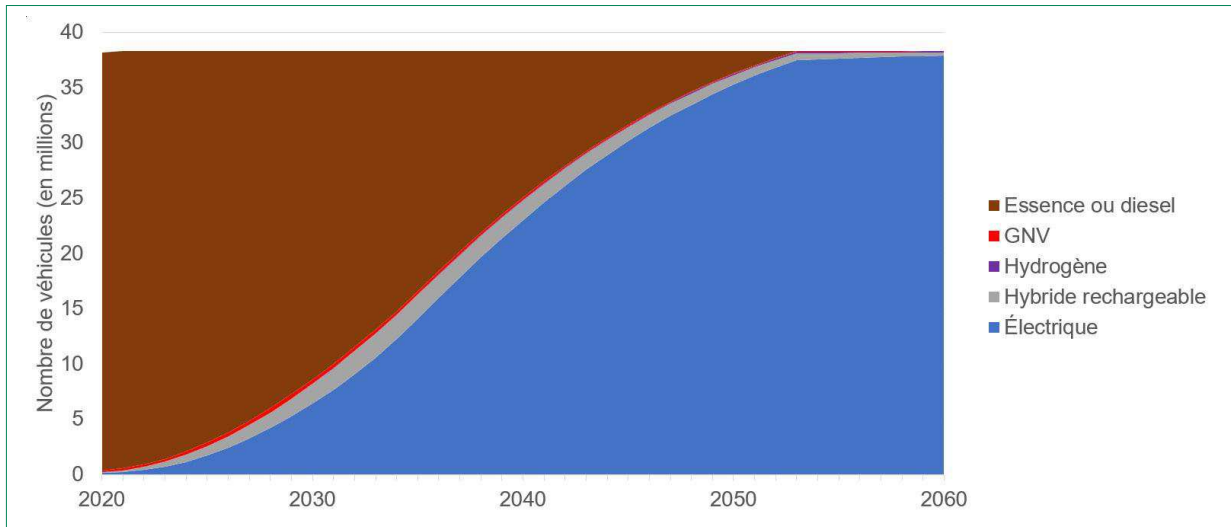


Figure 2 : Évolution du parc de véhicules particuliers entre 2020 et 2060 (Source : Dartois et Suderie, 2023).

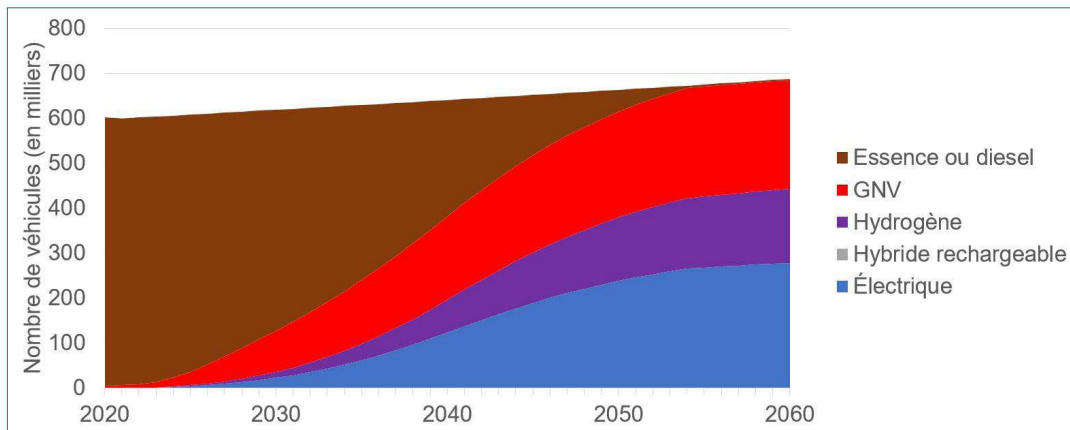


Figure 3 : Évolution du parc de poids lourds entre 2020 et 2060 (Source : Dartois et Suderie, 2023).

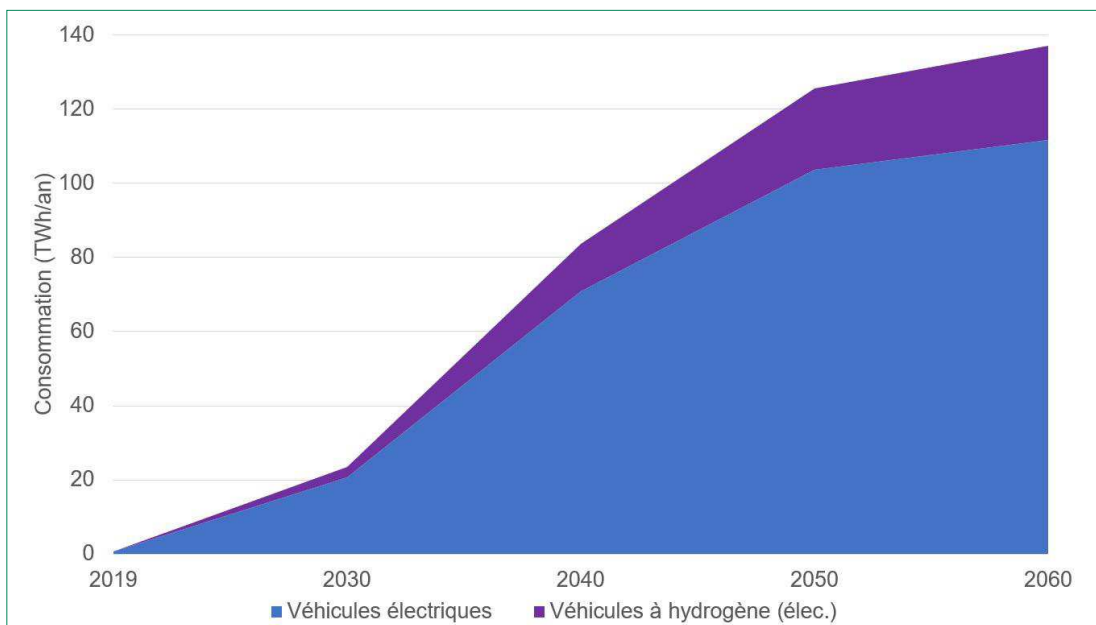


Figure 4 : Consommation d'électricité des véhicules électriques et à hydrogène (Source : Dartois et Suderie, 2023).

À quel besoin répond un programme de nouveau nucléaire ?

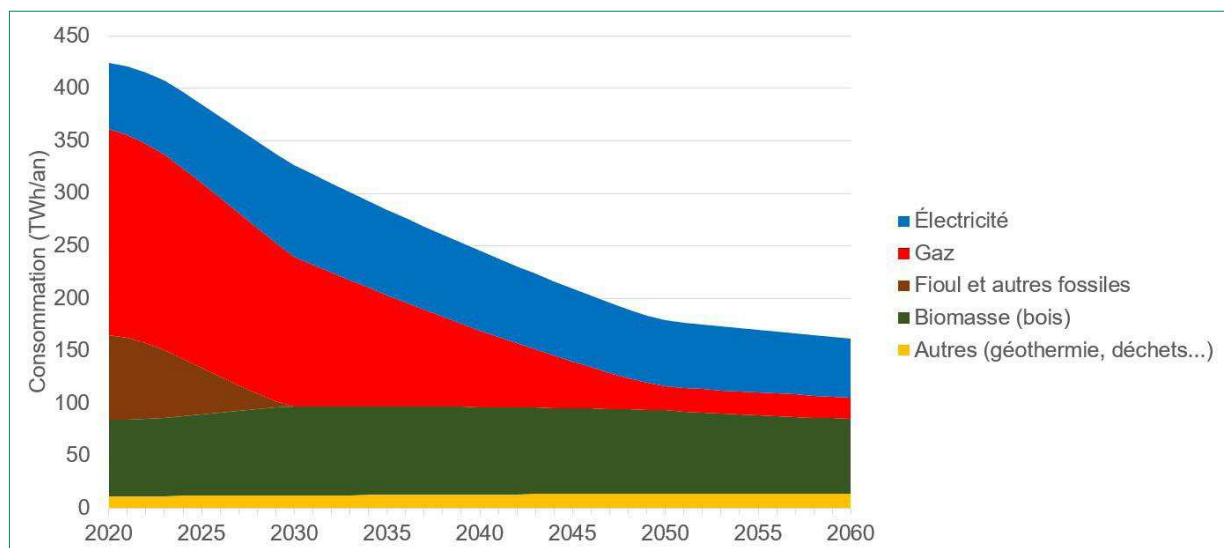


Figure 5 : Répartition de la consommation énergétique liée au chauffage résidentiel et tertiaire par source d'énergie (Source : Dartois et Suderie, 2023).

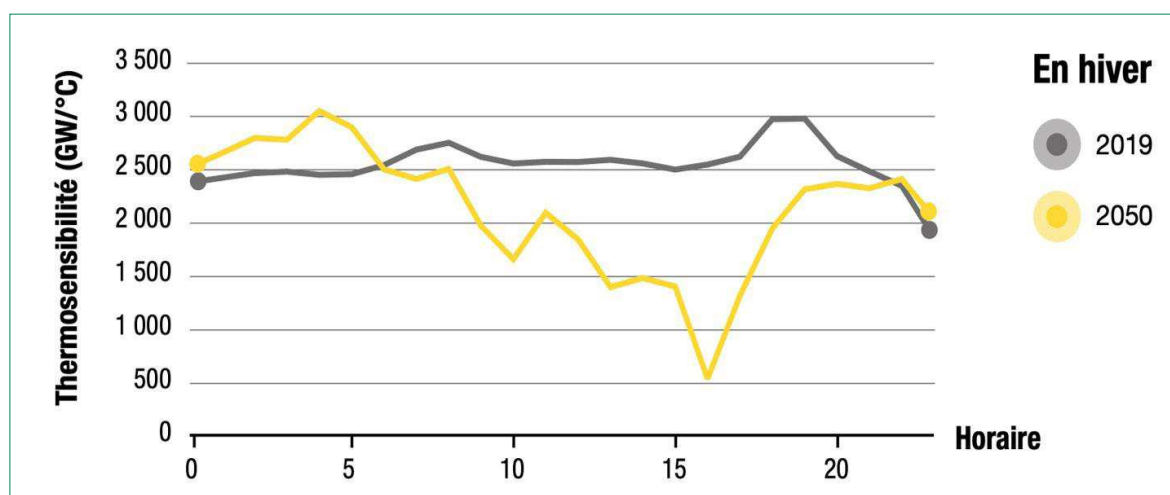


Figure 6 : Évolution de la thermosensibilité hivernale entre 2019 et 2050 (Source : Dartois et Suderie, 2023).

Le gisement limité de biogaz, réservé prioritairement à l'industrie, doit conduire à privilégier l'électrification.

De même que pour les transports, le vecteur électrique est le plus efficace. En exploitant l'énergie de l'air ambiant, une pompe à chaleur classique restitue 3 kWh de chaleur pour 1 kWh d'électricité. Dans nos modélisations (Dartois et Suderie, 2023), le déploiement généralisé de cette technologie devrait permettre de passer la part de l'électricité dans le chauffage des bâtiments de 26 à 74 %, de sortir du fioul en 2030 et de diviser la consommation de gaz par 10 en 2050. Pour autant, la consommation d'électricité pour le chauffage serait maintenue à son niveau actuel (63 TWh) grâce à la rénovation thermique et à l'efficacité des pompes à chaleur. L'explosion de la pointe électrique en hiver en raison du chauffage n'est donc pas à craindre, puisque

la thermosensibilité<sup>3</sup> de la consommation électrique devrait même légèrement baisser.

### L'électricité est essentielle à la décarbonation et à la relance de l'industrie

Avec 19 % des émissions de gaz à effet de serre en 2021, l'industrie est le troisième secteur le plus émetteur en France derrière les transports (30 %) et l'agriculture (19 %) (SGPE, 2023). Si les émissions du secteur se sont réduites de moitié depuis 1990, c'est en grande partie à cause de la désindustrialisation. Il

<sup>3</sup> Pour rappel, la thermosensibilité est la variation de la consommation électrique par degré de moins en hiver. Elle se situe autour de 2,5 GW/°C aujourd'hui.

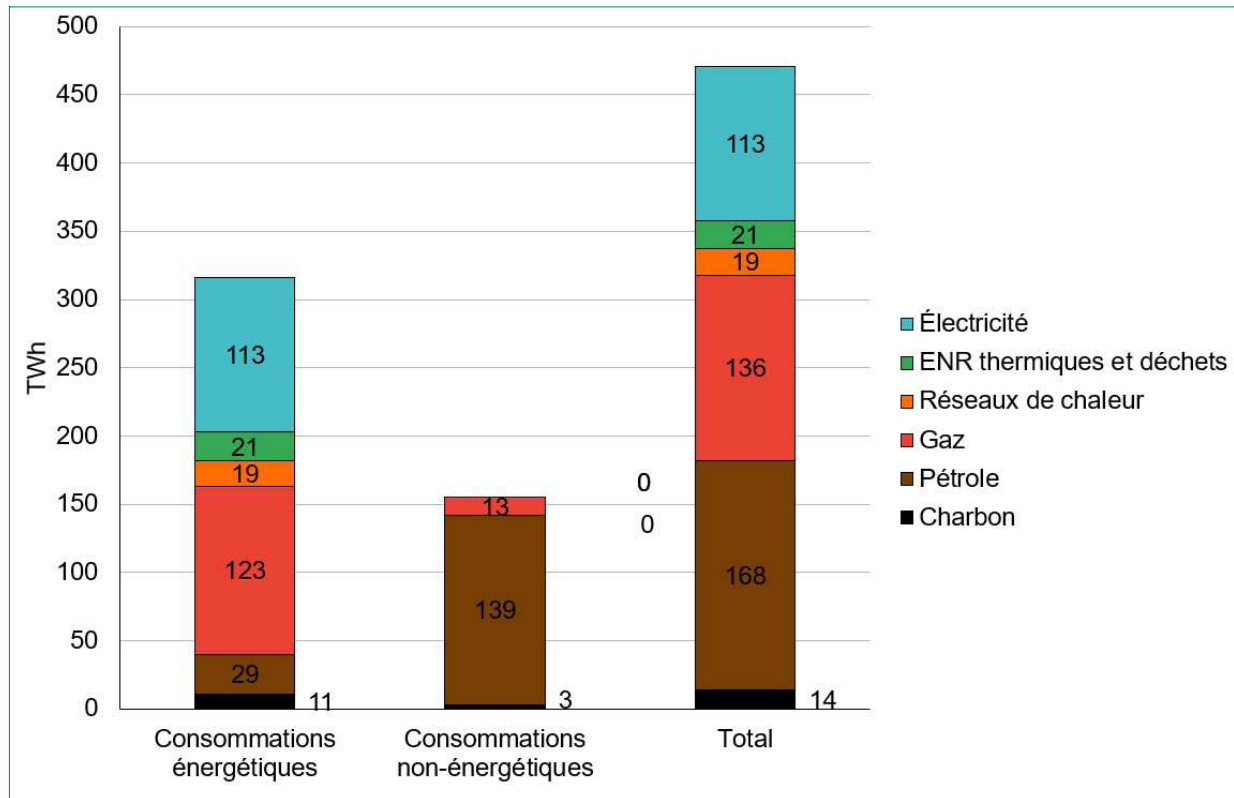


Figure 7 : Consommations d'énergie dans l'industrie en TWh (Source : SGPE, 2023).

n'est donc guère surprenant que la part des importations dans l'empreinte carbone des Français n'ait fait qu'augmenter depuis, passant de 39 % à 51 % entre 1995 et 2021 (SDES, 2022).

L'industrie française reste aujourd'hui très dépendante des combustibles fossiles. En 2021, charbon, pétrole et gaz représentaient 52 % des consommations énergétiques de l'industrie et la totalité des consommations non-énergétiques (en tant que matières premières pour la plasturgie, les engrais et la métallurgie).

Outre leur usage « matière », les combustibles fossiles servent principalement à produire de la chaleur. La biomasse peut s'y substituer facilement mais son gisement étant limité, elle ne doit prioritairement être utilisée qu'en l'absence d'alternatives décarbonées, notamment pour les procédés à très haute température (par exemple pour la production de ciment). Le développement des réseaux de chaleur industriels alimentés en chaleur fatale ont aussi leur rôle à jouer. Le gisement de chaleur fatale est estimé par l'ADEME (2022) à 99,6 TWh à fin 2020, mais moins de la moitié de ce gisement est à plus de 100 °C (donc potentiellement exploitable par l'industrie). En outre, ce gisement doit être partagé avec le secteur du bâtiment (pour les besoins de chauffage) et pourrait évoluer défavorablement avec les progrès de la décarbonation. Décarboner la production de chaleur dans l'industrie est donc impossible sans une électrification massive, même avec de gros efforts d'efficacité énergétique (RTE, 2021 ; Yggdrasill, 2021).

Cette nécessaire électrification directe des procédés repose sur des ruptures technologiques importantes, des prix de l'électricité compétitifs vis-à-vis des combustibles et un soutien public dans la durée. Elle s'accompagne aussi d'une électrification indirecte, qui prend la forme d'une substitution par l'hydrogène décarboné (produit par électrolyse de l'eau). L'exemple le plus emblématique est sans doute celui de l'acier. Aujourd'hui, les usines sidérurgiques de Fos-sur-Mer et Dunkerque sont les sites industriels les plus émetteurs de France et consomment l'essentiel du charbon utilisé par l'industrie pour réduire le minerai de fer. La voie la plus prometteuse pour les décarboner complètement est la réduction directe du minerai de fer par l'hydrogène, couplée au recyclage de la ferraille dans des fours à arcs électriques (procédé DRI-EAF).

Dans son étude sur les besoins en électricité de l'industrie en 2050 réalisée pour l'Uniden, le cabinet Yggdrasill (2021) estime que la sidérurgie et la chimie seront les principaux secteurs consommateurs d'hydrogène, le reste des consommations étant plus diffuses (principalement pour les besoins de chaleur). Au total, les besoins d'hydrogène dans l'industrie pourraient atteindre 29 à 77 TWh en 2050, et viendraient s'ajouter à la consommation directe de l'industrie, qui atteindrait 180 à 271 TWh, à comparer aux 113 TWh de 2019 (Dartois et Suderie, 2023 ; RTE, 2021 ; Yggdrasill, 2021). La fourchette basse correspond au scénario de référence de RTE où la part de l'industrie dans le PIB est maintenue à 10 %. La fourchette haute provient du cabinet Yggdrasil et s'inscrit dans une trajectoire de

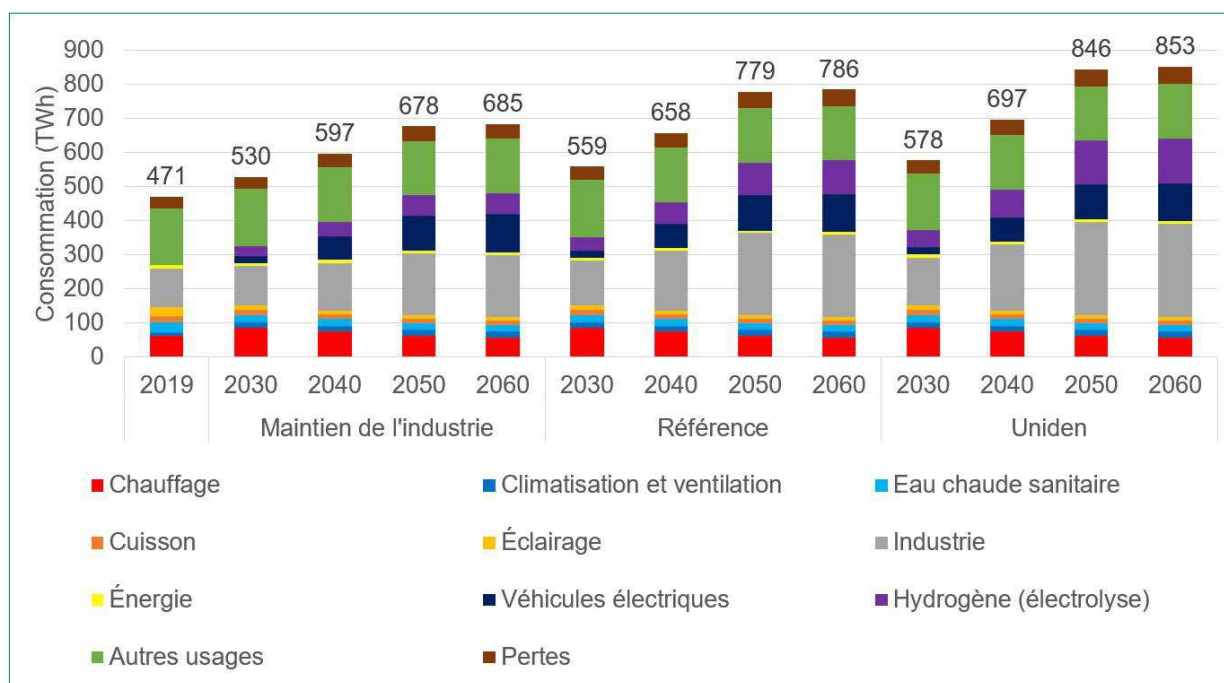


Figure 8 : Évolution de la consommation d'électricité dans trois scénarios prospectifs (Source : Dartois et Suderie, 2023).

rééquilibrage de la balance commerciale de l'industrie manufacturière dans la plupart des secteurs industriels et de forte électrification. Dans notre étude (Dartois et Suderie, 2023), cette estimation sert de référence au scénario le plus électro-intensif (dit « Uniden »), où la consommation électrique atteint 846 TWh en 2050, dont 43 % pour les seuls besoins de l'industrie.

Compte tenu des contraintes et des ambitions politiques françaises, ce dernier scénario prudent sur le gisement de biomasse et volontariste sur le plan industriel est une bonne référence sur les besoins électriques futurs. Y renoncer risquerait de conduire à un abandon de la réindustrialisation, dommageable à l'empreinte carbone de la France<sup>4</sup> ou à une dépendance prolongée aux combustibles fossiles. D'où l'importance d'une production massive d'électricité décarbonée.

## Conclusion

Le nucléaire à lui seul ne peut certes répondre à la hausse des consommations d'électricité d'ici 2035 et une accélération du déploiement des énergies renouvelables est indispensable à cet horizon (RTE, 2021 ; RTE, 2023). En revanche, le maintien d'une capacité nucléaire importante à l'horizon 2050 et au-delà est indispensable à la sécurité d'approvisionnement électrique. En effet, en l'absence de nouveau programme nucléaire, l'effet falaise qui commencerait en 2040 en raison de la fermeture des tranches nucléaires existantes à partir de 60 ans d'exploitation conduirait à installer 215 GW de solaire et 125 GW d'éolien à horizon

2050 pour faire face au double défi de la hausse de la consommation et de la réduction de la production nucléaire (Dartois et Suderie, 2023). Les rythmes de déploiement que cela implique (plus de 9 GW/an pour le solaire) s'approcheraient de l'Allemagne et devraient être poursuivis de 2030 jusqu'à 2060. En outre, des moyens de stockage intersaisonnier (notamment le stockage géologique de l'hydrogène) seraient nécessaires pour assurer l'équilibre offre-demande sur le système électrique à tout instant. La faisabilité d'un tel scénario pose question. De l'aveu même de RTE (2021) qui a étudié ce type de scénario de sortie du nucléaire : « Dans les scénarios où la fermeture des réacteurs nucléaires n'est pas compensée par de nouveaux, le maintien de la performance climatique nécessite un strict respect des rythmes de développement des renouvelables et implique un remplacement du gaz fossile utilisé dans les centrales thermiques par du gaz vert dès la décennie 2030-2040. Si ces conditions ne sont pas respectées, les émissions de gaz à effet de serre du système électrique augmenteront et rendront la neutralité carbone hors d'atteinte ».

## Références bibliographiques

ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES (mars 2023), « La décarbonation du secteur aérien par la production de carburants durables », Rapport, Paris.

ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES (octobre 2023), « Feuille de route vers la production de e-carburants », Avis, Paris.

ADEME (2022), *Récupération de chaleur fatale - État des réalisations et évolution du gisement à fin 2020*, Angers, La librairie de l'ADEME, coll. Expertises.

ROUX A. *et al.* (2017), « Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique ? », étude de l'INRA et l'IGN.

<sup>4</sup> RTE (2021) estime en effet qu'une politique de réindustrialisation réduirait les émissions cumulées de la France de 900 MtCO<sub>2eq</sub>, soit l'équivalent de deux années d'émissions au rythme actuel.

CITEPA (2023), « Bilan des émissions en France de 1990 à 2022 », rapport Secten.

DARTOIS P. & SUDERIE M. (2023), « Couvrir nos besoins énergétiques », éditeur la Fabrique de l'Industrie.

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE (2023), « Stratégie française pour l'énergie et le climat ».

MOURJANE I. & FOSSE J. (2021), « Biomasse agricole : quelles ressources pour quel potentiel énergétique ? », Paris, France Stratégie.

RTE (2017), « Bilan prévisionnel 2017, "Synthèse" », Courbevoie, p. 12.

RTE (2021), « Futurs énergétiques 2050 », Courbevoie, Chapitre 3, pp. 72-145.

RTE (2023), « Bilan prévisionnel 2023-2035 », Courbevoie.

RTE & ADEME (2020), « Réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, impact sur le système électrique : quelle contribution du chauffage dans les bâtiments à l'horizon 2035 ? », rapport, 268 pages.

SDES (2023), « Bilan énergétique de la France pour 2021 », Paris.

SDES, BAUDE M. (2022), « L'empreinte carbone de la France de 1995 à 2021 ».

SGPE (2023), « La planification écologique dans l'énergie ».

YGGDRASIL & UNIDEN (2021), « Projection à 2050 de la consommation électrique de l'industrie manufacturière française ».

# La décarbonation du secteur aérien au défi de l'accès à l'énergie décarbonée

Par Thibaud NORMAND

Directeur de programme au sein de Safran Nacelles

Le secteur aérien a adopté en 2021 l'objectif de la neutralité carbone d'ici 2050 et convergé rapidement sur les leviers de décarbonation requis pour atteindre cet objectif. Cette décarbonation nécessite toutefois le développement massif et rapide d'une filière de carburants aériens durables. Aux côtés de la biomasse, dont les ressources sont empreintes d'incertitude, l'électricité décarbonée apparaît clé pour la production de carburants de synthèse. Le secteur aérien français pourrait ainsi représenter une consommation électrique indirecte de l'ordre de 150 TWh en 2050.

Le développement d'une nouvelle filière industrielle de production de carburants de synthèse, fortement électro-intensive, représente une opportunité de nouvel usage pour l'électricité nucléaire. Le nouveau nucléaire devra toutefois se montrer compétitif face aux sources d'électricité renouvelables centralisées, sur un marché des carburants aériens durables ou Sustainable Aviation Fuels (SAF) qui sera mondial.

**A**u début des années 2000, l'association entre les secteurs aérien et nucléaire évoquait plutôt la prise en compte, dans les études de sûreté de l'EPR, du risque associé à la chute d'un avion de ligne sur le réacteur. Une vingtaine d'années plus tard, c'est l'exigence de décarbonation du secteur aérien, et l'ampleur des besoins énergétiques associés, qui invite à repenser les liens avec l'industrie nucléaire.

Si les émissions de gaz à effet de serre de l'aviation sont modestes au niveau mondial (2,5 % en 2019), le secteur est soumis à une pression croissante pour se décarboner. Après un premier engagement pris en 2008 de diviser par deux ses émissions de gaz à effet de serre entre 2005 et 2050, le secteur aérien s'est engagé en 2021 à atteindre la neutralité carbone au niveau mondial en 2050, objectif adopté en 2022 par l'ensemble des États réunis au sein de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI).

## La décarbonation du secteur aérien repose sur le développement massif des carburants durables

Le secteur aérien se caractérise par un petit nombre d'acteurs technologiques (deux grands avionneurs, Airbus et Boeing, quelques grands motoristes, etc.) imbriqués dans des chaînes de valeur globales. Cela entraîne un fort niveau de coopération, qui a contribué à une convergence rapide sur les leviers de décarbonation accessibles. Toutes les feuilles de route de décar-

bonation de l'aviation<sup>1</sup> reposent ainsi sur trois leviers technologiques :

- l'amélioration de la performance énergétique des avions ;
- la transition vers les carburants aériens durables ;
- l'amélioration de l'efficacité des opérations aériennes et au sol.

### Améliorer fortement l'efficacité énergétique des avions et des opérations

Comme dans d'autres secteurs, améliorer l'efficacité énergétique constitue le premier levier de la stratégie de décarbonation. Le renouvellement régulier des flottes d'avion a généré ces dernières décennies un progrès continu de l'efficacité énergétique d'environ 1,5 % par an. Atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 suppose une rupture dès la prochaine génération d'avion, mise en service dans la décennie 2030 et qui constituera la majorité de la flotte en 2050. Safran estime ainsi que le futur remplaçant de l'A320, mis en service vers 2035, devrait viser un gain de consommation de 30 % par passager.kilomètre, soit le double du gain usuel entre deux générations.

<sup>1</sup> Par exemple : Waypoint 2050 (2021) au niveau mondial, Destination 2050 au niveau européen, feuille de route du secteur aérien (2023) au niveau français, ou encore les scénarios de l'association AéroDécarbo.



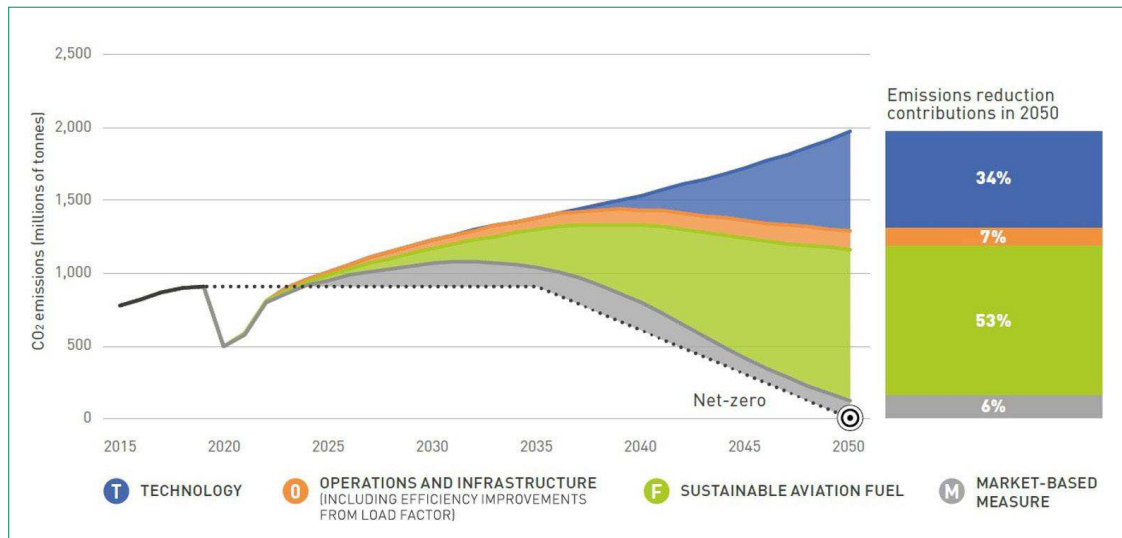


Figure 1 : Trajectoire de décarbonation du secteur aérien (ATAG, 2021).

Atteindre une telle performance suppose de combiner l'ensemble des pistes d'amélioration technologiques identifiées sur les avions :

- La motorisation : Safran et GE Aerospace travaillent notamment sur les matériaux résistant aux hautes températures, l'utilisation d'un réducteur pour la soufflante, l'hybridation électrique, ainsi qu'une architecture non carénée, pour gagner jusqu'à 20 % de consommation au niveau du moteur.
- L'aérodynamique : des progrès significatifs sont attendus grâce à l'allongement des ailes et l'optimisation de leur forme.
- L'allègement : il s'agit de réduire la masse des aérostructures et des systèmes embarqués, grâce à des matériaux plus légers (composites) ou la fabrication additive.
- L'électrification : la substitution croissante des systèmes hydrauliques, pneumatiques ou mécaniques par l'électrique permet un allègement des réseaux, et des prélèvements énergétiques optimisés sur les moteurs.

En complément, un ensemble de leviers relatifs aux opérations aériennes et au sol pourrait apporter 5 à 10 % d'efficacité supplémentaire d'ici 2050 : roulage électrique au sol, recours à des trajectoires plus directes grâce à une meilleure gestion du trafic aérien, etc. Si les innovations technologiques associées sont bien identifiées, ces leviers reposent aussi sur des évolutions organisationnelles importantes du contrôle aérien.

Tous ces progrès combinés pourraient apporter des gains d'efficacité énergétique de l'ordre de 2 % par an, mais ne permettront pas de réduire significativement les émissions compte tenu de la croissance forte du secteur. À titre d'exemple, le scénario Net Zero 2050 de l'Agence internationale de l'énergie (2021) prévoit une consommation d'énergie finale stable sur la période 2019-2050, résultant d'un quasi-doublement du trafic de

passagers. La décarbonation du secteur suppose donc une transition profonde vers de nouvelles énergies.

### Assurer la transition vers des carburants bas-carbone

La propulsion électrique n'apportant pas l'autonomie requise, l'aviation demeurera largement propulsée par des turbines à gaz à l'horizon 2050. Deux types de carburants décarbonés sont envisagés : les carburants aériens durables ou Sustainable Aviation Fuels (SAF) ; et l'hydrogène – cette deuxième voie présente toutefois des défis majeurs et sa contribution à la décarbonation ne sera significative qu'au-delà de 2050.

Les SAF sont des carburants liquides utilisables en mélange avec le kérosène, et à terme purs, constitués de carbone non fossile. Ils sont indispensables pour décarboner la génération actuelle d'avions, et le demeureront pour les vols long-courriers pour lesquels l'hydrogène n'est pas une solution même à long terme.

La Figure 2 de la page suivante, extraite du rapport de l'Académie des Technologies (2023), illustre les principaux procédés et ressources de production des SAF. Les biocarburants avancés, qui apportent une réduction de CO<sub>2</sub> d'environ 80 % sur leur cycle de vie par rapport au kérosène, sont déjà matures. Des installations de production de biocarburants à partir d'huiles usagées sont en service, comme celle de TotalÉnergies à La Mède en France. Leur production s'est élevée à environ 300 kt en 2022, soit 0,1 % de la consommation mondiale de carburant aérien. Plusieurs nouvelles filières arriveront à la maturité industrielle dans les prochaines années, notamment les procédés Fischer-Tropsch appliqués après la gazéification de biomasse, ou la famille de procédés Alcohol-to-Jet. Contrairement au secteur routier, seules les matières premières dites de deuxième génération peuvent être utilisées pour la production de SAF (huiles usagées, graisses animales, déchets, résidus agricoles ou forestiers...).

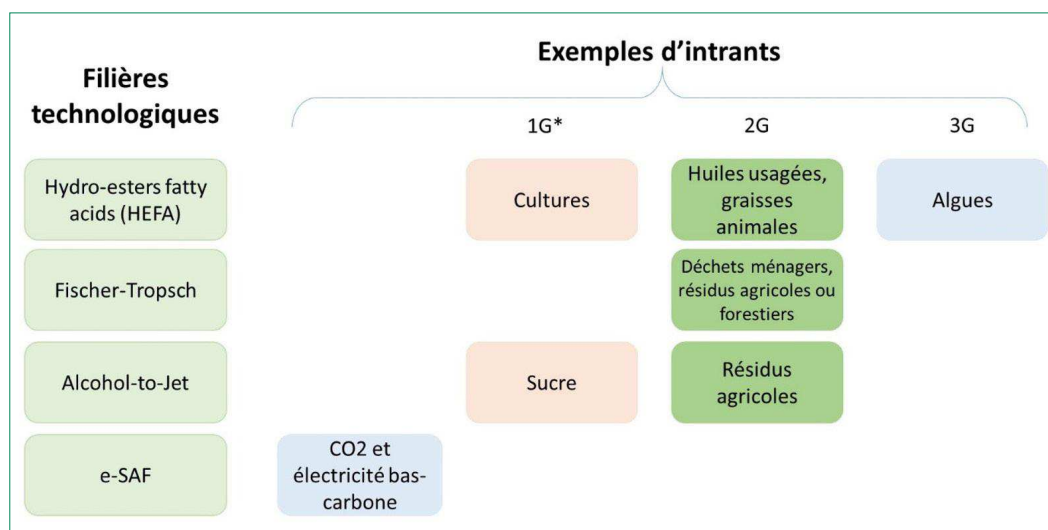


Figure 2 : Typologie des procédés et ressources pour la production de SAF (d'après Académie des Technologies, 2023).

\* Les SAF à partir de cultures ou de sucres ne sont pas autorisés par le droit européen.

Les carburants de synthèse ou eSAF, produits à partir d'hydrogène décarboné et de CO<sub>2</sub>, font l'objet de projets pilotes et devraient se développer fortement dans la décennie 2030.

Le développement des SAF ne présente pas d'enjeu technologique majeur sur les avions. Les avions en service peuvent déjà en utiliser jusqu'à 50 % en mélange, et les principaux avionneurs se sont engagés à livrer des avions compatibles avec 100 % de SAF d'ici 2030.

L'émergence des SAF a été longtemps freinée par leur coût élevé (3 à 5 fois celui du kérosène) et l'absence de régulation. Les initiatives des dernières années, notamment en Europe et aux États-Unis, devraient enfin permettre un développement important de la production :

- L'Union européenne a adopté un mécanisme d'obligation d'incorporation de carburants aériens durables, avec une trajectoire pluriannuelle qui assure une grande visibilité aux acteurs (voir le Tableau 1).
- De leur côté, les États-Unis se sont fixés l'objectif d'incorporer 10 % de SAF en 2030 et 100 % en 2050. Surtout, ils ont intégré dans l'Inflation Reduction Act un soutien fiscal à l'incorporation de SAF, permettant de combler l'écart avec les incitations relatives au biodiesel. Combiné à des aides locales dans plusieurs

États américains, ce soutien est proche d'instaurer une parité avec le kérosène, même si la visibilité sur les mécanismes fiscaux est faible à long terme.

## La production de carburants durables sera un consommateur majeur d'électricité décarbonée

La décarbonation de l'aviation suppose le développement rapide d'une filière industrielle des SAF, à une échelle majeure. Selon les hypothèses de trafic et d'efficacité énergétique, les scénarios identifient un besoin de SAF en 2050 typiquement compris entre 250 Mt (AIE (2021), avec une croissance modérée du trafic et un taux d'incorporation de 80 %) et 450 Mt (ATAG (2021), variante haute pour les SAF), à comparer à une consommation de kérosène de 331 Mt en 2019<sup>2</sup>. Les points de passage intermédiaires, dans les différents scénarios, dépendent essentiellement de l'ambition climatique visée : le scénario de l'AIE, qui vise un réchauffement inférieur à 1,5°C, suppose ainsi un taux d'incorporation de 50 % dès 2040. Le Tableau 2 présente une synthèse des ordres de grandeur des besoins de SAF à différents horizons et sur différents périmètres.

L'électricité décarbonée, *via* la production d'hydrogène par électrolyse, jouera un double rôle dans la produc-

Tableau 1 : Trajectoire d'incorporation de carburants durables aériens prévue par le règlement RefuelEU Aviation.

	2025	2030	2035	2040	2045	2050
% d'incorporation de SAF	2 %	6 %	20 %	34 %	42 %	70 %
Dont % minimum de carburants synthétiques	/	1,2 % en moyenne en 2030-31, 2 % en moyenne entre 2032 et 2034	5 %	10 %	15 %	35 %

<sup>2</sup> Source : AIE.

Tableau 2 : Ordre de grandeur des besoins en SAF (Académie des Technologies, 2023).

Besoin en SAF (Mt)	2030	2035	2040	2050
Monde	20	70	185	400
Europe	2,5	10	16	30
France	0,5	2	3	6

tion de SAF. Elle est tout d'abord un intrant clé pour la production de carburants de synthèse<sup>3</sup>, ou eSAF. Le bénéfice climatique des eSAF ne sera réel que dans le cas où le carbone, seconde brique, n'est pas d'origine fossile : les mécanismes de capture directe de CO<sub>2</sub> dans l'air, fortement consommateurs d'énergie<sup>4</sup>, apparaissent donc nécessaires au développement des eSAF. Le rendement complet de la chaîne de production des eSAF se situe actuellement autour de 45 %<sup>5</sup>, mais pourrait approcher à terme 55 % dans des installations optimisées<sup>6</sup>. On rappellera que le kérosène représenterait typiquement 60 % des carburants produits, le reste correspondant à une coupe naphta intéressant le secteur de la chimie. D'autre part, l'hydrogène décarboné pourrait contribuer à améliorer fortement le rendement énergétique des procédés de production des biocarburants avancés<sup>7</sup>.

Le besoin d'électricité décarbonée dépendra fortement des ressources disponibles en biomasse, sur lesquelles les incertitudes sont élevées : disponibilité

de la biomasse brute dans un contexte de changement climatique ; questions technico-économiques sur la mobilisation de cette biomasse, peu dense en énergie ; concurrence avec d'autres usages actuels ou futurs (secteur routier, industrie lourde, secteur maritime...).

Malgré cette incertitude, le besoin d'électricité décarbonée apparaît considérable dans les premiers exercices de prospective qui l'ont caractérisé. Le secteur aérien français, d'une part, et l'Académie des Technologies, d'autre part, ont évalué en 2023 les besoins d'électricité nécessaires à la décarbonation des vols au départ de la France. Bien que leurs hypothèses soient différentes, ces travaux dessinent des ordres de grandeur similaires, présentés au Tableau 3 ci-dessous.

Au niveau mondial, le scénario Net Zero de l'AIE (2021) décrit une consommation de 22 Mt d'hydrogène en 2040 et 52 Mt en 2050 pour le secteur aérien. L'aviation représenterait alors 10 % de la consommation mondiale d'hydrogène, soit environ 1 500 TWh d'électricité décarbonée, compte tenu du mix moyen de production d'hydrogène du scénario.

Ces besoins considérables conduisent à la conclusion que la disponibilité d'énergie décarbonée pourrait être le principal facteur limitant la décarbonation du secteur aérien. Si l'on suppose par ailleurs cette décarbonation comme un impératif, l'énergie disponible serait la principale contrainte pour la croissance du trafic<sup>8</sup>. Cette prise de conscience est encore récente et peu de scénarios de décarbonation de l'aérien intègrent actuellement un réel bouclage énergétique.

Tableau 3 : Évaluation des besoins d'électricité décarbonée pour le secteur aérien.

	Électricité décarbonée mobilisée*	Hypothèses
Académie des Technologies	50 TWh en 2040 170 TWh en 2050	30 % SAF en 2040, 60 % en 2050 6,7 Mt de biomasse sèche disponible pour le secteur aérien (10 % du gisement français) Rendement énergétique optimal
Secteur aérien	Entre 78 et 153 TWh en 2050 selon l'ambition	Hypothèse basse : 63 % de SAF en 2050 dont 28 % d'e-fuels Hypothèse haute : 85 % dont 50 % d'e-fuels Demande énergétique inférieure au scénario de l'Académie des Technologies (croissance modérée, efficacité énergétique plus forte)

<sup>3</sup> Et pour la production d'hydrogène liquide, utilisé de manière plus marginale à l'horizon 2050.

<sup>4</sup> Sous forme de chaleur pour les procédés les plus avancés, mais aussi d'électricité pour des procédés émergents.

<sup>5</sup> Feuille de route de décarbonation du secteur aérien, 2023.

<sup>6</sup> Électrolyse haute température, recyclage de la chaleur de la réaction exothermique Fischer-Tropsch pour alimenter le procédé de capture du CO<sub>2</sub> dans l'air (Académie des Technologies, 2023).

<sup>7</sup> L'apport d'hydrogène permet d'approcher le rapport 1 / 2 entre carbone et hydrogène, visé dans le carburant final, alors que ce rapport est proche de 2 / 3 dans la biomasse (Académie des Technologies, 2023).

## Quel rôle pour le nucléaire dans la décarbonation du secteur aérien ?

L'émergence de la filière des carburants durables aériens représente une opportunité de développement industriel et de renforcement de la souveraineté écono-

<sup>8</sup> Le scénario de l'AIE (2021) limite ainsi la croissance à environ 2 % par an d'ici 2050, en faisant l'hypothèse d'une maîtrise de la demande.

mique des pays consommateurs. Dans le même temps, de nouveaux pays producteurs s'affirment, en particulier ceux disposant d'un potentiel de production d'électricité renouvelable à bas coût (Chili, Moyen-Orient, etc.). À ce stade, le nucléaire n'apparaît pas encore identifié au niveau mondial comme un contributeur significatif pour la production de SAF, et les projets pilotes de production d'eSAF parient sur un approvisionnement en électricité renouvelable. Il est toutefois révélateur qu'EDF s'intéresse à la production d'eSAF (projet Take Kair) ou que Rolls-Royce mette en avant l'intérêt de son projet de Small Modular Reactor pour alimenter la production d'eSAF destiné à décarboner ses moteurs d'avion.

L'échelle des besoins électriques de la production d'eSAF fait apparaître le nucléaire comme une solution pertinente. Les installations de production d'eSAF sont soumises à un effet d'échelle, pour les procédés spécifiques à cette technologie comme pour le raffinage final des carburants. À titre d'exemple, le projet KerEauZen d'ENGIE, l'un des premiers de taille industrielle en France, vise un volume de 70 000 tonnes d'eSAF par an : cela requiert une capacité d'électrolyse de 250 MW, soit une consommation typique de 1,5 à 2 TWh d'électricité annuelle sous la forme d'un ruban.

Au-delà de la production d'électricité elle-même, l'existence d'un réseau électrique adapté constitue une condition-clé pour ces projets, et l'on peut noter que les premiers projets soutenus par France 2030 sont situés sur des zones propices du réseau, à proximité d'installations de production existantes ou arrêtées ces dernières années<sup>9</sup>.

Pour représenter une source d'électricité attractive pour les eSAF, le nouveau nucléaire devra toutefois démontrer sa compétitivité. Le coût de l'électricité représenterait en effet entre un tiers et la moitié des coûts de production des eSAF. Or le marché de ces carburants est mondial : contrairement à l'électricité ou l'hydrogène, les carburants de synthèse sont facilement transportables sur de longues distances, et leurs caractéristiques techniques sont normées au niveau mondial. Leur production se fera donc naturellement, au moins au début, à proximité des ressources que constituent une électricité décarbonée compétitive et du CO<sub>2</sub><sup>10</sup>.

Au-delà même de la compétitivité, prévisibilité des prix et maîtrise des risques seront clés pour les investisseurs comme les clients des eSAF. À court terme, le financement des projets d'eSAF est encore balbutiant, compte tenu de leur caractère innovant et des risques du passage à l'échelle de cette technologie. Dans ce contexte, les acteurs financiers cherchent à supprimer les risques des projets sur le volet de l'approvisionnement électrique. Par ailleurs, les compagnies aériennes clientes recherchent une visibilité sur les prix des eSAF, bien plus élevés que le kérosène. Ces exigences conduisent les producteurs émergents des eSAF à prévoir des contrats de long terme (PPA)

avec des producteurs d'électricité, voire à s'intégrer de la production d'électricité à la production des carburants. Pour faire du nouveau nucléaire une source clé d'approvisionnement pour la production d'eSAF, la capacité à signer des contrats de long terme, et l'appréhension des risques spécifiques au nucléaire par les financeurs des projets eSAF, seront donc importantes. Dans les deux cas, la puissance publique pourrait jouer un rôle si la volonté politique existe de produire des eSAF sur le territoire français.

## Conclusion

La trajectoire de décarbonation de l'aérien vers la neutralité carbone requiert des quantités considérables d'énergie décarbonée, sous la forme de biomasse et d'électricité décarbonée. La consommation d'eSAF par le secteur aérien français pourrait ainsi représenter une consommation électrique de l'ordre de 150 TWh en 2050. L'ampleur de ces besoins énergétiques est encore mal prise en compte par le secteur aérien au niveau mondial, et constituera sans doute le principal défi de la décarbonation du secteur.

Le développement du nouveau nucléaire pourrait répondre à ce nouvel usage de l'électricité décarbonée, à condition toutefois de se montrer compétitif face aux sources d'électricité renouvelables centralisées, sur un marché des SAF qui sera mondial.

Dans ce contexte, le rôle de la puissance publique est clé, tant pour accompagner l'émergence et le développement industriel de la filière des SAF, que pour intégrer aux exercices de planification les besoins d'électricité associés et définir une stratégie sur la production en France de ces carburants.

## Bibliographie

- ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES (2023), « La décarbonation du secteur aérien par la production de carburants durables ».
- AIR TRANSPORT ACTION GROUP (2021), "Waypoint 2050", 2<sup>nd</sup> édition.
- FNAM, FRANCE HYDROGÈNE, GIFAS, UAF, UFE, UFIPM (2023), « Feuille de route de décarbonation de l'aérien ».
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (2021), "Net Zero by 2050", IEA, Paris.

<sup>9</sup> Dunkerque, Le Havre, Gardanne.

<sup>10</sup> Les exigences relatives à l'origine du CO<sub>2</sub> peuvent constituer une forme de barrière à l'entrée : l'Union européenne n'autorise que jusqu'en 2040 l'utilisation de CO<sub>2</sub> capté à partir de rejets industriels, privilégiant le CO<sub>2</sub> biogénique ou capté dans l'air.

# Financement du nouveau nucléaire et gestion des risques dans des économies sous contrainte carbone

Par Jan Horst KEPLER

Conseiller économique sénior à l'Agence de l'énergie nucléaire de l'OCDE (AEN)

L'énergie nucléaire, seule technologie de production électrique à faibles émissions de carbone pouvant être dimensionnée à volonté, est appelée à jouer un rôle important pour atteindre les objectifs de zéro émission nette auxquels un nombre croissant de pays de l'OCDE se sont engagés. Toutefois, pour parvenir au niveau de puissance nucléaire installée nécessaire au cours des prochaines années et décennies, il faudra pouvoir mobiliser des quantités considérables de capitaux à des taux concurrentiels.

À cette fin, l'AEN présente un nouveau cadre d'analyse des risques financiers liés à la construction de nouvelles centrales nucléaires. La minimisation du coût du capital dépend de l'optimisation de la gestion des risques financiers. Le cadre proposé ici permet de tirer deux conclusions clés. D'abord, dans un monde contraint par les émissions de carbone, les coûts en capital réels de l'énergie nucléaire et d'autres sources de production à faibles émissions de carbone sont inférieurs à ce qui est généralement supposé en raison de leur capacité à compenser le risque financier systémique. L'incorporation d'investissements dans la production d'énergie à faibles émissions de carbone peut donc réduire les risques globaux du portefeuille. Ensuite, il existe des politiques et des mesures efficaces pour réduire de manière radicale les coûts économiques et financiers d'autres composantes du risque, tels que les risques liés à la construction, les risques liés aux prix et les risques politiques.

Ces conclusions s'appliquent de la même manière aux investissements privés et publics. Cependant, les gouvernements ont eux aussi un rôle important à jouer. Tout d'abord, ils doivent garantir des engagements crédibles et efficaces en faveur de l'objectif de zéro émission nette de carbone d'ici 2050. Ils doivent également mettre en œuvre les mesures nécessaires pour éliminer ou réduire les coûts économiques liés aux risques de construction, aux risques de prix et aux risques politiques. Enfin, les gouvernements peuvent intervenir en tant que promoteurs directs de projets en cas de défaillance du marché lorsque les acteurs privés ne reconnaissent pas la vraie valeur économique d'un projet nucléaire. Au-delà de la réduction des risques financiers, les gouvernements ont alors un rôle à jouer dans la mise en place de structures de gestion de projet efficaces pour les projets complexes et de grande envergure tels que la construction de nouvelles centrales nucléaires, ainsi que dans la stabilité macroéconomique.

Si les mesures indiquées ci-dessous sont pleinement mises en œuvre et que les projets de nouvelles centrales nucléaires sont entièrement sans risques, les investisseurs privés et publics rivaliseront pour bénéficier des avantages d'une électricité pilotable à faibles émissions de carbone, en réduisant le rendement exigé sur le capital à des taux nettement inférieurs à ceux d'aujourd'hui.

*Cet article est une synthèse en langue française du rapport de l'Agence de l'énergie nucléaire de l'OCDE (AEN) "Financing new nuclear power plants: minimising the cost of capital by optimising risk management", AEN, 2022. Les travaux pour ce rapport furent entrepris dans le cadre de l'Initiative sur le financement du nucléaire portée par l'AEN et l'International Framework for Nuclear Energy Cooperation (IFNEC), en collaboration avec le gouvernement de la Pologne.*

## Introduction

Atteindre l'objectif de zéro émission nette de carbone d'ici 2050 nécessitera le financement et le développement d'une capacité significative de production d'énergie nucléaire au cours des prochaines années et décennies. Pour encourager ce processus, l'Agence

de l'énergie nucléaire de l'OCDE (AEN) et le Cadre international pour la coopération en matière d'énergie nucléaire (IFNEC), en collaboration avec le gouvernement de la Pologne, ont décidé à la fin de l'année 2020 de lancer l'Initiative AEN-IFNEC sur le financement du nucléaire. Cette initiative a réuni des experts du monde universitaire, de l'industrie et de la politique énergétique

À quel besoin répond un programme de nouveau nucléaire ?

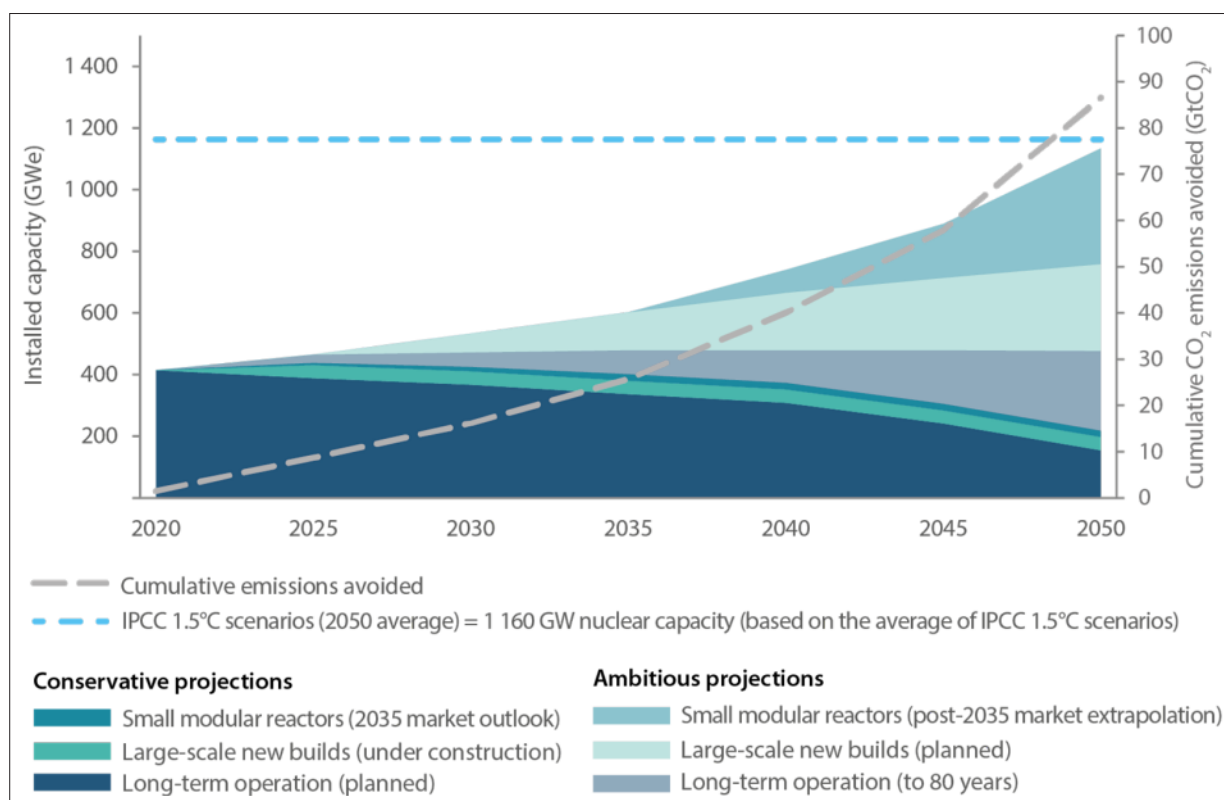


Figure 1 : La contribution potentielle du nouveau nucléaire et de l'exploitation à long terme à la réduction des émissions carbone jusqu'en 2050 (Source : AIE/AEN, 2021).

pour identifier les principaux défis du financement de la construction de nouvelles centrales nucléaires et les moyens prometteurs de les surmonter.

En s'appuyant sur ces travaux, l'AEN a rédigé un rapport<sup>1</sup> étudiant un nouveau cadre basé sur le modèle d'équilibre des actifs financiers (MEDAF) (capital asset pricing model [CAPM]) pour analyser le risque financier lié à la construction de nouvelles centrales nucléaires. Ces analyses permettent de définir des moyens de minimiser le coût du capital et donc les coûts totaux de l'investissement lors de la construction de nouvelles centrales nucléaires. Ce cadre a conduit à deux conclusions clés. D'abord, dans un monde contraint par les émissions de carbone, les coûts en capital réels de l'énergie nucléaire et d'autres sources de production à faibles émissions de carbone sont inférieurs aux attentes en raison de leur capacité à compenser le risque financier systémique. Ensuite, il existe des politiques et des mesures efficaces pour réduire de manière radicale les coûts économiques et financiers d'autres composantes de risque, tels que les risques liés à la construction, les risques liés aux prix et les risques politiques. Les conclusions de ce rapport s'appliquent aux investissements privés comme publics. Elles suggèrent que les gouvernements ont un rôle à jouer pour mettre en œuvre les mesures nécessaires à la réduction des

coûts économiques liés aux risques et pour intervenir en cas de défaillance avérée du marché.

L'énergie nucléaire, seule technologie de production électrique à faibles émissions de carbone pouvant être dimensionnée à volonté, l'énergie nucléaire est appelée à jouer un rôle important pour atteindre les objectifs de zéro émission nette auxquels un nombre croissant de pays de l'OCDE se sont engagés. Les travaux récents de l'AEN ont montré que l'énergie nucléaire pourrait éviter 87 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> à l'échelle mondiale d'ici 2050 compte tenu de sa compétitivité, en particulier lorsque l'on considère le système électrique dans son ensemble. Ces économies d'émissions seraient vraisemblablement réalisées grâce à un mélange d'exploitation à long terme de centrales existantes et de construction de capacités nucléaires sous forme de réacteurs de troisième génération et de petits réacteurs modulaires.

### Le coût du capital détermine la compétitivité des nouvelles centrales nucléaires

L'énergie nucléaire peut donc contribuer de manière significative à la réduction des émissions de carbone. Cela dépend cependant de la capacité des gouvernements, des chefs de projet et des fournisseurs de réacteurs à travailler ensemble pour livrer un nombre suffisant de réacteurs nucléaires à un coût attractif. Comme d'autres technologies à faibles émissions

<sup>1</sup> AEN (2022), "Financing new nuclear power plants: minimising the cost of capital by optimising risk management", Éditions OCDE, Paris, [www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_76525](http://www.oecd-nea.org/jcms/pl_76525)

de carbone, telles que l'hydroélectricité, l'éolien ou le photovoltaïque solaire, l'énergie nucléaire est fortement capitalistique. Cette forte intensité capitalistique distingue les technologies de production à faibles émissions de carbone des technologies basées sur les énergies fossiles, telles que le charbon et le gaz, pour lesquelles les coûts du carburant et les coûts des émissions de carbone sont les principaux composants du coût. Une forte intensité capitalistique suppose en outre que le coût du capital, c'est-à-dire le taux de rendement versé aux investisseurs, constitue, avec les coûts initiaux et la gestion efficace du projet, l'un des trois principaux déterminants des coûts totaux de la construction de nouvelles centrales nucléaires et de la compétitivité de l'énergie nucléaire par rapport à d'autres technologies de production de base, telles que le gaz et le charbon.

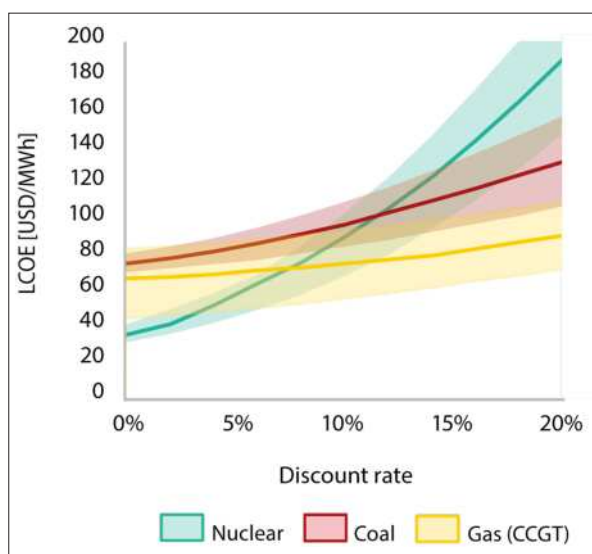


Figure 2 : Compétitivité des technologies de production de base en fonction du coût du capital (Source : AIE/AEN, 2020, p. 84).

À faibles coûts du capital (voir la Figure 2 ci-dessus et le Tableau 1 ci-dessous), l'énergie nucléaire est très compétitive, même par rapport à la production d'élec-

tricité au gaz en temps normal, avec des coûts de carburant de 8 dollars par MMBTU (27,2 dollars par MWh) pour l'Europe et des coûts de carbone de 30 dollars par tonne de CO<sub>2</sub>. Cet avantage en termes de coûts disparaît rapidement à des coûts en capital plus élevés. Les événements récents ont considérablement augmenté les coûts du gaz et des émissions de carbone, améliorant ainsi davantage la compétitivité de l'énergie nucléaire. Cependant, atteindre zéro émission nette de carbone en 2050 et investir dans la capacité de production d'énergie sont des projets à long terme, et les hypothèses de l'édition 2020 de Projected costs of generating electricity (AIE/AEN, 2020)<sup>2</sup> demeurent pertinentes pour la prise de décision énergétique.

## Une gestion efficace des risques pour réduire les coûts du capital du nouveau nucléaire

Le coût du capital dans la construction de nouvelles centrales nucléaires, comme ailleurs, dépend de la gestion et de l'allocation des risques. Un principe important dans ce contexte est que les risques doivent toujours être alloués à la partie la mieux équipée pour minimiser les coûts économiques de ces risques. La capacité à minimiser le coût des risques est généralement liée soit à une compétence technique particulière (les électriciens gérant les centrales nucléaires devraient supporter le risque opérationnel, par exemple), soit à une capacité particulière à partager, diversifier et couvrir les risques. Ce rapport introduit une autre considération : dans les cadres politiques visant à réduire les émissions de carbone afin d'atteindre zéro émission nette d'ici à 2050, les sources de production à faibles émissions de carbone telles que l'énergie nucléaire peuvent jouer un rôle important dans la compensation des risques financiers de portefeuille.

Le coût du capital des investissements est déterminé par les coûts des risques. Plus les coûts des différents types de risques pour les investisseurs sont élevés, plus les taux de rendement qu'ils rechercheront auprès des promoteurs d'un projet seront élevés. Ce principe de l'économie financière est universel et affecte les

Country	Technology	Net capacity (MWe)	Overnight costs (USD/kWe)	Investment costs (USD/kWe)		
				3%	7%	10%
France	EPR	1,650	4,013	4,459	5,132	5,705
Japan	ALWR	1,152	3,963	4,402	5,068	5,633
Korea	ALWR	1,377	2,157	2,396	2,759	3,066
Russian Federation	VVER	1,122	2,271	2,523	2,904	3,228
Slovak Republic	Other nuclear	1,004	6,920	7,688	8,850	9,837
United States	LWR	1,100	4,250	4,721	5,435	6,041
<b>Non-OECD countries</b>						
China	LWR	950	2,500	2,777	3,197	3,554
India	LWR	950	2,778	3,086	3,552	3,949

Tableau 1 : Coûts d'investissement par kW à différents coûts du capital (Les coûts "overnight" correspondent à un taux d'intérêt nul) (Source : Ibid., p. 49).

<sup>2</sup> AIE/AEN (2020), "Projected costs of generating electricity", AIE/AEN, Paris, [www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_28612/projected-costs-of-generating-electricity](http://www.oecd-nea.org/jcms/pl_28612/projected-costs-of-generating-electricity)

investissements dans tous les secteurs économiques. Cependant, il revêt une importance particulière pour les investissements dans des projets de production d'énergie à faibles émissions de carbone intensifs en capital, tels que la construction de nouvelles centrales nucléaires. Le capital asset pricing model (CAPM), le modèle le plus largement appliqué en économie financière pour déterminer le coût du capital, offre une approche systématique de l'analyse des risques. Il permet en particulier d'analyser les différentes dimensions du risque financier dans la construction de nouvelles centrales nucléaires une par une, offrant à la fois une vue plus complète du risque global et la capacité de mieux concevoir des mesures pour gérer, réduire et allouer les coûts économiques des risques de manière cohérente et transparente.

La première idée clé du CAPM est que les projets plus risqués doivent générer des profits plus élevés pour compenser le risque supporté par les investisseurs. La deuxième idée clé du CAPM est que le risque d'un projet est lié à sa corrélation avec le risque systémique du marché global. Le raisonnement repose sur un principe de bon sens selon lequel les risques peuvent être réduits en diversifiant les investissements sur plusieurs projets non corrélés dans différents secteurs. Cependant, si un projet est étroitement lié au risque global du marché, une telle diversification n'apporte plus aucun avantage en termes de réduction du risque.

Le risque de marché systémique peut être considéré comme le risque d'un portefeuille d'investissements parfaitement diversifié. L'élément clé du risque systémique réside dans la corrélation des rendements d'un projet nucléaire avec le risque de marché systémique. Toute corrélation positive du résultat d'un projet avec le risque de marché général nécessite d'inclure ce risque proportionnellement dans le coût du capital du projet. Cependant, si les rendements des nouvelles centrales nucléaires sont négativement corrélés, cela permet aux investisseurs d'accroître la diversification de leur portefeuille, ce qui est très souhaitable. Une forte contrainte carbone, par exemple, décorrèlerait le rendement des actifs à faibles émissions de carbone du marché général.

Le coût du risque financier d'un projet individuel est donc déterminé par sa corrélation avec le risque de marché systémique plus la somme de ses risques idiosyncrasiques (non diversifiables), tels que le risque politique, le risque prix et le risque de construction :

$$r_n = r_f + \beta_n * r_s + \sum_i^n r_{INI} \quad \text{où}$$

$r_n$  est le coût du capital d'un projet de production d'énergie nucléaire,

$r_f$  est le taux de rendement d'un actif financier sans risque, généralement le taux de dette souveraine pour un pays jouissant d'une bonne notation financière,

$\beta_n$  est la corrélation du risque d'un projet de production d'énergie nucléaire avec le risque de marché systémique, soit 
$$\beta_n = \frac{cov(r_n, r_s)}{var(r_s)}$$

$r_s$  est le risque systémique, c'est-à-dire le risque marché ( $r_m$  ou le risque d'un portefeuille parfaitement diversifié) moins le taux sans risque, c'est-à-dire  $r_s = r_m - r_f$

$\sum_i^n r_{INI}$  est la rémunération supplémentaire demandée par les investisseurs pour compenser la somme des risques spécifiques du projet (risque politique, risque de prix du marché et risque de construction).

Comme indiqué ci-dessus, dans un projet de construction de nouvelles centrales nucléaires, les risques idiosyncrasiques incluent généralement le risque de construction, le risque prix et le risque politique. L'idée de base de ce rapport est que soit les coûts économiques de ces risques sont inférieurs aux attentes, soit il existe des mesures efficaces pour les réduire davantage.

S'il est clair que le risque de construction ou le risque politique sont propres au projet et à la technologie, l'inclusion du risque prix dans les risques idiosyncrasiques peut surprendre. Une croissance économique plus élevée ne conduirait-elle pas à une demande plus élevée, à des prix de l'électricité plus élevés et à des bénéfices plus élevés générés par une centrale nucléaire ? En principe, oui. Cependant, les particularités de la formation des prix sur les marchés de l'électricité, en particulier sur les marchés de l'électricité en cours de décarbonation, qui comprennent l'impossibilité du stockage, les interactions avec les marchés du carbone, l'autocorrélation des énergies renouvelables intermittentes, le financement hors marché et d'autres facteurs, font que la corrélation d'un nouveau projet nucléaire avec la croissance économique est radicalement limitée.

Les arguments en faveur de coûts très faibles du capital pour les projets de construction de nouvelles centrales nucléaires dans chaque catégorie de risque sont les suivants :

- En termes réels, c'est-à-dire déduction faite de l'inflation, le taux sans risque auquel les pays jouissant d'une bonne notation financière peuvent emprunter à long terme demeure à des niveaux très bas malgré les hausses récentes des taux nominaux à court terme.
- Dans le cas du risque systémique, le paramètre clé est la corrélation du rendement d'un projet avec celui du reste du marché. Si cette dernière est inférieure à la moyenne, nulle ou même négative, les investisseurs peuvent réduire leur risque global en ajoutant un tel projet à leur portefeuille car il compense le risque systémique d'autres investissements. Dans un monde de zéro émission nette, cela s'applique aux producteurs à faibles émissions de carbone. À mesure que le changement climatique et les efforts pour le combattre s'intensifient, les prix du carbone implicites et explicites augmentent. Cela diminue la rentabilité de l'économie dans son ensemble, mais augmente la rentabilité des investissements à faibles émissions de carbone. Dans ce cas, l'inclusion des investissements à faibles émissions de carbone réduira le risque et améliorera le rapport risque-rendement, également appelé ratio de Sharpe, des portefeuilles financiers (voir la Figure 3 ci-après). En



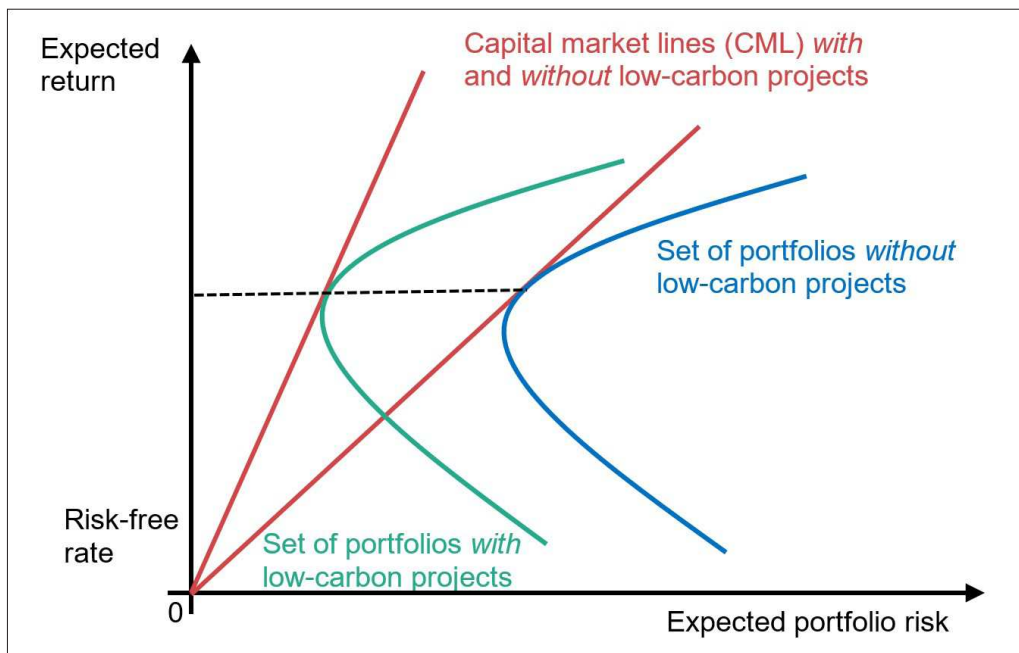


Figure 3 : Inclure des projets bas carbone améliore le ratio risque-rendement des portefeuilles  
(Source : AIE/AEN, 2022, p. 33).

conséquence, les investisseurs accepteront des rendements très faibles, voire nuls, sur de tels investissements, car leur valeur réside principalement dans leur fonction de couverture plutôt que dans leur rendement absolu.

- En ce qui concerne les risques spécifiques au projet, le but n'est pas d'analyser différemment le vrai coût du capital mais de mettre en œuvre des mesures efficaces pour réduire les coûts économiques des risques sous-jacents. Pour les différents risques idiosyncrasiques, ceci s'applique de la manière suivante :
  - Pour les projets importants et complexes tels que la construction de nouvelles centrales nucléaires, le risque de construction est peut-être le risque spécifique le plus important. Si une entreprise individuelle supporte ce risque, sa survie pourrait être en jeu. En conséquence, les investisseurs exigeraient une prime de faillite importante en cas d'exposition au risque de construction. Pour pallier cet inconvénient, des mesures telles que la base d'actifs régulée (regulated asset base ou RAB) au Royaume-Uni ou le travail en cours de construction (construction work in progress ou CWP) aux États-Unis ont été proposées. De telles mesures transfèrent le coût de la construction de l'usine sur les factures d'électricité des consommateurs à partir du moment même où la construction commence, plutôt qu'à partir du moment où la production d'électricité débute. La théorie économique montre que cela implique non seulement un transfert de risque, mais aussi, tant que certaines hypothèses raisonnables sont satisfaites, une réduction des coûts économiques du risque, car les montants en jeu représentent une toute petite

partie du budget de chaque consommateur.

- Le risque prix dans les marchés de l'électricité dérégulés qui dominent les secteurs de l'électricité des pays de l'OCDE est depuis longtemps reconnu comme un facteur important du coût du capital (voir par exemple AEN, 2015). C'est pourquoi les régulateurs ont proposé, dans certains cas, des garanties de prix sous forme de tarifs de rachat garantis ou de contrats à terme régulés, notamment les contrats sur différence (contracts for difference [CFD]). Or, ce n'est que le début. Si les pays de l'OCDE continuent à opérer des marchés dérégulés également dans des systèmes électriques bas carbone, les prix seront de plus en plus souvent fixés par les coûts marginaux à court terme nuls ou très bas des énergies renouvelables et du nucléaire<sup>3</sup>. Compte tenu des contraintes budgétaires des producteurs ceux-ci devront compenser ces bas prix par des heures de rareté où les prix pourront atteindre des centaines, voire des milliers, de dollars ou d'euros par MWh. Un consensus émerge graduellement, selon lequel dans un contexte de fortes contraintes carbone, tous les fournisseurs à faibles émissions de carbone devront bénéficier de contrats à long terme généralisés avec des prix garantis au niveau des coûts moyens sur toute la durée de vie du projet (voir Keppler *et al.*, 2022).
- En ce qui concerne le risque politique, la logique qui exige d'attribuer le risque à la partie la mieux équipée pour le minimiser et l'internaliser est,

<sup>3</sup> Sous réserve de la prise en compte de contrats de long terme, comme mentionné dans les conclusions du conseil énergie de l'UE du 17 octobre 2023.

dans l'ensemble, déjà respectée. Les clauses d'indemnisation contractuelle assurent les opérateurs de projets et leurs investisseurs contre les changements de la politique énergétique qui limiteraient l'utilisation de l'énergie nucléaire, allouant ce risque aux gouvernements nationaux.

En résumé, le coût du capital pour les projets de construction de nouvelles centrales nucléaires est soit plus bas que ce qui est généralement supposé, soit potentiellement réduit radicalement grâce à des mesures appropriées. Dans le premier cas, le taux de rendement sans risque à long terme est toujours très bas, tandis que la corrélation avec le risque de marché systémique peut être prudemment supposée nulle, tant que des objectifs de zéro émission nette sont poursuivis avec vigueur et cohérence. Dans le deuxième cas, les gouvernements et les régulateurs des marchés de l'électricité disposent de mesures efficaces pour réduire non seulement le risque effectif pour les investisseurs, mais aussi le coût économique global du risque de construction, du risque de prix de l'électricité et du risque politique.

Autrement dit, si les projets de construction de nouvelles centrales nucléaires sont complètement sans risques de la manière décrite ci-dessus, les investisseurs, qu'ils soient privés ou publics, offriront du capital à des taux de rendement très bas pour acquérir le droit au bien précieux qu'est l'électricité à faibles émissions de carbone livrée de manière prévisible 24 heures sur 24 pendant des décennies.

## Gestion des risques dans la construction de nouvelles centrales nucléaires en pratique et rôle des gouvernements

Compte tenu des sommes importantes en jeu et du nombre de projets menés à bien avec succès, il est évident que la gestion des risques financiers a toujours fait partie de la construction de nouvelles centrales nucléaires. Historiquement, les accords étaient souvent assez simples. Dans la grande majorité des projets de construction de nouvelles centrales nucléaires réussis, les services énergétiques étaient publics, ce qui signifie que le risque de construction était réparti autrement, sur un grand nombre de contribuables, et les tarifs étaient réglementés. L'avènement de la déréglementation des marchés de l'électricité dans les années 1990 a changé la donne. La gestion des risques financiers a dû se sophistiquer pour rester compatible avec le marché. Le rapport de l'AEN à paraître sur les enseignements tirés du financement de projets récents de construction de centrales nucléaires proposera un panorama détaillé de ces efforts (AEN, à paraître).

Il apparaît donc que la gestion des risques financiers dans les projets de construction de nouvelles centrales nucléaires, dans un contexte de marchés de l'électricité déréglementés, est souvent appliquée de manière partielle et parfois désordonnée, ce qui s'explique d'ailleurs par des précédents nationaux et des considéra-

tions politiques prédominantes que par une analyse systématique. L'objectif de ce rapport est précisément de fournir aux décideurs une vue d'ensemble complète de la gestion des risques financiers pour permettre une gestion et une allocation plus cohérentes et transparentes des différents risques à différents acteurs.

En définitive, la responsabilité de la gestion des risques financiers reviendra aux gouvernements. La conclusion du rapport selon laquelle les coûts en capital des projets de construction de nouvelles centrales nucléaires peuvent être nettement inférieurs aux attentes s'applique de la même manière aux investisseurs publics et privés. Néanmoins, les gouvernements ont encore un rôle important à jouer dans ce contexte.

La première tâche des gouvernements est de garantir un engagement crédible et efficace en matière de réduction des émissions de carbone. La désynchronisation des projets à faibles émissions de carbone par rapport au risque de marché systémique ne sera pas réalisée si des engagements forts de réduction des émissions ne sont pas suivis d'actions ayant un impact réel sur l'économie.

Deuxièmement, les gouvernements doivent mettre en œuvre les stratégies présentées ci-dessus pour éliminer ou réduire les coûts économiques de trois risques idiosyncrasiques propres à chaque projet : le risque de construction, en répartissant le risque sur les consommateurs ; le risque de prix, grâce à des contrats à long terme ou à des tarifs réglementés ; et le risque politique, grâce à des accords d'indemnisation appropriés conclus avec les autorités.

Troisièmement, les gouvernements peuvent également intervenir en tant que promoteurs directs de projets en cas d'échec du marché lorsque les acteurs privés ne reconnaissent pas la vraie valeur économique d'un projet nucléaire, notamment grâce à leur capacité à compenser le risque d'un portefeuille financier. Inutile pour cela d'en appeler à l'intérêt général ou à des objectifs stratégiques tels que la sécurité de l'approvisionnement énergétique, le développement technologique, la cohésion régionale ou l'emploi, aussi importants soient-ils. Les seules défaillances du marché pertinentes concerneraient l'appréciation correcte des coûts et des avantages d'une électricité pilotable à faibles émissions de carbone.

Quatrièmement, les gouvernements ont un rôle à jouer pour mettre en place des structures de gestion de projet efficaces pour la construction de nouvelles centrales nucléaires. L'interaction des structures de financement, de la gestion de projet, des incitations et de l'architecture des marchés de l'électricité dans la construction de nouvelles centrales nucléaires fera l'objet d'un futur rapport de l'AEN. À ce stade, il convient de dire que les gouvernements doivent veiller à ce que tous les acteurs contribuent à l'objectif commun qui est de mener à bien les projets de construction de nouvelles centrales nucléaires en respectant les délais et le budget définis. Enfin, les gouvernements doivent garantir la stabilité macroéconomique pour minimiser les primes de risque pays. Les projets de production d'énergie nucléaire sont gourmands en capital et de grande envergure.

Une augmentation d'un ou deux pour cent au-dessus du taux sans risque entraîne rapidement une différence dans les coûts réels de ces projets.

Par conséquent, les gouvernements doivent continuer d'agir pour instaurer des conditions-cadres et mettre en œuvre des mesures à même de réduire les coûts économiques du risque financier. Avant tout, les engagements en faveur de zéro émission nette d'ici à 2050 doivent être concrétisés par des actions efficaces. Si ces conditions sont assurées, les coûts en capital des projets de construction de nouvelles centrales nucléaires tendront à se rapprocher du taux sans risque, plus toute prime de risque pays requise. Il ne s'agit pas uniquement d'une proposition conceptuelle. Si les projets de construction de nouvelles centrales nucléaires sont totalement sans risques, les investisseurs privés et publics rivaliseront pour bénéficier des avantages d'une électricité pilotable à faibles émissions de carbone, en réduisant le rendement exigé sur le capital à des taux nettement inférieurs à ceux d'aujourd'hui. La condition, bien sûr, est que les mesures et cadres suggérés dans ce rapport soient intégralement mises en œuvre.

## Références bibliographiques

AIE/AEN (2020), "Projected costs of generating electricity: 2020 edition", AIE/AEN, Paris, [www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_28612/projected-costs-of-generating-electricity](http://www.oecd-nea.org/jcms/pl_28612/projected-costs-of-generating-electricity)

AIE/AEN (2022), "Financing new nuclear power plants: minimising the cost of capital by optimising risk management", Éditions OCDE, Paris, [www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_76525](http://www.oecd-nea.org/jcms/pl_76525)

AIE/AEN (2021), "Meeting climate change targets: the role of nuclear energy", Éditions OCDE, Paris, <https://t.co/KwhxdnntTs>

ARROW K. & LIND R. (1970), "Uncertainty and the evaluation of public investment decisions", *American Economic Review*, vol. 60, n°3, pp. 364-78, <https://doi.org/10.1080/19390459.2014.867640>

GOLLIER C. (2021), "The welfare cost of ignoring the beta", Toulouse School of Economics working paper, [www.tse-fr.eu/sites/default/files/TSE/documents/doc/by/gollier/forget6.pdf](http://www.tse-fr.eu/sites/default/files/TSE/documents/doc/by/gollier/forget6.pdf)

GOLLIER C. (2015), « Taux d'actualisation et rémunération du capital », *Revue française d'économie*, vol. 30, n°4, pp. 3-15.

KEPPLER J.H., S. QUEMIN & SAGUAN M. (2022), "Why the sustainable provision of low-carbon electricity needs hybrid markets", *Energy Policy*, vol. 171, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113273>.

NEWBERY D. (2021), "The cost of finance and the cost of carbon: A case study of Britain's only PWR", *Economics of Energy and Environmental Policy*, vol. 10, n°2, pp. 229-247, <https://doi.org/10.5547/2160-5890.10.2.dnew>

PELUCHON B. (2019) "Market Design and the cost of capital for generation capacity investment", Working Paper 41, Chaire European Electricity Markets, Université Paris-Dauphine, [www.ceem-dauphine.org/working/en/market-design-and-the-cost-of-capital-for-generation-capacity-investment](http://www.ceem-dauphine.org/working/en/market-design-and-the-cost-of-capital-for-generation-capacity-investment)

# Réduction des consommations et décarbonation : les deux piliers de la stratégie française pour l'énergie et le climat

Par Sophie MOURLON

Directrice générale de l'Énergie et du Climat au ministère de la Transition énergétique

En application de l'accord de Paris sur le climat et de ses engagements internationaux, la France a inscrit en 2019 dans la loi l'objectif d'atteindre la neutralité carbone en 2050. La mobilisation pour le climat impose une accélération de la décarbonation de l'économie et des modes de vie, une réduction des consommations d'énergie ainsi qu'une redéfinition de notre système énergétique encore dépendant aux deux tiers des énergies fossiles, en s'appuyant sur les énergies bas-carbone : renouvelables et nucléaire. Cette transition doit permettre également d'assurer la sécurité de l'approvisionnement en énergie et de réduire la dépendance aux importations, de préserver la compétitivité de l'économie et de protéger les consommateurs français. Elle représente un défi industriel majeur.

**S**i la France bénéficie d'une production d'électricité décarbonée à plus de 90 %, notre bouquet énergétique reste encore dominé par les énergies fossiles, avec 37 % de pétrole et 21 % de gaz naturel dans notre consommation d'énergie finale.

La France est aujourd'hui confrontée à un triple enjeu de souveraineté, de compétitivité et d'accélération de la lutte contre le changement climatique. En matière de souveraineté, l'invasion de l'Ukraine a montré à quel point nous étions vulnérables du fait de notre dépendance à des énergies fossiles importées soumises aux aléas géopolitiques. En matière de compétitivité, notre mix énergétique actuel conduit à dégrader fortement notre déficit commercial, avec une facture d'importation de combustibles entre 25 et 80 milliards d'euros par an au cours de la décennie 2010 et plus de 100 milliards d'euros en 2022, et qu'il soumet notre pays à la volatilité très forte des marchés internationaux. Sur la lutte contre le dérèglement climatique, enfin, notre pays, comme le reste du monde, fait face à une véritable course contre-la-montre.

Pour faire de la transition énergétique une réalité, la politique énergétique française repose sur deux piliers principaux, permettant de s'affranchir entièrement à terme du recours aux énergies fossiles : d'une part, la réduction des consommations d'énergie, par des mesures de sobriété et d'efficacité énergétique, et, d'autre part, la décarbonation totale du mix énergétique en 2050. Comme annoncé par le président de la République dans son discours à Belfort en février 2022, notre stratégie vise le développement rapide des éner-

gies bas-carbone : énergies renouvelables – chaleur, gaz, carburants, électriques – et nucléaire. Ce sont les orientations qui fondent la révision en cours des documents programmatiques de la stratégie française pour l'énergie et le climat : la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC) et la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE).

## La transition énergétique passe d'abord par la maîtrise des consommations d'énergie

La transition énergétique passe avant tout par la maîtrise de la consommation d'énergie. Pour rendre soutenable la transformation du système énergétique et assurer l'utilisation durable des ressources, la stratégie nationale bas-carbone (SNBC) adoptée en 2020 prévoit une baisse de la consommation dans tous les secteurs. Pour y parvenir, la France a développé des politiques ambitieuses de réduction des consommations d'énergie, qui doivent encore être amplifiées :

- la rénovation des bâtiments, aussi bien résidentiels que tertiaires et industriels ;
- la baisse des consommations d'énergie des véhicules, le développement des transports en commun et des mobilités douces ;
- l'efficacité énergétique dans l'industrie.

Au-delà, des voies supplémentaires de réduction des consommations devront être développées. C'est l'objet

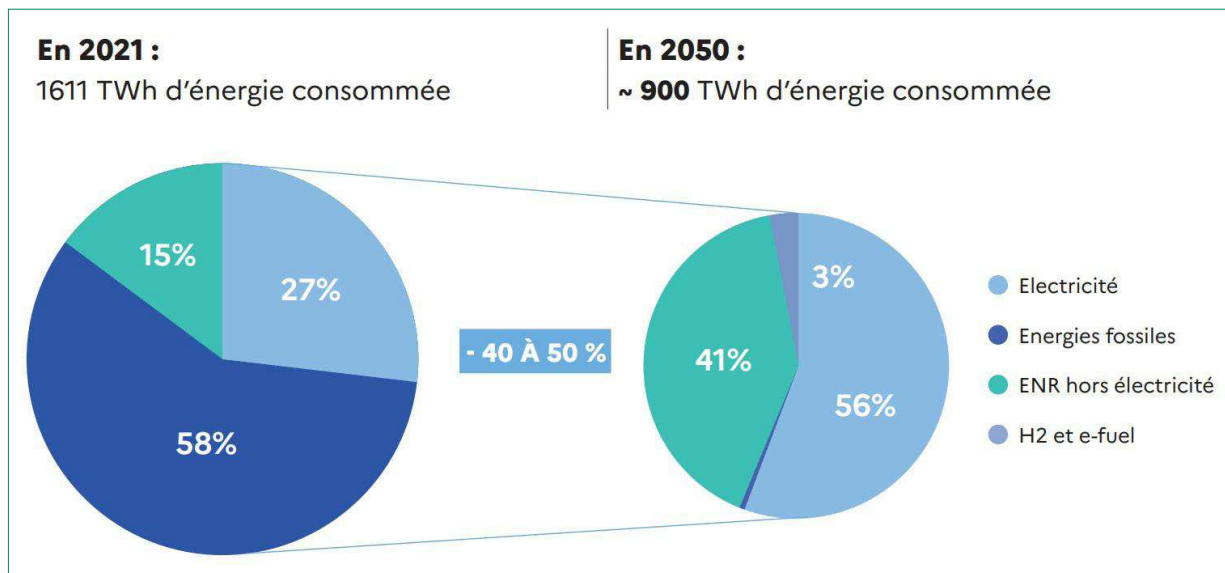


Figure 1 : Consommation finale d'énergie en 2021 et projections à horizon 2050 : consommation d'énergie finale telle que définie dans la directive relative à l'efficacité énergétique 2023/1791/UE (Source : RTE, Futurs énergétiques 2050 // SDES pour 2021 et DGEC pour 2050, modélisations provisoires).

de la révision de la SNBC dont les orientations sont en cours d'élaboration et seront bientôt soumises à la concertation.

La consommation finale énergétique de la France a diminué entre 2012 et 2019 d'environ 5 %, puis plus rapidement depuis 2022. Il est nécessaire d'accélérer le rythme global de réduction de consommation pour atteindre nos objectifs, en particulier celui du paquet législatif européen « Fit for 55 » inscrit dans la nouvelle directive relative à l'efficacité énergétique publiée le 20 septembre 2023. Cet objectif est estimé pour la France à 1 209 TWh en 2030, ce qui correspond à une réduction de la consommation en énergie finale d'environ 30 % par rapport à 2012.

Sans cette réduction de la consommation d'énergie, les objectifs de décarbonation resteraient hors de portée. Les capacités de production d'énergie décarbonée à développer d'ici 2050 seraient énormes et poseraient d'importants enjeux en matière, d'une part, de faisabilité industrielle (capacité à les construire) et, d'autre part, d'impacts environnementaux et économiques : aucune forme de production d'énergie n'est sans incidence ; chacune requiert des ressources (combustibles, espace foncier, matériaux pour construire les installations, etc.), qui ne sont pas sans limites, et représentent un coût à couvrir par la collectivité. Chercher à couvrir l'ensemble des besoins énergétiques d'une France qui, en 2050, aurait les mêmes modes de consommation qu'aujourd'hui ne serait pas soutenable.

### Notre mix énergétique doit être entièrement décarboné

Pour assurer la décarbonation complète du système énergétique, la prochaine programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) fixera des objectifs plus ambitieux

que la précédente en matière de production énergétique décarbonée et organisera l'accélération de la sortie des énergies fossiles.

La chaleur représente aujourd'hui un peu moins de la moitié (43 %) de la consommation d'énergie finale en France, dont seulement environ un quart est d'origine renouvelable. La France mise sur le développement accéléré des réseaux urbains de distribution de chaleur et de froid et sur une forte augmentation de la production de chaleur d'origine renouvelable ou de récupération, en mobilisant toutes les filières de production de chaleur renouvelable (pompes à chaleur, solaire thermique, biogaz, géothermie...) de même qu'un recours accru à la récupération de chaleur fatale.

Dans le même temps, la France développera la production de produits énergétiques liquides et gazeux. Le développement des biocarburants reposera sur la montée en puissance des carburants de deuxième génération, produits à partir de déchets et de résidus. La ressource en biomasse étant limitée et utilisée pour de nombreux usages, il est en effet nécessaire de faire preuve d'une grande vigilance sur l'origine des biocarburants et sur leur influence quant à l'évolution de l'usage des sols. De la même manière, une progression marquée de la production de biogaz est prévue, pour atteindre environ 15 % de la consommation de gaz en 2030. Le développement de l'hydrogène par électrolyse, à partir d'électricité bas-carbone, permettra de le substituer à l'hydrogène utilisé dans l'industrie, majoritairement produit aujourd'hui à partir de produits fossiles et avec d'importantes émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), et de l'utiliser pour le transport lourd (maritime, transport terrestre).

L'objectif est que ces produits énergétiques soient majoritairement produits en France et en Europe, y compris pour l'hydrogène. La stratégie française est d'éviter de

substituer à la dépendance aux importations d'énergies fossiles d'autres dépendances majeures.

Enfin, la décarbonation de notre économie passera par l'électrification massive des usages. À l'horizon 2050, l'électricité devrait représenter plus de la moitié de la consommation finale d'énergie, contre un peu plus du quart aujourd'hui.

## Notre système électrique devra être profondément renouvelé et renforcé

L'évolution du mix électrique constitue donc l'autre objectif majeur de la stratégie de transformation de la production énergétique. Notre système électrique devra être presque entièrement renouvelé à l'horizon des trois prochaines décennies, avec l'arrivée en fin de vie des centrales nucléaires construites dans les années 1980 et 1990, des capacités de production d'énergie renouvelables développées entre 2000 et 2020, et le renouvellement nécessaire des réseaux de transport et de distribution. Pour préparer l'avenir, l'État a demandé à Réseau de transport d'électricité (RTE) la modélisation complète du système électrique (capacités de production, flexibilités, réseau) à l'horizon 2050 dans plusieurs scénarios de mix et de besoins énergétiques, en tenant compte des ressources nécessaires, de l'évolution du climat et des modes de consommation et en conservant l'objectif d'assurer la sécurité d'approvisionnement instantané en électricité. Les travaux de RTE<sup>1</sup> montrent que dans tous les scénarios, le développement rapide des énergies renouvelables électriques, et en priorité l'éolien offshore, est nécessaire, de même que le renforcement des interconnexions avec les pays européens voisins, et que les moyens de production d'électricité bas-carbone, photovoltaïque, éolien terrestre, éolien en mer et nucléaire peuvent être complémentaires au regard de leurs caractéristiques et de leurs calendriers industriels de développement.

La stratégie française repose donc sur un mix électrique s'appuyant sur les deux piliers de production bas-carbone disponibles – le nucléaire, avec le renforcement de la production du parc existant et la construction de nouveaux réacteurs, et les énergies renouvelables électriques, qui devront être fortement développées –, en tenant compte des temps de développement propres à chaque filière.

Le rythme de développement du photovoltaïque sera accéléré, celui de l'éolien terrestre au moins maintenu en veillant à une répartition plus équilibrée sur le territoire et en investissant dans le *repowering*. Le rythme d'attribution des capacités d'éolien offshore sera renforcé pour viser 18 GW de puissance installée en 2035, en élaborant une planification par façade maritime, en lançant en 2025 les procédures pour l'attribution de 10 GW de puissance et en poursuivant le développe-

ment de la filière de l'éolien flottant. En ce qui concerne l'hydroélectricité, qui constitue aujourd'hui la première source d'électricité renouvelable (42 % de la production électrique renouvelable et une puissance totale de 25,7 GW), l'objectif sera d'augmenter les capacités installées de 2,8 GW à horizon 2035, en grande partie sur des installations existantes.

L'essor des énergies renouvelables permettra en outre de diversifier le mix énergétique, de le rendre plus résilient et de positionner la France comme un acteur majeur sur le marché de ces nouvelles technologies.

Les orientations de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) ont été mises en consultation le 22 novembre<sup>2</sup>.

## La consolidation du pilier nucléaire de notre système électrique représente un défi industriel majeur

La PPE en cours d'élaboration prévoit la poursuite de fonctionnement des réacteurs électronucléaires existants en prenant en compte les meilleures pratiques internationales, y compris pour leur permettre de fonctionner après 50 ans ou 60 ans d'exploitation, tant que les exigences de sûreté sont respectées. Conformément à la loi, les réexamens de sûreté décennaux permettront de valider périodiquement la capacité à poursuivre l'exploitation pour chaque réacteur. EDF conduira les études nécessaires pour préciser les perspectives de fonctionnement du parc existant après 50 ans et après 60 ans, en incluant les réflexions nécessaires sur l'adaptation des réacteurs au changement climatique, notamment vis-à-vis des enjeux liés à la ressource en eau. L'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) a publié le 13 juin 2023 un avis sur les perspectives de poursuite du fonctionnement des réacteurs nucléaires d'EDF jusqu'à leurs 60 ans, sur la base des premières analyses réalisées par EDF, en rappelant qu'elle prendrait formellement position sur les conditions de la poursuite de fonctionnement des réacteurs au-delà de 50 ans à l'occasion de leur cinquième réexamen périodique. Ces travaux pourraient conduire à une prise de position « générique » de l'ASN à la fin de l'année 2026.

Pour renouveler le parc nucléaire, EDF porte un programme de construction de 6 réacteurs de technologie « EPR2 » (Evolutionary Power Reactor 2), un nouveau modèle de réacteur développé par EDF sur la base de la technologie « EPR », à raison de deux réacteurs sur le site de Penly, deux sur le site de Gravelines et deux réacteurs au Bugey, avec la perspective d'une décision finale d'investissement par le Conseil d'administration d'EDF d'ici à la fin de l'année 2024. Le Gouvernement a confirmé son soutien à ce programme après avoir conduit plusieurs audits et publié en février 2022 un rapport d'étape intitulé « Travaux relatifs au nouveau nucléaire – PPE 2019-2028 », sur les modalités de mise en œuvre du programme industriel. La PPE prévoit également l'étude d'un renforcement de ce programme

<sup>1</sup> <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilan-previsionnel-2050-futurs-energetiques#Lesresultatsdeletude> et <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/les-bilans-previsionnels>

<sup>2</sup> <https://www.ecologie.gouv.fr/consultation-publique-sur-strategie-francaise-energie-climat>

électronucléaire avec EDF et les opérateurs concernés, avec l'objectif d'instruire les questions relatives au dimensionnement, au juste besoin et à l'adaptation de la conception de l'EPR2, afin d'être en capacité d'ici 2026 de prendre une décision sur la réalisation d'un éventuel second palier de 8 EPR2.

La stratégie énergétique française soutient également l'émergence de réacteurs innovants, en particulier à travers le plan France 2030. Celui-ci prévoit d'accompagner le développement du projet français de petit réacteur modulaire (SMR) Nuward, qui vise l'objectif d'un premier béton pour une tête de série en France à l'horizon 2030, avec une aide de 50 M€ pour la phase d'avant-projet sommaire (APS), et un soutien public qui sera poursuivi pour la phase d'avant-projet détaillé (APD) prévue de 2023 à 2026. Le projet Nuward continue à travailler avec ses partenaires historiques, à savoir le Commissariat à l'énergie atomique (CEA), TechnicAtome et Naval Group, ainsi que les nouveaux partenaires qui ont rejoint le projet en 2022 : Framatome et Tractebel.

Le plan France 2030 soutient également de nouveaux concepts de réacteurs nucléaires innovants portés par des acteurs émergents, dans les domaines de la fission et de la fusion nucléaires, pour favoriser l'essor d'un nouvel écosystème de *start-up* dans le secteur nucléaire. Un programme de trois appels à projets (AAP) soutenant différentes phases du processus d'innovation (maturation initiale, preuve de concept et prototypage) est en cours. Le premier appel à projets « Réacteurs nucléaires innovants », opéré par Bpifrance, s'est déroulé du 2 mars 2022 au 28 juin 2023 et a suscité un fort intérêt des industriels, avec

15 dossiers déposés. Enfin, le plan d'investissement France 2030 comprend des actions de soutien au développement d'innovations accélérées pour la gestion des matières et déchets radioactifs, l'instruction de la faisabilité du multi-recyclage du combustible en réacteurs à eau pressurisée, ou encore au déploiement d'installations de recherche performantes et renouvelées.

Enfin, la stratégie de traitement-recyclage du combustible usé sera poursuivie sur la période de la PPE (jusqu'en 2035) et au-delà. La filière nucléaire mènera d'ici la fin de l'année 2026, sous la supervision du Gouvernement, des travaux visant à définir les scénarios industriels de renouvellement des installations les plus appropriés pour l'avenir du cycle du combustible après 2040.

Ces projets représentent des défis industriels majeurs. Les études conduites par le Groupement des Industriels Français de l'Énergie Nucléaire (Gifen) à la demande du Gouvernement montrent que la filière prévoit une croissance de 25 % du volume de travail d'ici 2033 sur le périmètre de 20 activités étudié, hors gain de productivité. Cette perspective se traduit par 155 000 emplois directs en 2033 (contre 125 000 en 2023) sur ce périmètre, 60 000 recrutements (pour moitié pour compenser les départs, et pour moitié pour répondre à la croissance de l'activité), soit 6 000 recrutements par an avec des pointes à 10 000 recrutements par an. Élargi à l'ensemble des 220 000 emplois de la filière, ce besoin s'élève à environ 100 000 recrutements équivalents temps plein sur 10 ans. La transformation à engager suppose donc une mobilisation industrielle comme l'Europe n'en a pas connue depuis plusieurs décennies.

# Suites aux difficultés rencontrées sur Flamanville, le plan excell d'EDF

Par Alain TRANZER et Anne-François de SAINT SALVY  
Groupe EDF

Après Flamanville 3, le plan excell d'EDF

Le 11 décembre 2019 EDF décide de mettre en œuvre un plan d'envergure, engageant EDF et toute la filière nucléaire pour retrouver le niveau de qualité, de rigueur et d'excellence qui a présidé à la construction du parc nucléaire français. Le plan excell comporte trois volets principaux : la maîtrise de la qualité industrielle, les compétences et la gouvernance des grands projets.

La mise en œuvre opérationnelle du plan excell s'engage en juin 2020 avec l'arrivée au COMEX d'EDF d'Alain Tranzer. Elle s'organise selon cinq axes : Gouvernance des projets, Compétences, Fabrications et réalisations, *Supply Chain*, Standardisation et réplication, complété par le plan Soudage.

Deux ans après le lancement du plan excell, les engagements pris ont été atteints à 90 %. La dynamique créée est devenue la règle au sein d'EDF et dans la filière. Son impact sur les résultats des projets nucléaires est suivi dans un tableau de bord trimestriel avec des cibles ambitieuses.

## Le rapport Folz et la genèse du plan excell

Le 11 décembre 2019, après avoir analysé avec la filière nucléaire rassemblée au sein du Gifen, le retour d'expérience de la construction des premiers EPR, EDF décide de mettre en œuvre un plan d'envergure, engageant EDF et toute la filière nucléaire pour retrouver le niveau de qualité, de rigueur et d'excellence qui a présidé à la construction du parc nucléaire français. Ce plan baptisé « excell » va bénéficier à tous les grands projets nucléaires en cours, à Flamanville et à Hinkley Point C, et futurs ainsi qu'au parc en exploitation, confronté lui aussi à des enjeux de qualité industrielle et de maîtrise des compétences.

Il comporte trois volets principaux :

- la maîtrise de la qualité industrielle ;
- les compétences ;
- la gouvernance des grands projets.

### La maîtrise de la qualité industrielle

La maîtrise de la qualité industrielle est un enjeu pour la sûreté nucléaire comme pour la performance de nos projets.

Seule une stratégie industrielle globale appuyée sur un panel de fournisseurs compétents, compétitifs permet d'atteindre l'excellence. Elle intègre dans une même vision : les politiques industrielles sectorielles, la maîtrise du risque de défaillance des fournisseurs, la maî-

trise des référentiels, techniques et contractuels, qui structurent les relations avec les fournisseurs.

Chacune des étapes de la chaîne de valeur de la qualité industrielle porte une part de la qualité finale. Elle commence dès l'amont : normes, standards industriels, qualité de la prescription. Le contrat passé avec le fournisseur sélectionné et qualifié formalise les exigences et les référentiels retenus. Il engage conjointement le client et le fournisseur dans l'atteinte du résultat. La surveillance des procédés de fabrication qui sont au cœur de la qualité du produit délivré en garantit la conformité.

De ces constats se dégagent trois évolutions majeures dans la relation d'EDF avec ses fournisseurs :

- la refonte du modèle contractuel : simplifié et plus équilibré ;
- la révision du schéma de qualification des fournisseurs pour les nouveaux projets ;
- le développement de la qualification des procédés industriels.

### Les compétences

L'état des lieux de la filière nucléaire française, réalisé par EDF et le Gifen, met en évidence un déficit de compétences dans plusieurs domaines industriels, soudage, chaudronnerie, etc. et dans l'ingénierie.

L'industrie nucléaire doit s'ouvrir sur les autres industries. L'amplification des parcours croisés est indispensable à tous niveaux : avec le monde industriel dans son ensemble, entre les entreprises de la filière et au



sein du groupe EDF entre les directions du nucléaire comme avec Framatome.

Le Gifem a engagé les travaux permettant de déployer et de mettre à disposition de l'ensemble des entreprises de la filière les outils et structures de formation qui leur sont nécessaires en visant des formations certifiantes. Le renforcement de l'alternance, le développement de l'apprentissage, la mise en place de partenariats avec les écoles et les centres de formation appuieront ces initiatives.

EDF s'associe à cette démarche et propose la création d'une Université des Métiers du Nucléaire pour former des intervenants clés aux meilleures pratiques.

Pour répondre au déficit de compétences de soudage de qualité nucléaire mis en exergue par Jean-Martin Folz, EDF met en place un plan soudage dont un volet sera consacré à la mise en place de nouvelles formations dans les régions où l'industrie nucléaire est fortement ancrée (école de soudure en Normandie par exemple). D'autres métiers tels que la chaudronnerie demanderont des efforts similaires.

S'agissant de l'ingénierie nucléaire d'EDF un plan d'action spécifique pour créer et sécuriser les compétences critiques est mis en place.

Il comporte notamment :

- une démarche de *Knowledge Management* ambitieuse et structurée et le développement d'une stratégie de transfert des compétences pour ancrer la pérennité des savoirs ;
- le développement des parcours croisés entre les ingénieries du parc en exploitation et du nouveau nucléaire ;

- un rééquilibrage entre ingénierie de réalisation et ingénierie de conception ;

- un recrutement accru de collaborateurs expérimentés venant d'autres secteurs industriels.

### La gouvernance des grands projets

Pour une réelle maîtrise des enjeux des projets nucléaires complexes et pour garantir une gouvernance placée au plus haut niveau de l'entreprise, une fonction de « client interne » porteuse des enjeux du projet et du futur propriétaire exploitant (enjeux techniques et de sûreté, enjeux financiers, risques du projet et enjeux industriels) doit être mise en place.

Incarné par un comité stratégique présidé par le président d'EDF, le « client interne » définit les enjeux du projet qu'il porte et ceux qu'il délègue au directeur de projet. Il valide l'estimation du projet en termes de coûts et de planning et en définit les principaux jalons. Il valide ensuite les engagements financiers et approuve les principaux contrats.

### La mise en œuvre opérationnelle

La mise en œuvre opérationnelle du plan excell s'engage en juin 2020 avec l'arrivée au COMEX d'EDF d'Alain Tranzer, délégué général à la qualité industrielle et aux compétences nucléaires. Sous son impulsion, les trois grands volets du plan sont organisés et structurés en cinq axes : Gouvernance des projets, Compétences, Fabrications et réalisations, *Supply Chain*, Standardisation et réplication.

Cette structuration précise les actions à mener dans les trois domaines définis initialement. Elle bénéficie directement de l'expérience industrielle d'Alain Tranzer



Figure 1 : Le plan excell.

comme en témoigne l'axe standardisation et réplication où les pratiques d'autres industries (automobile mais aussi naval et aéronautique) viennent irriguer, et parfois bouleverser, les pratiques de l'industrie nucléaire.

L'axe Gouvernance des projets a abordé trois dimensions :

- la structuration d'un client interne, maître d'ouvrage des projets, structure nécessaire pour des projets pour lesquels l'identification du client externe est difficile et ne porte pas réellement les enjeux de maîtrise d'ouvrage ;
- la mise en place d'une capacité de contrôle des Grands projets, auprès du président d'EDF pour évaluer la performance et la maturité du projet à chaque étape ;
- la structuration des projets nucléaires.

L'axe Compétences comportait deux thématiques :

- la première au niveau du Gifem, incarnée par le projet MATCH, pour identifier et suivre l'adéquation des ressources et capacités industrielles aux besoins des projets de la filière. Il s'agit de fournir à chacun des acteurs les éléments nécessaires pour engager les actions ;
- la seconde, au niveau d'EDF, concernait l'aspect ressources humaines et notamment le recrutement et les parcours formants.

L'axe Fabrications et réalisations était focalisé sur la qualité industrielle. Il a abordé l'ensemble des thématiques liées à ce domaine et notamment :

- la qualification des fournisseurs ;
- l'optimisation de la surveillance des fabrications ;
- le développement de la qualification des procédés industriels.

L'axe *Supply Chain* a concerné la relation entre EDF et ses fournisseurs :

- la définition et la conduite de la stratégie industrielle dans toutes ses dimensions ;
- la simplification de la relation contractuelle au profit d'un meilleur alignement des intérêts ;
- la performance du pilotage des contrats.

L'axe Standardisation et réplication se focalisait sur trois dimensions :

- déployer une logique de standardisation des exigences techniques et des équipements ;
- simplifier les référentiels techniques d'EDF pour les adapter au strict besoin nécessaire pour obtenir la qualité et les performances ;
- mettre en œuvre une logique de réplication des équipements pour conserver chaque fois que possible des matériels éprouvés plutôt que de rechercher systématiquement à faire mieux.

Rythmé par des comités de pilotage présidés par Jean-Bernard Lévy qui se succèdent tous les 15 jours

pendant quatre mois avant de s'espacer au fur et à mesure que les décisions prises entrent en application, le plan se déploie rapidement et engage une transformation en profondeur de l'entreprise pour relever les défis définis par le plan excell.

Sa mise en œuvre s'est organisée en trois phases :

- Phase 1 – juin à octobre 2020 : le temps des décisions ;
- Phase 2 – octobre 2020 à octobre 2021 : la mise en œuvre des décisions ;
- Phase 3 – octobre 2021 à octobre 2022 : l'ancrage des pratiques.

### Le temps des décisions

Sur chacun des cinq axes, une équipe restreinte associant toutes les parties prenantes y compris les industriels de la filière a analysé la situation et le retour d'expérience, intégré les pratiques d'autres industries et construit les propositions soumises au comité de pilotage. Cette analyse a été nourrie par des visites de terrain pour s'ancrer dans la réalité et traiter les sujets de la manière la plus concrète. Près de 150 décisions ont été prises qui vont transformer les pratiques opérationnelles. Les débats ont été parfois difficiles et il a fallu procéder par étapes en validant les décisions par des expérimentations.

La caractéristique de cette phase, enjeu clé de son efficacité mais aussi bouleversement profond dans une grande entreprise comme EDF, a été la vitesse, dans l'analyse mais sans rester à la surface des dossiers, dans la prise de décision avec des comités de pilotage fréquents, dans la mise en œuvre contrôlée par un tableau de bord de suivi exigeant.

### La mise en œuvre des décisions

Dans cette seconde phase, l'accent est mis sur la rigueur dans la mise en œuvre des décisions. Elle est pilotée avec un tableau de bord mensuel qui présente au comité de pilotage l'avancement de chacun des dossiers. Un bilan semestriel permet de définir les plans d'actions et les échéances pour les actions qui n'ont pas encore atteint leur objectif.

Les principales décisions prises ont été matérialisées par 25 engagements. La figure 2 de la page suivante illustre l'avancement au milieu de cette phase en mai 2021.

### L'ancrage des pratiques

22 des 25 engagements pris en octobre 2020 ont été atteints à l'échéance confirmant à la fois la pertinence et l'applicabilité des décisions prises et démontrant par les expérimentations mises en place l'atteinte de l'efficacité attendue.

Ce constat permet d'engager la phase suivante pour généraliser et ancrer ces pratiques dans l'action quotidienne des équipes de terrain. Elle se caractérisera par 30 engagements dont les 25 précédents. La responsabilité des engagements les plus avancés est d'ores

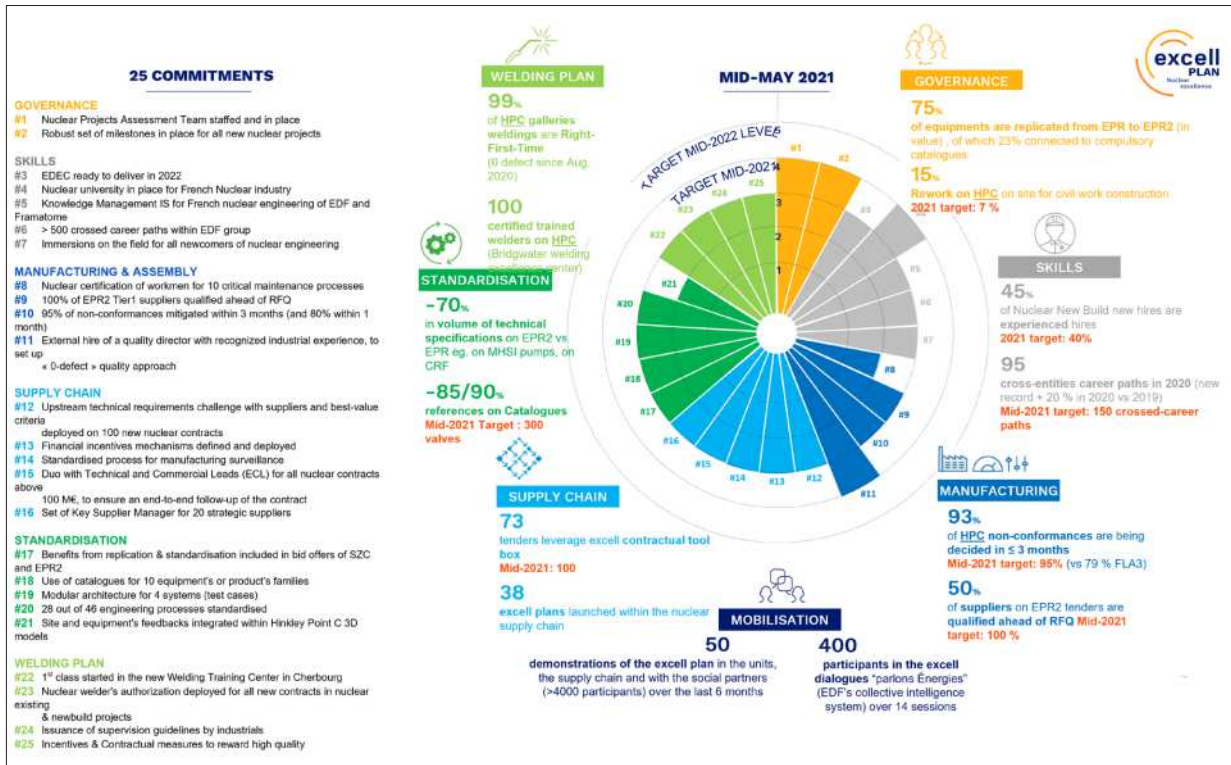


Figure 2 : État d'avancement du plan excell en mai 2021.

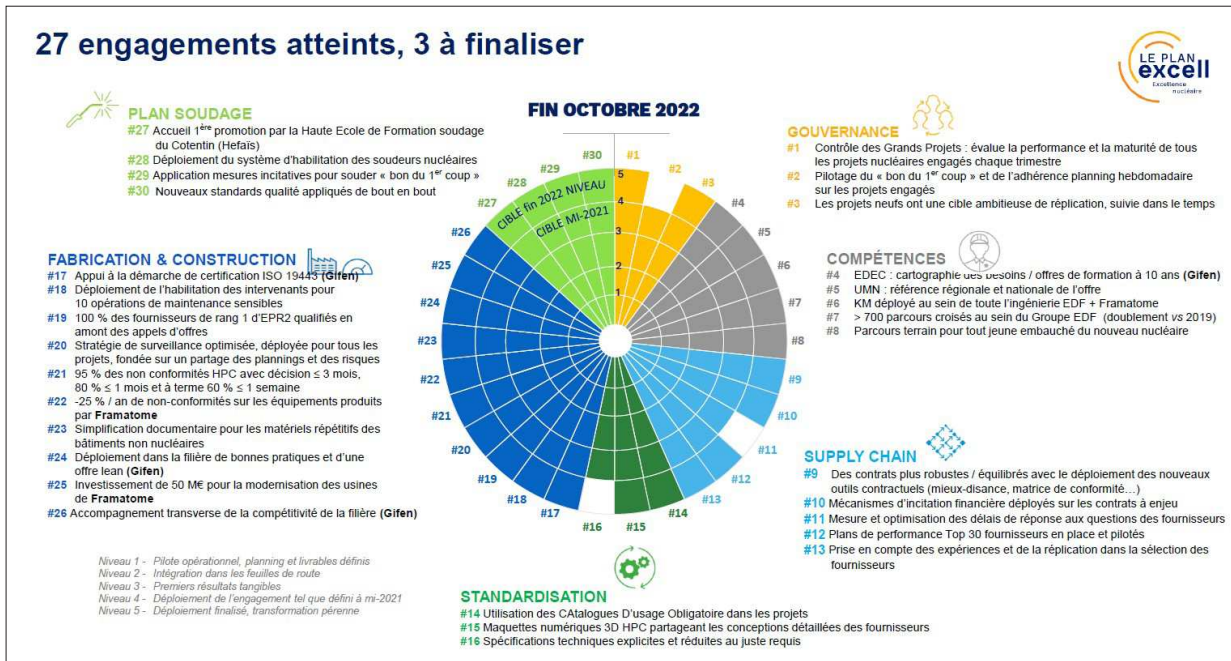


Figure 3 : État d'avancement du plan excell en octobre 2022.

et déjà transférée aux équipes opérationnelles, l'équipe excell se concentrant sur l'appui au déploiement des autres engagements.

En octobre 2022, 27 des engagements ont été atteints et 3 restent à finaliser.

## Les résultats après deux ans

Deux ans après le lancement du plan excell, les engagements pris ont été atteints à 90 %, les trois derniers étaient en cours de finalisation. Leur déploiement s'est poursuivi au sein d'EDF et, en étroite coopération avec

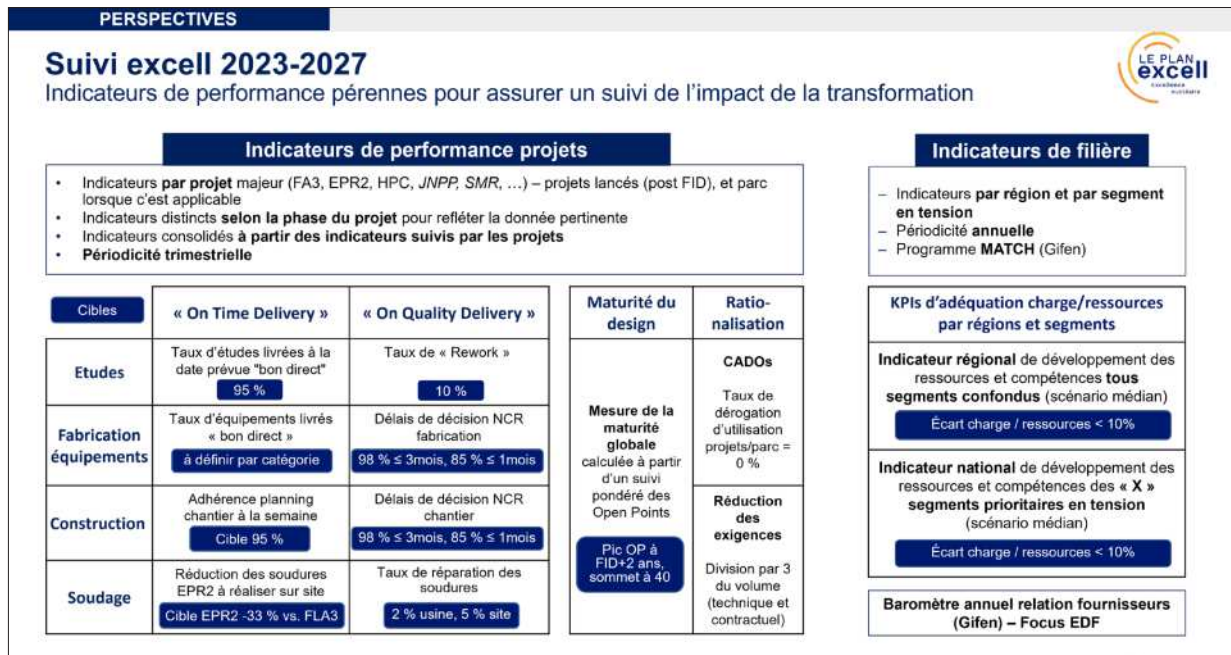


Figure 4 : Suivi du plan excell de 2023 à 2027.

le Gifen, dans toute la filière nucléaire. La dynamique créée par excell est devenue la règle pour tous les acteurs du nucléaire au sein d'EDF et dans la filière. Son impact sur les résultats des projets nucléaires est suivi dans un tableau de bord trimestriel dont les cibles ambitieuses sont autant de leviers vers l'excellence. Ce tableau de bord intègre également les résultats atteints dans deux autres domaines :

- celui des compétences avec l'analyse annuelle conduite par le Gifen dans le cadre du projet MATCH ;
- celui de la relation partenariale et engagée résultat entre EDF et ses fournisseurs suivis par le baromètre de la filière nucléaire porté par le Gifen et baptisé du nom prometteur d'IDYLL.

Les avancées obtenues sur chacun des cinq axes témoignent des résultats obtenus.

### Gouvernance des projets

Pour la Gouvernance des projets, les jalons principaux des projets nucléaires ont été identifiés. Pour chaque jalon, trois éléments clés ont été définis qui conditionnent le franchissement du jalon et évitent la fuite en avant. L'équipe de contrôle des grands projets, constitués d'une dizaine d'experts de haut niveau dans les différentes dimensions a été mise en place. Elle apporte une vision tête haute de l'avancement des projets et peut appuyer un projet en difficulté.

En parallèle, une maîtrise d'ouvrage pour le programme de nouveaux réacteurs nucléaires EPR2 a été mise en place. Elle s'appuiera sur le contrôle des grands projets.

### Compétences

Dans le domaine des Compétences, le déploiement du projet MATCH du Gifen apporte désormais une vision

complète, actualisée annuellement, des besoins en recrutement et en formation dans les différents secteurs industriels et une analyse métier par métier. Nourrie par les prévisions d'activité des exploitants nucléaires et par les ressources disponibles chez les industriels de la filière, cette vision permet de définir les actions à lancer en matière d'attractivité, de formation et de recrutement.

C'est l'Université des Métiers du Nucléaire, créée début 2021, qui assure le pilotage de l'ensemble des actions destinées à satisfaire ces besoins en ressources compétentes, formées et expérimentées. Rassemblant les acteurs de ce domaine, sur le plan national et régional, l'Université des Métiers du Nucléaire est le véritable moteur de la remontée en compétences de la filière.

### Fabrications et réalisations

Sur l'axe Fabrications et réalisations, de nombreuses actions ont été menées parmi lesquelles on retiendra deux évolutions majeures :

- une nouvelle stratégie de surveillance des fabrications pour réaliser la convergence entre le déroulement fluide du cycle de fabrication de l'industriel d'une part, les enjeux de qualité et les exigences réglementaires associées d'autre part. Cette nouvelle stratégie « surveiller sans ralentir » repose notamment sur le partage ouvert entre EDF et le fabricant des plannings de fabrication pour mieux focaliser la surveillance ;
- pratique courante dans d'autres industries, le développement de la qualification des procédés industriels sécurise la qualité des produits et allège le besoin de surveillance.

Enfin, EDF a décidé la mise en œuvre de la certification au regard de la norme ISO 19443 pour ses propres entités concernées par les enjeux de sûreté nucléaire et pour les entreprises réalisant des fabrications ou des activités impliquant de tels enjeux.

### Supply Chain

Sur l'axe *Supply Chain*, les dispositions contractuelles ont été revues pour mieux orienter la relation vers l'objectif de réussir ensemble les projets. Le baromètre annuel de la relation fournisseurs permet d'identifier les domaines dans lesquels des avancées sont encore nécessaires. En matière de pilotage des contrats, une continuité d'action entre la négociation du contrat et son pilotage a été mise en place sur les contrats majeurs. En cible, l'acheteur qui a conduit l'appel d'offres assurera après attribution le management du contrat.

La création d'un « plateau fournisseurs » permet aujourd'hui d'avoir une vision transverse des enjeux industriels et de la connaissance de la filière. Il participe à la cohérence des actions qui sont engagées. C'est là que s'élabore la stratégie qui vise à rationaliser le panel de fournisseurs et à mettre en place une gestion de bout en bout de la performance des principaux fournisseurs à enjeux. La mise en place de revues régulières de performance et le déploiement d'une démarche "supplier development" destinée à appuyer ces industriels dans leur progression vers l'excellence sont les principaux leviers de cette démarche.

Les dispositions du code des marchés publics auquel est soumis EDF ne sont pas toujours compatibles avec la complexité et la technicité des projets de construction de nouvelles installations nucléaires et avec les enjeux industriels associés. Elles ne permettent pas de bénéficier des effets d'une construction en série. Des actions ont été engagées pour obtenir les dérogations nécessaires, elles sont clés pour la réussite des projets futurs. Ces demandes portent notamment sur :

- la prise en compte de la spécificité des projets dans le domaine nucléaire, qui sont particulièrement exposés aux risques d'interface entre les différents lots et acteurs sur le chantier avec un impact direct sur les délais et les coûts en autorisant de déroger à l'obligation de lotissement prévue par le code de la commande publique pour mieux prendre en compte ces risques ;
- la possibilité de conclure des accords-cadres d'une durée qui dépasse la durée maximale prévue par le code de la commande publique pour permettre de les adapter à la durée du projet ou du programme ;
- la possibilité de passer des appels d'offres restreint sans publicité pour la partie la plus sensible des installations en maintenant sauf exception le principe de la mise en concurrence. Ce dispositif permettrait de renforcer le niveau de protection actuelle tout en conservant les bénéfices de l'ouverture des marchés aux partenaires, notamment européens.

### Standardisation et réplication

Standardisation et réplication sont aujourd'hui les mots clés de l'ingénierie nucléaire d'EDF. Les référentiels techniques ont été simplifiés dans leur rédaction et digitalisés pour s'intégrer directement dans les outils de conception. Cette action se prolonge aujourd'hui pour focaliser les exigences techniques des contrats sur le strict besoin.

Des Catalogues D'usage Obligatoire ou CADO ont été établis afin de réduire la diversité tant des équipements que des fournisseurs. Cette évolution majeure est gage d'amélioration de la qualité, elle augmente la taille des séries à fabriquer et favorise l'investissement dans l'automatisation des process et les compétences.

La réplication garantit à la fois l'utilisation de matériels éprouvés et la réduction des risques. À titre d'illustration, elle est appliquée à hauteur de 90 % entre les projets d'Hinkley Point C et de Sizewell C au Royaume-Uni.

### En forme de conclusion...

Fin 2023, au moment où est rédigé cet article, les 30 engagements du plan excell ont été tenus. En première analyse, le plan excell a donc tenu ses promesses et engagé une réelle transformation en profondeur des pratiques d'EDF et des entreprises de la filière vers la réussite des projets nucléaires. L'évolution de l'organisation et des modes de fonctionnement des métiers du nucléaire en cours de définition s'inscrit pleinement dans la continuité de la transformation conduite par le plan excell et en confortera les résultats.

# Le renforcement de la qualité industrielle chez Framatome

Par Bernard FONTANA

Président du directoire et CEO de Framatome

Depuis plus de 60 ans, Framatome participe au développement en France et à travers le monde de solutions nucléaires sûres, bas-carbone et compétitives.

Après l'arrêt des nouvelles constructions en France et la perte de compétences associée, le marché du nucléaire est désormais redevenu dynamique, tiré par sa forte intégration dans les futurs mix électriques bas-carbone et le besoin renforcé d'indépendance énergétique.

Pour répondre aux diverses demandes en France et à l'international et consolider sa performance, Framatome poursuit depuis plusieurs années un programme de renforcement des compétences et de la qualité d'exécution.

## L'histoire de Framatome

Depuis plus de 60 ans, Framatome participe au développement en France et à travers le monde de solutions nucléaires sûres, bas-carbone et compétitives.

Framatome est un chaudiériste nucléaire. Les équipes de Framatome conçoivent, fabriquent, entretiennent et installent des composants et des combustibles ainsi que des systèmes de contrôle-commande pour les centrales nucléaires en France et dans le monde.

Aujourd'hui, Framatome regroupe un peu plus de 18 000 collaborateurs présents sur près de 70 sites dans le monde. Framatome est le fabricant d'équipements d'origine (l'OEM) de 92 réacteurs nucléaires et intervient sur 385 des 450 réacteurs installés dans le monde.

Constituée en décembre 1958, Framatome est l'héritière de la Franco Américaine de Constructions Atomiques (Framatome), qui s'est vu confier en 1975 le mandat de construire le parc nucléaire français, avec une licence de Westinghouse pour les réacteurs à eau pressurisée.

Cette grande époque a été accompagnée de développements à l'export, comme en Chine (notamment Daya Bay et Ling Ao), ou encore en Afrique du Sud (Koeberg). Un rapprochement de Siemens Nucléaire a donné naissance à l'EPR, qui est le résultat d'une collaboration franco-allemande.

Par la suite, la filière nucléaire française a été impactée par l'arrêt des nouvelles constructions en France, et la perte de compétences associée.

Des mesures correctrices ont été mises en place, au sein de Framatome et également plus généralement dans la filière, avec un programme de renforcement des compétences et de la qualité d'exécution en cours de déploiement.

Désormais, le marché du nucléaire est dynamique, tiré par sa forte intégration dans les futurs mix électriques

bas-carbone et le besoin renforcé d'indépendance énergétique.

En France, un renouveau du nucléaire a lieu, avec l'annonce de la construction de 6 réacteurs EPR2 sur le territoire français à partir de 2035 par le président de la République le 10 février 2022, et de 8 EPR supplémentaires à l'étude, en parallèle du programme Grand Carénage lancé par EDF, qui vise à moderniser et rénover les centrales nucléaires, pour étendre le fonctionnement des réacteurs du parc nucléaire en toute sécurité.

Framatome contribue également au projet de SMR français Nuward et à d'autres initiatives de SMR et réacteurs avancés par la fourniture de briques technologiques telles que du combustible, du contrôle-commande, du support pour du *licensing* ou encore comme fournisseur de composants.

## Les compétences

Comme pour tous les programmes complexes, le premier défi auquel Framatome a dû faire face est le besoin en ressources compétentes. L'arrêt pendant plus de 20 ans de constructions de centrales nucléaires en France s'est traduit par un appauvrissement en compétences et par un déséquilibre de la pyramide des âges.

Pour être en mesure d'améliorer la qualité, il était nécessaire d'avoir des collaborateurs compétents dans leur domaine et suffisants en nombre. Une solide base de compétences était donc à recréer.

Framatome travaille ainsi depuis plusieurs années à maintenir et renforcer les savoirs et capacités nécessaires au développement du potentiel technique :

- Plus de 2 000 nouveaux collaborateurs sont recrutés chaque année pour remplacer les départs à la retraite et renforcer les compétences.

- Framatome a créé des centres d'excellence dans les domaines de la robotique, des calculs, du soudage, de l'usinage de précision et, cette année, de la fabrication additive, et lancé plusieurs écoles et académies : Inspection Academy, Campus, École de *design* à Lyon, École de *design* combustible, Centre de Formation des Réacteurs.
- Enfin, pour assurer le transfert des savoirs et des compétences, Framatome poursuit un important programme de *knowledge management*, de formations avancées, et d'expériences continues sur les sites.

## La standardisation des produits

Framatome a lancé en 2019 le programme « Juliette », visant la standardisation des composants fabriqués en usine et de leur processus de fabrication. L'objectif est d'assurer la stabilité de la conception pour permettre la répétition d'opérations identiques en usine, afin d'améliorer la maîtrise du geste par les opérateurs, du fait de sa répétitivité. Le programme « Juliette » est le catalyseur de nos progrès en matière de qualité et de délai d'exécution des équipements.

En 2021, le programme « Juliette » a été complété par le programme « Romeo » qui porte l'effort de standardisation au niveau des équipements complets, dans leur définition fonctionnelle : conception et documentation associée. L'ensemble de ces informations est capita-

lisé dans le PLM (logiciel Product Life Management de gestion du cycle de vie des produits).

Des processus de gouvernance de ces standards de conception et de fabrication ont été définis et sont mis en œuvre. Une démarche similaire est initiée pour le contrôle- commande de sûreté et l'instrumentation nucléaire.

En termes de maîtrise des procédés, notre démarche de standardisation a pour objectif d'assurer la mise en œuvre de procédés robustes et éprouvés :

- elle ne recherche pas la meilleure technologie contemporaine ou émergente, mais la mise en œuvre de technologies et de procédés connus et caractérisés ;
- elle cherche à rapprocher, dans toute la mesure du possible, les gammes de fabrication utilisées pour la fabrication des produits Framatome de gammes de fabrication couramment employées dans des industries présentant des requis de sûreté élevés (aéronautique, spatial...).

## Le programme Excell in Quality

Pour gagner en qualité, en capacité et en compétitivité, Framatome adapte et renforce ses moyens humains et industriels.

Le programme Excell in Quality a été lancé en 2020 pour améliorer fortement la qualité de nos fabrications

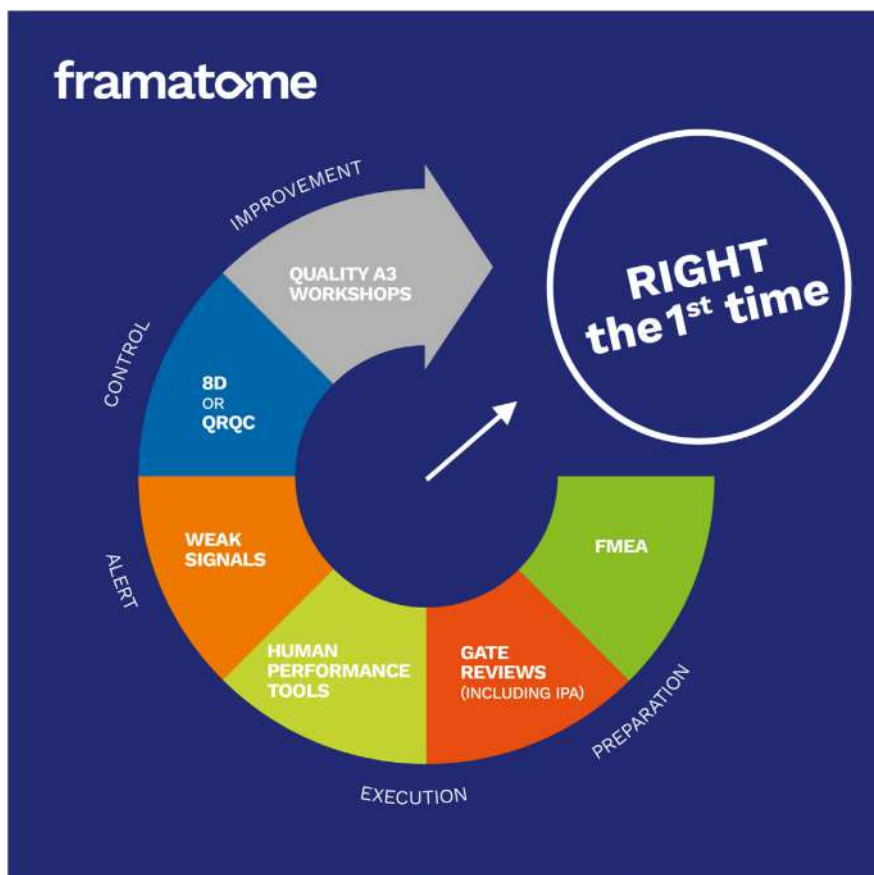


Figure 1 : Le programme Excell in Quality (Source : Framatome).

dans l'objectif « bon du premier coup », et éviter les écarts majeurs générant retards et surcoûts. Ce programme a été déployé selon 6 axes : « Tous engagés pour la qualité », « La qualité bon du premier coup », « Maîtrise de nos procédés », « Engagement de nos fournisseurs », « Les compétences » et « La fonction qualité en support du plan ».

Un des objectifs poursuivis est de réduire fortement voire éliminer la récurrence des écarts importants ou ayant un impact pour nos clients, tout en favorisant la remontée des écarts internes et des signaux faibles. Les résultats sont mesurés depuis le début sous forme du taux de fréquence de la non-qualité perçue par nos clients, qui est réduit de 25 % par an depuis 2020.

Dans le cadre de ce plan, nous avons notamment développé une nouvelle méthode de qualification de nos procédés de fabrication, appelée IPA (Industrial Process Approval), dérivée de la méthode APQP (Advanced Product Quality Planning) déployée dans l'industrie automobile et aéronautique. La méthode a été appliquée, de manière graduée, sur nos procédés critiques ou à forts enjeux, afin de les mettre sous contrôle et les rendre capables de garantir des produits fabriqués « bons du premier coup ».

## L'implication des fournisseurs

En termes de maîtrise de notre chaîne d'approvisionnement, nous mettons en place les principes suivants dans le cadre du projet EPR2 :

- nous réalisons le retour d'expérience des fabrications antérieures ;
- nous nous astreignons à vérifier la capacité du fournisseur d'un point de vue système qualité (niveaux système « nucléaire » ISO 19443 ou « qualité » ISO 9001 selon la classification des produits commandés), mais aussi, compte tenu de l'ampleur du projet EPR2, d'un point de vue capacité industrielle, santé financière et pérennité (pour les fournisseurs stratégiques) ;
- nous évaluons l'état de qualification des procédés mis en œuvre, afin de positionner au besoin des parades particulières ;
- nous vérifions la bonne déclinaison des exigences (dans une logique d'ingénierie système), et nous vérifions la bonne compréhension au travers des réunions d'enclenchement (pré et post contractualisation) ;
- nous surveillons, en fonction de la maturité et de la qualification des procédés mis en œuvre, de façon graduée en fonction de l'importance pour la qualité du matériel à livrer, l'activité propre du fournisseur et de sa chaîne d'approvisionnement et de sous-traitance ;
- nous accompagnons individuellement le fournisseur en cas de besoin, y compris pour l'établissement de son rapport de fin de fabrication (RFF).

Par ailleurs, pour favoriser la maîtrise de notre chaîne d'approvisionnement, nous prenons aussi le parti de limiter le nombre de fournisseurs et sous-traitants (tout

en assurant un niveau minimal d'alternatives), et fidéliser ces sous-traitants, pour :

- installer des habitudes de travail (notamment, en matière de résolution de problèmes) ;
- donner une assise économique (volume d'affaires) plus significative à notre relation contractuelle et commerciale.

## Les investissements

L'amélioration de la qualité passe également par la modernisation des capacités industrielles, dans laquelle Framatome s'engage pleinement.

Framatome consacre plus de 250 M€ par an à la modernisation, l'automatisation et la digitalisation des usines, l'amélioration de la qualité, la standardisation des produits et la productivité induite,

Framatome :

- a pour ambition d'avoir un outil industriel *benchmark* mondial (Le Creusot, Saint-Marcel, Jeumont pour la fourniture des équipements nécessaires pour les nouvelles constructions et la base installée) et européen (Romans pour la fourniture de combustible) ;
- travaille à l'industrialisation des méthodes usines ;
- mise sur l'industrie du futur et l'innovation en développant la French Fab Métallurgie – Forge 4.0 (Le Creusot).

Nous avons investi 1 Md€ ces 5 dernières années et nous investissons 1 Md€ de plus dans les 4 prochaines années pour sécuriser notre capacité à livrer le programme nucléaire Français, les EPRs à l'export, notre contribution au SMR Français. Nous adoptons également un positionnement de fournisseur de composants pour d'autres programmes, notamment de SMR ou de nouveaux réacteurs.

## La R&D et l'innovation

L'amélioration de la qualité passe également par la recherche et l'innovation.

Framatome alloue plus de 120 M€ par an pour la R&D avec une augmentation de 7 % par an.

Quelques exemples de thématiques actuelles :

- Framatome développe des combustibles dit « Accident Tolerant Fuel », qui vont intrinsèquement avoir une tolérance accrue en cas, par exemple, de manque de refroidissement. Framatome est la première société dans le monde à avoir livré un assemblage de combustible ATF complet.
- Il apparaît aussi la possibilité d'incorporer des progrès de fabrication additive. Des éléments de combustible nucléaire imprimés en 3D de Framatome ont été ainsi insérés dans des réacteurs commerciaux.
- Framatome renforce également sa connaissance des matériaux, du diagnostic de leur état et de leur



traitement pour développer les systèmes de remédiation nécessaires.

Pour finir, il faut souligner le rôle à jouer de la digitalisation pour renforcer la qualité.

L'ambition de Framatome est d'utiliser le digital pour améliorer l'ensemble de ses processus. Ces développements digitaux sont concentrés sur l'exécution, les coûts et la qualité.

Framatome digitalise le suivi des procédés. Par exemple, sur le site de Rugles, l'évolution des paramètres des procédés (température, acidité, épaisseur...) de fabrication des tôles et feuillards faisait l'objet d'une revue hebdomadaire qui ne permettait pas une réactivité immédiate en cas de dérive. Et la diversité des équipements et des formats de stockage des données des procédés rendait difficile la systématisation des traitements avec des outils bureautiques classiques.

Il a été mis en place un système de nettoyage et de centralisation des données des procédés, qui alimente des tableaux de bord interactifs, affichés au plus près des machines de production, grâce à des méthodes d'analyses statistiques et des rapports de visualisation dans Power BI.

Ce dispositif de cartes de contrôle automatique est mis en place à Rugles, Romans et Saint-Marcel.

L'ensemble de ces initiatives est porté par des salariés très engagés et fiers de relever tous ces challenges.

La France et sa filière nucléaire peuvent compter sur eux.

# EPR2 : améliorer la constructibilité de l'EPR grâce au retour d'expérience

Par Gabriel OBLIN

Directeur du Projet EPR2 du groupe EDF

L'EPR2 est une version optimisée et industrialisée de l'EPR. Il capitalise sur les forces de l'EPR : la même puissance, et les mêmes performances de sûreté et environnementales parmi les plus élevées au monde. Il prend également en compte le retour d'expérience des EPR précédents et du parc en exploitation, pour en faciliter la construction ; des enseignements tirés à la fois par EDF et la filière industrielle française mobilisée vers le retour à l'excellence, *via* le « plan excell ».

La différence avec l'EPR réside donc principalement dans le fait que l'EPR2 sera plus facile à construire, dans des délais optimisés et donc plus compétitif. La construction sera facilitée en :

- simplifiant le *design* ;
- standardisant les équipements ;
- renforçant la préfabrication dans les usines ;
- associant au plus tôt les fournisseurs ;
- adaptant les organisations et relevant l'enjeu des compétences ;
- transformant en profondeur et en digitalisant l'ingénierie d'EDF.

EDF vise de démarrer les premiers travaux sur le site de Penly (Normandie) mi-2024. Les projets suivants sont prévus à Gravelines (Hauts-de-France) et Bugey (Auvergne-Rhône-Alpes).

## Introduction

« Nous allons, pour la première fois depuis des décennies, relancer la construction de réacteurs nucléaires dans notre pays et continuer de développer les énergies renouvelables (...) pour garantir l'indépendance énergétique de la France, pour garantir l'approvisionnement électrique de notre pays et atteindre nos objectifs, en particulier la neutralité carbone en 2050 ». Cette volonté exprimée par le président de la République, Emmanuel Macron, le 9 novembre 2021, devrait se traduire l'été prochain par le lancement du premier chantier de construction de réacteurs EPR2 sur le site de Penly (Normandie). L'aboutissement d'un projet porté par EDF et la filière nucléaire française remobilisée, tirant les enseignements des chantiers EPR dans le monde et de l'exploitation du parc nucléaire actuel.

## Genèse du programme

S'inscrivant pleinement dans la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) 2019-2028, et conformément à la demande formulée en 2018 par le président de la République de « travailler à l'élaboration d'un programme de nouveau nucléaire, en prenant des engagements fermes sur le prix pour qu'il soit plus compétitif », EDF et la filière nucléaire française ont remis au Gouvernement, en mai 2021, une pro-

position industrielle de construction de trois paires de nouveaux réacteurs de type EPR2 en France. Ces réacteurs seraient implantés sur les sites de Penly (Normandie), Gravelines (Hauts-de-France) et Bugey (Auvergne-Rhône-Alpes).

Dès le 10 février 2022, dans le cadre d'un discours sur le volet « Énergies » de France 2030 à Belfort, le président de la République a réaffirmé vouloir consolider la place de l'énergie nucléaire dans le mix énergétique français, et a fait part, au-delà de sa volonté, de mettre en œuvre immédiatement un programme de nouveaux réacteurs nucléaires à travers le lancement du projet de construction de trois paires d'EPR2.

Le débat public sur le « Projet d'une première paire de réacteurs EPR2 sur le site de Penly dans le cadre de la proposition d'EDF pour un programme de nouveaux réacteurs nucléaires en France » s'est tenu d'octobre 2022 à avril 2023. Après l'analyse du bilan du débat et des recommandations émises par la Commission nationale du débat public, EDF en tant que maître d'ouvrage, a décidé de poursuivre la préparation du programme EPR2 et a déposé les demandes d'autorisation pour Penly auprès des administrations concernées (demande d'autorisation de création et demande d'autorisation environnementale). Ces demandes vont être instruites dans le cadre de la nouvelle loi d'accélération du nucléaire en France. La construction de



Figure 1 : Vue d'architecte des 2 futurs EPR2 en exploitation sur le site de Penly en Normandie  
(Copyright : Didier Marc (PWP) et Kardham Architecture).

la première paire pourrait débuter à l'été 2024, après l'obtention de l'autorisation environnementale.

## Le réacteur EPR2, une version optimisée et industrialisée de l'EPR

L'EPR2 est une version optimisée et industrialisée de l'EPR. D'une puissance de  $2 \times 1\,670$  MWe, chaque paire de réacteurs produira chaque année l'équivalent de 50 % de la consommation électrique d'une région comme l'Île-de-France.

L'EPR2 reconduit les principaux atouts de l'EPR, c'est-à-dire des performances techniques, de sûreté et environnementales parmi les plus élevées au monde. Réacteur de troisième génération, l'EPR2 bénéficie des meilleurs standards de sûreté disponibles et intègre par exemple dès la conception le retour d'expérience de Fukushima. Ce réacteur offre également un meilleur rendement que le parc actuel et des performances environnementales accrues (possibilité d'utiliser du combustible issu du retraitement du combustible usé (MOX), optimisation des rejets et déchets pour un même volume de production, etc.).

La différence avec l'EPR réside donc principalement dans le fait que l'EPR2 sera plus facile à construire, dans des délais optimisés et donc plus compétitif, grâce

à l'intégration du retour d'expérience des EPR dans le monde et du parc français en exploitation.

L'EPR2 est également conçu pour s'intégrer dans le futur mix énergétique français à l'horizon 2035, à forte composante en énergies renouvelables. La possibilité de faire varier son niveau de production d'électricité en fonction de la consommation le rend très complémentaire de la production solaire et éolienne.

Enfin, l'EPR2 prend en compte, dès sa conception, l'évolution des facteurs externes en lien avec le changement climatique, particulièrement les températures d'air et d'eau, les niveaux d'eau en bord de mer et le débit des fleuves. L'objectif est qu'il soit résilient à ces

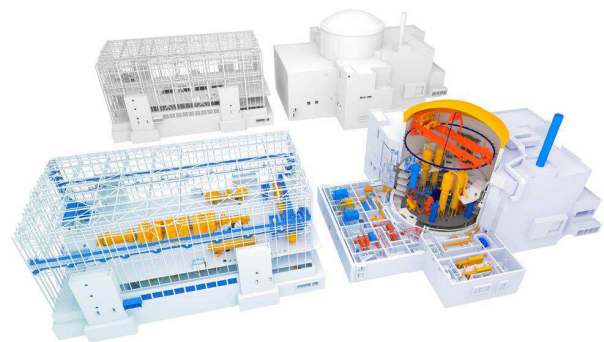


Figure 2 : Vue en coupe de la salle des machines et de l'îlot nucléaire d'une paire d'unités de production EPR2.

évolutions sur toute sa durée de fonctionnement, d'au moins 60 ans.

## Améliorer la constructibilité des EPR2 grâce aux enseignements tirés par EDF et la filière

Le réacteur EPR2 est issu du travail approfondi mené par EDF et la filière nucléaire afin de tirer les enseignements des chantiers et de l'exploitation des EPR dans toutes leurs dimensions : technique, industrielle et socio-organisationnelle. L'objectif : optimiser et industrialiser l'EPR afin de le rendre plus simple à construire et donc plus compétitif.

Pour ce faire, EDF et la filière ont travaillé sur les axes suivants.

### Simplifier le *design* pour améliorer la constructibilité et optimiser l'exploitation future

Les principales évolutions du *design* de l'EPR2 ont un impact direct sur le génie civil et donc le planning de construction et le coût du réacteur.

Le *design* a été simplifié, avec l'appui des entreprises du secteur, en supprimant les singularités de génie civil et en favorisant des structures plus simples à construire, par exemple en alignant les murs d'un local à l'autre ou d'un étage à l'autre. La constructibilité de l'enceinte du réacteur EPR2 a également été améliorée (une enceinte à paroi unique en béton avec un revêtement métallique au lieu des 2 parois béton de l'EPR) en conservant le même niveau de sûreté et les mêmes performances de confinement et de résistance aux agressions externes que l'EPR.

Certains couloirs et salles ont été agrandis afin de faciliter les activités en phase de montage puis en phase d'exploitation.

Des simplifications ont également été apportées au *design* suite à l'abandon de certaines options demandées par les électriciens allemands lors de la conception de l'EPR car non utilisées par les exploitants français, par exemple la possibilité de faire de la maintenance dans le bâtiment réacteur lorsque celui-ci fonctionne à pleine puissance (concept "two-rooms").

### Stabiliser la conception pour éviter les cycles de modification

Suite au retour d'expérience de Flamanville 3, dès la phase de *basic design*, EDF a fait valider les principaux choix de conception de l'EPR2 et s'est accordé avec l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) sur les règles appliquées en matière de sûreté. L'objectif : disposer d'un référentiel de conception stabilisé et ainsi éviter les reprises d'études en phase de réalisation.

Dès 2016, EDF a ainsi fait le choix de remettre à l'ASN le Dossier d'options de sûreté (DOS) qui, après instruction, a abouti à un avis positif de l'Autorité sur les principaux choix de conception de l'EPR2. EDF a ensuite

transmis, dès février 2021, le Rapport préliminaire de sûreté de la première paire d'EPR2 sur le site de Penly afin de permettre à l'ASN d'anticiper l'instruction longue de ce document. Les conclusions de l'ASN sur le rapport de sûreté définitif constitueront en effet l'une des pièces essentielles à l'obtention du décret d'autorisation de création (DAC).

### Standardiser les équipements sur la durée et répliquer dès que possible

En s'appuyant notamment sur le plan excell lancé par EDF avec les entreprises de la filière nucléaire française, les équipes EPR2 ont réduit significativement le nombre de références d'équipements au profit de modèle standards de l'industrie, déjà dans les catalogues des fournisseurs. Une démarche qui permet à la fois de générer des gains de coûts (achats en volume des références sélectionnées), de maintenance et d'exploitation (avec des pièces suivies, disponibles rapidement chez les fournisseurs) et de durée de construction.

Ainsi, le nombre de références de portes sur l'installation a été divisé par 3 passant de 294 à 89, et la standardisation du catalogue de tuyauterie a été réduit à 2 nuances d'acier et 2 épaisseurs par diamètre, ce qui a permis de réduire de 40 % le nombre références utilisées sur l'EPR2.

Enfin, afin de limiter les risques industriels, le choix a été fait d'utiliser les mêmes équipements de la chaudière que pour les EPR précédents.

### Construire en série et par paire

Afin de retrouver les bonnes pratiques qui ont fait le succès de la construction en un temps record du parc français actuel dans les années 1970-1980, les EPR2 sont construits par paire au sein d'un programme.

Construire en série offre l'opportunité de faire des achats d'équipements ou de prestations pour l'ensemble du programme et donc de tirer le plein bénéfice du volume induit par la construction de 6 réacteurs.

Réaliser ce programme, c'est aussi la possibilité pour la filière nucléaire française de bénéficier d'un effet d'apprentissage, permettant d'optimiser ses process industriels, ses techniques et la durée de construction à chaque nouveau chantier.

### Renforcer la préfabrication dans les usines et modulariser

La durée de construction de l'EPR2 est également optimisée en faisant appel autant que possible à la préfabrication en usine d'équipements complets (avec l'objectif de réduire de 30 % le nombre de soudures réalisées directement sur le chantier) ou à la modularisation.

Ces techniques, déjà en partie mises en œuvre sur la construction des EPR de Hinkley Point C en Grande-Bretagne, permettent également de réduire les interfaces sur le chantier et donc les risques dus à la coactivité et de gagner du temps de construction sur le chantier.

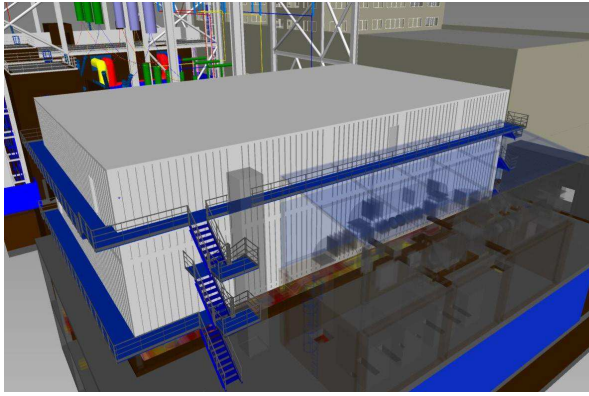


Figure 3 : Le bâtiment électrique non classé de sûreté de l'EPR2 a été intégralement modularisé avec des modules entièrement équipés qui seront livrés directement sur site.

### Associer au plus tôt les fournisseurs

EDF a fait le choix d'associer les industriels dès la phase de conception de l'EPR2, afin de bénéficier de

leur expérience. Des groupements d'entreprises spécialisées dans le génie civil ou encore le montage électromécanique ont ainsi « mis à l'épreuve » la constructibilité du *design* conçu par les équipes d'EDF, relevé le *challenge* des grandes phases du planning du chantier et apporté leurs méthodes industrielles afin de les appliquer à l'industrie nucléaire.

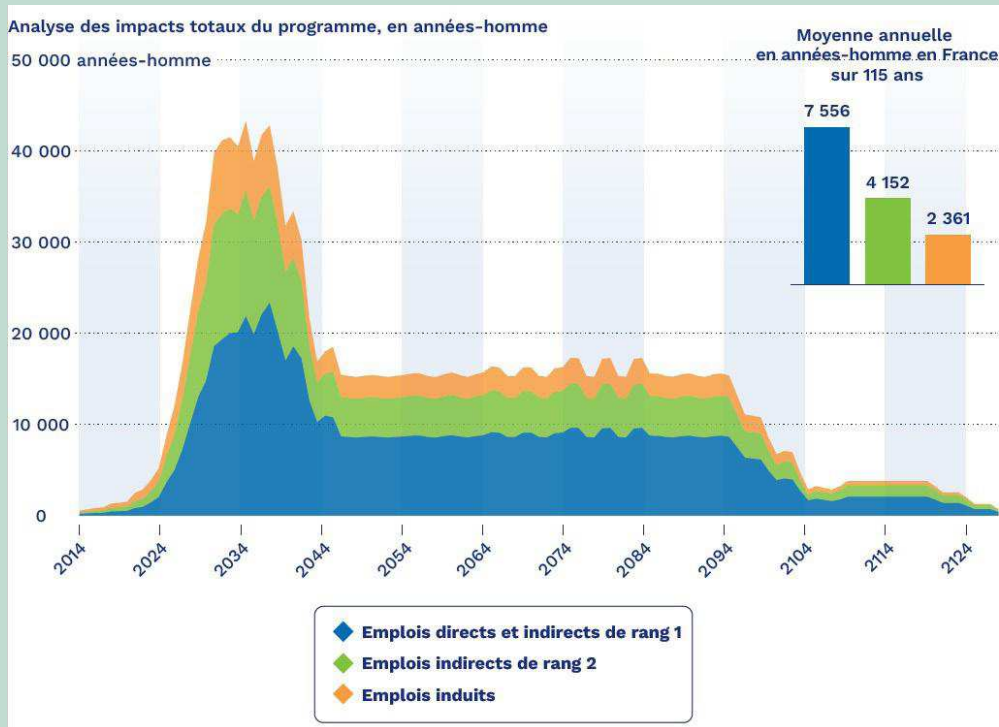
Côté contractualisation, l'EPR2 bénéficie du retour d'expérience des projets EPR dans la rédaction des marchés et la sélection des fournisseurs. Les appels d'offres EPR2 ont ainsi été lancés suffisamment tôt, autant que possible pour les trois paires du programme, afin d'assurer la robustesse et l'optimisation de l'estimation du coût du programme mais aussi donner la visibilité nécessaire à la filière pour s'engager dans la durée et que les entreprises puissent investir aussi bien dans l'outil industriel que dans les compétences, et enfin sécuriser le *design* en disposant au plus tôt des retours des études fournisseurs.

## L'emploi généré par le programme EPR2

Le programme de trois paires d'EPR2 générera des emplois sur l'ensemble de la filière industrielle française. Il mobilisera jusqu'à 30 000 emplois par an pendant sa phase de construction, et environ 10 000 emplois par an pendant son exploitation.

Ces emplois, en grande majorité basés en France, seront répartis sur tout le territoire, dont une part importante dans le département hébergeant les réacteurs et les départements limitrophes.

Sur le seul chantier de la première paire de réacteurs EPR2 à Penly, on estime que 3 000 salariés seront mobilisés en moyenne chaque jour, avec un pic à plus de 7 500.



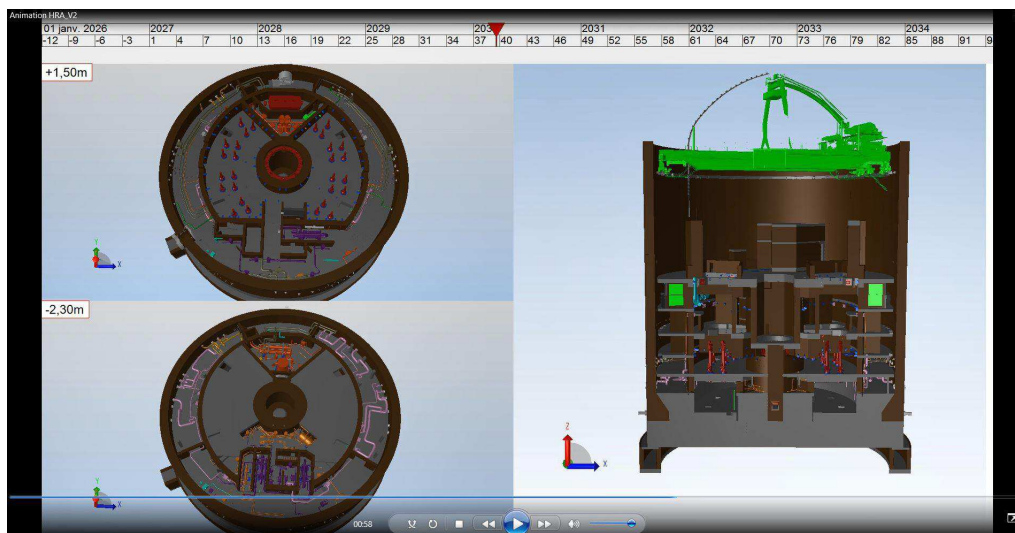


Figure 4 : Visuel issu de la maquette 4D du réacteur EPR2.

Par ailleurs, EDF a entrepris de transformer ses relations contractuelles avec ses fournisseurs au profit d'une relation plus partenariale. EPR2 déploie progressivement ce nouveau modèle de contractualisation plus équilibré, qui intègre les fournisseurs dans les enjeux du projet, dans son système d'information et dans son approche collaborative ; l'objectif étant de favoriser la capacité à produire dans les délais et « bon du premier coup ».

### Adapter les organisations

Les enseignements tirés de l'EPR de Flamanville ainsi que les recommandations formulées par Jean-Martin Folz en 2019 ont amené EDF à renforcer la gouvernance de ses grands projets nucléaires.

Ainsi, au printemps 2022, une gouvernance de projet éprouvée dans d'autres grands projets industriels aéronautiques et automobiles a été mise en place, distinguant des rôles clairs entre maîtrise d'œuvre (MOE) et maîtrise d'ouvrage (MOA). Si la MOE est en charge de l'exécution du projet, la mission de la MOA est de représenter les intérêts du client, en répondant de la valeur créée par le Projet (respect des coûts, délais, qualité) et de sa réalisation, et de sécuriser, au niveau national et européen, le cadre juridique et financier du programme.

En complément du retour d'expérience technique, un retour d'expérience socio-organisationnel a également été mené à Flamanville 3 par 3 sociologues, en 2019 et 2020 afin d'apporter des enseignements sur les sujets organisationnels, de méthode, d'outil et de compétences. Cela a notamment amené EDF à placer la responsabilité au plus proche des chantiers : ainsi, la direction de Projet EPR2 est aujourd'hui basée sur le futur chantier de Penly, de façon à simplifier les processus de décision.

### Transformer en profondeur et digitaliser l'ingénierie d'EDF

EDF innove en intégrant les nouvelles technologies à son ingénierie nucléaire. L'EPR2 est ainsi le premier

réacteur à être conçu entièrement de façon numérique, au sein d'un outil permettant de capitaliser l'ensemble des données sur toute la durée de vie du réacteur : de sa conception à sa déconstruction. Cette gestion sous forme *data centric* permet de limiter les erreurs dans la mesure où la donnée numérique devient la source unique de données partagées entre EDF et ses fournisseurs.

Pour EPR2, EDF utilise également la simulation 4D, qui permet de visualiser les différentes phases de construction par le biais d'une maquette 3D qui évolue dans le temps et ainsi d'avoir une vision précise de l'avancement du chantier. Cette simulation permet notamment de détecter des anomalies dans l'ordonnancement du montage et de mieux préparer les interventions avant même de lancer la construction.

En synthèse, lancer la construction d'EPR2 en France est un choix stratégique fort pour conserver une industrie dynamique à long terme, capable de construire des réacteurs nucléaires au meilleur niveau de performance.

Ce programme EPR2, grâce aux enseignements tirés des chantiers EPR dans le monde et du parc en exploitation sera un formidable levier pour la réindustrialisation de la France, sa souveraineté énergétique et la lutte contre le changement climatique.

# Le programme Match ou comment la filière nucléaire se projette dans l'avenir

Par Olivier BARD

Délégué général du Groupement des industriels français de l'énergie nucléaire (GIFEN)

Le lancement d'un nouveau programme nucléaire en France est une première depuis plus de 50 ans. Il va contribuer à la réindustrialisation de notre pays tout en luttant contre le dérèglement climatique et en renforçant la souveraineté énergétique. Afin de répondre à ces enjeux, la filière s'est dotée d'un outil robuste, piloté par le GIFEN et développé collectivement avec plus de 100 entreprises de la filière : le programme Match.

Ce programme Match vise à assurer l'adéquation des capacités de la filière avec ses besoins industriels et humains. Il établit une visibilité à 10 ans qui sera remise à jour annuellement et permet d'identifier les leviers d'actions nécessaires. Ces leviers s'appuient sur trois piliers : la mobilisation des ressources, la performance industrielle pour utiliser ces ressources efficacement, la soutenabilité économique et financière des entreprises de la filière. Ainsi, Match doit aider la filière à « faire bon du premier coup » et à renforcer sa capacité de production collective dans la durée.

**E**n février 2022, le président de la République annonce le lancement d'un nouveau programme nucléaire en France avec, en complément de la poursuite de l'exploitation des réacteurs actuels, la construction de 6 nouveaux réacteurs EPR2 et 8 en option pour 2050 mais également le développement de réacteurs innovants type SMR ou AMR. C'est un moment historique pour notre pays et son industrie car inédit depuis un demi-siècle. Cette ambition répond à un triple enjeu : climatique afin de viser la neutralité carbone en 2050 en décarbonant notre économie, énergétique afin de réduire la dépendance aux énergies fossiles mais également en termes de souveraineté industrielle. Elle permet également de donner un cap enthousiasmant et une vision à long terme aux entreprises travaillant dans le domaine du nucléaire, au sein d'une filière qui maîtrise l'ensemble de la chaîne de valeur depuis la production minière d'uranium jusqu'au recyclage des matières, en passant par l'exploitation d'un des plus grands parcs de réacteurs au monde et des compétences reconnues en gestion des déchets et R&D.

Au-delà de l'enthousiasme qui est réel dans l'ensemble de la filière, un tel programme industriel, d'une ampleur inédite depuis des décennies, nécessite une organisation afin de traduire ces annonces en engagements puis en réalisations.

C'est pourquoi le GIFEN a conduit le programme Match. C'est un outil de pilotage qui doit permettre de renforcer la performance de l'ensemble de la filière et contribuer ainsi à la réussite du programme nucléaire.

## Le rôle du GIFEN : fédérer la filière

Le Groupement des industriels français de l'énergie nucléaire (GIFEN) est le syndicat professionnel de la filière. Créé en 2018, il fédère les acteurs avec environ 500 entreprises adhérentes, exploitants nucléaires (Andra, CEA, EDF, Framatome, Orano), ETI, PME et TPE, qui couvrent l'ensemble de l'activité et l'essentiel des salariés du secteur. Le GIFEN apporte ainsi une structure et une gouvernance adaptées à la mobilisation collective de la filière nucléaire.

L'action du GIFEN repose sur l'engagement pris par chacun de ses membres à s'impliquer activement dans les initiatives prises en son sein dans l'intérêt de la performance de l'ensemble de la filière et notamment à partager son expérience et à répondre aux demandes de contributions et aux enquêtes.

## Match, une démarche collective

Le lancement d'un nouveau programme nucléaire en France requiert une mobilisation forte de l'ensemble des acteurs de la filière sur la performance des programmes, le respect des délais et des coûts.

Le GIFEN est mandaté pour permettre cette mobilisation collective et pour accompagner les entreprises de la filière dans les plans de transformation et de performance opérationnelle, et plus généralement toutes les initiatives qui visent à améliorer la gouvernance et la maîtrise des projets, la gestion des compétences,

l'efficacité des relations clients-fournisseurs ou encore la standardisation et la simplification des exigences techniques.

Il a donc développé le programme Match qui vise à assurer l'adéquation des capacités de la filière avec ses besoins tant industriels qu'humains. Match est un travail collectif mené avec plus de 100 entreprises de la filière et organisations professionnelles sectorielles donc au plus près du terrain. Il s'appuie sur des éléments concrets : les plans de charges des exploitants nucléaire répartis sur 20 segments d'activité et leur traduction par les entreprises en prévision de besoins des entreprises. Il donne une visibilité en se projetant à 10 ans et propose des leviers d'actions. Sa mise à jour annuelle à partir de 2024 a vocation à permettre à la filière de mesurer sa dynamique de préparation et d'ajuster les actions nécessaires. Match permet d'instaurer un cadre de cohérence pour la filière, qui fasse référence au sein des entreprises au profit de l'application effective des actions et du suivi de leur efficacité. L'approche orientée sur les résultats en termes de mobilisation et de performance doit permettre à la filière de « faire bon du premier coup » et de renforcer sa capacité de production collective dans la durée.

## Premiers résultats

Le premier rapport publié en avril 2023, et remis à Agnès Panier Runacher, ministre de la Transition énergétique et à Roland Lescure, ministre de l'Industrie, fournit une vision d'ensemble structurée de la filière et de ses besoins à 10 ans, par région, sur les 20 segments d'activité et 84 métiers clés et au cœur des activités nucléaires comme électricien, fondeur, forgeron, soudeur, technicien de maintenance, tuyauteur et chef de projet.

Sur ce périmètre, la filière estime une croissance de son volume d'activité de l'ordre de de 25 % d'ici 2033. Cela se traduira par 155 000 emplois directs équivalent temps plein en 2033 (contre 125 000 en 2023) sur les 20 segments cœur (exploitants et fournisseurs). Au total, cela correspond à un besoin de 60 000 recrutements équivalents temps plein (une moitié pour compenser les départs, l'autre pour la croissance d'activité), soit 6 000 par an en moyenne (avec des pointes à 10 000 par an), hors gains potentiels de productivité. Élargi à l'ensemble des 220 000 emplois de la filière (qui comprend en plus les fonctions transverses non spécifiques à la filière : management, RH, commerciales, finances...), ce besoin peut être extrapolé à un ordre de grandeur de 100 000 recrutements sur 10 ans, hors gains de productivité.

Les recrutements vont concerner tous les niveaux d'études du CAP au bac+5. Toutes les régions vont également bénéficier de l'évolution positive des besoins en termes d'emplois. Les régions où les besoins seront les plus importants sont celles où l'industrie nucléaire est déjà fortement implantée ou qui vont accueillir des projets : Auvergne-Rhône-Alpes, Île-de-France, Normandie, Centre-Val de Loire, Hauts-de-France, Paca et Grand Est, que ce soit pour la conception et le développement de projets, la construction de réacteurs

EPR2 ou de recherche, les projets sur les usines du cycle ou ITER, les programmes de grand carénage ou de démantèlement.

Les besoins étant estimés en emplois équivalent temps plein pleinement opérationnels, il est à souligner que les recrutements doivent intervenir par anticipation pour tenir compte du délai de monter en compétence et en autonomie. La durée de cette préparation varie en fonction des métiers. Elle peut aller de quelques mois à plusieurs années.

Concernant la répartition dans le temps des besoins, on peut distinguer trois phases :

- 2023-2026 : une première augmentation des besoins à laquelle il convient de répondre immédiatement pour intégrer le temps de formation, et qui conduit les entreprises à préparer des plans d'investissement et de recrutement à activer dès qu'elles ont établi leurs propres perspectives d'activités dans les projets ;
- 2027-2030 : une accélération (début de construction EPR2) où ce sont les fournisseurs qui devront porter une part prépondérante de l'augmentation ;
- à partir de 2031 : une poursuite de l'augmentation des besoins qui pourra évoluer en fonction des mises à jour du programme Match intégrant certains facteurs de croissance complémentaires (extension du programme de réacteurs EPR2 au-delà des 3 premières paires, développement des SMR/AMR, projets en Europe...) mais qui devront être affinés.

## Trois leviers d'actions

Les estimations issues du programme Match permettent à la filière d'identifier et partager ses leviers d'actions. Les trois leviers issus des travaux du GIFEN et partagés avec les entreprises qui y ont contribué sont complémentaires : un levier sur la mobilisation des compétences et des capacités industrielles, un levier sur la performance industrielle et un levier sur la soutenabilité économique des entreprises et de leurs partenariats.

Concernant les compétences, il s'agit de développer les ressources en travaillant sur l'attractivité, la maîtrise des parcours intra-filière, le développement du compagnonnage... Un plan d'actions a ainsi été lancé en ce sens, sous le pilotage de l'Université des Métiers du Nucléaire dont le GIFEN est l'un des membres fondateurs.

Le renforcement de la performance industrielle est par ailleurs une nécessité notamment pour utiliser de manière efficiente les ressources industrielles et humaines. Cela passe par exemple par la maîtrise de la sûreté et de la qualité, par des plannings partagés et fiables, par la simplification des processus de surveillance ou de qualification, par la digitalisation des processus et des interactions...

Enfin, Match a également développé un levier d'actions visant à assurer la robustesse économique et financière de la filière en promouvant par exemple la mise en œuvre de partenariats entre entreprises, avec notamment un équilibre optimisé dans la répartition des risques.



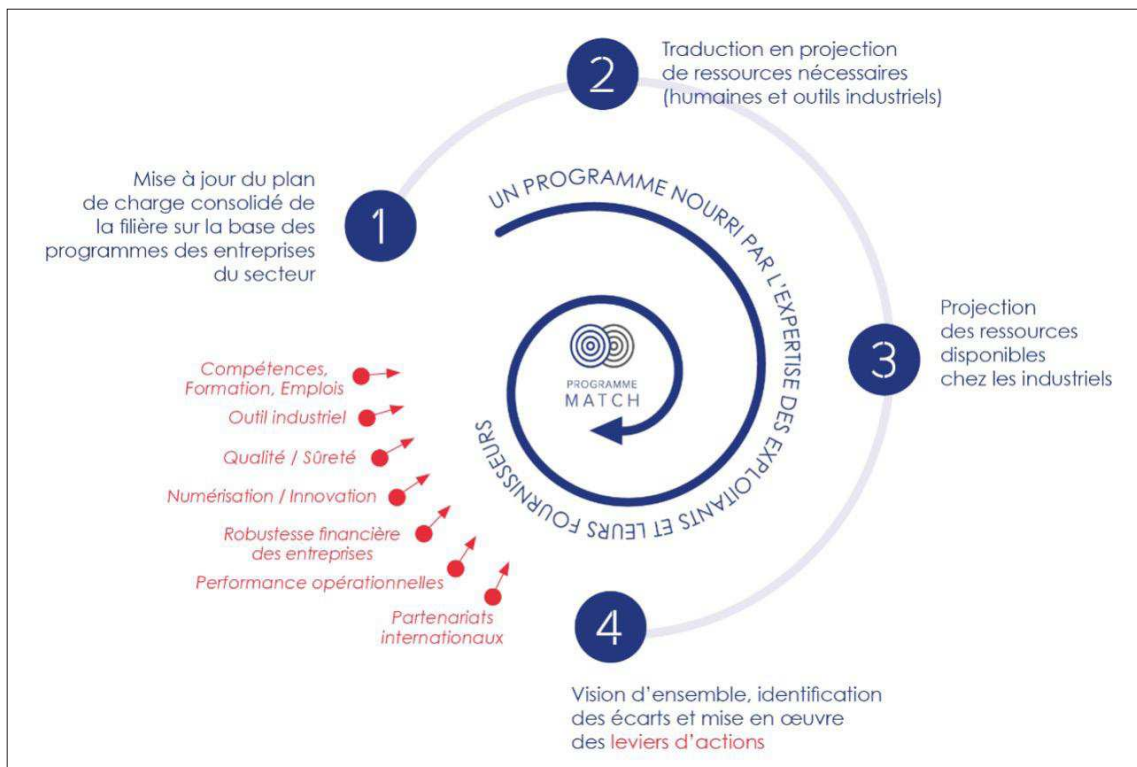


Figure 1 : Le programme Match (Source : GIFEN).

Sur ces sujets, le programme Match a permis à la filière de se doter d'un ensemble de principes qui fait désormais référence en son sein. Cette démarche apporte un cadre de cohérence pour l'ensemble des actions conduites par les entreprises au sein de la filière et pour les actions menées collectivement au sein du GIFEN.

### Match : une démarche dynamique

Match n'en est qu'à son début. Il a permis à la filière et aux pouvoirs publics de disposer d'éléments chiffrés qui évolueront dans le temps en fonction des projets et du résultats des actions dans lesquelles la filière s'est engagée. La récurrence de Match sera désormais annuelle. La première mise à jour des données aura lieu au premier semestre 2024. Elle tiendra compte des précisions apportées entre-temps aux activités domestiques dans le cadre de la programmation énergétique nationale, ainsi que des hypothèses d'autres activités en Europe et dans le monde. Elle s'appuiera sur une actualisation des données de cartographie de la filière et sur l'évolution de la mesure de l'état des relations entre clients et fournisseurs de la filière pour mesurer la dynamique effective de préparation de la filière, l'application des principes adoptés et les progrès effectivement réalisés. Elle permettra ainsi d'identifier l'ajustement des actions nécessaires et de les partager avec l'ensemble des entreprises de la filière et ses diverses parties prenantes.

En parallèle, le GIFEN a initié des partenariats de filière à filière avec ses homologues européens, en particulier dans les pays impliqués dans l'Alliance européenne du

nucléaire impulsée par le ministre de la Transition énergétique. Ces partenariats visent à confronter les éléments disponibles au sein de la filière française avec ceux de ses homologues, afin de construire ensemble une vision intégrée des capacités industrielles à l'échelle du continent européen en regard de l'ambition de disposer de 150 GW de capacité de production nucléaire d'ici 2050.

Enfin, le GIFEN s'implique dans des collaborations avec ses homologues des autres filières industrielles, afin de conduire ensemble les activités d'intérêt commun (par exemple, attractivité vers les métiers industriels, inter-comparaisons et standardisation de méthodes) et d'identifier les opportunités de synergies en termes de plan de charge.

Dans ces deux derniers axes qui amènent la filière nucléaire française à interagir avec son environnement international ou intersectoriel, Match a été l'occasion de souligner deux conditions majeures pour transformer une concurrence en une opportunité de synergie en termes de compétences et de capacités industrielles : la fiabilité des calendriers de décision et d'exécution des activités et la suppression des spécificités d'exigences propres au nucléaire dès lors qu'elles ne sont pas indispensables.

Ainsi, avec le programme Match, la filière nucléaire dispose d'un outil de pilotage robuste. Un outil développé par la filière pour la filière afin qu'elle puisse relever avec succès un défi industriel entièrement tourné vers l'avenir. Les entreprises du nucléaire sont prêtes à s'y engager avec détermination et enthousiasme.

# Relance du nucléaire : un plan Marshall pour sécuriser les compétences

Par Hélène BADIA

Présidente de l'Université des Métiers du Nucléaire

La question des compétences est cruciale pour la filière nucléaire et se pose d'abord avec la dimension sûreté. Au-delà des spécificités techniques à acquérir, toute nouvelle recrue doit intégrer des exigences et comportements liés à la sûreté, une acquisition de compétences qui s'inscrit dans un « temps long ». Les besoins en ressources induits par les projets industriels d'envergure à venir expliquent également l'importance accordée au développement des compétences par les acteurs de la filière, qui ont créé en 2021 l'Université des Métiers du Nucléaire. Le contexte de relance du nucléaire a renforcé la nécessité de se doter d'un plan d'action structuré et fédérant l'ensemble des acteurs. Ce plan d'actions, remis par l'Université des Métiers du Nucléaire aux pouvoirs publics en juin 2023, s'appuie sur une analyse des 20 métiers sensibles de la filière et met en évidence que la création de nouvelles formations doit être complétée de mesures pour renforcer la visibilité et l'attractivité des formations existantes, s'adresser à de nouveaux viviers de recrutement.

## Sécuriser les compétences, un défi majeur dans un contexte de relance du nucléaire

La filière nucléaire est singulière à plusieurs titres. Sa dimension sûreté, priorité absolue, confère aux compétences des salariés un statut particulièrement stratégique et sensible. En effet, tout nouvel entrant qui rejoint ces métiers, au-delà des spécificités techniques à acquérir (compétences pour devenir mécanicien, soudeur, automaticien, etc.), doit intégrer des exigences inhérentes à la filière et un comportement au quotidien exigeant pour sa sécurité et celle des autres, pour protéger l'homme et son environnement contre la dispersion des produits radioactifs. C'est la définition même de la sûreté, singularité de la filière à intégrer par tout nouvel arrivant et qui s'inscrit dans un « temps long » d'acquisition des compétences.

Pour toute la filière nucléaire, les compétences sont indispensables et vitales pour la construction, l'exploitation, le démantèlement des installations. L'exigence liée aux compétences nécessaires pour rentrer et évoluer dans cette filière nucléaire est spécifique, et la culture sûreté en est un marqueur fort.

Ces éléments caractéristiques de la filière, ainsi que les besoins en compétence induits par les projets industriels d'envergure qu'elle entreprend, expliquent l'importance accordée au développement des compétences par les acteurs de la filière qui ont créé en 2021 l'Université des Métiers du Nucléaire, avec le soutien des pouvoirs publics.

## Une université des métiers du nucléaire

L'Université des Métiers du Nucléaire (UMN) est une association créée en 2021 par les acteurs de la filière nucléaire, l'UFE, l'UIMM, France Industrie et Pôle emploi pour contribuer à la sécurisation des compétences de la filière.

Elle a pour missions principales de :

- favoriser l'attractivité de toutes les voies d'enseignement et de la formation dans le domaine de l'industrie nucléaire en rendant visible l'offre de formation ;
- adapter l'offre de formation aux besoins de la filière, en particulier pour les métiers en tension, en capitalisant sur l'existant et en travaillant sur le contenu des formations ;
- promouvoir les métiers et les parcours de la filière nucléaire.

## Un plan d'action structuré et fédérateur

Le contexte de relance du nucléaire a renforcé la nécessité pour la filière nucléaire de se doter d'un plan d'action structuré et fédérant l'ensemble des acteurs



Figure 1 : Liste des membres fondateurs de l'Université des Métiers du Nucléaire.

pour sécuriser les compétences nécessaires à la réalisation des projets industriels d'envergure des prochaines décennies.

L'Université des Métiers du Nucléaire a été ainsi mandatée en janvier 2023 par la ministre de la Transition énergétique et le ministre de l'Industrie pour définir et déployer un véritable « plan Marshall des compétences » de la filière nucléaire.

Ce plan d'action, remis au Gouvernement le 9 juin 2023, est une des clés fondamentales pour réussir les projets industriels de la filière en France et à l'international, renforcer la compétitivité et garantir la qualité d'exploitation.

L'Université des Métiers du Nucléaire facilite la mise en œuvre de ce plan d'actions en fédérant l'ensemble des acteurs de la formation, de l'emploi et les entreprises de la filière. Elle s'appuie sur une démarche nationale/locale qui permet le développement d'initiatives (création et adaptation de formations, démarches et outils au service de l'attractivité des métiers...) adaptées au contexte local, au plus près du besoin des industriels, tout en assurant la coordination nécessaire de l'ensemble des actions au niveau national.

### Des actions définies sur la base d'une analyse fine des besoins

Aujourd'hui la filière nucléaire compte 220 000 emplois, ce qui en fait la troisième filière industrielle française. Le Gifem a mené son étude Match sur le périmètre de 84 métiers « cœur », représentant 125 000 emplois directs qualifiés et spécialisés dans le nucléaire en 2023.

Sur ce périmètre, la filière prévoit une croissance de 25 % du volume de travail d'ici 2033, hors gain de productivité, se traduisant par 60 000 recrutements équivalents temps plein. Élargi à l'ensemble des 220 000 emplois de la filière, ce besoin est d'environ 100 000 recrutements équivalents temps plein d'ici 2033.

L'étude Match a également permis d'identifier les vingt métiers les plus en tension, en tenant compte de plusieurs facteurs (poids du métier dans la filière, estimation de la volumétrie et du rythme des recrutements à réaliser...) : automaticien, bobinier, chaudronnier, chef de projet, conducteur de travaux, personnel certifié pour les contrôles non destructifs (END-CND), dessinateur-projeteur, électricien, fondeur, forgeron, ingénieur études conception électricité, ingénieur études conception mécanique, soudeur, projeteur génie-civil/projeteur BIM, technicien maintenance, technicien radioprotection, tuyauteur, ingénieur procédés/ingénieur installation générale, monteur, coffreur-bancheur.

Pour chacun de ces métiers, l'Université des Métiers du Nucléaire a mené une analyse permettant de caractériser le niveau de « sécurisation des compétences » : face aux besoins de recrutement, l'offre de formation initiale et continue a été recensée, incluant les actions de sécurisation menées récemment par les industriels de la filière nucléaire. Cette analyse a permis d'identifier les actions prioritaires à mener pour sécuriser les besoins métier par métier.

### Sept leviers déclinés en trente actions concrètes

Si les analyses menées dans le cadre de l'Engagement développement de l'emploi et des compétences (EDEC) tendent à montrer que l'offre de formation peut couvrir une grande partie des besoins de la filière, il convient néanmoins de prendre en compte le contexte de tension sur les métiers de l'industrie, détaillé dans les études récentes de la Dares et de Pôle emploi<sup>1</sup>.

Face à ces constats, il convient d'augmenter les flux menant aux métiers industriels, en adaptant l'offre de formation mais en traitant également les questions d'attractivité de l'industrie, de *sourcing*, d'orientation des jeunes, d'élargissement de viviers de recrutement...

Les travaux menés par l'UMN ont ainsi conclu à la pertinence de mettre en œuvre plusieurs leviers d'action

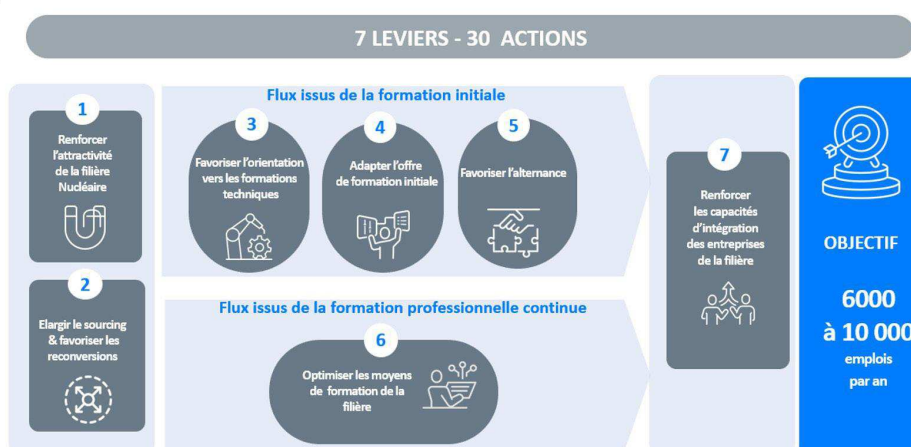


Figure 2 : Les sept leviers d'actions.

<sup>1</sup> <https://dares.travail-emploi.gouv.fr/publication/les-tensions-sur-le-marche-du-travail-en-2021>

pour sécuriser les besoins. La création de nouvelles formations ne peut être la seule réponse aux besoins, elle doit s'accompagner de la mise en œuvre des autres leviers, sous peine de créer des formations qui ne trouvent pas leur public. Sept leviers sont identifiés, ils se déclinent en trente mesures opérationnelles.

### Renforcer l'attractivité de la filière nucléaire

Selon un baromètre réalisé par Sciences Po OpinionWay de février 2023, la part de français favorables à l'utilisation du nucléaire pour produire l'électricité est en augmentation (+ 7 points depuis 2022) et atteint désormais 70 % des répondants. Cette amélioration de l'image du nucléaire traduit le fait que la filière nucléaire est au cœur des enjeux fédérateurs de décarbonation et de lutte contre le réchauffement climatique mais aussi de sécurité d'approvisionnement du mix énergétique et de la réindustrialisation de la France.

Cependant, compte tenu des tensions sur les métiers de l'industrie et de la désaffection marquée des formations techniques de niveau bac pro à bac +3 menant aux métiers du nucléaire, le renforcement de l'attractivité de la filière nucléaire reste un enjeu majeur. Le plan d'action inclut ainsi plusieurs actions clé pour transformer l'image de la filière.

Pour pallier la méconnaissance des métiers et des formations qui y mènent, souvent perçus par le grand public comme réservés à des experts très qualifiés, donc difficilement accessibles, la filière s'est dotée en 2022 de son portail des métiers et formations « Mon Avenir dans le Nucléaire »<sup>2</sup>. Ce portail, destiné à un large public, permet de mettre en valeur la variété des métiers et des parcours au sein de la filière. C'est le seul site qui recense les formations menant aux métiers du nucléaire. Le portail permet également d'accéder aux offres d'emploi, de stages et d'alternance des entreprises de la filière (plus de 4 000 offres d'emploi recensées actuellement).

Par ailleurs, le plan d'actions contribue à fédérer les acteurs de la filière autour d'événements phare, maximisant ainsi l'impact des actions menées. À titre d'exemple, la première semaine des métiers du nucléaire organisée par Pôle emploi, l'UMN et leurs partenaires en mars 2023 a permis de toucher 8 000 demandeurs d'emplois avec 278 événements dans toute la France.

Le déficit d'image et le manque d'attractivité touchent l'ensemble des filières industrielles, au-delà de la filière nucléaire. Selon un sondage récent d'OpinionWay<sup>3</sup>, 72 % des lycéens ont une bonne image de l'industrie mais seulement 43 % d'entre eux s'y projettent et ont envie d'y travailler. Ce constat montre la nécessité d'actions coordonnées entre filières industrielles pour « réenchanter » l'industrie, au-delà des actions menées par chaque filière industrielle. La filière nucléaire s'inscrit dans la mise en œuvre de solutions communes. À

titre d'illustration, la filière nucléaire s'est associée à la campagne « Avec l'industrie » orchestrée par l'OPCO2I et contribue aux côtés de la filière des nouveaux systèmes énergétiques au projet Forindustrie, métavers dédié aux collégiens, lycéens et demandeurs d'emploi, pour leur faire découvrir de manière ludique les métiers de la transition énergétique.

### Élargir le *sourcing* et favoriser les reconversions

Les populations féminines en premier lieu, mais aussi celles issues des quartiers visés par la politique de la ville ou des territoires ruraux sont actuellement peu représentés au sein de la filière nucléaire. Or, la filière a besoin de tous les talents, d'où l'identification d'actions pour renforcer l'inclusion de ces populations.

Ce levier nécessite un maillage au plus près du terrain pour toucher les publics visés et implique de nouer des partenariats avec les associations qui œuvrent au quotidien dans ce domaine, à l'instar du partenariat avec l'association Win France pour féminiser la filière.

En complément, l'UMN promeut la mise en œuvre d'actions concrètes favorisant l'inclusion, comme le déploiement de classes passerelles pour réintégrer les jeunes en décrochage scolaire dans les cursus de formations. En lien avec Pôle emploi, l'UMN favorise également le développement de méthodes de recrutement innovantes au sein de la filière, à l'instar de la Méthode de recrutement par simulation ou le recrutement par le sport.

### Favoriser l'orientation vers les formations techniques

Les formations scientifiques et techniques peinent à attirer. Favoriser l'engagement des jeunes vers ces cursus menant aux métiers de l'industrie est un enjeu fort pour la filière nucléaire. Des actions ont été engagées, avec d'autres industries et l'Éducation nationale, pour faire connaître les métiers de l'industrie aux jeunes élèves et les inciter à s'orienter vers des cursus scientifiques et techniques : intervention dans les classes de 5<sup>e</sup> pour présenter nos métiers, industrialisation de l'accueil des stagiaires de 3<sup>e</sup> dans nos entreprises, sensibilisation des professeurs, prescripteurs, aux métiers de l'industrie.

L'UMN a également mis en place, grâce au soutien de France Relance, un dispositif de bourses d'études pour encourager les élèves à rejoindre les formations techniques menant aux métiers en tension. 250 élèves en ont bénéficié en 2022 et 2023, 200 élèves en seront dotés en 2024. En plus du soutien financier, ces élèves sont parrainés par un salarié de la filière qui leur fait découvrir les métiers et les entreprises du nucléaire.

### Adapter l'offre de formation initiale

Si l'offre de formation menant aux métiers du nucléaire est importante, avec plus de 7 000 classes recensées du CAP au bac +5 menant à nos métiers, elle reste à adapter pour renforcer l'attractivité des formations mais aussi pour répondre aux besoins des industriels et pour

<sup>2</sup> <https://www.monavenirdanslenucleaire.fr/>

<sup>3</sup> Baromètre « Les lycéens & l'industrie » publié le 10 mars 2023 par les Arts et Métiers et la BPI, <https://www.artsetmetiers.fr/fr/actualites/10e-edition-du-barometre-les-lyceens-et-lindustrie-sondage-opinionway>

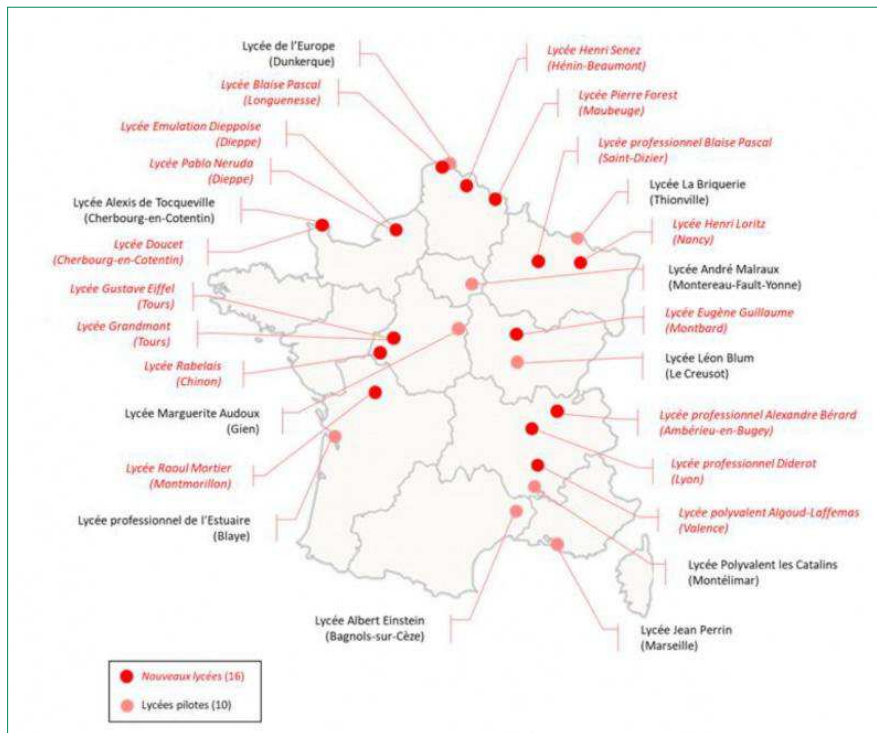


Figure 3 : Bourses d'étude nucléaire.

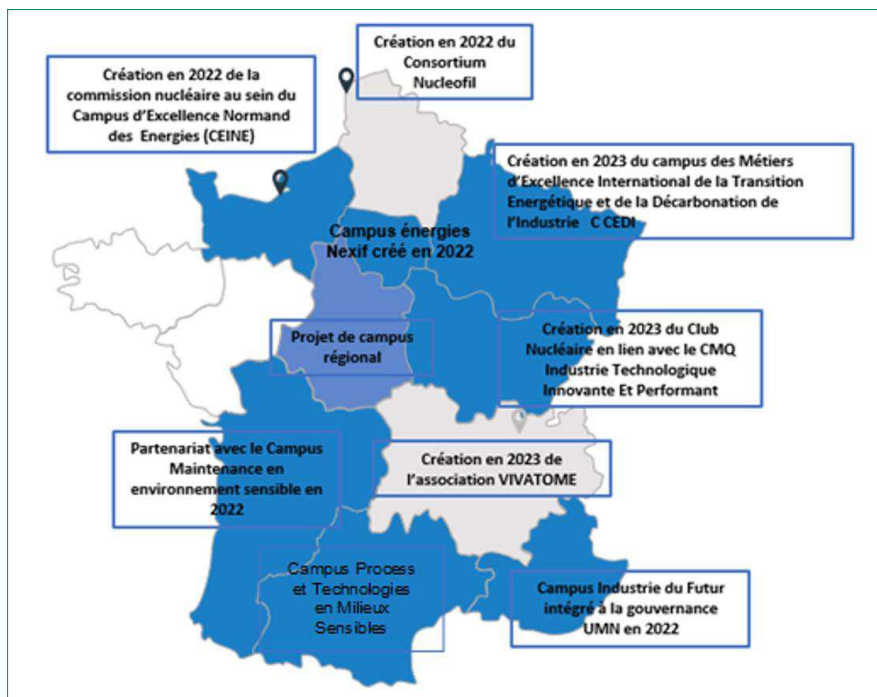


Figure 4 : L'UMN s'appuie sur les CMQ, membres adhérents de l'UMN pour adapter les formations.

préparer l'avenir : au-delà de l'émergence de nouveaux métiers, il importe surtout de tenir compte de l'évolution du contenu de nombreux métiers existants – et des nouvelles façons de travailler – en ajustant de manière permanente la nature, le nombre et le contenu des formations qui y prépareront.

L'UMN travaille à ces adaptations avec des Campus des Métiers et des Qualifications (CMQ), membres adhérents de l'UMN, qui fédèrent à la maille régionale les acteurs de la formation et les industriels. En 2022 et 2023, plus de 60 formations ont été créées.

La majorité des formations menant aux métiers du nucléaire sont des formations non spécifiques à la filière. L'UMN a développé le dispositif de Passeport nucléaire avec le soutien du ministère de l'Éducation nationale pour intégrer à ces formations des modules d'enseignement sur le nucléaire. Il est déployé depuis septembre 2023 dans plus de 30 établissements, sur une dizaine de diplômes du bac pro au bac +5, permettant à plus de 2 000 élèves d'en bénéficier.

### Favoriser l'alternance

L'alternance permet aux entreprises de s'assurer un vivier de candidats et aux jeunes de s'insérer dans le monde professionnel plus rapidement. De manière générale, l'alternance connaît un essor considérable<sup>4</sup>. La filière vise plusieurs dispositifs pour faciliter l'alternance tant du côté entreprise (accès aux sites nucléaires des mineurs) que du côté des étudiants (mise en visibilité des offres d'alternances sur [monavenirdanslenucleaire.fr](http://monavenirdanslenucleaire.fr)). Le contexte ne permettant pas toujours aux entreprises d'embaucher l'alternant en fin de formation, un dispositif partagé de recommandations, pour conserver au sein de la filière ceux qui ont bénéficié de formations aux spécificités du métier et sont souvent directement opérationnels, est à l'étude.

### Fédérer les moyens de formation de la filière

Sachant que 30 % de l'offre de formation est portée par des entreprises de la filière, s'appuyer sur la formation professionnelle est une réponse aux besoins de recrutements. Une optimisation des moyens développés ces dernières années a été suggérée, partager et unir nos forces étant nos meilleurs atouts pour couvrir les besoins. La démarche bénéficiera aux entreprises, aux organismes de formation et aux établissements d'enseignement secondaire et supérieur. Il y a d'ores et déjà des partenariats gagnant-gagnant entre organismes de formation, entreprises et lycées : accès aux plateaux techniques contre mise à disposition d'heures de formateurs ou d'ingénierie, sessions de formation interentreprises, modules e-learning... Le recensement des moyens tant humains, que matériels (plateaux techniques, chantiers-école) et numériques (modules e-learning, simulateurs) est en cours. Une stratégie pour fédérer ces ressources au niveau national et régional sera ensuite proposée.

### Développer le compagnonnage

Ce dernier levier concerne l'intégration des nouveaux salariés au sein de la filière. Une des actions phare, instruite par le Gifen est de définir les modalités de soutien au compagnonnage pour accompagner, professionnaliser les nouvelles recrues.

### Conclusion

Le plan d'action « compétences » de la filière nucléaire est en cours de déploiement. Les actions et initiatives locales ne manquent pas. Il est nécessaire de coordonner, favoriser les synergies, faciliter les dispositifs et de continuer à les développer. C'est le rôle que l'UMN joue depuis sa création en 2021 avec toutes les parties prenantes.

<sup>4</sup> Après avoir bondi de 37 % en 2021 par rapport à l'année 2022 (+ 70 % par rapport à 2016), le nombre de contrats d'alternance a progressé de 14 % en 2022 par rapport à l'année 2021.

# HEFAÏS, la formation soudage par excellence

Par Corentin LELIEVRE  
HEFAÏS

HEFAÏS, la Haute École de Formation Soudage, est une école unique en France, créée par et pour les industriels, comme un élément de réponse à la problématique de déficit de soudeurs qualifiés pour satisfaire les besoins des grands projets industriels d'aujourd'hui et de demain.

Fondée par quatre grands industriels implantés dans le Cotentin, en Normandie – EDF, Naval Group, Orano et CMN – HEFAÏS est une école industrielle de haut niveau dont l'ambition est de former les meilleurs soudeurs et soudeuses de France pour les filières nucléaire et navale.

Soutenue également par plusieurs partenaires institutionnels, HEFAÏS propose des modalités de formation modernes et innovantes permettant de se former ou se perfectionner au plus près des conditions réelles.

Elle propose des formations d'excellence aussi bien aux salariés d'entreprise qu'aux personnes en recherche d'emploi, débutants ou confirmés, hommes et femmes, de Normandie ou d'ailleurs.

## HEFAÏS : une école pour former les meilleurs soudeuses et soudeurs de France

### Soudeur : un métier en tension, un métier d'avenir

D'ici 2050, de grands projets industriels verront le jour en France, notamment dans la filière nucléaire avec des opérations importantes de maintenance et de construction de nouvelles installations comme les EPR ou pour les usines du cycle du combustible et dans la filière navale avec des projets liés à la construction de navires de surface et de sous-marins nouvelle génération. Si le soudage est une opération incontournable dans la réussite de ces projets complexes et leur durabilité, la qualité des soudures réalisées doit être parfaite pour répondre aux normes d'excellence de ces industries pour des raisons de sécurité et de sûreté.

Les filières industrielles navale et nucléaire françaises sont aujourd'hui toutes deux confrontées à deux problématiques en matière de soudage. D'une part, elles constatent un manque de soudeurs du fait d'une faible attractivité du métier liée, à tort, à une représentation obsolète et à un manque de valorisation des métiers manuels en général. Ainsi, le Groupement des industriels français de l'énergie nucléaire (Gifen) évalue dans sa dernière étude le besoin de la filière nucléaire à 1 500 soudeurs à recruter d'ici à 2033<sup>1</sup>. D'autre part, les exigences industrielles de plus en plus drastiques dans ces filières d'excellence imposent un niveau de compétences de plus en plus élevé.

<sup>1</sup> GIFEN (2023), « Programme Match, l'outil de pilotage de l'adéquation besoins-ressources de la filière nucléaire pour être au rendez-vous de ses programmes », Note remise au Gouvernement.

Face à ces constats et à la montée en puissance des projets industriels à venir en Normandie mais aussi en France, les délais actuels d'acquisition des compétences ne sont plus compatibles. Il devenait donc nécessaire de sécuriser les futurs recrutements en valorisant le métier de soudeur – y compris pour les femmes – tout en accélérant l'apprentissage et en élevant le niveau de compétences.

### HEFAÏS : une école unique en France, née dans le Cotentin

En 2020, face à ces défis partagés, quatre grands industriels fortement implantés dans le Cotentin, en Normandie (EDF, Naval Group, Orano et CMN – Constructions Mécaniques de Normandie) se sont fédérés autour d'un projet ambitieux et unique en France : la création d'une école de formation d'excellence en soudage dont l'ambition est de former à terme les meilleures soudeuses et soudeurs de France. Comment ? En créant des conditions d'apprentissage au plus près des conditions réelles afin de développer l'employabilité des soudeurs. Baptisée HEFAÏS – en référence au dieu grec de la métallurgie, Héphaïstos – la Haute École de Formation Soudage a été créée sous format associatif début 2021. Elle a ouvert ses portes en septembre 2022 dans le Cotentin, terre d'expertise en soudage depuis près de 100 ans.

Ce projet a immédiatement reçu un soutien fort de différents partenaires : la CCI Ouest Normandie, l'UIMM Manche, l'Agglomération du Cotentin, la Région Normandie et l'État. Le statut associatif d'HEFAÏS en fait un modèle d'école unique en France, résultat d'une coopération inédite entre acteurs privés et publics. La gouvernance est assurée par un Bureau composé des quatre grands industriels membres fondateurs de

l'école, accompagnés par les partenaires institutionnels et industriels au sein du conseil d'administration.

La contribution des différents acteurs impliqués s'est matérialisée par des apports en compétences d'experts, des apports en matériel sous forme de dons et des apports financiers conséquents comme le financement par les grandes entreprises des environnements industriels reconstitués – qui concourent à la valeur ajoutée de l'école – ou encore par le financement par l'Agglomération du Cotentin du bâtiment définitif qui accueillera l'école au printemps 2024. Par ailleurs, le projet est soutenu par l'État et la Région Normandie dans le cadre de l'Action IFPAI, volet régional de France 2030 opéré par la Banque des Territoires pour le compte de l'État pour un montant de 1,68 millions d'euros. Le projet a été aussi retenu au titre du plan France Relance et bénéficie ainsi d'une aide de 0,8 million d'euros.

Créée PAR et POUR les industriels avec l'objectif de répondre à leurs exigences de très haut niveau, HEFAÏS travaille aussi étroitement avec les acteurs de la formation et de l'emploi et les entreprises adhérentes de l'association pour garantir l'adéquation des formations aux besoins spécifiques des entreprises.

### L'excellence industrielle accessible à tous

HEFAÏS propose des formations aussi bien aux personnes en recherche d'emploi qu'aux salariés des entreprises de la métallurgie, débutants ou confirmés, hommes et femmes, de Normandie ou d'ailleurs.

Les personnes en recherche d'emploi souhaitant s'orienter vers les métiers du soudage peuvent se former dans le cadre de formations financées par la Région Normandie et opérées par un groupement d'organismes de formation (Institut de Soudure/GRETA Côtes normandes) ou dans le cadre de formations hors Région, financées par Pôle emploi. L'utilisation des environnements reconstitués leur permet de se confronter à la réalité des industries où ils auront à travailler.

Les soudeurs en activité au sein d'entreprises de la métallurgie qui ont besoin d'accroître leur niveau de compétences sont formés dans le cadre du plan de formation de leur entreprise. Ces formations sont animées par différents partenaires d'HEFAÏS dont le Pôle Formation UIMM - Grand Ouest Normandie associé à cinq entreprises (IFCEN, INSTN, Assystem, SGS et TRA-C Industrie) mais également d'autres acteurs reconnus dans le monde du soudage tels que FRONIUS, le Groupe SETIN ou Serimax.

L'offre de formation d'HEFAÏS se décline en quatre niveaux en fonction du profil du public : débutant (soudeur souhaitant apprendre les bases), confirmé (soudeur souhaitant étendre son champ de connaissances), maître (soudeur souhaitant développer ses compétences) et expert (soudeur souhaitant se perfectionner dans des domaines d'expertise comme des alliages spécifiques).

Les formations sont découpées en quatre grands blocs, accessibles selon le niveau de l'apprenant :

- formations certifiantes : soudeur et tuyauteur industriel ;
- formations théoriques en métallurgie du soudage et environnement industriel : notions de base, métallurgie du soudage y compris alliages spécifiques, lecture de plan, défautologie, utilisation des sources de soudage mécanisé, traçabilité, sûreté, qualité et sécurité en soudage ;
- formations pratiques en soudage : perfectionnement TIG, MIG/MAG, électrode enrobée avec soudage en environnement industriel au plus près du réel et dans des conditions de gêne opératoire reproduites (soudage main opposée et à la glace, bout à bout...);
- formations pratiques des alliages spécifiques : titane, zirconium, duplex, superduplex, uranium...

École créée PAR et POUR les industriels, HEFAÏS adapte son offre de formation aux demandes spécifiques de ses clients pour répondre de façon adéquate aux besoins des entreprises. Sur demande, il est également possible de sanctionner les formations par la réalisation de QCM, coupons témoins selon le référentiel d'habilitation soudeur EDF, qualifications de soudeur selon les normes françaises, CQPM ou tout autre élément demandé par le client.

Vous pourrez trouver le catalogue de formation en ligne à l'adresse suivante : <https://hefaïs.fr/les-formations/>

## HEFAÏS : une école qui se donne les moyens de ses ambitions

### La culture de l'excellence industrielle en soudage

Afin d'atteindre l'excellence industrielle en matière de qualité de soudage, c'est-à-dire « Faire bon du premier coup » et permettre une employabilité accélérée des stagiaires, HEFAÏS fonde ses formations sur le développement simultané de trois savoirs complémentaires :

- le savoir-faire pour maîtriser à la perfection le geste technique du soudage ;
- le savoir industriel par la parfaite connaissance des processus et procédures des environnements industriels nucléaire et naval dans lesquels les soudeurs vont évoluer ;
- le savoir-être pour adopter les comportements d'excellence et évoluer en qualité, sûreté et sécurité.

Ces enseignements reposent sur cinq piliers, conditions de l'excellence des formations :

- des outils et équipements à la pointe : HEFAÏS propose du matériel et des modalités formatives modernes et innovantes intégrant notamment la réalité virtuelle et le numérique ;
- des locaux attractifs : HEFAÏS se situe dans un premier temps sur la commune de La Hague dans un bâtiment industriel entièrement rénové ; avant la livraison, par





Figure 1 : Schéma de la culture de l'excellence industrielle (© HEFAÏS).

l'Agglomération du Cotentin, au printemps 2024 d'un bâtiment neuf, situé sur Cherbourg-en-Cotentin ;

- des environnements reconstitués pour apprendre au plus près des conditions réelles, c'est à dire des maquettes à l'échelle 1 d'installations du nucléaire et du naval ;
- des formateurs et des contenus pédagogiques de haut niveau : les formateurs intervenant au sein d'HEFAÏS ont suivi une formation au sein des quatre grands industriels ;
- des stagiaires motivés, sélectionnés sur leurs aptitudes, leur potentiel professionnel et leur motivation à venir apprendre ou se perfectionner au sein d'HEFAÏS.

Ces trois savoirs et ces cinq piliers sont la structure formative d'HEFAÏS pour répondre à l'ambition de l'école : former les meilleurs soudeuses et soudeurs de France.

### Apprendre au plus près des conditions du réel

HEFAÏS est un modèle d'école unique en France qui est le fruit d'une implication très forte et sans précédent de quatre grands industriels, notamment à travers la mise en œuvre d'environnements reconstitués, c'est-à-dire des maquettes à l'échelle 1 d'installations du nucléaire et du naval permettant de reproduire les conditions réelles d'intervention en chantier et de reproduire des conditions de gêne opératoire spécifiques.

Ainsi, côté filière nucléaire, HEFAÏS est équipée d'une représentation de cellules hors zone ou en zone contrôlée au sein des CNPE EDF et de la représentation d'une cellule de type Zone 4 de l'usine Orano La Hague, avec différents équipements chaudronnés et tuyauteries. Côté naval, HEFAÏS dispose d'un environnement capa-

culaire reproduisant l'évolution des soudeurs dans les espaces restreints des navires de surface ou sous-marins et disposera en 2024 d'un quart de tronçon de sous-marin et d'une charpente avant de navire.

Ces environnements reconstitués sont au cœur de l'apprentissage chez HEFAÏS et en font sa particularité

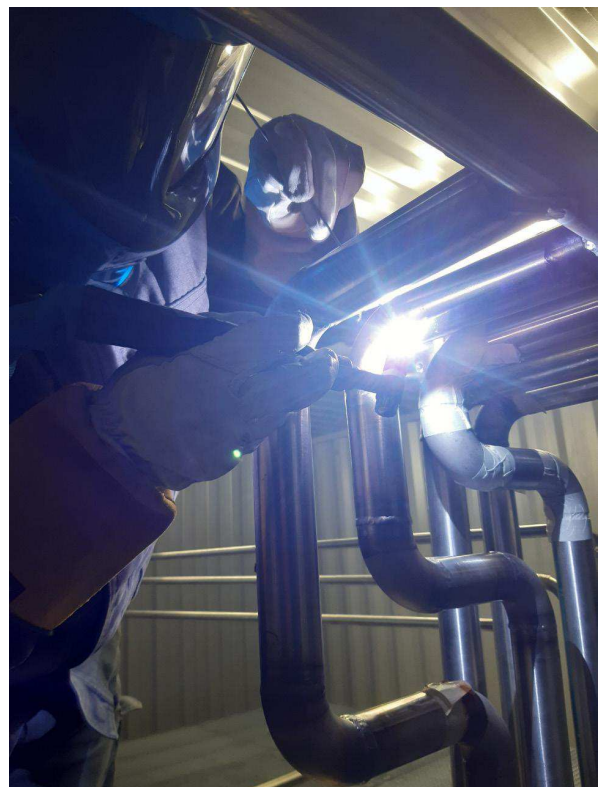


Figure 2 : Formation soudage en environnement reconstitué (© HEFAÏS)

grâce à leur diversité et leur représentativité. Associés à des modalités pédagogiques innovantes, avec notamment de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée, ils permettent de réduire le délai d'acquisition des compétences et de développer l'employabilité des stagiaires pour faire bon du premier coup.

Pour atteindre l'excellence en matière de culture industrielle, les formateurs intervenant chez HEFAÏS bénéficient annuellement de modules d'intégration et d'embarquement au sein des sites industriels des quatre membres fondateurs, leur permettant de s'approprier pleinement les dernières exigences du métier de soudeur dans les industries du nucléaire et du naval et d'être en mesure de transmettre des connaissances adaptées et actualisées aux stagiaires. Ces derniers sont à leur tour immergés dans l'aspect documentaire des industries sur différents aspects liés à la sûreté, la sécurité et la traçabilité, les préparant à être opérationnels plus rapidement dès leur arrivée sur chantier.

Pour immerger les stagiaires au plus près du réel, HEFAÏS propose des modules de formation sur-mesure tel que le port de tenues spécifiques aux interventions en installations nucléaires. Pendant une durée déterminée, l'apprenant évolue ainsi dans un environnement reconstitué représentatif d'une zone contrôlée, au milieu de tuyauteries difficiles d'accès et en s'habituant au soudage avec le port de tenues de protection particulières et donc à de nouvelles contraintes. Le résultat : une amélioration de la qualité des soudures et de la productivité en environnement de travail contraint pour rendre le soudeur opérationnel dans le cadre d'exigences industrielles élevées.

### Des locaux neufs et attractifs

Dans un premier temps, HEFAÏS a ouvert ses portes en septembre 2022 sur la commune de La Hague, dans un bâtiment industriel préexistant appartenant à l'Agglo-

mération du Cotentin et entièrement rénové. À partir du printemps 2024, les stagiaires entrant en formation auront l'opportunité d'intégrer un bâtiment flambant neuf conçu au plus près des besoins des utilisateurs et intégrant des conditions de formation à la pointe.

Financé par l'Agglomération du Cotentin, ce bâtiment d'une surface de plus de 3 300 m<sup>2</sup> verra l'implantation de 28 box à souder et de 4 box de meulage ainsi que la diversification en nombre et en type des environnements reconstitués des filières nucléaire et navale. Par ailleurs, une zone spécifique sera dédiée à la réalisation des contrôles non destructifs et aux formations dans ce domaine. Afin de renouveler l'image de l'atelier de soudage sombre et poussiéreux, une attention particulière a été portée au respect des dernières normes de construction et à la conception d'espaces de travail lumineux, organisés pour favoriser le repli de chantier. À cet espace industriel, s'ajoutent des salles de cours théoriques et des espaces modernes permettant de déployer des modalités pédagogiques numériques. À terme, ce nouveau bâtiment sera en capacité d'accueillir environ 200 stagiaires par an.

Toujours dans un objectif de valorisation des métiers du soudage auprès de différents publics tels que les personnes en recherche d'emploi et/ou en reconversion mais aussi les jeunes en recherche d'orientation, garçons et filles, leurs parents et leurs enseignants, HEFAÏS travaille de concert avec l'Agence Régionale de l'Orientation et des Métiers et la Maison de l'Emploi et de la Formation à la réalisation d'un espace pédagogique hébergé au sein de l'école qui mettra en valeur les métiers de la chaudronnerie, tuyauterie, soudage de façon innovante.

### Des outils à la pointe et innovants

Dans le cadre de l'accélération de l'acquisition des compétences, HEFAÏS propose aux débutants de se fami-



Figure 3 : Vue provisoire du bâtiment HEFAÏS (© HEFAÏS).

liariser avec le geste technique sur un simulateur de soudage permettant, grâce à la technologie de la réalité augmentée, de répéter le geste, de tester différents paramètres et surtout de pouvoir étudier en détail leurs réussites mais aussi leurs erreurs afin de perfectionner leur dextérité en soudage : un outil qui offre une formation sur les trois procédés et de nombreuses pièces, offrant une complexité croissante (soudage main droite, main gauche, soudage sans visibilité directe sur la pièce...) avant d'utiliser un vrai poste à souder.

Par ailleurs, différents modules en réalité virtuelle permettent une première découverte virtuelle des environnements reconstitués et de travailler certaines notions spécifiques telles que la lecture de plan ou les conditions de sécurité sur chantier : des modules ludiques et dynamiques qui attirent les jeunes comme les moins jeunes.

Pour former au plus près des conditions réelles de l'industrie, HEFAÏS dote chaque stagiaire démarrant une formation pratique d'une servante lui mettant à disposition des moyens de préparation, de débit et de contrôle individuels identiques à ceux que l'on retrouve en entreprise. Les postes à souder dernière génération sont loués à des fournisseurs partenaires pour permettre une maintenance de haut niveau.

En adéquation avec l'essor du soudage mécanisé, HEFAÏS déploie d'ores et déjà des formations théoriques en lien avec cette technique. En juin 2023, le soudage mécanisé a d'ailleurs fait l'objet d'une journée technique organisée dans les locaux de l'école à destination des entreprises locales et nationales. Cet événement était le premier d'une longue série qui abordera ensuite différentes thématiques (robot collaboratif en soudage, procédé TIG avec amené de fil automatique...) et distinguera HEFAÏS comme un centre technique de référence autour du soudage.

### Une école qui attire

Dans une démarche d'excellence, HEFAÏS est certifiée QUALIOP1, ce qui atteste que l'organisation qualité mise en place par l'école est conforme au référentiel national de déploiement d'actions de formation visant au développement des compétences des collaborateurs d'entreprise. De plus, cette certification permet aux entreprises éligibles de bénéficier des aides financières collectées par les Opérateurs de Compétences.

L'école est également habilitée par CERTIMETAL à dispenser des actions de formation et d'évaluation en vue d'attribuer les certifications professionnelles de la branche de la Métallurgie. Ces certifications, nommées CQPM (Certificat de Qualification Paritaire de la Métallurgie), valident des compétences ajustées aux exigences de l'industrie.

En parallèle, la Haute École de Formation Soudage collabore avec les représentants des filières navale et nucléaire. Ainsi, HEFAÏS est adhérente du CINav (Campus national des industries de la mer) et a vu certaines de ses formations labellisées par le CINav et le label by CINav, y apportant une coloration maritime pour répondre aux besoins des industries de la mer.

HEFAÏS est également adhérente de l'UMN (Université des Métiers du Nucléaire) et propose le « Passeport nucléaire », une coloration nucléaire des formations à destination des personnes en recherche d'emploi.

Grâce à tous ces partenariats forts et son ambition d'excellence, HEFAÏS a déjà bénéficié d'une importante couverture médiatique en attirant les sollicitations de plus de 15 médias presse, TV et radio différents dans le cadre de reportages sur la création de cette école unique en France comme un élément de réponse à la problématique de déficit de soudeurs qualifiés pour satisfaire les besoins des grands projets industriels d'aujourd'hui et de demain.

HEFAÏS fédère également une communauté de près de 2 000 abonnés sur LinkedIn qui suivent en direct les actualités et la vie de l'école. En outre, des demandes d'inscription régulières en provenance de toute la France démontrent l'attractivité grandissante des métiers du soudage auprès de tous types de publics.



Figure 4 : Logo de HEFAÏS (© HEFAÏS).

### Conclusion

C'est en travaillant de façon partenariale, à la fois sur la modernisation et la féminisation du métier de soudeur et sur l'excellence de son offre formative au plus près du réel qu'HEFAÏS a l'ambition de former à terme les meilleurs soudeuses et soudeurs de France pour les besoins des filières nucléaire et navale ; contribuant en cela à l'attractivité de l'industrie française.

# Le nucléaire au service de la réindustrialisation de la France

Par Hubert VIRLET

Directeur de projets au sein du service de l'Industrie de la direction générale des Entreprises

La France est confrontée à une croissance massive de ses besoins en production d'électricité stable et compétitive pour répondre au double défi de la décarbonation et de la réindustrialisation. Le nucléaire est un atout stratégique dans ce contexte, avec une régulation du prix de l'électricité permettant aux consommateurs d'en tirer les bénéfices. La relance du nucléaire est par ailleurs en elle-même une opportunité industrielle pour le pays, qu'il s'agisse du programme EPR2 ou encore des développements des réacteurs innovants.

## Le nucléaire au service de la réindustrialisation

### Un besoin massif d'électricité pour réussir la réindustrialisation dans le contexte de décarbonation

Après de nombreuses années de désindustrialisation, les pouvoirs publics se sont clairement prononcés pour une stratégie de reconquête industrielle. À l'occasion de l'événement « accélérer notre réindustrialisation », le président de la République a rappelé en mai 2023 qu'il s'agit d'un enjeu de souveraineté dans un contexte de triple accélération climatique, technologique et géopolitique.

Cette réindustrialisation ne pourra avoir lieu qu'en décarbonant et électrifiant massivement l'industrie. L'Europe vise en effet à atteindre la neutralité carbone en 2050, objectif traduit dans la loi énergie-climat du 8 novembre 2019. Or, l'industrie représente 18 % des émissions de gaz à effet de serre en 2022 (Citepa, 2023). Dans ce contexte, le Gouvernement a fixé un objectif de division par deux des émissions industrielles pour la prochaine décennie et a mis en place une planification pour accélérer la décarbonation des sites industriels. Plusieurs vecteurs sont mobilisés. L'efficacité énergétique est une composante-clé de cette transition. D'autres leviers consistent en l'usage de la biomasse pour les très hautes températures de combustion ou dans la chimie, ou encore la capture, stockage ou utilisation du carbone. Mais la stratégie de décarbonation de l'industrie repose en grande partie sur deux briques essentielles : l'électrification des procédés et l'utilisation d'hydrogène bas carbone, produit à partir d'électricité décarbonée.

L'électrification recouvre des projets très divers : électrification de la chaleur avec l'installation de fours élec-

triques, électrification des turbines et chaudières des vapocraqueurs. Un bon exemple est celui d'Arcelor-Mittal, pour lequel la Commission européenne a approuvé en juillet 2023 une aide de la France à hauteur de 850 millions d'euros pour décarboner partiellement la production d'acier à Dunkerque, en soutenant une usine de réduction directe et deux fours à arc électrique. Quant à l'hydrogène, il est typiquement utilisable en substitution au charbon ou au gaz naturel pour les procédés chimiques, et la France a fait le choix d'investir massivement dans cette filière, en prévoyant de consacrer 9 milliards d'euros à son soutien, comme en témoigne l'élaboration dès 2020 d'une stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné et la participation au PIIEC (projet important d'intérêt européen commun) hydrogène avec 22 projets structurants français.

Réussir à la fois la décarbonation et la réindustrialisation nécessitera ainsi une croissance massive de la production d'électricité. Dans le cadre de Futurs Énergétiques 2050, RTE s'est livré à une estimation des besoins à horizon 2050 (RTE, 2021). La consommation d'électricité passerait de 475 TWh en 2019 à 645 TWh en 2050 dans le scénario de référence (+ 35 %), et 752 TWh dans le scénario de réindustrialisation profonde (+ 60 %), qui prévoit une part de l'industrie dans le PIB passant de 9,9 % en 2019 à 12,3 % en 2050. En particulier, la consommation d'électricité de l'industrie passerait de 113 à 239 TWh en 2050 et celle liée à la production d'hydrogène pourrait atteindre 87 TWh en 2050, dont une grande part pour l'industrie.

### Le nucléaire, atout stratégique pour la réindustrialisation

Face au défi de l'électrification et malgré les difficultés récentes liées à la corrosion sous contrainte, le

nucléaire représente un atout irremplaçable pour l'industrie. C'est en premier lieu grâce à son parc nucléaire que la France peut s'appuyer sur une production électrique décarbonée à hauteur d'environ 90 %, de sorte que localiser une activité industrielle en France fait baisser les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> (Bourgeois, 2022). Le nucléaire ne subit pas les intermittences liées à l'ensoleillement et au vent et est par ailleurs pilotable. Il réduit par ailleurs nos dépendances à l'étranger : le coût de l'approvisionnement en uranium naturel ne représente qu'environ 5 % des coûts complets de l'électricité nucléaire (SFEN, 2022) et la densité énergétique de l'uranium permet à EDF de disposer de stocks intermédiaires permettant le fonctionnement du parc sur plusieurs années.

Les choix faits par la France au cours de la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle lui permettent de disposer d'une base installée de 61 GW de réacteurs nucléaires, à un coût de production récemment réévalué par la CRE selon sa méthodologie à 60,7 €<sub>2022</sub>/MWh pour la période 2026-2030. Dans ce contexte, le programme de 6 EPR2 annoncé en février 2022 par le président de la République (soit environ 10 GW), ainsi que les études pour 8 EPR2 additionnels, représente un enjeu clé pour la réindustrialisation du pays en complément du déploiement des énergies renouvelables (ENR). L'analyse de RTE a montré qu'un mix électrique conjuguant croissance des ENR et construction de nouveaux réacteurs devrait être le scénario le moins risqué et le moins coûteux pour la collectivité. La maîtrise des délais et des coûts de ce nouveau programme sera toutefois clé pour qu'il demeure un outil de compétitivité.

### Faire bénéficier l'économie de la compétitivité du nucléaire

Le nucléaire ne peut jouer son plein rôle d'atout pour l'économie française que si les consommateurs et en particulier les entreprises peuvent bénéficier de la compétitivité et de la stabilité des coûts qu'il apporte. En l'absence de mécanisme de régulation, les entreprises restent sujettes à deux types d'incertitude s'agissant du prix de l'électricité.

Il s'agit tout d'abord des mouvements de marché à court terme. Les analyses de la direction générale des Entreprises montrent que la hausse du prix du gaz et de l'électricité à la suite du déclenchement de la guerre en Ukraine a constitué un choc économique majeur pour l'industrie (DGE, 2023). Si les entreprises ont fait preuve de capacité d'adaptation et de résilience, certains secteurs ont été contraints de réduire leur production (métallurgie, papier/carton, chimie, fabrication de minéraux non métalliques), malgré le rôle d'amortisseur joué par l'ARENH et les aides mises en place par le Gouvernement (notamment les aides versées sur le fondement du décret n°2022-967 du 1<sup>er</sup> juillet 2022). Ce type de choc énergétique est porteur de risques pour les entreprises industrielles françaises, la répercussion totale des coûts énergétiques dans les prix de vente pouvant se traduire par une baisse des exportations. Le coût de l'électricité est aussi un enjeu de compétitivité structurelle et il fait partie des paramètres exa-

minés attentivement dans le lancement de nombreux grands projets industriels, qu'il s'agisse de nouvelles implantations ou d'investissement dans de nouveaux moyens de production, y compris pour la décarbonation. Le président de la République a ainsi pu déclarer en février 2022 : « Il n'y a pas de production industrielle stable s'il n'y a pas une énergie stable aux prix les plus compétitifs ».

L'économie française a jusqu'ici toujours pu tirer parti de la compétitivité et de la stabilité des coûts du parc nucléaire français. RTE constate qu'en raison de l'atout du parc nucléaire existant, le coût de l'électricité produite en France figure parmi les plus bas d'Europe, même sans subvention. La suppression des tarifs réglementés jaunes et verts pour les entreprises par la loi NOME de 2010 a été compensée par l'introduction du mécanisme de l'ARENH (accès régulé à l'électricité nucléaire historique), qui permet aux consommateurs d'avoir accès à un prix compétitif (42 €/MWh) à une partie du productible nucléaire mais prend fin en 2026. Le président de la République a ainsi souhaité en février 2022 qu'une nouvelle régulation de l'électricité nucléaire soit mise en œuvre, afin que les consommateurs puissent bénéficier de prix stables, proches des coûts de production. Ces travaux ont en particulier donné lieu à une consultation lancée en juillet dernier par le ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique sur les besoins de prix des entreprises industrielles pour leur approvisionnement en électricité à l'horizon 2035.

Ils s'inscrivent par ailleurs en pleine cohérence avec les initiatives européennes, la réforme du marché de l'électricité proposée par la Commission européenne en mars 2023 se donnant parmi ses objectifs la réduction de la dépendance des factures des consommateurs à la volatilité des prix des combustibles fossiles et plus généralement l'amélioration de la prévisibilité et de la stabilité des coûts de l'énergie pour stimuler la compétitivité industrielle<sup>1</sup>. L'accord trouvé en Conseil en octobre 2023 par les ministres de l'énergie marque une étape importante en vue de l'adoption du texte.

Au niveau national, l'État et EDF ont annoncé le 14 novembre 2023 un accord important. Celui-ci prévoit une régulation de l'ensemble du productible nucléaire, avec un prélèvement des revenus d'EDF au-delà d'un certain niveau de prix<sup>2</sup> et la redistribution des sommes prélevées à l'ensemble des consommateurs, mais aussi le développement des contrats de long terme permettant de donner plus de visibilité aux consommateurs.

<sup>1</sup> Sur le marché de l'électricité, voir aussi : [https://annales.org/re/2023/re\\_109\\_janvier\\_2023.html](https://annales.org/re/2023/re_109_janvier_2023.html)

<sup>2</sup> Le mécanisme, mis en consultation publique le 21 novembre 2023 par le Gouvernement, prévoit un premier seuil de prélèvement évalué à ce stade à 78 €<sub>2022</sub>/MWh avec un taux de prélèvement de 50 % du prix moyen de vente du productible nucléaire au-delà de ce niveau, et un second seuil de 110 €<sub>2022</sub>/MWh avec un taux de prélèvement de 90 % au-delà de ce niveau.

## La relance du nucléaire, un nouveau industriel

En sus de son impact sur le reste de l'économie, la relance du nucléaire est aussi en elle-même une pièce importante de la réindustrialisation du pays.

### Le programme de construction des EPR2, une opportunité industrielle

Troisième filière industrielle du pays, la filière nucléaire représente 220 000 emplois et 3 000 entreprises. Chiffrée à 52 Mds€<sub>2020</sub> à la suite de deux audits externes en 2019 et 2021, la construction de 6 EPR2 annoncée par le président de la République représente une opportunité majeure pour la filière et pour le pays.

On peut rappeler le constat de Pierre Messmer lorsque le Gouvernement a décidé en 1974 de l'accélération du programme nucléaire à la suite du choc pétrolier, constat que l'enjeu actuel de décarbonation ne fait que renforcer : « Notre grande chance c'est l'énergie électrique d'origine nucléaire parce que nous avons une bonne expérience dans tout cela ». La maîtrise par la France de la chaîne de valeur du nucléaire lui donne à la fois les clés pour la réalisation d'un programme ambitieux mais permettra aussi que celui-ci ait des retombées fortes pour notre industrie.

Le rapport « Match » remis au Gouvernement en avril 2023 par le GIFEN prévoit ainsi une augmentation du volume d'activité de la filière de 25 % en 10 ans, avec une accélération à compter de 2027, qui devrait se traduire par 100 000 recrutements en équivalent temps plein (GIFEN, 2023). Cette dynamique sera bien répartie sur le territoire. Aujourd'hui, 9 des 13 régions métropolitaines comptent plus de 5 000 employés dans la filière et les perspectives de croissance de l'emploi sont positives pour chacune d'entre elles (EY, 2022). Les recrutements touchent des types d'emploi très variés, qu'il s'agisse d'ingénieurs, d'électriciens, de chaudronniers pour prendre des exemples parmi les 20 métiers en tension particulière au sein des 84 métiers identifiés dans le rapport de l'Université des métiers du nucléaire (UMN, 2023).

Les entreprises de la filière considèrent le programme comme une priorité stratégique, qui impliquera pour une partie importante d'entre elles une augmentation de la capacité de l'outil industriel et sa modernisation. Dès fin 2020, l'État a accompagné la modernisation de la filière dans le cadre du plan France Relance, avec en particulier un fonds de soutien aux investissements du secteur nucléaire et l'appel à projets « renforcement des compétences de la filière nucléaire », qui ont compté 136 projets lauréats et 150 M€ d'aides de l'État, bien répartis sur le territoire national, ou encore la mise en place du Fonds France nucléaire doté de 200 M€ (100 M€ de l'État et 100 M€ d'EDF). L'État continue d'ajuster ses leviers d'action sur la base des résultats les plus récents sur l'état de préparation de la filière.

Au-delà des retombées directes, le programme de construction de réacteurs sur le territoire national sera également un outil clé pour l'attractivité de la filière

française à l'international, dans un contexte de renouveau du nucléaire. L'Agence internationale de l'énergie prévoit ainsi une augmentation de la capacité nucléaire mondiale de 417 GW en 2022 à 620 GW en 2050 selon les annonces en vigueur des gouvernements et plus de 900 GW dans son scénario net-zero en 2050 (AIE, 2023).

La relance du nucléaire peut enfin avoir des effets d'entraînement plus larges sur le tissu industriel, alors que 80 % des entreprises de la filière nucléaire travaillent pour d'autres secteurs. L'attractivité d'un grand programme industriel ou les efforts de qualité mis en place dans ce cadre peuvent en effet bénéficier aux activités des entreprises sur leurs autres marchés.

### La France de retour dans la course aux réacteurs du futur

Au-delà du nouveau programme EPR2, le Gouvernement a souhaité soutenir les efforts d'innovation de la filière française, alors que le développement de nouvelles technologies de réacteurs fait l'objet d'efforts majeurs dans le monde, notamment aux États-Unis, en Chine ou au Royaume-Uni. Dans le cadre du plan France 2030 présenté en octobre 2021, le Gouvernement entend accompagner la filière nucléaire pour qu'elle continue d'investir massivement et durablement dans l'innovation, la maîtrise technologique étant gage d'indépendance nationale. Le Gouvernement souhaite en particulier faire émerger en France des réacteurs nucléaires de petite taille, innovants et avec une meilleure gestion des déchets, SMR (*small modular reactors*) ou AMR (*advanced modular reactors*).

C'est d'abord le soutien au projet de réacteur SMR NUWARD, pour lequel le Gouvernement a annoncé en juin 2023 un financement public significatif en soutien à la phase d'avant-projet détaillé ; mais c'est aussi le choix d'ouvrir le jeu de façon inédite, *via* un programme de trois appels à projets dont le premier a été ouvert de mars 2022 à juin 2023. Ce programme vise à soutenir la recherche et développement sur des projets en rupture, répondant à plusieurs objectifs tels que la compétitivité, l'amélioration de la sûreté, le déploiement d'applications non électrogènes ou encore la fermeture du cycle. Ces appels à projets, qui renouent avec l'exploration des différentes voies technologiques lors de l'après-guerre (Le Renard, 2017), permettront aussi de contribuer à la création d'un nouvel écosystème de *start-up* nucléaires et pourraient déboucher sur de nouvelles solutions de décarbonation de l'industrie, *via* les applications non-électrogènes.

Le précédent contrat stratégique de la filière nucléaire avait été signé en janvier 2019 alors que la programmation pluriannuelle de l'énergie prévoyait la fermeture de 14 réacteurs d'ici 2035, date à laquelle le nucléaire ne représenterait plus que 50 % du mix électrique. C'est ainsi dans un contexte bien différent, initié par le discours de Belfort du président de la République, que le prochain contrat stratégique de filière est en préparation entre la filière nucléaire et l'État, prenant en compte ce renouveau du nucléaire au service notamment de la réindustrialisation du pays, et de la conso-

validation d'une filière d'excellence, innovante, attractive en termes d'emplois et au rendez-vous des enjeux clés qui l'attendent.

## Bibliographie

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ÉNERGIE (2023), *World Energy Outlook*.

BOURGEOIS & MONTORNES (2022), « Produire en France plutôt qu'à l'étranger, quelles conséquences ? », *INSEE Analyses*, 89.

CITEPA (2023), « Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques. Bilan des émissions en France de 1990 à 2002. Rapport Secten éd. 2023 ».

DIRECTION GÉNÉRALE DES ENTREPRISES (2023), « Quelle incidence de la hausse des prix de l'énergie sur l'industrie ? », *Les Thémas de la DGE*, 13.

EY (2022), « État des lieux des formations qualifiantes initiales et continues et cartographie des besoins en compétences, emplois et métiers dans le domaine nucléaire – Rapport final ».

GIFEN (2023), « Programme Match – L'outil de pilotage de l'adéquation besoins-ressources de la filière nucléaire pour être au rendez-vous de ses programmes – Note remise au Gouvernement ».

LE RENARD (2017), « Les débuts du programme électronucléaire français (1945-1974) : de l'exploratoire à l'industriel », *Hérodote*, 2017/2, pp. 53-66.

RTE (2021), « Futurs énergétiques 2050 – Principaux résultats – Résumé exécutif ».

SFEN (2022), « Combien coûte le nucléaire ? Économie du nucléaire dans le système électrique ».

UNIVERSITÉ DES MÉTIERS DU NUCLÉAIRE (2023), « Plan d'actions "compétences" de la filière nucléaire ».

# Réussir la décarbonation de l'industrie française grâce à l'atout compétitif du nucléaire

Par Nicolas de WARREN

Président de l'Union des industries utilisatrices d'énergie (Uniden)

Le partenariat historique entre production nucléaire et industries électro-intensives a structuré le paysage industriel français, la première ayant besoin de grands consommateurs stables et prévisibles, les secondes d'une électricité abondante, sûre et compétitive. Renouveler ce partenariat répondrait aujourd'hui à deux défis : celui de la décarbonation de l'industrie d'abord, le nucléaire étant l'énergie bas carbone par excellence et l'industrie étant appelée à multiplier sa consommation d'électricité par 1,5 d'ici 2035, et par 2 ou 3 d'ici 2050 pour se décarboner. Seul le nucléaire peut répondre à de tels besoins. Le défi de la compétitivité ensuite, le nucléaire garantissant la disponibilité de la ressource dans le long terme, l'indépendance aux impacts des crises énergétiques sur le prix, dès lors qu'il n'est pas soumis aux incertitudes du marché de gros, et un coût de production raisonnable, le parc nucléaire existant étant amorti.

## Production d'électricité et usines électro-intensives : une symbiose historique

Derrière les tensions entre la France et l'Allemagne sur la réforme du marché européen de l'électricité et le traitement du nucléaire, perce l'inquiétude de nos partenaires sur un autre terrain : la compétitivité industrielle. L'énergie étant, littéralement, le carburant de la croissance, les conditions économiques et techniques pour y accéder sont un facteur essentiel de la compétitivité des industries, d'autant plus que l'énergie est stratégique dans leurs procédés : tel est le cas des industries électro-intensives comme l'électro-métallurgie (aluminium, silicium, manganèse, zinc) et l'électro-chimie (chlore, sodium), mais aussi l'acier, le papier, l'électronique, les batteries, etc., pour qui l'électricité est une matière première et représente entre 10 et 50, voire 70 % des coûts de production.

C'est pour cette raison qu'historiquement, en France, les plus électro-intensives de ces industries se sont développées dans les vallées alpines ou pyrénéennes, au plus près de la ressource hydro-électrique qu'elles ont d'ailleurs développée par leurs barrages ou centrales au fil de l'eau. Elles pouvaient ainsi s'approvisionner à prix coûtant et compétitif. Cette symbiose entre production d'électricité et industries électro-intensives ne s'est pas démentie après la nationalisation des moyens de production et la création d'EDF. En effet, l'article 8 de la loi 46-628 du 8 avril 1946 sur la nationalisation de l'électricité et du gaz prévoyait : « L'Électricité de France et le Gaz de France sont tenus d'assurer aux entreprises dépossédées, à conditions écono-

miques et techniques égales, des fournitures d'électricité et de gaz équivalentes au point de vue de leur quantité, de leur qualité et de leur prix aux fournitures dont les entreprises disposaient avant le transfert de leurs biens ». C'est sur cette base juridique que des contrats d'approvisionnement en électricité compétitifs ont bénéficié à un certain nombre de sites très électro-intensifs, pendant des décennies, y compris quand le déploiement du programme électronucléaire français, dans les années 1970-1980, a permis de renforcer considérablement une offre d'électricité abondante et décarbonée.

En effet, la symbiose entre production d'électricité et consommation industrielle s'est prolongée, voire amplifiée, avec le développement du parc électronucléaire français : le profil de consommation des électro-intensifs fait d'eux un partenaire naturel et indispensable du développement du parc nucléaire, car il assure aux producteurs une consommation stable, prévisible, 24h/24 et 365 jours par an, déduction faite des périodes de maintenance... Profil qui correspond aux caractéristiques-mêmes de la production nucléaire, même si celle-ci a été rendue plus modulable que dans les premières décennies d'exploitation du parc nucléaire. C'est à ce titre aussi que certains sites électro-intensifs, comme l'usine d'aluminium Trimet de Saint-Jean-de-Maurienne, comptent EDF parmi leurs actionnaires.

Plus récemment, cela s'est traduit dans le consortium Exeltium, sur la base d'un contrat de partenariat signé avec EDF en 2008 : vingt-sept industriels, actionnaires d'Exeltium, ont ainsi accès, sur une durée de 24 ans, à un volume de 148 TWh d'électricité, payé à EDF par une avance en-tête de 1,75 milliard d'euros financée en



très grande partie par emprunt, et par un prix proportionnel indexé payé au fil de l'eau, censé représenter les coûts d'exploitation du parc nucléaire d'EDF. L'intérêt du montage, validé par la Commission européenne en juillet 2008 et démarré en mai 2010, repose sur trois facteurs : l'accès de l'industrie à la compétitivité de la production nucléaire sur une durée lui assurant une vraie visibilité, le fort effet de levier d'un financement essentiellement bancaire et la déconsolidation corrélative de la dette du bilan des entreprises actionnaires. Le projet portait sur un volume total du double environ, mais la crise financière de 2008 a rendu impossible le financement de l'intégralité du projet. Une seconde phase d'Exeltium est donc aujourd'hui possible pour un volume d'électricité légèrement supérieur à celui de la première phase. Face au défi financier de la décarbonation des procédés industriels, qui passera souvent par des sauts technologiques, cet outil présente un réel intérêt.

Enfin, la mise en place de l'ARENH (accès régulé à l'électricité nucléaire historique) en 2011 a également permis à l'industrie de bénéficier en partie de la production du parc nucléaire existant, partiellement amorti et permettant donc un prix régulé. Lors de la flambée historique des prix de l'énergie en 2022 liée notamment à l'invasion de l'Ukraine, beaucoup d'usines n'ont pu continuer à produire qu'à hauteur de la part de leur approvisionnement électrique couverte par l'ARENH, qui aura été un facteur majeur de la résilience de l'industrie électro-intensive ou électro-sensible, et au-delà de l'économie française.

Le partenariat historique entre production électrique, en particulier nucléaire, et industries électro-intensives, a donc structuré le paysage industriel français. Le poursuivre et le renouveler répondrait aujourd'hui à un double enjeu : celui de la décarbonation de l'industrie, son défi le plus important pour les prochaines années, et celui de sa compétitivité, donc de sa survie.

## Le nucléaire, l'électricité bas carbone par excellence

Le mix électrique français, reposant très majoritairement sur la production nucléaire (70 % en moyenne), sur l'hydro-électricité et les renouvelables, était décarboné à 87 % en 2022, malgré une part du nucléaire descendue à 62,7 % du fait de l'arrêt de nombreuses tranches. Grâce au nucléaire essentiellement, les émissions du secteur électrique ne représentent que 5 % des émissions totales du pays, contre 19 % dans l'Union européenne.

Pour l'avenir, le nucléaire restera le principal contributeur de ce mix décarboné. L'ADEME évalue le contenu carbone du kWh nucléaire à 6 g de CO<sub>2</sub> par kWh, contre 418 pour les centrales à gaz et 1 058 pour les centrales à charbon. En France, le nucléaire devance même l'éolien (10 gCO<sub>2</sub> par kWh) et le solaire (30 gCO<sub>2</sub> par kWh).

EDF, dans une analyse de cycle de vie de 2019<sup>1</sup>, a montré que la contribution de l'aval du cycle nucléaire,

<sup>1</sup> <https://www.edf.fr/groupe-edf/produire-une-energie-respectueuse-du-climat/lenergie-nucleaire/notre-vision/analyse-cycle-de-vie-du-kwh-nucleaire-dedf>

en particulier avec l'extraction et le traitement de l'uranium (1,3 g eq.CO<sub>2</sub>/kWh), est la plus importante, alors qu'au contraire, le démantèlement (0,1 g), la maintenance (0,3 g) et le stockage des déchets (0,1 g) ont un poids négligeable.

EDF constate aussi que l'allongement de la durée d'exploitation des centrales réduit l'empreinte carbone (- 8 % pour un allongement de 40 à 60 ans) et qu'une variation de 10 % de la production électrique annuelle (base 2019) se traduit par une variation de 0,1 gCO<sub>2</sub>/kWh. EDF conclut que la sensibilité globale à ces hypothèses offre un spectre allant de 2,9 à 4,6 g eq.CO<sub>2</sub>/kWh.

L'existence d'un parc très largement amorti, qui peut et doit retrouver ses performances en maximisant le productible, est donc une chance pour la France face à l'impératif de la neutralité carbone en 2050. Et c'est particulièrement vrai pour l'industrie.

## Le nucléaire, un atout pour la compétitivité industrielle

Le parc nucléaire existant apporte à l'industrie trois réponses essentielles. D'abord, c'est un facteur de prévisibilité important pour l'investissement. Les grands groupes industriels présents en France, filières établies (aluminium, acier, chimie et matériaux...) ou nouvelles (batteries, hydrogène, semi-conducteurs...), toutes électro-intensives, contribueront fortement à l'objectif de neutralité carbone en 2050 en apportant des solutions de décarbonation à l'ensemble de l'économie. Ces investissements ne se feront que si les porteurs de projets disposent d'une visibilité prix en base à long terme, *via* des formules contractuelles qui ne pourront être assises, compte tenu de la puissance requise et de leur profil de consommation, que sur le parc nucléaire existant puis futur, et avec des formules de prix se rapportant directement au coût de ceux-ci.

Les critères décisifs sur lesquels un groupe industriel électro-intensif se fonde pour implanter telle unité de production, investir dans la modernisation d'installations existantes, voire suspendre ou reprendre la production, sont la compétitivité de ses coûts de production, la non-sensibilité au risque carbone à moyen-long terme, la disponibilité d'une production électrique de base de forte puissance et la prévisibilité de ces facteurs sur quinze ans au moins, pour permettre l'amortissement d'investissements lourds de maintien des usines au meilleur niveau mondial ou de nouvelles capacités.

La production d'électricité nucléaire française répond à chacune de ces exigences : la disponibilité, avec un taux qui certes doit retrouver un meilleur niveau (autour de 75 %, sachant que la meilleure performance mondiale pour une tranche prise isolément est à 94 %) mais reste nettement supérieur à celui des énergies renouvelables intermittentes (éolien, solaire, autour de 30 %) ; la prévisibilité, par l'indépendance aux impacts des crises énergétiques sur le prix, dès lors que le nucléaire n'est pas étroitement soumis aux incertitudes du marché de gros (c'est l'enjeu des discussions sur la régulation du nucléaire dans le cadre du futur *design* de marché européen), ce qui en fait aussi un facteur de

souveraineté économique ; le coût de production enfin, le parc nucléaire existant permettant de garantir une certaine compétitivité. À cet égard, la Commission de régulation de l'énergie (CRE) a évalué, à la demande du Gouvernement, les coûts de production de ce parc, EPR de Flamanville 3 compris. Pour cela, elle a expertisé « les recettes issues de l'exploitation du parc nucléaire afin d'en déduire le prix d'un ruban d'énergie électronucléaire », autrement dit, d'une puissance électrique souscrite constante tout au long de l'année. Ses conclusions ont été rendues publiques en septembre 2023 : la CRE a retenu un coût complet du ruban de 56,7 €<sub>2022</sub>/MWh sur 2026-2030, 55,1 €<sub>2022</sub>/MWh sur 2031-2035 et 53,2 €<sub>2022</sub>/MWh sur 2036-2040. Or, ce « ruban d'énergie » correspond au profil de consommation dit "base load" des industries électro-intensives, à la fois prévisible et régulier, et offre donc la base d'un partenariat renouvelé entre le parc nucléaire et les sites électro-intensifs. À titre de comparaison, les concurrents mondiaux de nos usines s'approvisionnent à des prix « rendus sites tout compris » entre 40 et 80 \$/MWh en Chine, et 30 à 50 \$/MWh aux États-Unis...

La CRE a fondé ses travaux sur une trajectoire de productible nucléaire relativement modérée : 361,5 TWh par an sur la période 2026-2030, puis 360,2 TWh par an sur 2031-2035 et 344,1 TWh par an sur 2036-2040. Soulignons que l'évolution du productible impacte le coût, qui baisse de 1,6 €/MWh avec 10 TWh de production supplémentaire. À cet égard, une question structurante se pose : dans un contexte où la part non pilotable du mix électrique européen, déjà majoritaire, va passer à plus de 75 % d'ici 2040, le parc nucléaire français doit-il continuer à « faire la dentelle » par la modulation, pour pallier cette non-pilotabilité et assurer ainsi l'équilibrage physique offre/demande sur la plaque centre Ouest Europe, voire au-delà ? Cette situation a un coût technique (l'impact probable sur la durée de vie des tranches), économique (le manque à produire et donc à vendre, la hausse du coût de production unitaire) et climatique (la production renouvelable sera encore longtemps adossée à un complément gaz). Elle devra faire l'objet d'un débat objectif et approfondi dans le cadre du futur système électrique global européen.

## La décarbonation de l'industrie grâce au nucléaire, un défi majeur mais réaliste

Les énergies décarbonées alternatives au nucléaire ne présentent pas, à l'heure actuelle en France, les mêmes qualités : le potentiel de développement de l'hydraulique, sous forme de station de transfert d'énergie par pompage (STEP) pour l'essentiel, est désormais limité et la montée en puissance des énergies renouvelables, principalement éolienne et solaire, couplée au développement massif de moyens complémentaires de stockage comme les batteries, les STEP ou l'hydrogène, ne pallierait que partiellement leur intermittence. Ajoutons que la faisabilité, à l'échelle nécessaire, de ces capacités de stockage paraît hypothétique. Enfin, la production qui pourrait être ainsi générée ne serait pas à l'échelle des besoins de l'industrie, appelés à

### Présentation de l'Union des industries utilisatrices d'énergie (Uniden)



L'Uniden, créée en 1979, représente les industries énérgo-intensives pour lesquelles la maîtrise des coûts énergétiques (électricité, gaz et chaleur) constitue un facteur essentiel de compétitivité. Les 62 adhérents de l'Uniden représentent plus de 70 % de l'énergie consommée par l'industrie en France et appartiennent à une large gamme de secteurs industriels : minerais, aluminium, acier et autres métaux, ciment et autres matériaux de construction, verre, pâte et papier, raffinage, pétrochimie et chimie, automobile et batteries, transports, semi-conducteurs, agroalimentaire.

croître considérablement du fait de sa décarbonation, qui passera par l'électrification des procédés.

Dans son étude « Futurs énergétiques 2050 », RTE a souligné l'intérêt climatique d'un scénario de reconquête industrielle appuyé sur une énergie bas carbone, grâce notamment à l'électrification massive des procédés industriels. Il est maintenant établi que l'accroissement massif des besoins de l'industrie en électricité pour sa décarbonation se traduirait par une multiplication par presque 3 de la consommation industrielle d'électricité d'ici 2050, et par 1,5 d'ici 2035, hypothèse retenue dans le « budget prévisionnel 2035 » de RTE publié en octobre dernier. Ces projections rendent nécessaire une fourniture d'électricité abondante, décarbonée, pilotable, fiable et compétitive, comme le parc nucléaire français existant ou à venir peut l'apporter. À long terme, la construction de six nouveaux réacteurs ne peut donc être qu'une première étape, composante d'une stratégie industrielle nucléaire de long terme, étroitement articulée avec la prolongation de la plupart des réacteurs en service.

Au-delà de la question de la disponibilité de la ressource électrique, la décarbonation de l'industrie, et donc de l'économie, sera compétitive ou ne sera pas. En effet, à défaut de pouvoir faire face à la concurrence internationale, les industries ne pourront pas investir dans leur décarbonation. Et la décarbonation par le vide, c'est-à-dire par la désindustrialisation, serait une illusion mortifère y compris pour l'atteinte des objectifs climatiques. Une étude conduite par Deloitte pour l'Uniden en 2021 a démontré l'impact négatif de la désindustrialisation de la France, ces dernières décennies, sur son empreinte carbone : alors qu'entre 1995 et 2015 les émissions de gaz à effet de serre de la France ont baissé de 17,5 %, son empreinte carbone a augmenté d'autant

(+ 17,5 %), tandis que l'industrie reculait fortement dans l'économie française. Extrapolé à 2022, avec des émissions globales de 25 % inférieures à celles de 1995, l'on peut considérer que l'empreinte carbone de la France a augmenté d'au moins 20 %. L'étude a ainsi mis en évidence le coût climatique considérable de la désindustrialisation, qui s'explique par la plus grande efficacité carbone de la production domestique sur l'ensemble des filières industrielles analysées, auxquelles des productions importées se sont substituées ; pour les filières faisant fortement appel à l'énergie électrique, cet avantage climatique est encore renforcé par le très faible contenu carbone du mix électrique français. Inversement, l'étude montrait l'impact positif sur l'empreinte carbone d'une réindustrialisation fondée sur le mix énergétique français.

C'est pourquoi l'accès de l'industrie électro-intensive au productible nucléaire doit faire l'objet d'un cadre garantissant que les coûts de production de l'électron soient décorrélés des incertitudes du marché de gros. Pour la France, l'Uniden estime à 40 TWh les besoins de ces industries pour 2026. Autrement dit, autour de 10 % de la cible de production moyen terme du parc existant. L'enjeu est majeur, mais l'objectif est atteignable !

# Orano, *leader* du cycle du combustible, pourrait doubler voire tripler ses investissements pour accompagner la relance du nucléaire

Par Claude IMAUVEN  
Orano

Orano, en tant qu'expert industriel mondial du cycle du combustible, est idéalement positionné pour soutenir et renforcer la souveraineté énergétique française, de même que pour accompagner le développement du nucléaire dans le monde. Le groupe n'a jamais cessé d'investir, que ce soit dans les mines, la conversion ou encore l'enrichissement avec notamment le renouvellement des usines au cours de la dernière décennie. Afin d'accompagner cette relance en France d'abord, en Europe et dans le monde ensuite, Orano pourrait doubler voire tripler ses investissements dans le cycle. Alors que le projet d'extension de l'usine Georges Besse II, qui a été validé par le conseil d'administration du groupe en octobre dernier sera majoritairement autofinancé, les financements devront être trouvés afin qu'Orano soit en mesure de déployer des projets majeurs tels que le renouvellement des capacités minières ou des installations de l'aval du cycle, pour lequel des décisions devront être prises dans le courant de l'année 2024.

Ces dernières années ont été particulièrement marquées par la prise de conscience de la nécessité de lutter contre le réchauffement climatique et la volonté de renforcer la souveraineté européenne, notamment énergétique, à la suite de l'invasion russe en Ukraine. Dans ce contexte, l'énergie nucléaire constitue un réel atout. Avec un taux d'indépendance énergétique de plus de 50 %, elle permet de placer la France parmi les meilleurs élèves européens<sup>1</sup>.

Qu'il s'agisse du discours de Belfort du président de la République le 10 février 2022 décliné un an plus tard par le Conseil de Politique Nucléaire (CPN) le 3 février 2023, en passant par l'Alliance du nucléaire constituée sous l'impulsion de la ministre française de la Transition énergétique Agnès Pannier-Runacher qui promeut l'atteinte d'une capacité nucléaire installée de 150 GW d'ici à 2050 au sein de l'Union européenne, jusqu'aux récentes annonces de la COP 28 lors de laquelle 22 pays<sup>2</sup> et 120 acteurs économiques ont appelé à un triplement des capacités, la relance du nucléaire est une réalité. À titre indicatif, un triplement des capacités

nucléaires occidentales nécessiterait plus de 100 G€ d'investissements dans le cycle.

Rappelons que le nucléaire est une énergie :

- bas carbone : ses émissions sont estimées à 12 g éq. CO<sub>2</sub>/kW<sup>3</sup> selon le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat et à 4 g de CO<sub>2</sub> par kWh selon EDF<sup>4</sup> ; elles sont donc comparables à celles de l'éolien, environ 4 fois moins élevées que celles liées au photovoltaïque et environ 50 fois moins élevées que celles liées au gaz ;
- pilotable et stable : sur le réseau électrique français, il peut permettre d'absorber des variations de 10 GW de puissance en moins de 4 h ;
- sûre : plus faible taux de mortalité parmi l'ensemble des énergies (Berger *et al.*, 2017) ;
- pour laquelle l'Europe possède un *leadership* technologique : en effet, toutes les technologies du cycle du combustible nucléaire – minières, transformation de

<sup>1</sup> Source : Statistics | Eurostat (europa.eu).

<sup>2</sup> Bulgarie, Canada, République tchèque, Finlande, France, Ghana, Hongrie, Japon, Moldavie, Mongolie, Maroc, Pays-Bas, Pologne, République de Corée, Roumanie, Slovaquie, Slovénie, Suède, Ukraine, Émirats arabes unis, Royaume-Uni et États-Unis.

<sup>3</sup> GIEC : [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_annex-iii.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-iii.pdf)

<sup>4</sup> Analyse Cycle de Vie du kWh nucléaire d'EDF, <https://www.edf.fr/groupe-edf/produire-une-energie-respectueuse-du-climat/lenergie-nucleaire/notre-vision/analyse-cycle-de-vie-du-kwh-nucleaire-dedf>

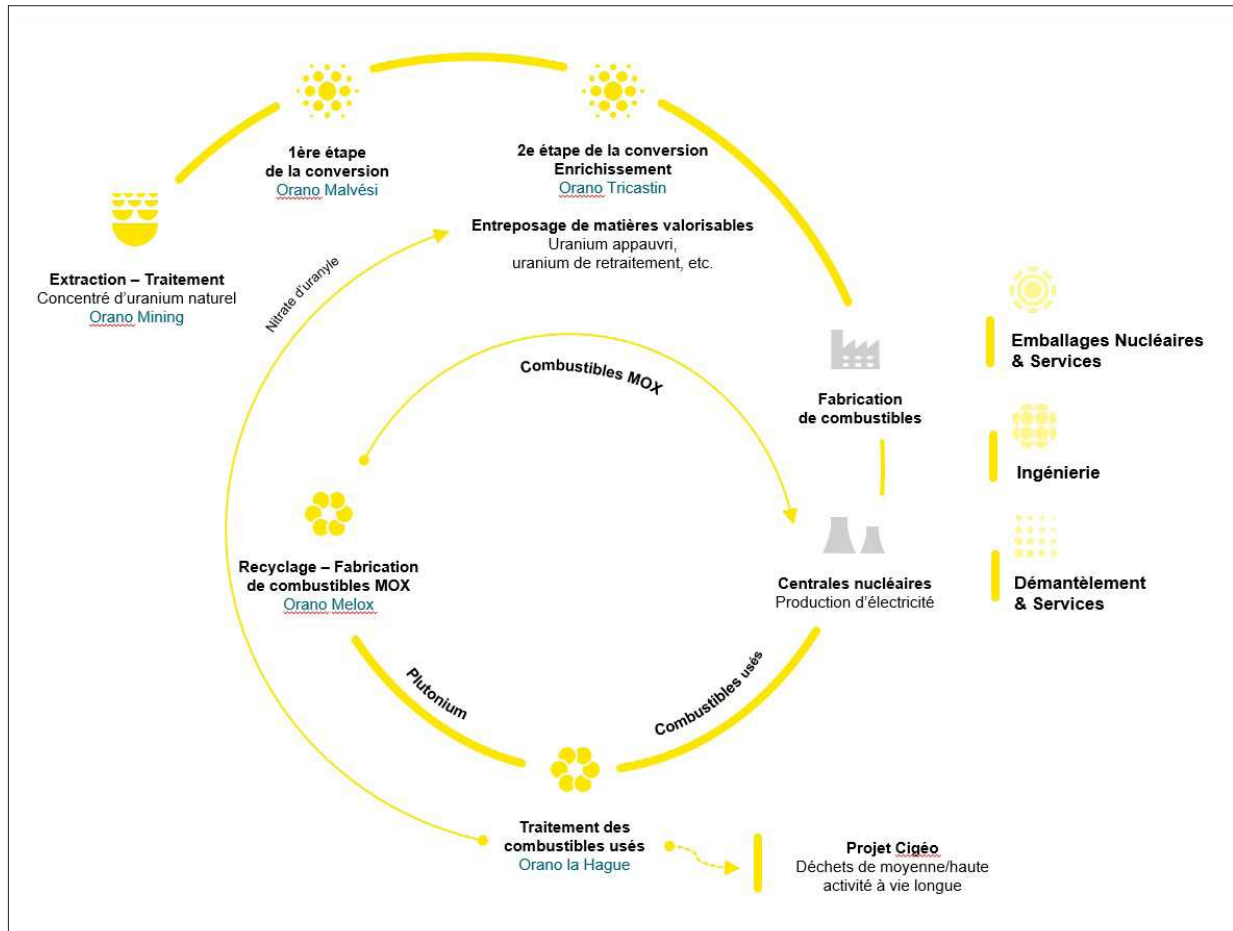


Figure 1 : Cycle du combustible (Source : Orano).

l'uranium, réacteurs, combustible, recyclage et services – sont maîtrisées en Europe. Par conséquent, l'Union européenne dispose de tous les atouts pour s'appuyer davantage sur son écosystème interne, afin de limiter sa dépendance à la Russie notamment.

Orano développe les savoir-faire de transformation et de maîtrise des matières nucléaires pour le climat, pour la santé et un monde économe en ressources : le groupe en a fait sa raison d'être depuis 2020 et suit une feuille de route engagée. Quelle que soit l'échelle considérée, Orano en tant qu'acteur du cycle, est donc idéalement positionné (voir la Figure 1 ci-dessus) pour accompagner cette transition et se projeter vers l'avenir, notamment dans les mines, dans la conversion et l'enrichissement ainsi que dans l'aval et le recyclage des combustibles usés.

## Les mines

Orano a toujours fait le choix d'une stratégie de long terme en maintenant un niveau d'activité élevé dans ses mines historiques et en poursuivant la diversification de son portefeuille minier. Cette stratégie a permis de maintenir un portefeuille diversifié de mines.

## Un niveau d'activité élevé dans ses mines historiques Au Kazakhstan

Orano est partenaire de Kazatomprom depuis 26 ans au travers de la co-entreprise Katco, qui exploite l'une des plus grosses mines d'uranium dans la région du Turkestan, avec une capacité de production annuelle de l'ordre de 4 000 t. En 2022, Katco et le ministère de l'Énergie de la République du Kazakhstan ont signé un amendement au contrat d'utilisation du sous-sol existant pour l'exploitation de la parcelle de South Torkuduk. L'exploitation de cette nouvelle parcelle dont les réserves en uranium sont estimées à 46 000 t, devrait assurer la production de Katco pendant plus de 10 ans. La production du nouveau gisement doit débuter dans 18 mois.

## Au Canada

La mine de McArthur avait été arrêtée et mise sous cocon il y a près de 5 ans à la suite de la baisse des prix de l'uranium. Annoncé en février 2022, le redémarrage de la mine de McArthur et de l'usine de traitement associée de Key Lake est effectif depuis novembre 2022. La production en 2023 devrait s'élever à près de 5 400 t d'uranium. Cameco prévoit une montée en production pour atteindre environ 6 900 t d'uranium par an dès 2024. Dans le même temps, les productions 2023 de la

mine de Cigar Lake et de l'usine de McClean devraient approcher les 6 300 t d'uranium.

### Au Niger

La société Somaïr a été créée en 1968 : la capacité de production de la mine est de l'ordre de 2 000 t par an. Le 4 mai 2023, Orano a signé un Accord Global de Partenariat avec l'État du Niger illustrant la volonté du groupe et du pays de renforcer un lien fort et durable. Parmi les sujets couverts, le développement du gisement d'Imouraren, les conditions de poursuite de l'exploitation de la mine de Somaïr, le réaménagement du site de Cominak et l'engagement sociétal d'Orano au Niger. Depuis les événements survenus dans le pays le 26 juillet dernier, les équipes locales d'Orano sont mobilisées pour assurer la continuité des activités sur les sites d'Arlit, d'Akokan et au siège à Niamey avec le total support des équipes en France.

Le projet Imouraren revêt des enjeux techniques particuliers : il est convenu qu'Orano poursuive ses travaux de recherche pour valider l'alternative à l'exploitation du gisement selon les méthodes éprouvées au Niger. À cet effet, une feuille de route a été établie, incluant une enveloppe d'investissement de plus de 50 millions d'euros pour démontrer l'applicabilité technique, environnementale et économique de la méthode d'exploitation par lixiviation *in situ*.

## La conduite de nouveaux projets a toujours été au cœur de la stratégie du groupe

### En Mongolie

Orano est présent depuis 1997 et a découvert les gisements de Zuuvch-Ovoo, Dulaan Uul et Umnut. Un pilote a fonctionné avec succès entre 2021 et 2022. Il a confirmé la faisabilité technique et économique de la future production à l'échelle industrielle et a mis en évidence le faible impact environnemental de la méthode d'extraction par lixiviation *in situ*. Le 12 octobre 2023, Orano a signé un protocole d'accord pour le développement et la mise en exploitation de la mine d'uranium de Zuuvch-Ovoo. La signature de l'accord d'investissement est attendue dans les prochains mois : il s'agit d'une étape essentielle pour stabiliser le cadre juridique et fiscal de la future exploitation. La production à terme est estimée à 2 500 t par an pendant 30 ans.

### En Ouzbékistan

Orano est présent depuis 2019, date à laquelle le groupe a initié un partenariat avec le Comité d'État pour la Géologie et les Ressources Minérales de la République d'Ouzbékistan (GosComGeology), pour développer des activités d'exploration et d'exploitation minières dans la zone de Djengeldi. Orano Mining, GosComGeology et la Société d'État Ouzbèke Navoiuranium ont signé un accord tripartite de coopération stratégique. L'accord signé pose les fondations d'une alliance stratégique exclusive pour le développement et la mise en production de nouvelles mines d'uranium en Ouzbékistan.

Ainsi, si Orano reste un des trois premiers producteurs mondiaux d'uranium (environ 7 500 t d'uranium en 2022) c'est parce que le groupe a su maintenir des niveaux d'investissements importants et une straté-

gie de diversification. Que ce soit au Kazakhstan, au Canada, au Niger, en Mongolie ou en Ouzbékistan, les investissements à venir se chiffrent à plusieurs centaines de millions d'euros et doivent permettre de pérenniser la stratégie d'approvisionnement à long terme, initiée il y a bientôt 50 ans.

## Conversion et enrichissement

Tout d'abord, dès le début des années 2000, Orano a été capable de faire le bon choix en termes de technologie d'enrichissement, en passant de la diffusion gazeuse à la centrifugation, se dotant ainsi de la meilleure technologie au monde.

Puis, dans les années 2010, le groupe, avec le soutien de l'État, a fait le choix d'investir plus de 5 G€ dans le renouvellement de son outil industriel, à la fois pour la conversion (usine Philippe Coste) et l'enrichissement (usine Georges Besse II), contribuant ainsi à l'indépendance énergétique de la France et à la production d'une énergie décarbonée, à une époque où nous étions loin d'imaginer la guerre en Ukraine et le contexte de crise énergétique que nous connaissons. Aujourd'hui, 60 % du chiffre d'affaires est réalisé à l'export.

Depuis l'éclatement du conflit russo-ukrainien au printemps 2022, les clients occidentaux ont exprimé la volonté de désensibiliser leurs approvisionnements à la Russie. L'agence Euratom les a d'ailleurs incités à cette diversification indispensable. En effet, en moyenne, 25 % de l'uranium enrichi des centrales européennes et américaines provient de Russie, notamment en raison de la technologie de réacteur VVER<sup>5</sup> retenue par certains pays. Or, Orano et Urenco sont les seuls enrichisseurs occidentaux. Dans ce contexte, Orano a étudié la possibilité d'augmenter ses capacités en France pour être en mesure de les porter à 10 MUTS<sup>6</sup> : un an après l'éclatement du conflit, Orano a pris la décision d'investissement le 19 octobre 2023 pour un montant de 1,7 G€. Il s'agit d'un projet industriel d'ampleur, qui démontre l'agilité de la filière et sa capacité à se structurer en un laps de temps limité.

En outre, dans le contexte du développement des petits réacteurs modulaires et des réacteurs avancés qui constituent une alternative au charbon notamment, une augmentation des besoins européens est envisagée à moyen terme. Orano est technologiquement en mesure d'accompagner le développement de ces nouveaux acteurs.

## Aval du cycle

Les combustibles, après leur séjour en réacteur nucléaire, sont envoyés à l'usine de la Hague où ils refroidissent en piscine pendant quelques années avant d'être recyclés. Ils possèdent encore un potentiel énergétique important.

<sup>5</sup> Les réacteurs VVER sont des réacteurs à eau sous pression de technologie russe.

<sup>6</sup> UTS : l'Unité de Travail de Séparation représente l'énergie nécessaire pour enrichir l'uranium.

À l'issue du processus de traitement, 96 % de la matière peut être réutilisée pour fabriquer de nouveaux combustibles qui fourniront à leur tour de l'électricité. Le plutonium (1 % de la matière) est utilisé dans des combustibles MOX (Mélange d'Oxydes). L'uranium récupéré (95 % de la matière, avec une teneur en uranium 235 proche de l'uranium naturel), appelé uranium de retraitement (URT), peut être réenrichi pour fabriquer du combustible dit URE (Uranium de Retraitement Enrichi). Les matières restantes non réutilisables (seulement 4 % du combustible) sont conditionnées à l'usine de La Hague dans des matrices en verre, elles-mêmes contenues dans un assemblage en acier, en vue de leur stockage définitif (aujourd'hui prévu au centre de stockage géologique profond de Cigéo). Les déchets ultimes représentent 5 grammes/an/habitant en France.

Le choix du cycle fermé permet donc de limiter l'utilisation des ressources extraites du sous-sol. En effet, le recyclage des combustibles usés permet une économie d'uranium naturel d'environ 10 % grâce à l'utilisation du plutonium dans les combustibles MOX. Cette économie sera portée jusqu'à 25 % en réenrichissant l'uranium de retraitement, en plus du MOX, ce qu'EDF prévoit de faire, notamment dans les réacteurs de Cruas<sup>7</sup>. Dans le monde, le Japon, la Russie et la Chine ont également fait le choix du cycle fermé qui présente également d'autres avantages :

- la réduction de la radiotoxicité des déchets de haute activité d'un facteur 10 ;
- la réduction du volume de déchets d'un facteur 5 ;
- le procédé de vitrification permet de confiner les résidus ultimes dans une matrice extrêmement sûre et stable, optimisée pour l'entreposage et le stockage géologique, évitant également l'accumulation de combustibles usés à entreposer ;
- le mono-recyclage permet de réduire l'emprise au stockage définitif dans Cigéo, de l'ordre de 20 %.

Les usines actuelles qui assurent le recyclage des combustibles usés ont été démarrées pour les premières en 1990 sur le site de La Hague et en 1995 pour l'usine de recyclage Melox, sur le site de Marcoule. Ainsi, au cours de la décennie 2040, ces usines atteindront leur cinquantième année de fonctionnement. Comme dans toute industrie, si la durée de vie de certains ateliers des usines d'Orano peut être prolongée par le remplacement d'équipements qui atteignent le terme de leur durée de vie technique, ce n'est cependant pas le cas pour toutes les installations destinées à traiter les éléments les plus radioactifs, qui peuvent nécessiter d'envisager des investissements d'une ampleur bien supérieure à un simple remplacement d'équipements.

<sup>7</sup> <https://www.google.fr/url?sa=t&rot=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjX44OU5vKBaxU3VaQEHQXwBbwQFnoECBcQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.asn.fr%2FMedia%2FFiles%2F00-PNGMDR%2FPNGMDR-2016-2018%2FStrategie-de-reduction-a-moyen-terme-de-la-croissance-des-stocks-d-uranium-de-retraitement-EDF%3F&usq=AOvVaw0WPI4WuSA7WS4jVW6Vvnn8&opi=89978449>

Aussi, pour pouvoir disposer d'usines prolongées, en maîtrisant le risque du vieillissement, ou renouvelées, à l'horizon de la décennie 2040, les travaux de réalisation devront se dérouler au cours de la décennie 2030. Les financements devront être trouvés afin qu'Orano soit en mesure de déployer le renouvellement des installations de l'aval du cycle notamment. Les principales décisions sont annoncées dans le cadre d'un prochain Conseil de Politique Nucléaire (CPN).

Les développements à mener pour renforcer la politique de fermeture du cycle s'articulent autour de trois dimensions :

- La poursuite du mono-recyclage en cohérence avec la durée de fonctionnement du parc renouvelé, c'est-à-dire bien au-delà du milieu du siècle. Ceci implique l'étude de la pérennisation des usines de traitement actuelles de La Hague au-delà de 2040, le lancement d'études pour construire de nouvelles usines de traitement, l'étude des évolutions technologiques et le lancement du projet de réalisation d'une seconde usine de fabrication de combustibles MOX pour une mise en service industrielle à horizon 2040.
- Le Multi-Recyclage en Réacteur à Eau Pressurisée (MRREP) vise à stabiliser et maîtriser les inventaires de plutonium et de combustibles usés. Le MRREP ne s'opposerait pas à la mise en œuvre éventuelle d'un multi-recyclage en Réacteur à Neutrons Rapides (RNR) pour la fermeture totale du cycle, mais constituerait une étape dans le développement des nombreuses technologies et compétences du cycle qui seront nécessaires à sa mise en œuvre ultérieure.
- La fermeture totale du cycle et la réduction de la durée de vie des déchets grâce au déploiement d'options en rupture visant à élargir les types de combustibles qui pourront être traités (en particulier les combustibles des RNR) et à la transmutation en Réacteurs rapides à Sels Fondus (RSF) de matières aujourd'hui contenues dans les résidus ultimes vitrifiés qui permettrait ainsi de réduire le volume et la radiotoxicité à long terme des déchets de haute activité.

## Bibliographie

BERGER A. *et al.* (2017). "How much can nuclear energy do about global warming?", *International Journal of Global Energy Issues*, 40(1-2), pp. 43-78.

# Comment renforcer la dynamique d'innovation de la filière nucléaire française ?

Par Jean-François DEBOST

Directeur général du pôle de compétitivité Nuclear Valley

Et Bernard SALHA

Commission Innovation GIFEN, président de SNETP, CTO et directeur R&D d'EDF

Le nucléaire civil redémarre dans le monde, autant d'opportunités pour positionner une offre technologique française ambitieuse. Forte de ses 67 années d'expérience dans le nucléaire civil, forte des projets d'innovation accélérée par les plans « France Relance » et « France 2030 », la France fait la course dans le peloton de tête du nucléaire mondial. Face à la concurrence, nous allons devoir accélérer l'innovation et la mise sur le marché des solutions technologiques de nos PME et *start-up*. Cela nécessitera un soutien important des pouvoirs publics dans la durée, ainsi qu'un renforcement des fonds propres de nos ETI - PME, qui sont des industries à forte intensité capitalistique. Enfin, l'Europe devra protéger les intérêts industriels et économiques de ses pays membres sur le marché d'ores et déjà très concurrentiel du nouveau nucléaire.

**F**orte de 56 réacteurs en exploitation, d'une filière de production et recyclage du combustible complète, d'un réacteur neuf en fin de construction à Flamanville, et de projets de réacteurs de grandes tailles (EPR2) et de petites tailles (SMR et AMR) annoncés par les pouvoirs publics, d'un centre de stockage de déchets de haute activité vie longue en cours de finalisation, d'une chaîne d'approvisionnement complète, de ses laboratoires, de ses *start-up*, la France fait la course dans le peloton de tête du nucléaire mondial.

C'est un atout majeur pour notre pays.

Le nucléaire est en France une des composantes clé de la décarbonation, de l'atteinte de la neutralité carbone en 2050, et peut l'être de la stabilité des prix de l'électricité<sup>1</sup>, à des prix abordables pour l'industrie comme pour les clients particuliers.

C'est aujourd'hui une filière mature avec en France un parc de réacteurs et des outils industriels ayant une moyenne d'âge de 40 ans environ. Des TPE, PME, grandes entreprises, *start-up* et centres de recherches représentant plus de 3 000 entités portent ces activités avec environ 220 000 emplois engagés.

L'enjeu est désormais de poursuivre l'exploitation dans la durée et de faire émerger les innovations qui garantiront l'avenir de la filière pour les 40 années qui viennent.

<sup>1</sup> Notamment à l'issue de l'accord intervenu au conseil énergie du 17 octobre 2023 permettant un découplage partiel avec les prix du gaz, alors que ce couplage avait temporairement affaibli cet avantage du nucléaire en 2022 et 2023.

Ces innovations amèneront avec elles de nouveaux talents essentiels pour l'avenir de la filière.

Or l'industrie nucléaire apparaît jusqu'ici comme une industrie réputée pour sa stabilité.

Plusieurs raisons en sont la cause.

C'est d'abord une industrie sensible. Plusieurs accidents majeurs l'ont marquée. Elle produit aussi des déchets à vie longue. Dans ces conditions, ses procédés sont très rigoureusement établis, suivis et contrôlés à l'instar d'autres industries sensibles comme l'aéronautique ou le spatial. Rigueur de sûreté et innovation sont-elles contradictoires ? Nous verrons que non un peu plus loin.

C'est aussi une industrie de temps long. Il faut compter une quinzaine d'années entre le lancement des études d'un projet de nouveau réacteur et la production des premiers kilowatt heures d'électricité. C'est l'échelle de temps des projets d'infrastructures, autoroute ou voie ferrée. Il n'est aussi pas étonnant que jusqu'ici nous n'ayons vu quasi exclusivement que de très grands acteurs publics ou proches lancer ce type de projet. Ils sont les seuls à avoir les capacités financières suffisantes dans la durée.

C'est enfin une industrie de petites séries pour les réacteurs à grande puissance. Là où les constructeurs d'avions annoncent des commandes de la centaine d'unités, dans le nucléaire civil, il est exceptionnel jusqu'ici de dépasser la dizaine de projets.



Cependant, les 3 dernières années ont vu la floraison de beaucoup d'acteurs privés à l'international aussi bien qu'au niveau national qui proposent des innovations remarquables.

Au niveau national, le GIFEN au travers de sa commission Innovation et le pôle de compétitivité Nuclear Valley œuvrent aujourd'hui à faire émerger un nouveau dynamisme dans notre industrie nucléaire. Les perspectives sont prometteuses.

Nous vous proposons de décrypter quelques clés pour réussir.

## Innovation et sûreté

La sûreté est indissociable de la pérennité de l'industrie nucléaire. Ce principe s'applique à chaque exploitant. Tous sont d'ailleurs solidaires en cas d'accident sérieux touchant l'un d'entre eux.

La sûreté n'est pas à confondre avec l'immobilisme.

La sûreté des réacteurs existants s'améliore d'ailleurs au cours du temps au travers des ré-examens décennaux des installations et en tenant compte des enseignements des incidents rencontrés, mineurs ou majeurs et des retours d'expérience à l'international. Les réacteurs 900 MW du parc français, conçus dans les années 1970-1980 vont atteindre un niveau de sûreté proche de celui des réacteurs EPR au terme de leur quatrième visite décennale. Les innovations de l'EPR conçues dans les années 1990-2000 ont ainsi tiré celles de ces réacteurs au service d'un encore meilleur niveau de sûreté. L'industrie française a su mettre au point les méthodes et outils permettant de réaliser les modifications nécessaires sur des réacteurs pourtant déjà construits et de manière générale sur toutes les installations nucléaires de base (INB). Pensons aux robots qui ont permis de renforcer la protection du radier de ces réacteurs sur la référence que constitue l'EPR.

Cette innovation tirée par la sûreté sur les installations existantes est avant tout une innovation de méthodes d'ingénierie et d'outils de réalisation. Ce sont des « briques technologiques » nouvelles mises au point par des entreprises de toute taille du secteur répondant à des cahiers des charges exigeants.

L'analyse sûreté peut être aussi tirée par des innovations technologiques issues d'autres secteurs. Pensons aux méthodes de fabrications additives, aux nouvelles technologies d'exams non destructifs ou aux nouveaux outils numériques utilisant des technologies de l'information innovantes comme les jumeaux numériques, l'intelligence artificielle, l'IoT, la réalité virtuelle ou augmentée. Il faudra définir les règles de sûreté permettant de juger de l'acceptabilité de leur usage sur les systèmes critiques du nucléaire comme le fait aujourd'hui le secteur aéronautique avec des pièces issues de la fabrication additive sur les moteurs d'avion ou avec l'IA comme aide pour le suivi du trafic aérien. À l'industrie et aux régulateurs de définir des programmes de travail sur des cas concrets forts de ces expériences transverses et d'y consacrer des moyens adaptés.

La démonstration de sûreté des nouveaux petits réacteurs modulaires (SMR) pose de nouveaux défis.

La viabilité de leur modèle économique repose sur la fabrication de séries, et donc de l'implantation de réacteurs dans des pays différents avec le moins d'écart possible. Or les règles de sûreté sont des compétences nationales et des différences existent souvent entre États alors même que les projets sont réalisés par les mêmes vendeurs. L'exemple le plus fameux est le panneau de repli câblé du contrôle de commande numérique de l'EPR au Royaume-Uni, requis par le régulateur britannique alors que le régulateur français n'exige pas cette technologie.

Pour les SMR une démarche multinationale de sûreté sur un projet est indispensable pour éviter de tels écarts.

L'approche conjointe du projet Nuward et des autorités de sûreté finlandaises, françaises et tchèques pour analyser ensemble les caractéristiques techniques porte la promesse d'une belle réussite.

Sur les réacteurs de grandes tailles, y compris existants, ce renforcement de la proximité des analyses techniques est aussi un atout majeur tout particulièrement s'agissant de la poursuite de l'exploitation des réacteurs dans la durée jusqu'à 60 ans voire au-delà.

## Innovation et financement

Dans une industrie du temps long, très capitalistique, où chaque solution technologique se doit d'être qualifiée par l'exploitant et validée par l'autorité de sûreté, il y a peu de place pour l'imprévu et donc pour l'innovation spontanée. Les petites structures, nombreuses dans la chaîne de sous-traitance de la filière nucléaire, ont besoin d'être soutenues pour parvenir à innover. Il nous faut donc, aux côtés de la puissance publique, construire et adapter des mécanismes pour faciliter l'émergence de l'innovation dans la filière et transformer les innovations technologiques de nos PME et *start-up* en succès commerciaux et parts de marché à l'international. Le nucléaire civil redémarre dans beaucoup de pays, autant d'opportunités pour positionner une offre technologique française ambitieuse. Comment accompagner et financer ces innovations ? Nous proposons ci-après quelques pistes « pratiques » :

- Faciliter la rencontre technologique entre le petit acteur innovant et l'utilisateur final. En encourageant par exemple des programmes passerelles entre les grands industriels de la filière, les laboratoires / instituts de recherche et les *start-up*/TPE/PME (accès pour les porteurs de projets à des laboratoires, des expertises, des expérimentations en conditions réelles « bacs à sable » chez les exploitants...).
- Favoriser l'émergence de l'innovation avec des réflexions en coûts complets incluses dans les critères d'achat des appels d'offre des donneurs d'ordres.
- Fédérer une communauté d'investisseurs français autour de la thématique du nucléaire. Ce travail a été entamé par le pôle Nuclear Valley, qui a créé un

Club Investisseurs « Nuc Tech » regroupant le Fonds France Nucléaire, BPI Investissements et 13 acteurs du financement privé.

- Renforcer les fonds propres des petits acteurs. Pour les *start-up* qui s'y lancent, innover dans le nucléaire constitue un véritable parcours du combattant, avec un ticket d'entrée très élevé. Il s'agirait de créer un fonds d'amorçage / capital risque pour les *start-up* de la filière nucléaire, et un fonds de capital développement investissant des « petits » tickets (0,5 à 3 M€ - Small Cap) pour les projets d'investissement des petites PME industrielles. Ces fonds s'inscriraient en complémentarité du Fonds France Nucléaire.
- Mettre en œuvre des dispositifs de facilitation et de soutien financier public complémentaires. Des systèmes de contre-garantie ou caution apportés par BPI France pourraient par exemple inciter les acteurs privés à financer les projets.

## Nouveaux réacteurs SMR et AMR

Les annonces présidentielles de février 2022 confortées par le lancement de l'AAP France 2030 « Réacteurs innovants » ont incontestablement stimulé et accéléré l'innovation de rupture au sein de la filière française. Des nouveaux modèles de petits réacteurs, des nouveaux combustibles nucléaires (HALEU, RSF), de nouveaux usages, de nouveaux services associés émergent. Le Pôle de compétitivité Nuclear Valley accompagne ainsi aujourd'hui plus de 15 initiatives de nouveaux réacteurs innovants de générations III+ et IV (< 300 MWe). La dynamique française sur ce marché mondial prometteur, estimé à 150 milliards de dollars à horizon 2040, est lancée. Un vent nouveau, rafraîchissant souffle sur notre filière.

L'AIEA (Agence Internationale de l'Énergie Atomique) recense dans le monde plus de 80 initiatives de « petits » réacteurs innovants en cours de développement. La concurrence est d'ores et déjà prégnante. Les États-Unis et le Royaume-Uni sont déjà très agressifs commercialement sur le futur marché européen du SMR/AMR (par exemple l'américain NuScale en Pologne et Roumanie). Début 2023, le projet français Nuward a lui signé des accords de coopération de développement de nouveaux projets en Finlande, Suède et Pologne.

Mais la route sera longue et coûteuse. Selon le projet, nous estimons l'effort initial d'investissement pour un démonstrateur de 1 à 5 Mds€ par technologie, tout particulièrement lorsqu'un développement du combustible est nécessaire. L'allocation France 2030<sup>2</sup> dévolue à ces réacteurs ne nous paraît pas suffisante pour couvrir l'ensemble des projets. Un soutien financier complémentaire des États, des régions mais aussi pourquoi pas des industriels du secteur privé, devant décarboner leur *process*, sera nécessaire.

Pour conquérir des parts de marché, les initiatives françaises devront à la fois pousser loin la logique de série,

<sup>2</sup> <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/09.06.2023-DP-France2030-Nucleaire-formation-et-innovation.pdf> ; 1,2 G€ annoncés en juin 2023.

de fourniture conventionnelle, mais aussi faire la preuve de la fabrication modulaire, tout en accélérant quelques technologies disruptives permettant aux concepts-réacteurs d'éclorre rapidement, à un prix compétitif.

L'Europe n'est pas en reste. À l'initiative de la France, l'Alliance du Nucléaire regroupant à date 14 États membres de l'Europe se mobilise. La plate-forme européenne de recherche sur le nucléaire SNETP est également au rendez-vous. On pourra souligner notamment :

- Le plan SMR/AMR européen (EU SMR pré-partnership) en collaboration étroite entre les industriels, les régulateurs, et la communauté de recherche européenne de R&D&I avec la participation active de différents services de la Commission européenne.
- Des projets européens en cours ou en préparation dans le cadre du programme européen Euratom.
- Des capacités de test et de qualification seront financées par Euratom, sur les technologies qui intéressent France 2030. Certaines capacités d'essai, coûteuses et essentielles, non disponibles en France nécessiteront des accords de partenariats pour mutualiser les développements par filière de réacteur et éviter les doublons ;
- Cependant, le programme Euratom lié à la fission, de moins de 60 M€/an pour la R&D&I, devrait être significativement revu à la hausse. Pourquoi ne pas être innovant en inscrivant dans la feuille de route des fonds FEDER gérés par les régions le financement de projet d'innovations dans le nouveau nucléaire ? Ou inclure les projets nucléaires dans le portefeuille de l'*innovation fund* ou même du programme "Permanent structured cooperation : PESCO" à l'instar de la défense européenne ?
- L'Europe, à l'image de ce qu'elle a fait pour les batteries et l'hydrogène, pourrait également lancer un IPCEI (Important Projects of Common European Interest) SMR/AMR ou une alliance industrielle pour faciliter la mobilisation des fonds nécessaires.

L'Europe se doit de protéger les intérêts industriels et économiques de ses pays membres sur le marché de demain très concurrentiel des SMR/AMR et devra prendre des mesures appropriées (imposer du *local-content* en Europe, lever les barrières d'Export Control Intra EU...).

Enfin, pour les initiatives SMR et AMR qui n'auront pas été retenues à l'AAP France 2030, les solutions techniques développées, d'intérêt filière, pourraient incrémenter non seulement la valeur ajoutée des initiatives lauréates mais aussi nourrir la modernisation du parc nucléaire existant. Elles mériteront donc toute notre attention et notre soutien.

## Briques technologiques

Dans le secteur du nucléaire, le nombre de modèles de réacteurs produit par un même vendeur est très limité, deux ou trois. Ces modèles restent également pendant de nombreuses années sur le marché. Ce paysage

avec peu de nouveaux produits donne ainsi l'image d'un certain immobilisme.

Or l'innovation existe dans notre secteur et elle réside souvent dans des « sous-projets » ou des « briques technologiques ».

Elles sont de plus petites tailles – coût élémentaire de quelques millions à quelques dizaines de millions d'euros – et sont également accessibles à des petites entreprises voire des *start-up*.

En termes de communication, elles sont cependant relatives à des sujets très pointus, peu accessibles au non-expert, bien moins flamboyantes et donc visibles que les nouveaux projets de réacteurs.

Pourtant la filière nucléaire est extrêmement active et pertinente pour proposer de telles briques innovantes. Et les chances de succès sont aussi plus importantes.

La démarche France Relance lancée en 2021 a été particulièrement efficace.

Dans le dossier de retour d'expérience que nous avons présenté à la DGE en décembre 2021, nous citons 160 projets déposés, 77 lauréats pour un montant investi par les industriels de 343 M€ pour un soutien de l'État de 100 M€.

Le pourcentage de soutien s'est révélé assez modeste en moyenne, autour de 25 % pour les grandes entreprises et 40 % pour les plus petites, attestant par là

même la relative insuffisance de l'enveloppe de soutien public au regard de l'épaisseur du portefeuille d'innovations des entreprises,

Nous recommandons donc vivement, en complément du dispositif lancé pour les nouveaux SMR dans le cadre France 2030, de lancer rapidement un dispositif similaire pour soutenir, accélérer l'innovation technologique de la filière nucléaire française, pour utiliser encore davantage ce portefeuille d'innovations pour le nouveau nucléaire et le parc existant

## Conclusion

À l'heure de la réindustrialisation, de la souveraineté énergétique et de l'objectif de neutralité carbone à horizon 2050, force est de constater que la filière nucléaire française et ses ETI, PME se mobilisent et innovent pour être au rendez-vous. Il faut néanmoins aller plus vite et plus loin.

Le pôle Nuclear Valley et le GIFEN sont prêts à accompagner les pouvoirs publics pour mettre en œuvre les recommandations proposées dans cet article.

# Le modèle du *New Space* est-il l'avenir des petits réacteurs modulaires ?

Par Antoine CHESNE  
Ingénieur et économiste

L'industrie nucléaire connaît aujourd'hui une période de forte émulation, marquée notamment par les promesses des petits réacteurs modulaires et l'émergence de *start-up* innovantes. Il est aussi notable que le nucléaire partage avec le spatial des origines communes, puis un développement parallèle, avec un essor rapide dans les années 1960 et 1970, suivi d'une période de relative stabilité des années 1980 aux années 2000. Depuis une dizaine d'années, l'industrie spatiale est néanmoins bouleversée par la révolution du *New Space*, redynamisant la filière. Cette transformation inspire aujourd'hui l'essor des SMR portés par le *New Nuclear*, dont l'inspiration technique, économique et politique est directement issue du *New Space*. En adoptant ses codes : miniaturisation, répliquabilité, réutilisabilité, en attirant ses entrepreneurs, et en menant des politiques publiques semblables, le nouveau nucléaire cherche à répliquer la réussite du spatial et à trouver la voie qui lui permettra de jouer un premier rôle dans la transition énergétique.

Parmi les opportunités qu'offre la relance de l'industrie nucléaire, le développement des petits réacteurs modulaires (en anglais SMR "Smart Modular Reactors"), qu'ils soient mini-, micro-, voire nano-, est appelé à jouer un rôle majeur dans le renouveau de la filière et l'arrivée de la quatrième génération. Futurs composants essentiels de l'essor du Nouveau Nucléaire, les SMR promettent de révolutionner les codes traditionnels de la filière nucléaire en adoptant des solutions empruntées à de nombreux autres secteurs technologiques. Pour le nucléaire, l'enjeu est de s'ouvrir à des méthodes et des applications issues de secteurs jusqu'alors très éloignés de celui-ci, pour se décupler et prendre enfin une vraie place dans la transition énergétique. À ce titre, l'Atome devra savoir apprendre d'autres filières, et prendre pour modèle celles qui ont su se transformer et réussir leur mutation. En particulier, l'industrie spatiale apparaît aujourd'hui comme un exemple à suivre : la révolution du *New Space* a chamboulé l'écosystème traditionnel pour multiplier les possibilités d'accès et d'utilisation de l'Espace. Né aux États-Unis, le phénomène *New Space* influence désormais outre-Atlantique les codes du *New Nuclear* américain, les passerelles entre les deux mondes étant nombreuses. L'objet de cet article est d'analyser les facteurs de succès du *New Space* et ses liens avec le nouveau nucléaire, et d'en tirer des leçons pour encourager l'essor des SMR de ce côté de l'Atlantique.

Si l'on retrouve dans la littérature ou dans les médias des références occasionnelles au *New Space* pour le nucléaire, rares sont les auteurs à avoir jusqu'alors véritablement caractérisé la relation entre les deux univers. On citera notamment les articles de Crombrughe

(2022)<sup>1</sup>, Scherer (2022)<sup>2</sup>, ou Rauch (2023)<sup>3</sup>. Si évoquer Espace et Nucléaire ouvre le sujet de la propulsion nucléaire spatiale, nous nous concentrerons ici sur l'inspiration du spatial pour les SMR terrestres.

## Deux filières aux origines communes et aux histoires parallèles

Le premier lien à faire entre Espace et Nucléaire est historique. Ces filières partagent en effet une histoire commune : initiées par des percées dans le domaine de la physique, elles connurent tout d'abord des applications militaires du fait de la Seconde Guerre mondiale, qui accéléra leur passage de la théorie à la pratique. Les années 1950 virent un tournant avec l'ébauche d'applications civiles et pacifiques, tant pour l'accès à l'Espace que pour l'utilisation de l'Atome. Aux yeux du grand public, énergie nucléaire et conquête de l'Espace incarnaient alors la promesse du progrès, tout en étant aussi pour les États un symbole de prestige et d'influence. Dans les deux filières, les décennies 1960 et 1970 furent celles des grands programmes nationaux : programme Apollo américain pour l'Espace, plan Messmer français dans le nucléaire, chacun coûtant durant une décennie plusieurs pourcents de la dépense publique chaque année. Pierre Messmer n'hésitait

<sup>1</sup> CROMBRUGGHE (DE) G. (2022), "Is the nuclear industry on the verge of its NewSpace moment?", LinkedIn.

<sup>2</sup> SCHERER K. (2022), "What nuclear energy can learn from space technology advancement", Maddynews.

<sup>3</sup> RAUCH J. (2023), "Nuclear energy looks to SpaceX, Tesla, and Apple for inspiration", *Australian Financial Review*.

alors pas à comparer son programme nucléaire au programme Apollo, qui partageait les mêmes facteurs de succès : une volonté politique forte et constante, un investissement massif et une organisation industrielle hors-pair<sup>4</sup>.

Le dynamisme des industries spatiales et nucléaires atteignit néanmoins ses limites, et dès les années 1980, les deux filières connurent une sorte de plateau technologique, du moins en Occident. Les raisons furent multiples : ralentissement économique, augmentation du coût des crédits, rigueur budgétaire, mais aussi inertie industrielle et absence de nouvelle innovation de rupture. Ce ralentissement, qui toucha la filière nucléaire encore jusqu'à récemment, fut perceptible dans le spatial jusque dans les années 2000 ; l'aboutissement de l'assemblage de la Station spatiale internationale et l'échec du programme Constellation fit prendre conscience des impasses organisationnelles et financières du secteur. C'est à partir de cette période qu'apparaît un début de renouveau du spatial, avec l'émergence de nouveaux acteurs privés conjointement à un changement des politiques publiques, apportant de nouvelles méthodes qui allaient donner un nouveau souffle à la filière. Le *New Space* était né.

## Comment caractériser le *New Space* ?

Le phénomène du *New Space* peut être défini comme la convergence de trois facteurs contribuant à son succès : une nouvelle approche technologique, un cadre politique spécifique, et une ambition économique.

En matière industrielle, le *New Space* partit du constat que l'accès à l'espace était limité par la complexité et la spécialisation des systèmes utilisés. L'approche du *New Space* a consisté en une simplification, une standardisation, et, autant que possible, la réutilisation des plateformes, satellites ou lanceurs, pour disposer de moyens plus nombreux et moins chers. En bénéficiant des progrès de la simulation numérique et de la miniaturisation des équipements, le *New Space* a pu rendre les technologies spatiales plus industrialisables et ainsi passer à grande échelle.

Pour ce qui est du cadre politique, l'approche couramment retenue aujourd'hui est la délégation aux entreprises par les agences spatiales non plus seulement de la fabrication des systèmes, mais aussi de la définition de la solution et sa conception dans le cadre de contrats commerciaux de service. En ne développant pas par elle-même de remplaçant à la navette spatiale, mais en confiant au privé, SpaceX, Orbital ATK (acquis par Northrop Grumman) et Boeing la desserte de l'ISS, la NASA a défini un nouveau schéma, rapidement adopté des deux côtés de l'Atlantique pour des missions civiles et militaires de surveillance satellitaire (Copernicus...) ou de télécommunications.

Enfin, le *New Space* est également caractérisé par une nouvelle donne économique. Les *start-up* spatiales

bénéficient, comme dans d'autres secteurs de la tech, du soutien des fonds de capital-risque (venture capital) qui assurent l'essentiel des coûts de développement. Les financements publics demeurent le socle des industries spatiales nationales, mais sont désormais fléchés dans des contrats commerciaux, sécurisant les investisseurs sur le long terme tout en contraignant les entreprises à passer des étapes clés de mise en service pour en bénéficier. Cette dialectique entre stratégies institutionnelles et structures privées plus légères et plus agiles sont les clefs du succès de la révolution *New Space*.

## Aux États-Unis, l'émergence d'un *New Nuclear* calqué sur le *New Space*

Le début du renouveau nucléaire américain a été amorcé vers la fin des années 2000 avec la création des premières *start-up* du secteur, TerraPower (2006), NuScale (2007) ou encore X-Energy (2009). À cette époque, le nucléaire ne figurait pas encore en tête de liste parmi les priorités du Department of Energy (DoE), l'Amérique connaissant la révolution des gaz de schistes et avec elle l'abondance et l'autonomie énergétique. C'est davantage au milieu des années 2010 que les Américains réalisèrent l'importance de relancer leur filière nucléaire par la conjonction de trois facteurs : les échecs du nucléaire traditionnel, symbolisés par la faillite de Westinghouse et les dépassements budgétaires de son AP1000 ; la prise de conscience de l'enjeu écologique ; et, peut-être encore plus important aux yeux des Américains, le retard technologique accumulé face à la Chine et la Russie en matière de nucléaire civil dit de quatrième génération. Le réveil nucléaire américain fut spectaculaire, avec une augmentation de 50 % du budget du DoE envers le nucléaire entre 2016 et 2020<sup>5</sup>.

Plus intéressant encore, c'est la méthode du DoE qui rompt avec les pratiques habituelles de la filière nucléaire. Celui-ci alloue effectivement des crédits importants aux différents acteurs privés du nucléaire civil, mais selon des méthodes très similaires à celles... du *New Space* ! L'approche retenue consiste en effet à mettre en place des contrats de service, subventionnant indirectement, mais efficacement, le développement de petits réacteurs modulaires. Dans ce schéma, le public se constitue client du privé, en lui laissant une large marge de manœuvre quant aux propositions techniques et au *design*. Cette approche a été calquée, volontairement, sur le *New Space*. Comme la Nasa avec l'ISS, le DoE utilise ses laboratoires nationaux comme des bacs à sable pour les acteurs privés. C'est notamment le cas de l'Idaho National Lab, qui accueille le Molten Chloride Reactor Experiment (MCRE) de TerraPower et Core Power, et, jusqu'à son annulation en novembre 2023, du Carbon Free Power Project (CFPP) de NuScale, dont le client était une agence inter-locale de réseaux électriques municipaux.

<sup>4</sup> BEZAT J.-M. (2023), Nucléaire : le « plan Messmer », un programme Apollo à la française, *Le Monde*.

<sup>5</sup> MERLIN C. (2020), « Le renouveau du secteur nucléaire aux États-Unis. De Make America Great Again à l'Energy Dominance », Études de l'Ifri.

Inspiré par la nouvelle approche du DoE et aussi par ses expériences de contrats passés avec des acteurs du *New Space*, le Department of Defense (DoD) s'intéresse également au nouveau nucléaire pour ses propres besoins en électricité. En 2020, BWXT, X-Energy et Westinghouse ont reçu un contrat afin de développer un nano-réacteur de 1 à 5 MW, de moins de 40 tonnes et transportable pour ses opérations extérieures. De façon encore plus proche du nucléaire civil, en 2023 la *start-up* Oklo a été gratifié par l'US Air Force d'un contrat pour fournir de l'électricité à sa base aérienne d'Eielson, en Alaska. Tout comme pour ses lancements spatiaux, le DoD cherche à ne pas dépendre d'un seul fournisseur en matière de nucléaire et fait désormais jouer la concurrence.

## Des passerelles entre les deux mondes

Le développement du *New Nuclear* suit les préceptes adoptés par l'industrie spatiale pour accélérer le temps de développement et ainsi diminuer les coûts. La *start-up* de fusion nucléaire Avalanche Energy définit par exemple une double approche dite *fast-to-test* et *test-fail-fix*, censée être plus efficiente en capital et permettant d'intégrer des innovations de rupture qui arriveraient au cours de son cycle de développement<sup>6</sup>. Cette méthode, dite approche itérative, est aussi pratiquée dans la fission par Kairos Power qui réalise à différentes échelles des maquettes fonctionnelles de son réacteur. En Europe, cette approche est également pratiquée par des *start-up* comme Newcleo, qui testera sa boucle au plomb sur une maquette non nucléaire en Italie, ou Naarea qui a annoncé en octobre 2023 avoir testé un prototype de boucle en carbure de silicium avec des sels non-radioactifs.

D'une certaine manière, le nucléaire est désormais considéré aux États-Unis comme un secteur de la tech comme les autres. Son premier cycle décennal de venture capital arrive d'ailleurs à son terme, conclu par des introductions en bourse *via* des SPAC, comme celle de NuScale en 2022 ou actuellement en cours pour X-Energy et Oklo, malgré un contexte financier morose. De Bill Gates (TerraPower, Commonwealth) à Sam Altman (Oklo), fondateur d'OpenAI (Chat GPT), nombreux sont aujourd'hui les entrepreneurs et financeurs du *New Nuclear* issus de la Silicon Valley, mais aussi, élément intéressant, du *New Space*. Parmi ceux-ci, on citera notamment les co-fondateurs d'Avalanche, le CEO Robin Langtry et le COO Brian Riordan, issus de Blue Origin, mais aussi l'ancien ingénieur de SpaceX Doug Bernauer, fondateur de Radiant Nuclear, ou encore l'homme d'affaires Kam Ghaffarian, co-fondateur d'Axiom et d'Intuitive Machines dans le spatial, mais aussi d'X-Energy.

On retrouve ces interconnexions chez les financeurs, notamment en capital-risque. Le fonds C5 Ventures, habitué aux *deals* spatiaux (Axiom...) a rejoint le tour de table d'X-Energy. L'inverse est aussi possible,

<sup>6</sup> WESOFF E. (2023), "Avalanche raises \$40M to pursue vision of tiny nuclear fusion reactor", Canary Media.

puisque le fonds Breakthrough Energy Ventures mené par Bill Gates, ordinairement dédié aux *cleantechs*, a investi chez le fabricant de fusées 100 % réutilisables Stoke Space. Les Européens ne sont pas non plus en reste : en France, le gestionnaire d'actifs Audacia, fondé par Charles Beigbeder, vient de créer un fonds dédié au nouveau nucléaire, Isospin Exergon, après en avoir établi un précédent, Geodesic Expansion, pour le spatial. Autre fonds VC nucléaire en Europe, le belge Nuketech compte parmi ses fondateurs Gueric de Crombrughe, ancien directeur de ScanWorld et passé par l'ESA.

## Quelles leçons tirer de la révolution du *New Space* pour le nucléaire ?

Si le *New Space* n'est déjà plus si nouveau, avec des acteurs désormais bien établis, le *New Nuclear*, lui, n'a pas encore atteint sa phase de pleine maturité aux États-Unis et encore bien moins en Europe. À ce titre, le retour d'expérience du *New Space* peut profiter au renouveau du nucléaire à plusieurs égards.

Parmi les points-clefs à retenir pour le nucléaire, on citera en premier lieu le « mode *start-up* », permettant d'aboutir à des innovations de rupture en avançant plus vite, avec moins d'argent, et en se libérant de l'inertie propre aux trop grandes organisations. Le recours aux capitaux privés pour financer en fonds propres le développement des *start-up* est indispensable, de la même manière que l'ensemble de la tech. Il faudra s'assurer de la disponibilité en France de ces ressources, allant de l'amorçage (*pre-seed*, *seed*) avec des incubateurs, jusqu'aux levées de fonds plus tardives (Séries B, C...), qui font encore souvent défaut dans le spatial français. En parallèle de l'apport d'argent privé, le rôle de l'État, dans le spatial comme le nucléaire, demeure indispensable. Celui-ci doit définir un cadre attractif pour les investisseurs, en apportant une vision et un cadre réglementaire de long terme, et faciliter l'installation de sites de tests et de prototypes. En matière d'utilisation d'argent public, l'exemple du spatial montre que les contrats d'achat de long terme d'acteurs institutionnels sont plus efficaces que les subventions directes au développement, car d'une part ils motivent les *start-up* à aboutir réellement à un résultat, et d'autre part ils créent un marché, indispensable pour attirer les financeurs. Le retour d'expérience de l'industrie spatiale démontre également qu'être performant à l'export est impossible sans un marché intérieur qui permet de faire ses preuves. La domination de SpaceX sur le marché des lancements mondiaux, y compris des satellites européens, a été possible parce que cette société a pu bénéficier d'un volume de commande conséquent de la Nasa, mais aussi, et surtout, du DoD ; ce qui fait d'ailleurs défaut à Arianespace en Europe. Enfin, autre enjeu institutionnel majeur, sans doute encore plus critique dans le nucléaire que dans le spatial, celui de la certification et de la sûreté. Le rôle de l'Agence de Sûreté Nucléaire est amené à considérablement évoluer dans les prochaines années, ne devant plus seulement contrôler les installations des opérateurs,

mais désormais analyser et valider des *designs* de fabricants en série. L'ASN pourrait s'inspirer de l'organisation d'agences aéronautiques et spatiales comme l'EASA ou la FAA, qui émettent des certificats de types pour les aéronefs.

On peut aujourd'hui estimer à une petite dizaine d'années le décalage entre le *New Space* et le *New Nuclear*, qui est en 2023 dans une situation proche de celle de la filière spatiale au tournant des années 2010. Le renouveau du nucléaire doit désormais gagner en maturité. Ainsi, parmi les différences importantes qui demeurent entre les deux filières, l'aspect sécuritaire, ainsi que la compréhension et l'acceptation par le grand public demeurent plus complexes dans le cas du nucléaire. Aussi, il est intéressant de noter que le *New Space* s'est aujourd'hui étoffé, avec de nombreuses relations clients-fournisseurs à l'intérieur même de cet écosystème désormais industrialisé. À l'inverse, les *start-up* du *New Nuclear* travaillent encore trop en « silos », et celles-ci s'appuient encore pour l'essentiel sur la *supply chain* existante des industriels traditionnels. Toutefois, la mécanique est désormais enclenchée, avec les États-Unis en fers de lance, qui, forts de leur législation, de l'agilité de leur secteur public et de leurs financeurs issus de la tech, ont établi des codes du *New Nuclear* très fortement basés sur ceux du *New Space*.

Alors, qu'en retenir pour la France ? Qu'il faudra aller vite, selon le schéma tester-industrialiser-commercialiser, en bousculant les normes établies. Développement itératif et répliquabilité (fabrication en série, plateformes standardisées...) seront les clefs du nucléaire

de demain. Le secteur public, État, EDF, CEA, ASN, et même Armée, devront donner toutes les cartes en main aux acteurs privés pour qu'ils mettent en œuvre leurs solutions en maîtrisant leur risque financier ; tout en étant parcimonieux pour leurs propres dépenses en stimulant le recours au capital privé. Enfin, le nucléaire devra aussi savoir sortir de son isolement et de sa zone de confort, et savoir s'adapter aux besoins et aux méthodes de ses clients non-nucléaires. Tout comme l'industrie spatiale a su le faire, en adressant des services clefs-en-main d'observation de la Terre ou de connectivité à des clients non-spatiaux, le nucléaire devra aussi produire de l'hydrogène, décarboner de la chaleur, ou faire fonctionner des *data centers*. Tout comme le *New Space* a adopté un fonctionnement matriciel, les *start-up* du nouveau nucléaire devront aussi trouver leur voie et tisser des liens, entre développeurs technologiques, fabricants, équipementiers, porteurs de projet et exploitants. Tous ces éléments, ajoutés à la motivation des entrepreneurs et travailleurs du nucléaire, devraient ainsi permettre son essor et engendrer un vrai impact pour la transition énergétique et le climat.

# Les évolutions de l'opinion publique sur le nucléaire en France et en Europe

Par David LÉVY et Henri WALLARD

Co-fondateurs de NewCovalence

L'énergie nucléaire, invisible et récente, a connu une histoire mouvementée marquée par sa dualité civile/militaire et trois accidents aux retentissements mondiaux. L'idéologie et la politique ont souvent pris le pas sur l'économie et la technique.

En Europe, après 30 ans peu porteurs, la donne a changé en 2022. Ce changement apparaît plus en lien avec la guerre en Ukraine et les craintes de pénurie qu'à la lutte contre l'effet de serre.

Dans le monde, de nombreux pays comptent sur le nucléaire pour décarboner l'électricité. Et des voix de jeunes militants écologiques commencent à s'exprimer en faveur du nucléaire, à rebours des doctrines historiques.

Le nouveau nucléaire nécessitera un grand professionnalisme dans le processus de déploiement, et un cadre démocratique irréprochable comme celui mis en place pour le site de stockage en profondeur.

Des annonces et des plans insuffisamment préparés pourraient rendre certains projets beaucoup plus difficiles malgré cet environnement favorable.

## Introduction

Le 15 avril 2023 l'Allemagne déclarait sortir définitivement du nucléaire et arrêta ses trois dernières centrales en activité. Des militants écologistes célébraient l'évènement à Berlin avec un dinosaure moribond symbolisant la fin de cette énergie détestée. Challengé en septembre 2023 par les libéraux allemands qui demandaient de surseoir au démantèlement des réacteurs, le Chancelier Olaf Scholz confirmera qu'en Allemagne le nucléaire est un « cheval mort ». Sa réponse était sans doute motivée par le débat interne au pays, mais avec en arrière-plan les échos de la dynamique nouvelle dans beaucoup d'autres pays. De l'autre côté du Rhin la France pousse depuis 2022 en faveur du nucléaire et s'est associée avec 14 pays dans une Alliance européenne du nucléaire ; dans le reste du monde et notamment aux États-Unis, en Chine et en Russie les ambitions nucléaires sont fortes et se manifestent de façon visible à l'export. Après une histoire tourmentée des changements spectaculaires ont eu lieu ces dernières années qui vont influencer le futur du nucléaire.

## Une histoire mouvementée

Le nucléaire est une industrie jeune. Quel chemin rapidement parcouru depuis que Marie Curie fut la première femme couronnée du Prix Nobel ? Rappelons que la découverte formelle de la fission nucléaire n'a pas 100 ans. Tout est allé très vite et le nucléaire ne bénéficie pas d'un ancrage profond et historique dans nos

représentations comme les autres sources d'énergie. La biomasse nous rappelle le coin du feu, l'hydraulique les moulins à eau et l'éolien les moulins d'Alphonse Daudet ou ceux de Don Quichotte.

Aussi, l'énergie nucléaire n'est pas accessible simplement et directement à nos sens comme les énergies ancestrales telles le vent, le feu ou le soleil. Elle ne bénéficie donc pas comme les autres d'une longue familiarité et reste pour beaucoup mystérieuse, d'autant qu'elle est invisible. Enfin le nucléaire est vu par certains comme une des actions négatives de l'homme contre la nature. Il ne faut pas sous-estimer ces représentations imaginaires et bien que le nucléaire soit une énergie décarbonée il fait l'objet d'*a priori* négatifs comme dans le célèbre dessin animé des *Simpson* avec la Springfield Nuclear Power Plant dirigée par l'antipathique Charles Montgomery Burns.

Avec les inquiétudes exprimées sur la sûreté et les déchets, il n'est guère surprenant que lorsque des citoyens sont interrogés de façon qualitative le nucléaire fasse souvent l'objet de doutes et d'hésitations avec une dose de fatalisme. Il a porté dès le départ le halo de sa dualité civile et militaire en France avec la création du CEA. Par la suite l'histoire du nucléaire a comporté des « évènements focalisants »<sup>1</sup> tels que bien sûr Tchernobyl, Three Mile Island et Fukushima. Ces évènements ont contribué à des évolutions fortes non seulement dans les perceptions des citoyens mais aussi

<sup>1</sup> Brigidou-Bouillet, 2023.





Figure 1 : Manifestation du 15 avril 2023 en Allemagne (Source : Odd Andersen AFP).

dans la manière d'aborder les questions du nucléaire dans les médias et de façon associée dans les prises de position politiques. Ainsi, un sondage publié en mars 2011 par le magazine *Stern* montrait que 80 % des Allemands craignaient le recours à l'énergie nucléaire dans le monde et 63 % souhaitaient son abandon rapide en Allemagne<sup>2</sup>. C'est cette année-là qu'Angela Merkel confirmera le principe d'une sortie du nucléaire sur un fond de débats historiques.

Encore aujourd'hui dans le baromètre IRSN de perception des risques, Tchernobyl est parmi un ensemble d'événements catastrophiques celui que les répondants classent comme le plus effrayant (39 % en 2022, mais - 11 % par rapport à 2021) suivi par Fukushima (16 % en 2022, mais - 4 % par rapport à 2021), tandis que la pandémie de Covid-19 se situe entre les deux à 20 %.

Il est fréquemment supposé que les dirigeants politiques aient tendance à « suivre » l'opinion publique mais ne négligeons pas le fait que des orientations politiques négatives, hésitantes ou au contraire positives sur le nucléaire peuvent jouer en retour un rôle dans les perceptions.

Ainsi en France le contexte politique a été jusqu'en 2022 négatif pour le nucléaire. Au-delà des décisions d'il y a une quarantaine d'années avec l'abandon du projet de Plogoff puis du Carnet, les dernières décennies ont été marquées en France principalement par l'arrêt de réacteurs civils pour des raisons strictement politiques : arrêt de Superphénix (1997), fermeture des réacteurs de Fessenheim (2020) et, quoique moins visible, en 2019, l'abandon de la construction du projet ASTRID. Les dernières décennies ont donc été le temps de la

déconstruction, à rebours du temps qui avait précédé, avec la mise en place du plan Messmer. Pour mémoire, après des annonces ambitieuses faites par le Premier ministre en personne, et à un rythme qui impressionne encore aujourd'hui, 58 centrales avaient été construites en une vingtaine d'années.

## Le tournant climatique et la guerre en Ukraine

La prise de conscience du changement climatique est un tournant important perçu par les opinions publiques des différents pays. Même dans les pays du nord de l'Europe, au climat plus froid, les citoyens sont une majorité à avoir déjà constaté dans leur région des effets du changement climatique : 61 % en Suède et 62 % en Norvège selon l'étude ObsCop 2023<sup>3</sup> qui présente le grand intérêt d'interroger au même moment de nombreux pays.

Ces chiffres de perception du changement sont encore plus élevés plus au sud 69 % en France, et 66 % en Allemagne ; ils culminent pour atteindre 78 % en Italie et 77 % en Espagne.

Cette perception graduée du caractère localement tangible du changement climatique renforcée du nord au sud se retrouve dans les niveaux de préoccupation qui eux aussi se renforcent vers le sud. La note moyenne en 2022 de préoccupation vis-à-vis du changement climatique sur une échelle de 1 à 10 (10 signifiant une forte préoccupation) passe ainsi de 6,3 en Norvège à 7,7 en Italie avec la France entre les deux à 7,4.

<sup>2</sup> 20 minutes, 2011.

<sup>3</sup> EDF-Ipsos, 2023.

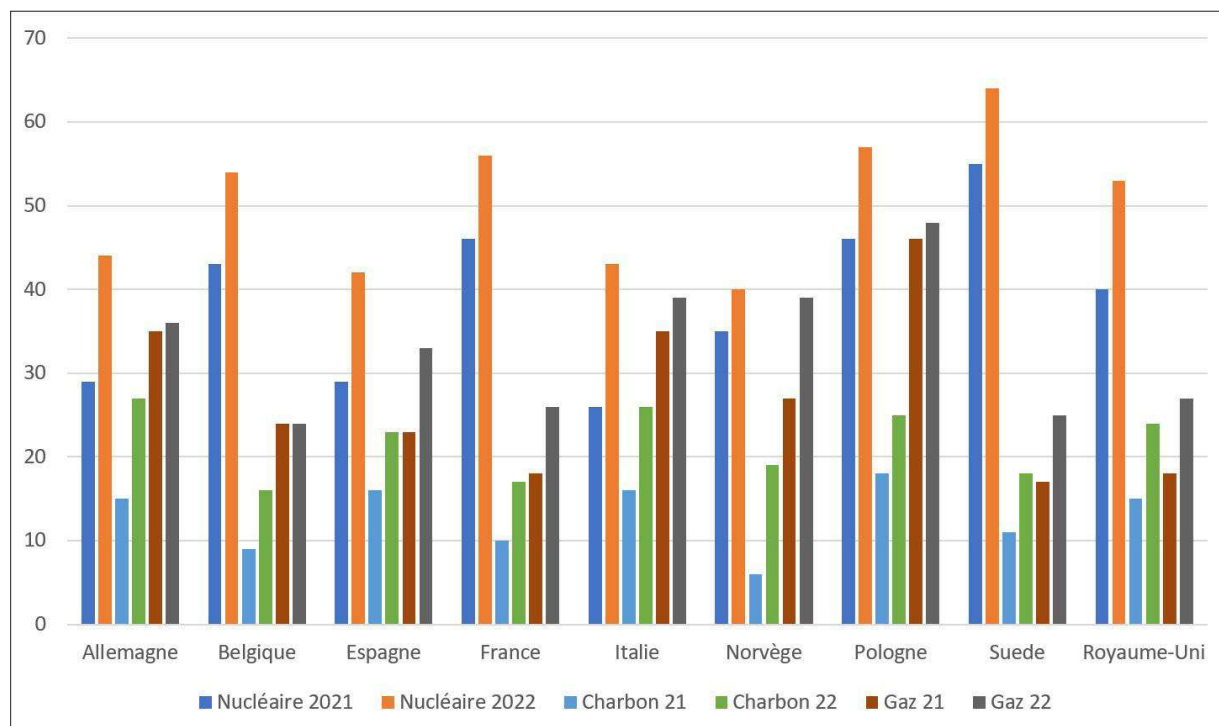


Figure 2 : Favorabilité des modes de production d'électricité.

Mais il faut éviter de conclure à un lien direct entre prise de conscience de la transition climatique et soutien au nucléaire.

En effet l'efficacité de la production d'électricité nucléaire au regard de l'émission de gaz à effet de serre (GES) est assez mal identifiée en Europe et singulièrement en France. Interrogés sur la production de CO<sub>2</sub> par les activités industrielles, les Français sont légèrement majoritaires (52 %) à considérer que les centrales nucléaires contribuent notablement aux GES (beaucoup ou assez émettrices) seulement surpassés dans cette opinion par les Italiens (57 %). Les Allemands sont un peu moins convaincus de cette contribution (43 %) tandis que seulement 30 % des Suédois pensent que les centrales nucléaires contribuent aux GES. Cette perception que l'électricité nucléaire produirait des GES peut surprendre. Au-delà des campagnes antinucléaires, l'idée que le nucléaire contribuerait aux émissions de GES est sans doute liée à la présence d'aéroréfrigérants qui avec leurs panaches de fumées blanches pourraient donner à penser à une large émission de gaz. En effet, dix sites nucléaires comportent des « cycles fermés » au bord de fleuves (Cattenom, Chooz, Nogent, Golfech, Cruas, Civaux, Chinon, Dampierre, Belleville, St Laurent) avec des tours aéroréfrigérantes impressionnantes (180 m de haut à Golfech) et des panaches de vapeur visibles de loin. Toutefois, dans tous les pays européens couverts par ObsCop (Allemagne, Belgique, Espagne, France, Italie, Norvège, Pologne, Suède) la proportion de répondants qui estiment importante la production de GES par les centrales de production d'électricité au charbon, gaz et fioul reste toutefois partout supérieure à celle des répondants qui estiment que les centrales nucléaires sont émettrices de GES.

Mais le phénomène le plus spectaculaire a été l'évolution entre 2021 et 2022 des opinions favorables à la production d'électricité selon les modes : charbon, gaz, nucléaire illustrés dans la Figure 2 ci-dessus (source : ObsCop 2022).

Cette évolution est tout à fait exceptionnelle par sa rapidité et son ampleur.

Premier enseignement : le nucléaire progresse partout, et même fortement en Allemagne (+ 15 %) alors que les réacteurs sont en 2022 sur le point d'être arrêtés. Progression très forte aussi en Espagne (+ 13 %), en France (+ 10 %) avec un record de progression pour l'Italie (+ 17 %). Différents sondages parus par la suite nationalement confirment ces tendances de « remontada » du nucléaire dans les opinions. Un événement clé dans ces changements spectaculaires pour le nucléaire a été la guerre en Ukraine et la crainte de manquer d'énergie ou qu'elle devienne trop chère.

Deuxième enseignement : au-delà du seul nucléaire, c'est toute la production d'énergie sur son sol qui est appréciée dans les différents pays. La favorabilité a aussi augmenté pour les autres énergies sources d'électricité alors que leurs contributions aux GES sont très supérieures à celle du nucléaire.

La relative méconnaissance des contributions respectives des sources de production d'électricité en GES conduit à associer le rebond du nucléaire davantage à un souci de sécurité d'approvisionnement, de prix et d'indépendance associé à la guerre en Ukraine et à l'inflation plutôt qu'à une association claire avec le changement climatique.

Dans cette perspective c'est d'ailleurs bien l'indépendance qui est ainsi mise en avant quand un sondage interroge en mai 2023 en France (Ipsos pour RTE) sur les raisons de développer les énergies renouvelables : 57 % sont « tout à fait » et 36 % « plutôt » de l'avis qu'il faut développer les énergies renouvelables (ENR) pour produire notre énergie sur le territoire français et seulement 39 % sont « tout à fait » et 43 % « plutôt » de l'avis qu'il faut développer les ENR pour remplacer notre consommation de pétrole et de gaz.

Les arguments liés aux coûts d'approvisionnement sont également importants car le pouvoir d'achat reste une préoccupation dominante des Français. Aussi, l'indépendance énergétique est jugée importante dans la perception du plan de sobriété annoncé par le Gouvernement pour passer l'hiver 2022. En effet, les Français ont été largement majoritaires (62 %) à considérer que ce plan traduit un signe de déclin de la France menacée de coupures « comme certains pays en développement » (RTE-Ipsos-Mai, 2023).

## Le nouveau nucléaire

Les perspectives de développement du nucléaire sont aujourd'hui portées par l'extension des durées d'exploitation du parc, la relance des constructions de nouveaux réacteurs EPR2 de grande taille, mais aussi par une visibilité naissante de nouveaux réacteurs de plus petite taille, les SMR (Small Modular Reactor) dont certains reposent sur des technologies présentées comme nouvelles même si les options physiques (sels fondus, neutrons rapides, etc.) ont été explorées il y a de nombreuses décennies. Une perspective est aussi ouverte sur l'utilisation de la fusion nucléaire.

De fait, l'opinion française présente un renforcement notable de l'opinion favorable à la construction de nouvelles centrales nucléaires : un Français sur deux (+ 6 %) y est désormais favorable (baromètre IRSN, 2023<sup>4</sup>). De façon intéressante, le regard en arrière vers le programme de construction historique est aussi très favorable avec 65 % des Français (+ 5 points) qui sont de l'avis que « la construction des centrales nucléaires a été une bonne chose ».

La sûreté reste une exigence fondamentale avec 84 % des Français qui déclarent que « les exploitants des sites nucléaires doivent protéger leurs installations de tous les risques, même ceux jugés très improbables ». Mais là encore la raison dominante en faveur du nucléaire reste l'indépendance énergétique (43 %, + 7 %).

À noter également que ce qui reste le premier argument contre le nucléaire, la production de déchets nucléaires, baisse en intensité (31 %, - 4 points) et se rapproche du risque d'accident (27 %) comme raison de l'opposition au nucléaire

Enfin, l'énergie nucléaire représente « l'énergie la plus performante » (45 %), suivie de loin par l'énergie solaire (10 %).

Toutefois, ces embellies dans les opinions européennes et en particulier en Italie et en France ne doivent évidemment pas être considérées comme acquises pour l'ensemble des processus à venir et faire oublier l'extrême vigilance à garder quant aux nouveaux projets.

Les nouveaux SMR, qui mettent en avant leur plus petite taille et leurs efforts de sûreté passive ne devront pas sous-estimer l'importance d'un processus d'implantation rigoureux et transparent. L'appui des industriels clients fortement implantés localement peut être un atout mais ces projets ne sont pas à l'abri d'un événement fédérateur des oppositions et le succès des projets demandera bien plus qu'une simple approche de communication.

Ces futures implantations nécessiteront dialogue, écoute et consultations de façon innovante, créative et respectueuse dans une durée acceptable pour permettre non pas un consensus illusoire mais obtenir un soutien suffisamment large des citoyens et des élus. C'est tout le travail qui avait été mené avec l'ANDRA par Christian Bataille et l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques pour l'implantation de CIGEO.

L'expérience montre hélas que des projets anodins à première vue comme des carrières ou des éoliennes peuvent virer au cauchemar. Le nouveau nucléaire nécessitera donc un grand professionnalisme dans le processus de déploiement et un cadre démocratique irréprochable.

À ce titre, des annonces dispersées et précoces hors d'un processus convaincant surtout pour des projets techniquement au stade du *design* peuvent *in fine* fragiliser les initiatives. Enfin, comme la contribution du nucléaire à la réduction des GES n'est pas naturellement identifiée, cette motivation du programme devra être rendue plus facilement lisible par le plus grand nombre.

Pour conclure, tournons-nous vers les nouvelles générations écologistes pour sentir les nouvelles perceptions. La militante écologiste suédoise la Aanstoot a lancé le débat international en demandant à Greenpeace de cesser sa campagne contre le nucléaire qu'elle juge « démodée et non scientifique ». Cet appel a été repris par de jeunes militants au-delà des frontières suédoises. Pour ces jeunes générations très anxieuses pour le climat, les idéologies anti-nucléaires historiques au sein d'organisations écologistes anciennes seraient donc des survivances dépassées.

Finalement les dinosaures devant la porte de Brandebourg ne seraient peut-être pas ceux que l'on croit...

<sup>4</sup> IRSN, 2023.

# Une nouvelle dynamique autour du nucléaire au sein de l'Union européenne

Par Pierre JÉRÉMIE

Ingénieur en chef des Mines

La préservation de l'équilibre entre objectifs européens en matière énergétique et climatique et la compétence souveraine laissée aux États membres par l'article 194 du Traité a été au cœur des débats des derniers mois. Au cœur de la construction européenne des années 1950 dans le cadre du traité Euratom, la coopération en matière d'énergie nucléaire s'était depuis les années 1990 concentrée sur les aspects les plus consensuels : gestion des déchets, protection des travailleurs, principes généraux de sûreté.

Le triple contexte d'accentuation de l'action climatique de l'Union, de tensions d'approvisionnement en énergies fossiles et notamment en gaz naturel, et le renchérissement des conditions de financement a exacerbé depuis plusieurs années la divergence entre : i) les choix de bouquets énergétiques des principaux États de l'Union, ii) les prix de marché de l'électricité et les coûts complets des systèmes électriques nationaux, iii) les conditions de financement des principales technologies décarbonées. C'est dans ce contexte qu'un nombre accru d'États membres se sont regroupés sous l'impulsion des autorités françaises au sein de l'Alliance du nucléaire afin de coordonner leurs positions en faveur d'un strict respect du principe de subsidiarité et du principe de neutralité technologique, permettant des avancées significatives et ouvrant des perspectives claires pour la prochaine mandature.

Le développement conjoint de l'énergie nucléaire pour des applications civiles constitue avec l'intégration des secteurs sidérurgiques et du charbon européens et la construction du marché intérieur un des piliers de la construction européenne dès les années 1950. Signé en 1957 à Rome concomitamment au traité instituant la Communauté économique européenne, le traité Euratom fonde une des trois communautés européennes qui structureront l'action commune jusqu'au traité de Maastricht. Encore aujourd'hui, ce traité, égal aux autres traités en vigueur, forme partie intégrante de notre ordre juridique au plus haut niveau de la hiérarchie des normes européennes et structure une entité juridique distincte qui partage ses institutions avec celles de l'Union européenne (UE).

Témoignant de l'optimisme des parties signataires pour le rôle dévolu à l'énergie nucléaire en Europe, son préambule affirme que « l'énergie nucléaire constitue la ressource essentielle qui assurera le développement et le renouvellement des productions et permettra le progrès des œuvres de paix » et porte l'objectif résolu de « créer les conditions de développement d'une puissante industrie nucléaire, source de vastes disponibilités d'énergie et d'une modernisation des techniques ». L'article 2 du traité établit des objectifs dans l'ensemble des champs de développement de l'énergie nucléaire : a) recherche et développement, b) normes de sécurité et protection des travailleurs, c) facilitation des investissements et des initiatives des entreprises, d) sécu-

rité d'approvisionnement en minerais et combustibles, e) garantie de la bonne utilisation des matières nucléaires, f) exercice par la Communauté d'un droit de propriété sur les matières fissiles spéciales, g) sécurisation de débouchés, libre circulation des marchandises, des travailleurs et des capitaux dans le secteur, et h) action internationale de la Communauté en la matière.

Dans le même temps, le Traité sur le Fonctionnement de l'Union Européenne (TFUE) reconnaît à son article 194(2) « le droit d'un État membre de déterminer les conditions d'exploitation de ses ressources énergétiques, son choix entre différentes sources d'énergie et la structure générale de son approvisionnement énergétique ». Dit en des termes plus simples, le traité reconnaît la compétence souveraine des États membres pour définir leurs mix énergétiques. Cette reconnaissance s'articule toutefois avec une politique énergétique de l'Union, qui vise à des objectifs « technologiquement neutres » tels que la sécurité d'approvisionnement, le fonctionnement du marché de l'énergie ou encore l'interconnexion des réseaux énergétiques, mais aussi oriente les choix nationaux par la « [promotion de] l'efficacité énergétique et les économies d'énergie ainsi que le développement des énergies nouvelles et renouvelables ».

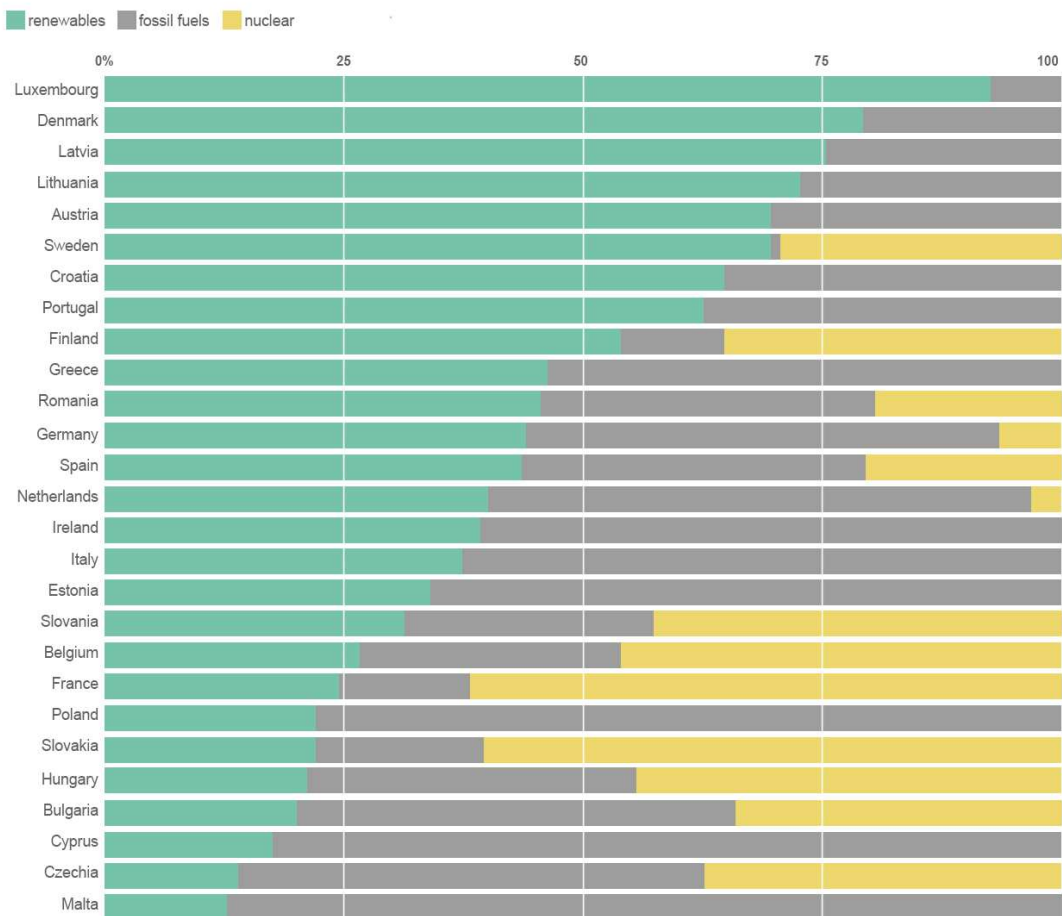
Depuis les années 1990, les politiques énergétiques des États membres s'inscrivent non plus dans une pure

logique de satisfaction des besoins aux meilleurs coûts assurée par des entreprises verticalement intégrées rémunérées selon un tarif, mais d'une part dans le cadre d'un marché européen ouvert à la concurrence sur les segments de la fourniture et de la production, ouvert à des échanges couplés entre différents marchés nationaux, et d'autre part dans le cadre d'une action climatique résolue, dans laquelle l'Union s'inscrit dans une démarche d'exemplarité. Les politiques énergétiques des États membres, et les choix souverains sur le mix, s'inscrivent ainsi à présent dans le cadre d'un droit sectoriel construit pour assurer l'intégration d'un marché ouvert à la concurrence, et poursuivent des trajectoires rapides de déploiement des énergies bas carbone dans les mix nationaux, afin de répondre aux engagements climatiques nationaux et de l'Union.

Ces trajectoires nationales présentent depuis une vingtaine d'année des divergences de plus en plus marquées, qui témoignent des différences importantes dans la lecture des différentes options technologiques en matière d'énergie bas carbone par les opinions publiques nationales, qui remontent à près de 50 ans de débat public : acceptabilité sociétale de l'énergie nucléaire dans l'ensemble de ses enjeux (maîtrise des risques, gestion des déchets et des matières, etc.) et acceptabilité locale des énergies renouvelables. Si l'Autriche ne rejoindra l'UE qu'en 1995, elle avait

dès le 5 novembre 1978 renoncé à son programme nucléaire (projet de centrale de Zwentendorf), et dès le 8 novembre 1987 avec le référendum italien qui renonça au programme nucléaire national, des États parties au processus européen ont renoncé à l'utilisation de l'énergie nucléaire civile.

Jusqu'en 2011, la plupart des États membres envisageaient leur avenir énergétique principalement autour de la prolongation de leurs actifs nucléaires existants (grand carénage en France, Energiekonzept de novembre 2010 en Allemagne, etc.) et du déploiement des énergies renouvelables conformément aux trajectoires entérinées dans la directive 2009/28/CE en présidence française du Conseil de l'UE. Suite au tsunami du 11 mars 2011 et à l'accident de Fukushima, plusieurs États membres ont choisi (Allemagne, Espagne) ou confirmé le choix (Italie) de ne pas avoir recours à l'énergie nucléaire dans leurs trajectoires énergie-climat, et d'assumer, pour ceux qui en disposaient, un arrêt de leurs centrales selon des échéances échelonnées, parallèlement à un déploiement renforcé des énergies renouvelables et au maintien d'actifs fossiles. D'autres, comme la France, mais aussi de nombreux pays d'Europe de l'Est, la Finlande ou la Suède, ont poursuivi l'exploitation de leurs installations, tout en développant également les énergies renouvelables : la part renouvelable en énergie finale de la France s'éta-



Bouquets énergétiques nationaux (source : Eurostat, 2022).

blit ainsi aujourd'hui à un niveau comparable à celui de l'Allemagne (20,9 contre 20,7 %) avec un développement à des rythmes également commensurables. Devant cette absence de consensus, les colégislateurs ont concentré leur action dans le cadre juridique d'Euratom sur les questions de sûreté, de protection des travailleurs, et de gestion appropriée des matières, et marginalement sur des projets de recherche, plus que sur le développement du financement et des perspectives économiques d'une filière européenne intégrée.

L'énergie nucléaire représente aujourd'hui environ la moitié de la production d'énergie bas carbone au sein de l'UE, et 21,9 % de la production d'électricité de l'UE en 2022, ce qui en a fait cette année la première source d'électricité, devant le gaz (19,6 %) et l'énergie éolienne (15,9 %), passée cette année devant le charbon. Le graphe présenté ci-dessous montre les différences importantes dans les choix énergétiques nationaux, étant entendu qu'il ne met pas en évidence les tailles comparées des consommations respectives des États membres, ni leurs dépendances respectives aux importations.

Le renouveau de l'énergie nucléaire civile, en France à partir de la seconde programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE2, 2019-2020) formellement mais déjà implicite dans la réorganisation de la filière engagée à partir de 2017, est un des piliers de la stratégie énergétique exprimée dans le discours de Belfort du 10 février 2022, articulée autour de la construction de 6 EPR2, pour des mises en service dans le tournant de la décennie suivante, de la préparation d'un second palier de 13 GW, du développement d'une technologie française de SMR, et affirme le rôle déterminant de l'énergie nucléaire dans l'atteinte des objectifs climatiques français. Les conseils de politique nucléaire (CPN) conduits en 2023 ont confirmé cette orientation en vue de la PPE3, et l'ont inscrit dans une vision d'ensemble à l'échelle du cycle, en réaffirmant notamment le choix pérenne d'un cycle semi-fermé et l'action résolue de l'État et de ses opérateurs pour maîtriser l'approvisionnement en matières. Plusieurs autres États membres ont dans la même temporalité confirmé leur intention de développer de nouvelles centrales : Pologne et République Tchèque à un stade avancé de conception des programmes, Pays-Bas, Suède, Croatie et Slovaquie, et Bulgarie de manière plus principale.

Dès 2020, les débats sur le règlement Taxonomie 2020/852 mirent en évidence une opposition particulièrement franche, autour de l'inclusion du nucléaire parmi les technologies éligibles à une qualification en finance durable. La virulence des débats s'explique aisément. D'une part parce que la transition est extrêmement intense en capital – et c'est tout particulièrement le cas de la production d'électricité bas carbone, aussi bien renouvelable que nucléaire : à l'heure où l'énergie cesse d'être un dérivé du prix du carbone et des intrants fossiles pour devenir un produit dérivé du coût de financement et du coût du foncier, définir ce qui est ou pas de la finance durable, et donc ce qui peut accéder au financement au meilleur coût, revient à définir la gamme de solutions possibles pour la transition. C'est le sens des conclusions de RTE dans le

rapport « Futurs énergétiques 2050 », qui met en évidence qu'en dessous de 300 points de base d'écart entre le coût de financement du nucléaire et celui des énergies renouvelables, des scénarios intégrant un renouvellement du parc nucléaire sont plus pertinents que des scénarios 100 % renouvelables. D'autre part car à travers le critère *do no significant harm* (ne cause de préjudice important à aucun des objectifs environnementaux) inscrit à l'article 3(2) du règlement, la question de l'inclusion du nucléaire renvoie aux questions d'acceptabilité sociétale des risques en exploitation et de la gestion ultime des déchets qui constituent le cœur du débat public.

Après des discussions très vives, un renvoi à des actes délégués, puis un renvoi des dispositions sur le nucléaire et le gaz à un acte délégué complémentaire, celui-ci fut finalement présenté le 2 février 2022 par la Commission, après les élections nationales allemandes, reconnaissant que les activités « nucléaires sélectionnées sont conformes aux objectifs climatiques et environnementaux de l'UE et nous permettront de délaisser plus rapidement des activités plus polluantes, telles que les centrales à charbon, au profit d'un avenir neutre pour le climat, où seront essentiellement utilisées des sources d'énergie renouvelables. ». Dans ce débat, la France avait pleinement assumé son rôle clé en Europe de pilier de la filière nucléaire, compte tenu de la taille de son secteur national, de son autonomie sur les principales briques technologiques, et de l'ancienneté de son implication dans l'industrie nucléaire : en structurant pour la première fois réellement une stratégie d'alliance autour du nucléaire associant pleinement les autres États partageant sa vision sur la place du nucléaire dans la transition, elle avait pu défendre ses intérêts les plus fondamentaux, laissant ouverts pour l'avenir la liberté de choix entre différents modèles énergétiques de transition dans un cadre de financement technologiquement neutre, et donc respectueux de la compétence souveraine gravée dans le Traité.

La tension entre modèles énergétiques est depuis mi-2021 exacerbée par trois éléments économiques majeurs. En premier lieu le contexte de relèvement rapide des taux d'intérêt engagé par les banques centrales suite au retour de l'inflation post-Covid, qui a placé une importance encore plus cruciale sur la question des conditions d'accès au capital pour les différentes technologies de production électrique. En deuxième lieu, l'accentuation de l'action climatique de l'UE dans le cadre du Pacte vert européen et du paquet Fit for 55, dont la négociation s'est achevée au second semestre 2023, qui à travers le renforcement du système de quotas d'émission européen (SEQUE-UE), qui passe par un durcissement du facteur de réduction linéaire du volume de quotas en circulation, par l'extinction des quotas gratuits à mesure qu'entre en vigueur le mécanisme d'ajustement carbone aux frontières ou que sont révisés les *benchmarks*, et par un renforcement de la réserve de stabilité, place le prix du quota d'émission sur une trajectoire de hausse structurelle importante. En troisième lieu, (par ordre chronologique, mais premier par l'ampleur de son impact) l'invasion de l'Ukraine, et le tarissement progressif en 2022 de l'accès européen au gaz russe, qui a tout à la fois consacré la banque-

route stratégique et économique d'une politique énergétique et économique reposant sur un accès pérenne au gaz russe bon marché, et plongé l'Europe durablement dans un monde où les hydrocarbures seront coûteux. En augmentant les coûts marginaux des centrales fossiles, qui dirigent leurs prix d'offres sur les marchés de l'électricité couplés et donc les prix payés par les consommateurs européens, quelle que soit la réalité de leurs mix électriques nationaux, le contexte de prix du gaz et du carbone élevés place une tension très forte entre coûts des mix décarbonés, stables et à la compétitivité différenciée selon les choix nationaux, et des prix communs, volatils, et dirigés par les commodités fossiles.

C'est dans ce contexte que l'Alliance du nucléaire a été fondée le 28 février 2023, à l'initiative d'Agnès Pannier-Runacher, ministre française de la Transition énergétique, en marge du Conseil informel de l'Énergie qui se tenait à Stockholm. À cette occasion, les pays participant à l'Alliance ont adopté une déclaration rappelant que « l'énergie nucléaire est l'un des nombreux outils permettant d'atteindre nos objectifs climatiques, de produire de l'électricité de base et de garantir la sécurité de l'approvisionnement ». Rassemblant à l'origine 11 pays de l'Union européenne, principalement des pays d'Europe de l'Est : la Bulgarie, la Croatie, la France, la République tchèque, la Hongrie, la Finlande, les Pays-Bas, la Roumanie, la Slovaquie, la Slovénie et la Pologne. Après la fin de sa présidence du Conseil de l'Union européenne, la Suède a rejoint le groupe (à l'été 2023). Deux autres pays s'y sont également joints en tant que membres observateurs, l'Italie dès mars 2023 et la Belgique. Enfin, afin d'élargir le champ des discussions, le Royaume-Uni, qui est un partenaire fort de la France dans le domaine du nucléaire, a intégré le groupe en tant que membre invité. Ce statut a également été proposé au Conseiller fédéral suisse lors de sa rencontre avec Agnès Pannier-Runacher en octobre 2023.

Les États membres se sont accordés sur 7 axes de travail principaux qui reprennent les principaux axes du traité Euratom, de manière englobante. L'Alliance a graduellement pris un rôle de plus en plus structurant dans le débat européen, en rassemblant des États membres unis dans leur analyse du paysage stratégique et économique dans lequel s'inscrit l'Union, porteurs d'une même vision exprimée à Valladolid lors de la quatrième réunion de l'Alliance, à savoir que les technologies nucléaires et les énergies renouvelables sont complémentaires pour atteindre les objectifs de l'Union européenne en matière de climat et de sécurité énergétique et doivent, à ce titre, faire partie intégrante de la transition énergétique européenne. En particulier, ils ont réaffirmé que le nucléaire apportait une contribution essentielle à la stabilité et à la résilience du réseau électrique pour l'ensemble du marché européen de l'électricité. Dans cette réunion, les États membres ont présenté à la Commission européenne une feuille de route intitulée « Une nouvelle stratégie sur l'utilisation de l'énergie nucléaire pour l'Union européenne », dans laquelle ils appellent à une reconnaissance du rôle vital de l'énergie nucléaire. Ils soulignent le principe de neutralité technologique et le droit souverain des

États membres à déterminer leur mix énergétique, qui doivent dûment être pris en compte dans les politiques européennes.

Enfin, la dernière réunion de l'Alliance du nucléaire a eu lieu le 7 novembre à Bratislava (Slovaquie). Cette réunion a porté plus particulièrement sur la perspective des élections européennes de 2024 et sur la nécessité de renforcer la cohésion de l'Alliance afin de mieux identifier des priorités communes pour le prochain mandat de la Commission. À ce titre, ils se sont engagés à travailler ensemble sur le sujet du financement du nucléaire au niveau européen et du développement d'une main-d'œuvre qualifiée pour toutes les applications nucléaires. En matière de financement, les États de l'Alliance ont réaffirmé leur demande d'explorer le soutien de la Banque européenne d'investissement (BEI) pour toutes les solutions technologiques bas carbone disponibles, en accordant une attention particulière au rôle de l'énergie nucléaire, y compris pour l'hydrogène bas carbone. Ils affirment également que la Commission devrait adopter des mesures visant à simplifier et à élargir l'accès aux fonds européens.

La prochaine rencontre est prévue pour le mois de mars 2024 à l'occasion d'un Sommet sur le nucléaire organisé par la présidence belge du Conseil de l'Union européenne sur proposition d'Agnès Pannier-Runacher. La question du programme de la prochaine Commission et de ses priorités dans une logique technologiquement neutre, sera au cœur des travaux des prochains mois. Dans cette perspective, à l'heure où les États membres achèveront la conception de leurs Plans Nationaux Intégrés Énergie-Climat, l'enjeu du partage de l'effort climatique et pour le développement des énergies renouvelables entre États membres, à travers une juste prise en compte du chemin déjà accompli ou prévu par les États membres dans la décarbonation par le nucléaire, sera dans ce cadre un point crucial, qui conduira vraisemblablement à une réouverture du règlement Gouvernance 2018/1999, et à des demandes croissantes de renégociation du cadre aides d'État Énergie Climat. Parallèlement, le triple contexte évoqué plus haut de tension sur l'approvisionnement énergétique, de rehaussement de l'action climatique, et de tension pour la compétitivité de l'Union continuera de porter sur les États membres, ouvrant la voie à un élargissement de l'Alliance.

# Les évolutions législatives pour accélérer les projets nucléaires

Par Pierre GUILLOT

Responsable juridique et régulation  
à la délégation interministérielle au Nouveau nucléaire

Et Anne-Cécile RIGAIL

Cheffe du service des risques technologiques  
à la direction générale de la Prévention des risques

Afin d'accompagner la relance du programme nucléaire français, la loi n°2023-491 du 22 juin 2023 permet d'accélérer et de sécuriser juridiquement les constructions de futurs réacteurs. Ce texte très technique répond à trois objectifs : supprimer les obstacles législatifs à la relance du nucléaire, notamment les plafonds dans le mix énergétique, accélérer les procédures administratives pour la construction à proximité des sites existants et accélérer le traitement du contentieux tout en sécurisant les projets sur certains aspects (loi littoral, droit des espèces protégées). Cette loi ouvre ainsi la voie à la construction des six EPR appelés de ses vœux par le président de la République lors de son discours de Belfort.

Le président de la République a présenté, dans le discours de Belfort du 10 février 2022, son ambition de faire de la France le premier grand pays à sortir de la dépendance aux énergies fossiles à un horizon de 30 ans.

Pour pouvoir atteindre cet objectif, et le maintenir dans la durée, il est indispensable d'anticiper la fermeture du parc nucléaire existant, mis en service pour l'essentiel entre 1980 et 1990. Sans nouveaux réacteurs, la capacité de production nucléaire pourrait passer de 63 à 16 GW en 2050, alors que RTE anticipe au même horizon une forte hausse de la consommation électrique : de 459 TWh en 2022, la consommation monterait à un niveau compris entre 555 et 752 TWh en fonction de ces scénarios.

C'est dans ce contexte que le discours de Belfort confirmait le souhait du président de la République, que, tout en étudiant la prolongation au-delà de 50 ans des réacteurs existants, 6 EPR2 soient construits et que les études pour en construire huit autres soient lancées.

Mais construire des réacteurs prend du temps. Compte tenu de la hausse anticipée des besoins et des enjeux de décarbonation de l'économie française, le législateur est donc intervenu pour chercher à accélérer autant que possible leur mise en service, sans sacrifier les intérêts protégés par le droit actuel, que ce soit la sûreté, la protection de l'environnement ou la participation du public.

Ces travaux ont débouché sur la loi n°2023-491 du 22 juin 2023 relative à l'accélération des procédures liées à la construction de nouvelles installations nucléaires à proximité de sites nucléaires existants et

au fonctionnement des installations existantes, validée pour l'essentiel par une décision du Conseil constitutionnel du 21 juin 2023<sup>1</sup>.

Bien que rédigée en des termes très techniques, elle suit quelques lignes de force : supprimer les obstacles législatifs à la relance du nucléaire, accélérer les procédures administratives pour la construction à proximité des sites existants et accélérer le traitement du contentieux. La loi comprend également certaines mesures relatives au fonctionnement des réacteurs existants et de nombreuses mesures d'information du Parlement, dont nous ne traiterons pas ici.

## Supprimer les obstacles à la relance du nucléaire

Le projet de loi initialement présenté par le Gouvernement n'emportait pas de décision s'agissant des orientations relatives au mix électrique.

Le Sénat a cependant souhaité inclure dans la loi des dispositions d'ordre programmatique. En effet, la loi pour la transition énergétique et la croissance verte de 2015 avait introduit deux dispositions pouvant faire obstacle à la relance d'un programme nucléaire d'ampleur : elle plafonnait la part du nucléaire dans le bouquet électrique à 50 % en 2025 (délai déjà repoussé à 2035 par le législateur), et elle limitait la capacité nucléaire totale à 63,2 GW. Ce plafond correspondait à la production du parc nucléaire avant mise en service du réacteur EPR

<sup>1</sup> Conseil constitutionnel, décision n°2023-851 Dc du 21 juin 2023.



Flamanville 3 (incluant les 2 réacteurs de Fessenheim) et avait pour objectif d'obliger à l'arrêt de réacteurs anciens avant de faire démarrer des nouveaux.

Les articles 1<sup>er</sup> et 2 de la loi n°2023-491 mettent un terme à ces limites, ce qui permettra de faire cohabiter les nouveaux réacteurs avec le parc existant aussi longtemps que ce dernier pourra être prolongé.

Corollaire de cette suppression, la loi permet de réviser de manière simplifiée la programmation pluriannuelle de l'énergie, qui était basée sur l'hypothèse de la fermeture de 12 réacteurs d'ici 2035 (en plus des 2 réacteurs de Fessenheim)<sup>2</sup>.

## Accélérer les procédures administratives

Une fois les obstacles à la relance du nucléaire levés, restait le cœur du projet d'origine, à savoir l'accélération des procédures pour la construction de nouvelles installations. Il s'agit du titre II de la loi n°2023-491, qui s'applique aux réacteurs électronucléaires à la double condition que leur implantation soit envisagée dans le périmètre d'une installation nucléaire de base ou à proximité immédiate de celui-ci et que la demande de d'autorisation de création soit déposée avant le 22 juin 2043<sup>3</sup>.

Critiquée sur le fondement de l'article 7 de la charte de l'environnement (qui pose le droit à vivre dans un environnement respectueux de la santé), cette accélération des procédures a été admise par le Conseil constitutionnel. Il a en effet considéré que le législateur avait mis en œuvre deux principes de valeur constitutionnelle : l'objectif de protection de l'environnement et celui de protection des intérêts fondamentaux de la Nation, qui inclut à la fois la protection de son indépendance et la protection des éléments essentiels de son potentiel économique (dont font donc partie les réacteurs en construction). Cette décision apporte donc un soutien très précieux au programme de relance nucléaire, dans un contexte de recherche à la fois de décarbonation et de souveraineté.

Dans le détail, cette accélération prend la forme d'un catalogue de mesures touchant la plupart des autorisations nécessaires à la réalisation d'un réacteur.

En matière d'urbanisme, tout d'abord, la loi permet de qualifier la réalisation des réacteurs de projet d'intérêt général par décret en Conseil d'État<sup>4</sup>. Cette qualification permet à l'État d'imposer rapidement la mise en conformité des documents d'urbanisme (plan local d'urbanisme, schéma de cohérence territorial, etc.) afin de permettre la réalisation du projet, selon une procédure conduite par l'État (alors que le droit commun ne lui permet d'intervenir qu'en cas de carence des collectivité

tés territoriales concernées, et après des délais de plusieurs mois, voire années). La procédure est en outre allégée, puisqu'elle intervient sans enquête publique, même si la participation du public reste prévue par voie électronique.

Elle permet, surtout, de dispenser les réacteurs de formalités au titre du code de l'urbanisme (permis de construire, déclaration d'aménager ou déclaration préalable). Leur conformité aux règles d'urbanisme sera vérifiée par l'administration à l'occasion de l'examen de l'autorisation environnementale ou du décret d'autorisation de création<sup>5</sup> du réacteur. Mais les réacteurs resteront traités comme des installations bénéficiant de permis de construire pour les besoins de la fiscalité de l'aménagement<sup>6</sup>.

La loi dispense également les réacteurs de l'application de la « loi littoral », qui impose en principe la construction en continuité de l'urbanisation existante en bord de mer. Or il est, pour des raisons de prévention des risques, nécessaire d'éloigner les centrales nucléaires des habitations. Même si la jurisprudence relative à Flamanville 3 était plutôt favorable à la construction des réacteurs à proximité de sites nucléaires existants, considérés comme déjà urbanisés<sup>7</sup>, cette dispense explicite permettra d'éviter du contentieux.

La construction d'un réacteur nucléaire se fonde sur une autorisation « principale », qui est l'autorisation de création, prévue par l'article L. 593-7 du code de l'environnement. C'est une autorisation spécifique aux installations nucléaires, dont l'instruction par l'administration prend habituellement 3 à 5 ans, ce temps étant notamment nécessaire à l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) pour examiner en détails, avec l'appui de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), la conception de l'installation, les différents types d'accidents et de nuisance possibles et la manière dont ils seront prévenus.

Quelques travaux préparatoires du grand chantier que constitue la construction d'un réacteur nucléaire (terrassement, installation d'une centrale à béton ou à bitume, creusements et forages) peuvent cependant être réalisés sans attendre la délivrance de cette autorisation de création. Ils sont alors autorisés, en application du droit commun, par une autorisation environnementale, prévue à l'article L. 181-1 du code de l'environnement, s'ils conduisent à mettre en œuvre une installation soumise à autorisation au titre de la loi sur l'eau (IOTA) ou une installation classée pour la protection de l'environnement (ICPE). La loi prévoit donc que l'autorisation environnementale permettant ce début des travaux obéira également à un régime particulier, puisqu'elle sera délivrée par décret<sup>8</sup> alors qu'elle relève habituellement d'un simple arrêté préfectoral. Par dérogation aux règles habituelles, les travaux pourront débiter sur la base de cette seule autorisation environnementale, sans attendre la clôture de l'enquête publique

<sup>2</sup> Décret n°2020-456 du 21 avril 2020 relatif à la programmation pluriannuelle de l'énergie.

<sup>3</sup> Un arrêté pourra, sous certaines conditions, étendre le bénéfice de ce régime aux installations d'entreposage de combustible (L. n°2023-491, art. 7-III).

<sup>4</sup> Loi n°2023-491, I de l'article 8.

<sup>5</sup> Loi n°2023-491, I de l'article 9.

<sup>6</sup> Loi n°2023-491, II de l'article 9.

<sup>7</sup> CAA Nantes, 22 avril 2008, n°07NT01013.

<sup>8</sup> Loi n°2023-491, art. 11.

du décret d'autorisation de création, excepté pour ce qui concerne les bâtiments destinés à recevoir des combustibles nucléaires ou à héberger des matériels de sauvegarde<sup>9</sup>. Cette anticipation n'est cependant permise que parce que le public aura été correctement informé sur l'ensemble du projet au stade d'une première enquête publique, celle qui précède l'autorisation environnementale.

L'autorisation environnementale pourra également, conformément au droit commun, valoir dérogation à l'interdiction de porter atteinte aux espèces protégées. Mais, pour les réacteurs qui répondront à certaines conditions de puissance et de type de technologie qui seront précisées par décret, la condition d'intérêt public majeur nécessaire à l'obtention de la dérogation sera présumée remplie<sup>10</sup>. Cela ne veut pas dire pour autant que l'octroi de la dérogation sera automatique, puisqu'il faudra encore démontrer que les autres conditions sont remplies, à savoir qu'il n'existe pas d'alternative satisfaisante et que la dérogation ne nuira pas au maintien des populations concernées dans un état de conservation favorable.

S'agissant du foncier, la loi prévoit des dispositions concernant tant l'accès aux terrains que la prise en compte des réacteurs dans le cadre du dispositif « zéro artificialisation nette ».

Pour l'accès au foncier, tout d'abord, les réacteurs pourront bénéficier du régime de prise de possession immédiate prévu par le code de l'expropriation<sup>11</sup>, qui ne s'applique ordinairement qu'aux infrastructures linéaires, et ce même si le terrain est bâti (alors que le droit commun ne vise que les terrains non bâtis). Ce régime permet schématiquement la prise de possession après paiement d'une somme équivalente à l'indemnité d'expropriation sans avoir à attendre la fin de la procédure, à condition qu'un décret pris sur avis conforme du Conseil d'État l'autorise (décret qui devra intervenir dans un délai maximum de 6 ans). Le Conseil constitutionnel a estimé que la construction des réacteurs constituait un motif impérieux d'intérêt général justifiant cette dérogation au droit commun.

Autre disposition importante concernant l'artificialisation, les réacteurs ne seront pas comptabilisés pour évaluer l'atteinte des objectifs locaux ou régionaux de réduction du rythme d'artificialisation des sols<sup>12</sup>. Ce traitement est plus favorable que celui des projets d'envergure nationale ou européenne déjà prévu par les textes en la matière, qui sont également comptabilisés dans les objectifs nationaux uniquement, mais au titre d'un régime qui ne s'applique que jusqu'en 2031<sup>13</sup>.

Parmi les autres dispositions du titre II, on peut enfin retenir que les concessions d'utilisation du domaine public maritime nécessaires aux réacteurs seront approuvées par décret en Conseil d'État (et non à

l'issue du processus de droit commun où le préfet approuve, assez étrangement, une concession dont il est lui-même le signataire).

Dernière simplification à noter, le régime de l'autorisation d'exploiter au titre du code de l'énergie est allégé, puisque c'est désormais le décret d'autorisation de création (DAC) qui en tiendra lieu<sup>14</sup>, au regard des mêmes critères que ceux fixés à l'article L. 311-5 du code de l'énergie pour l'autorisation d'exploiter<sup>15</sup>. À la différence des autres allègements visés ci-dessus, cette mesure est générale et concernera tous les réacteurs à l'avenir.

## Accélérer le traitement du contentieux

Pour les projets de grande ampleur, l'autre source fréquente de délais réside dans les recours contentieux devant les juridictions administratives. En effet, dans le droit commun, une autorisation administrative peut faire l'objet de recours devant les tribunaux administratifs, les cours administratives d'appel et le Conseil d'État.

Cela peut représenter cinq à six ans de procédure, ce qui est peu compatible avec les nécessités de la transition énergétique.

La loi devrait indirectement permettre de ramener ce délai à environ 18 mois.

En effet, les recours contre les décrets relèvent de la compétence en premier et dernier ressort du Conseil d'État<sup>16</sup>, ce qui supprime les deux étapes préalables au tribunal administratif et à la cour administrative d'appel. Or le régime dérogatoire de la loi d'accélération implique que l'ensemble des actes essentiels aux projets relèveront de décrets en Conseil d'État : ce sera le cas pour la qualification de projet d'intérêt général, la concession d'utilisation public maritime si elle est nécessaire, mais également pour l'autorisation environnementale. L'autorisation de création relevait déjà du décret, mais emportera aussi autorisation d'exploiter, ce qui fera relever cette autorisation du régime contentieux du DAC.

Le juge administratif pourra également, si un moyen des requérants s'avère fondé, surseoir à statuer en vue d'une régularisation (ce qui évite d'annuler tout de suite l'autorisation) ou, si la régularisation n'est pas possible, n'annuler qu'une phase de l'instruction d'un acte ou qu'une partie d'un acte. Dans ce cas, l'administration doit reprendre l'instruction ou corriger la partie invalide de l'acte (le juge décidant s'il y a lieu de suspendre, dans cette attente, l'exécution du reste de l'acte).

<sup>9</sup> Loi n°2023-491, II de l'article 11.

<sup>10</sup> Loi n°2023-491, art. 12.

<sup>11</sup> Loi n°2023-491, art. 15.

<sup>12</sup> Loi n°2023-491, art. 9-IV.

<sup>13</sup> Loi n°2021-1104, art. 194, III bis.

<sup>14</sup> Code de l'énergie, art. L. 311-5-6.

<sup>15</sup> Code de l'environnement, art. L. 593-7.

<sup>16</sup> Code de justice administrative, art. R. 311-1.

## Conclusion

Bien que la loi d'accélération du 22 juin 2023 soit d'une lecture ardue, elle représente un ensemble cohérent de mesures pour accélérer la réalisation des projets concernés, et donc l'atteinte des objectifs d'intérêt général qu'ils poursuivent.

Dans un contexte d'urgence climatique, il ne serait d'ailleurs pas inutile de réfléchir à la généralisation de certaines des mesures qu'elle contient. Nous pensons notamment à la possibilité de surseoir à statuer pour régulariser des autorisations. Ce mécanisme est de plus en plus fréquent dans le droit du contentieux administratif, au point qu'il serait probablement temps d'en

faire une règle de droit commun plutôt que de multiplier les exceptions (autorisations environnementales, droit minier, droit de l'urbanisme, éolien en mer, etc.). En effet, on voit mal l'intérêt de censurer des décisions régularisables, et le juge disposera toujours d'un garde-fou, puisque c'est à lui qu'il appartient de déterminer les vices régularisables.

Par ailleurs, l'accélération et la sécurisation des projets nucléaires pourrait bénéficier de certaines autres dispositions qui font l'objet de travaux par le Gouvernement à la date de la rédaction de cet article.

# Les enjeux en matière de sûreté d'une relance du nucléaire en France

Par Julien COLLET

Directeur général adjoint de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN)

La relance d'un programme électronucléaire d'ampleur constitue un défi pour la filière nucléaire française, qui doit reconstituer ses capacités, notamment en termes de compétences. L'ASN attire l'attention sur les risques liés au démarrage très rapide du programme EPR2 et adapte son contrôle en conséquence. En parallèle, les projets de petits réacteurs modulaires se multiplient, avec des objectifs ambitieux, y compris en termes de sûreté nucléaire. La plupart de ces projets sont à un stade de développement peu avancé et doivent encore faire leurs preuves. L'ASN a mis en place des modalités d'échange et de travail adaptées avec ces projets, qui posent des questions nouvelles ou réinterrogent les doctrines en vigueur en matière de sûreté.

En 2022, le président de la République a annoncé l'engagement d'un programme de construction de 6 à 14 réacteurs nucléaires afin de garantir l'indépendance énergétique et l'approvisionnement électrique du pays, et d'atteindre les objectifs en matière de neutralité carbone. Après une longue période sans nouveau projet et le faux départ du réacteur EPR de Flamanville, ce programme va conduire à reconstituer une filière industrielle de construction de réacteurs.

En parallèle, de nouveaux acteurs arrivent avec des propositions en rupture autour des petits réacteurs modulaires, qui promettent de l'énergie moins chère, plus sûre et des usages étendus, mais qui doivent encore largement faire leurs preuves.

Ce nouveau contexte va conduire l'ASN, qui est une autorité administrative indépendante chargée du contrôle de la sûreté nucléaire, à instruire de nombreux dossiers liés à ces projets et à adapter son contrôle aux évolutions en cours.

## Le programme EPR2

Lorsque la construction du réacteur EPR de Flamanville a été engagée en 2007, il s'agissait du premier projet nucléaire d'importance depuis de nombreuses années. D'importantes difficultés ont été rencontrées, qui ont été largement décrites (Cour des comptes, 2020) : une conception complexe visant à répondre aux exigences des électriciens français et allemands, des estimations initiales irréalistes, une gouvernance de projet inadaptee, la perte de compétences et de culture qualité du tissu industriel.

Qualifié d'échec (Folz, 2019), avec une mise en service prévue en 2024, ce projet a cependant constitué un

électrochoc pour la filière, qui a pris conscience qu'elle ne pouvait plus s'appuyer sur ses succès passés et qu'elle devait engager d'importantes transformations avant de pouvoir se lancer dans un nouveau programme nucléaire. Par de nombreux aspects, le programme EPR2 s'inscrit ainsi en réaction à l'EPR de Flamanville.

La conception de l'EPR2 dérive de celle de l'EPR en y apportant des simplifications pour en faciliter la construction et l'exploitation. Elle résulte d'un équilibre entre amélioration et limitation des risques liés au changement. Au plan de la sûreté, il s'agit d'un réacteur à l'état de l'art de la troisième génération, qui prend en compte le retour d'expérience de l'EPR pour apporter diverses améliorations en termes d'architecture des systèmes de sûreté. Une différence majeure est que sa conception est bien plus avancée que celle de l'EPR au même stade industriel, ce qui devrait fortement limiter les évolutions au cours de la construction.

Ces réacteurs ont vocation à être encore en service à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle, date à laquelle les effets du réchauffement climatique devraient être bien plus marqués qu'aujourd'hui. Les travaux du GIEC permettent d'éclairer les enjeux climatiques à cet horizon, mais il n'en demeure pas moins d'importantes incertitudes, notamment sur les températures à prendre en compte, avec parfois des effets en seuil sur le dimensionnement des équipements. Face à cette situation l'ASN considère qu'au-delà d'objectifs ambitieux en matière de résilience climatique, il convient de prévoir un certain niveau d'adaptabilité des installations, afin de pouvoir, le cas échéant, redimensionner certains équipements critiques.

La maîtrise de la qualité de la construction et des fabrications reste le principal défi auquel EDF doit faire face.

Le programme EPR2 démarre en effet sur un rythme d'une paire de réacteurs tous les trois ans, que la filière considèrerait il y a peu être au-delà de ses capacités, estimant qu'un délai de quatre à cinq ans entre les trois premières paires de réacteurs était difficilement compressible (RTE, 2022). Cela va nécessiter une montée en charge rapide des fournisseurs, avec un retour d'expérience limité des premières fabrications sur les suivantes.

Cette situation fait peser une importante pression sur les acteurs industriels, avec le risque que, confrontés à des objectifs irréalistes, le respect des échéances prenne le pas sur la qualité, avec un report à plus tard des difficultés, qui finissent par s'accumuler au détriment tant de la sûreté que du calendrier général du projet. Même si les principaux acteurs indiquent en avoir conscience, il n'empêche que reconnaître une telle situation et éviter la fuite en avant restera une décision difficile, comme on l'a vu sur l'EPR de Flamanville. La révision de la gouvernance, tant au sein d'EDF qu'au niveau de l'État avec la création de la Délégation de programme interministérielle au nouveau nucléaire (DINN), vise à détecter au plus tôt les dérives.

L'ASN constate que la filière se prépare depuis plusieurs années à l'arrivée de ce nouveau programme électronucléaire. Elle s'est structurée en 2018 en créant une fédération professionnelle, le Gifen<sup>1</sup>. Au printemps 2020, EDF et le Gifen ont lancé le plan Excell, avec des objectifs ambitieux en termes de gouvernance, de compétences et de qualité. Le sujet des compétences, que l'ASN considère comme primordial, fait l'objet de multiples actions, en lien avec l'État et les collectivités : cartographie des besoins et des offres de formation à 10 ans, ouverture d'une école de formation sur le soudage dans le Cotentin, création de l'Université des Métiers du Nucléaire, etc.

Pour autant, l'étude remise par le Gifen au Gouvernement met en évidence des besoins considérables en matière de recrutements, d'environ 65 000 personnes dans les 10 prochaines années. Selon EDF, un salarié sur deux qui travaillera dans le nucléaire en 2030 n'est pas encore dans la filière. L'ASN note par ailleurs que l'expérience, tant des personnes que des organisations, s'acquiert avant tout par l'exercice du métier, ce qui fait là encore peser un risque particulier sur le démarrage du programme.

Dans ce contexte l'ASN a adapté son contrôle. Elle a tout d'abord renforcé son contrôle du pilotage des projets complexes par les exploitants, en développant des compétences internes sur le sujet. Initialement mis en œuvre sur les projets de démantèlement, il s'est élargi progressivement aux projets de nouvelles constructions.

Le contrôle des fournisseurs est un sujet encore récent pour l'ASN, à l'exception du cas particulier des équipements de la chaudière nucléaire, dont elle assure le contrôle des fabricants depuis le début du programme électronucléaire français. Ce n'est en effet qu'en 2016 que la loi a étendu sa compétence aux activités

réalisées hors des installations nucléaires, en particulier dans les usines des fournisseurs et sous-traitants. Elle développe progressivement son action dans ce domaine, avec 45 inspections en 2022.

L'ASN constate que si les fournisseurs de rang 1 sont bien associés aux démarches engagées, un travail important reste à mener sur leurs sous-traitants. Les inspections de l'ASN mettent ainsi régulièrement en évidence des situations dans lesquelles ces derniers méconnaissent les exigences applicables, voire ignorent que leur produit est destiné à un usage nucléaire. L'ASN va prochainement diffuser un document pédagogique à destination de ces acteurs, afin qu'ils appréhendent mieux les exigences réglementaires applicables à leurs activités. Par ailleurs elle a partagé les constats de ses inspections avec les principaux donneurs d'ordre, auxquels elle a demandé d'améliorer leur maîtrise des chaînes d'approvisionnement et de fabrication des matériels destinés aux nouvelles installations.

Le contrôle de l'ASN est entré dans une nouvelle phase avec le dépôt à l'été 2023 par EDF de sa demande d'autorisation de création de deux réacteurs à Penly. L'ASN assure l'instruction technique de ce dossier pour le compte du Gouvernement, en vue d'une autorisation de création vers la fin de l'année 2026.

## Les petits réacteurs modulaires

Dans un contexte de demande croissante pour des sources d'énergie décarbonée, les difficultés rencontrées sur les projets récents de réacteurs de forte puissance ont suscité un intérêt croissant pour les petits réacteurs modulaires (en anglais Small Modular Reactors, SMR). Alors que la puissance des réacteurs a jusqu'à présent progressivement augmenté afin de réaliser des gains d'échelle, les promoteurs de ces réacteurs font le pari qu'une réduction importante de la puissance permettra de drastiquement réduire leur complexité et de renforcer l'effet de série grâce à une fabrication en usine. Des barrières à l'entrée plus faibles ont permis l'arrivée de nouveaux acteurs dans le domaine, de type *start-up*.

Le terme SMR recouvre des technologies, des usages et des niveaux de puissance très différents : du réacteur transportable pour les théâtres d'opération militaire à la centrale nucléaire de taille moyenne, en passant par de la production de chaleur ou la propulsion navale. En France, la plupart des projets se destinent à la production d'électricité ou de chaleur, pour une puissance allant d'une dizaine à quelques centaines de mégawatts.

Les caractéristiques des SMR, en particulier leur faible puissance et leur compacité, constituent des facteurs favorables pour la sûreté. L'ASN considère que ces caractéristiques doivent être mises à profit par les concepteurs pour proposer des réacteurs visant des objectifs de sûreté plus ambitieux que les réacteurs de forte puissance actuels.

L'ASN a des échanges réguliers avec plusieurs entreprises françaises développant des SMR, afin de prendre connaissance des caractéristiques techniques de ces

<sup>1</sup> Groupement des industriels français du nucléaire.

projets, de présenter le cadre réglementaire applicable et de préciser les éléments techniques nécessaires pour engager des discussions plus approfondies.

La réglementation applicable aux réacteurs nucléaires est indépendante de la technologie. À quelques exceptions près elle n'impose pas d'obligation de moyens, et en cas de besoin des dérogations peuvent être accordées dès lors que cela est justifié en termes de sûreté. Le cadre en vigueur permet ainsi d'accommoder des concepts innovants sans qu'il soit pour cela nécessaire de le réviser, comme cela a dû être le cas aux États-Unis.

L'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire avait examiné en 2015 le niveau de maturité des différentes filières de réacteur (IRSN, 2015), et conclu que seules les filières SFR<sup>2</sup> et VHTR<sup>3</sup> disposaient alors d'un retour d'expérience exploitable, en identifiant pour chaque filière les développements scientifiques et techniques nécessaires. L'ASN attire ainsi très tôt l'attention de porteurs de projet sur l'identification des connaissances nécessaires pour établir la démonstration de sûreté, qui peuvent être longues à acquérir. Certains projets prévoient la construction préalable de réacteurs expérimentaux pour valider les technologies et qualifier les codes de calcul.

À chaque filière correspond également un cycle du combustible, qui doit être pris en compte pour évaluer la pertinence et la viabilité de l'ensemble : disponibilité de la matière première, fabrication du combustible, déchets produits, filière de traitement des déchets, etc. De nouvelles installations de fabrication ou de traitement du combustible devront être construites en appui aux nouvelles filières.

Au-delà des aspects techniques, les SMR posent des questions nouvelles ou réinterrogent certaines pratiques.

Un premier sujet concerne les objectifs de sûreté de ces installations, qui doivent prendre en compte le fait qu'elles pourraient être nombreuses sur le territoire et dans certains cas installées à proximité immédiate d'installations industrielles ou proches de zones habitées. L'ASN a mis en place un groupe de travail pluraliste pour mener une réflexion sur des objectifs de sûreté minimum qui pourraient alors être fixées.

Par ailleurs, la question des capacités industrielles et financières, sur laquelle l'ASN doit se prononcer à la création d'une nouvelle installation, se pose en des termes différents selon qu'il s'agisse de *start-up* ou de grands opérateurs publics. Il s'agit de permettre à ce type d'opérateurs d'exploiter des installations nucléaires tout en évitant que la collectivité ne porte une part excessive du risque de défaillance économique.

Enfin, la variété des projets prévus va conduire à examiner d'autres sujets en fonction des schémas industriels envisagés par les industriels :

- les projets d'installations ayant une durée de vie réduite pourraient avoir à définir les modalités de leur démantèlement dès la phase d'autorisation ;
- les plus petites installations pourraient être mobiles, cas qui n'est pas vraiment pris en compte par le régime actuel ;
- etc.

L'ASN a défini un cadre de de travail adapté pour ces nouveaux projets, qui évolue en fonction de leur degré d'avancement. En particulier les échanges dans les premières phases sont plus itératifs afin de faire un retour rapide sur les questions ou difficultés que posent les choix de conception envisagés. Quelques projets devraient quant à eux entrer dans une nouvelle phase en 2024, avec l'instruction des premiers dossiers prévus par la réglementation (avis de l'ASN sur les options de sûreté ou demande d'autorisation de création).

## Bibliographie

COUR DES COMPTES (2020), « La filière EPR », rapport de la Cour des comptes.

FOLZ J.-M. (2019), « La construction de l'EPR de Flamanville », rapport au ministre de l'Économie et des Finances, Bruno Le Maire, et au président directeur général d'EDF, Jean-Bernard Lévy.

IRSN (2015), « Examen des systèmes nucléaires de 4<sup>ème</sup> génération », rapport de l'IRSN.

RTE (2022), « Futurs énergétiques 2050 », rapport d'étude de RTE.

<sup>2</sup> Sodium Fast Reactor : réacteur rapide à sodium. La France a notamment l'expérience des réacteurs Phénix et Superphénix.

<sup>3</sup> Very High Temperature Reactor : réacteur à très haute température, qui est refroidi au gaz et utilise un modérateur en graphite.

# La gestion responsable et durable des déchets radioactifs en France

Par Pierre-Marie ABADIE

Directeur général de l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra)

L'énergie nucléaire est le premier secteur producteur de déchets radioactifs en France (devant la recherche, la défense, l'industrie non électronucléaire et le médical). Ces déchets peuvent présenter des risques pour l'homme et l'environnement et nécessitent une gestion adaptée à leur niveau de radioactivité et leur durée de vie. La gestion à long terme de ces déchets a été confiée à l'Andra, Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs.

La grande majorité sont stockés dans des centres de surface. Il s'agit des déchets de très faible activité ou à vie courte qui représentent plus de 90 % des volumes mais une très faible part de la radioactivité totale. Au contraire, les déchets de haute activité et de moyenne activité à vie longue, qui sont issus du retraitement des combustibles usés et du fonctionnement des centrales nucléaires, représentent de très faibles volumes mais concentrent 99 % de la radioactivité totale et ne peuvent pas être gérés dans des centres de surface. Ils sont destinés à être stockés dans Cigéo, le projet de centre de stockage géologique profond pour lequel l'Andra a demandé une autorisation de création début 2023.

La politique française en matière de gestion des déchets radioactifs est solide et très bien évaluée à l'international. Elle s'appuie sur une planification forte, avec le plan national de gestion des matières et déchets radioactifs (PNGMDR), des institutions (l'Andra, la CNE2 pour l'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs, l'ASN...) et un financement assuré par les producteurs de déchets radioactifs, selon le principe pollueur-payeur.

La gestion des déchets radioactifs a été confiée à l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioac-

tifs (Andra). Établissement public créé en 1991, l'Andra est indépendante des producteurs et placée sous la tutelle des ministres chargés de l'Énergie, de la Recherche et de l'Environnement.

L'Andra remplit une mission d'intérêt général, confiée par l'État, de prise en charge des déchets radioactifs produits par les générations passées et présentes pour les mettre en sécurité pour les générations futures. L'Andra s'appuie sur trois métiers : la recherche et le développement, la conception de projets de stockage et l'exploitation de sites industriels.

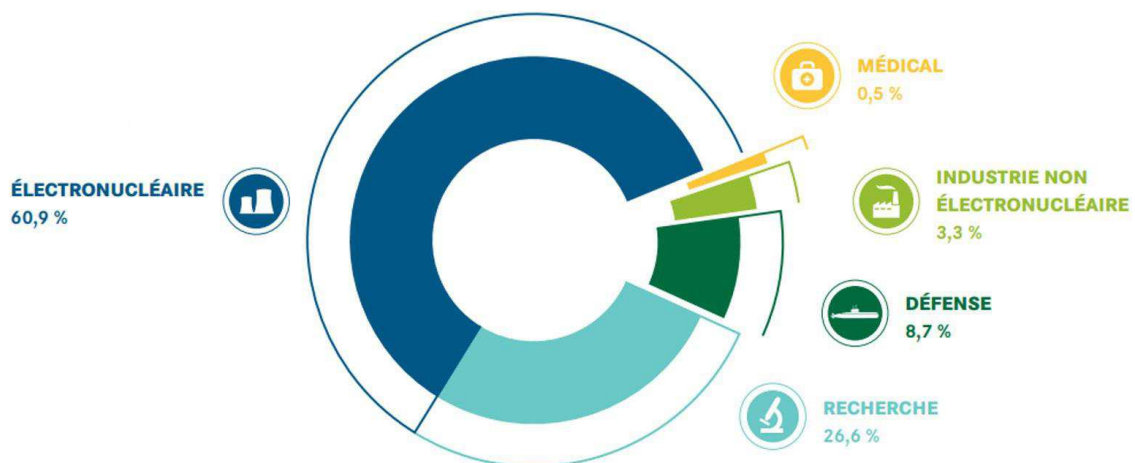


Figure 1 : Répartition par secteur économique du volume de déchets (en équivalent conditionné) déjà stockés ou destinés à être pris en charge par l'Andra à fin 2021.

## La gestion des déchets radioactifs

### Les déchets radioactifs

Les déchets radioactifs sont des substances radioactives ne pouvant être réutilisées ou retraitées et qui doivent être gérées de manière spécifique<sup>1</sup>. Ils sont de natures très diverses et peuvent provenir de la maintenance et du fonctionnement des installations nucléaires, de leur démantèlement, du retraitement du combustible usé des centrales nucléaires, de l'assainissement d'anciens sites pollués par la radioactivité, d'activités de recherche, de processus industriels ou d'examen et de soins médicaux.

Considérant les risques qu'ils représentent, la France a, comme de nombreux pays, fait le choix de les stocker dans des installations industrielles adaptées. L'objectif est de les isoler le temps que leur radioactivité ait suffisamment diminué pour qu'ils ne présentent plus de risques radiologiques.

En France, plus de la moitié des déchets radioactifs, en volume, provient de l'industrie électronucléaire. Toutefois, la recherche, la médecine, la Défense nationale ou encore l'industrie classique utilisent également régulièrement des substances radioactives et produisent des déchets radioactifs.

Aujourd'hui, 90 % du volume des déchets radioactifs produits en France est déjà pris en charge, ou destiné à l'être, dans des centres de stockage de surface gérés par l'Andra. Pour les autres déchets, des projets et études sont en cours (études sur les modes de gestion des déchets FA-VL, projet Cigéo).

### Les différentes catégories de déchets radioactifs et leurs modes de gestion

En France, la classification des déchets radioactifs repose principalement sur deux paramètres : le niveau de radioactivité et la période radioactive des radionucléides présents dans les déchets.







Compte tenu de leurs caractéristiques propres, la prise en charge des déchets nécessite la mise en œuvre de moyens de gestion appropriés à leur dangerosité, à leur volume et à leur durée de vie.

#### Les centres stockages existants

La sûreté du stockage de surface repose sur trois éléments : les colis qui contiennent les déchets, les ouvrages de stockage dans lesquels sont placés les colis et la géologie du site qui constitue une barrière naturelle à long terme.

Les déchets de très faible activité (TFA), essentiellement issus du fonctionnement et du démantèlement des installations nucléaires mais aussi d'industries non-nucléaires utilisant les propriétés de la radioactivité (chimie, métallurgie, etc.), sont pris en charge depuis 2003 au Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires) situé dans l'Aube.

Les déchets de faible et moyenne activité à vie courte (FMA-VC), issus de la maintenance (vêtements, outils, filtres, etc.) et du fonctionnement d'installations nucléaires et des activités de recherche ou de soins (laboratoires et hôpitaux) étaient, de 1969 à 1994, pris en charge par le Centre de stockage de la Manche (CSM). Depuis 1992, ils sont stockés dans le Centre de stockage de l'Aube (CSA).

Période radioactive* / Activité**	Période radioactive*		
	Vie très courte (VTC) (période < 100 jours)	Principalement vie courte (VC) (période ≤ 31 ans)	Principalement vie longue (VL) (période > 31 ans)
<b>Très faible activité (TFA)</b> < 100 Bq/g	 Gestion par décroissance radioactive	 Stockage de surface (Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage)	
<b>Faible activité (FA)</b> entre quelques centaines de Bq/g et un million de Bq/g		 Stockage de surface (centres de stockage de l'Aube et de la Manche)	 Stockage à faible profondeur à l'étude
<b>Moyenne activité (MA)</b> de l'ordre d'un million à un milliard de Bq/g			 Stockage géologique profond en projet (projet Cigéo)
<b>Haute activité (HA)</b> de l'ordre de plusieurs milliards de Bq/g	Non applicable	 Stockage géologique profond en projet (projet Cigéo)	

<sup>1</sup> L'article L. 542-1-1 du code de l'environnement définit notamment les notions de substance, matière et déchet radioactifs, [https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article\\_lc/LEGIARTI000032043680](https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000032043680)

Figure 2 : Catégories de déchets radioactifs et filières de gestion associées.



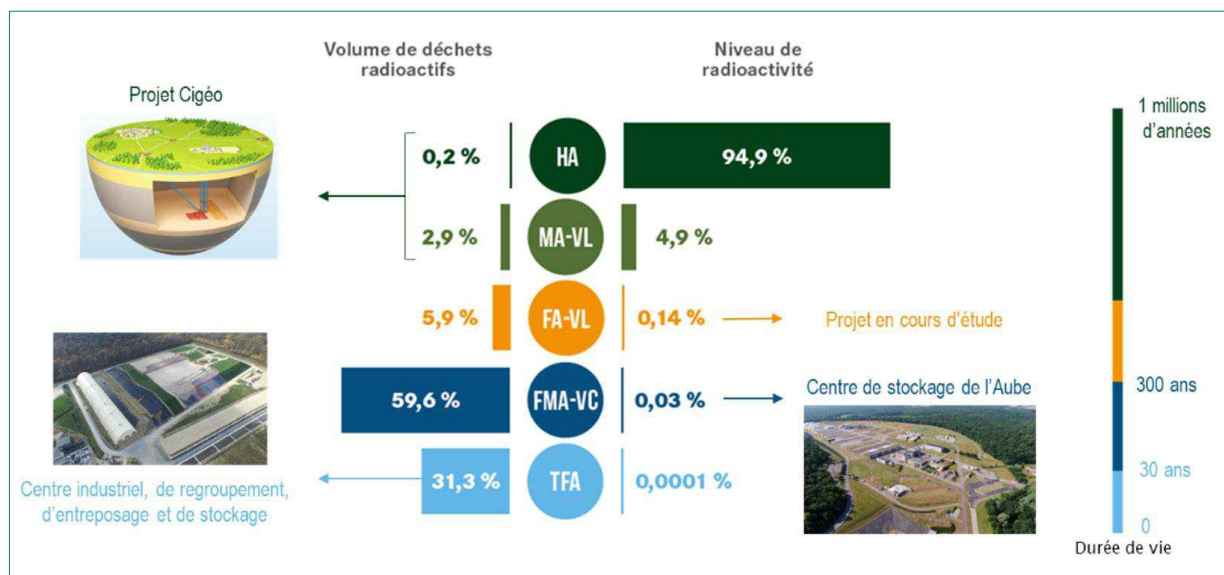


Figure 3 : Présentation du projet Cigéo.

### Les centres de stockage en projet

Les déchets de faible activité à vie longue (FA-VL) sont essentiellement des déchets radifères qui proviennent d'activités industrielles non nucléaires et des déchets graphites issus des centrales nucléaires de première génération. Ces déchets présentent des durées de vie longues mais leur niveau d'activité est faible : des solutions de gestion adaptées et proportionnées aux enjeux de sûreté sont en cours d'étude.

Pour les déchets de haute activité et moyenne activité à vie longue (HA et MA-VL), issus principalement de l'industrie électronucléaire, des activités de retraitement du combustible usé et de la recherche, l'Andra conçoit le projet Cigéo, le Centre de stockage géologique profond (cf. ci-après).

### Cigéo, le projet de centre de stockage en couche géologique profonde

Aujourd'hui en phase d'instruction par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), après que l'Andra a déposé une demande d'autorisation début 2023, le projet Cigéo a fait l'objet de plus de 30 ans de recherches et d'études de conception.

### Histoire du projet

La loi de 1991 a fixé trois voies de recherche pour assurer la gestion des déchets radioactifs HA et MA-VL : le stockage géologique (Andra), l'entreposage (CEA) et la séparation / transmutation (CEA). Après 15 ans de recherches, les résultats ont été présentés lors du débat public de 2005 et ont fait l'objet d'un avis<sup>2</sup>

par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) en 2006 qui a conclu que :

- la faisabilité technologique de la séparation / transmutation n'était pas acquise ;
- l'entreposage de longue durée ne pouvait constituer une solution de gestion définitive pour la gestion des déchets HA et MA-VL ;
- le stockage en formation géologique profonde est une solution de gestion définitive qui apparaît incontournable.

C'est donc sur cette base qu'en 2006 le Parlement fait le choix du stockage géologique profond pour gérer sur le long terme les déchets HA et MA-VL. Il a confié à l'Andra la conception d'un centre de stockage en Meuse – Haute-Marne. Ce choix, au-delà d'être technique, est également éthique et politique. En effet, il s'agit de s'appuyer sur la stabilité de la géologie pour assurer la protection à long terme de l'homme et de l'environnement, et de ne pas reporter la charge de gestion des déchets sur les générations à venir.

Après en avoir démontré la faisabilité en 2005, l'Andra a engagé la conception de Cigéo et a présenté l'esquisse du projet lors du débat public de 2013. En 2016, l'Andra a remis à l'ASN le dossier d'options de sûreté (DOS) de Cigéo, réalisé pour stabiliser les principes, les méthodes et les grands choix de conception pour la sûreté de l'installation. En 2018, l'ASN a estimé, que « le projet a atteint globalement une maturité technologique satisfaisante au stade du DOS<sup>3</sup> ». En 2022, Cigéo a été déclaré d'utilité publique, sur la base d'un dossier remis par l'Andra en 2020, et suite à son instruction, à la consultation des collectivités et à une enquête publique. En janvier 2023, l'Andra a déposé la demande d'autorisation de création, qui fait l'objet

<sup>2</sup> Avis de l'ASN du 1<sup>er</sup> février 2006 sur les recherches relatives à la gestion des déchets à haute activité et à vie longue (HAVL) menées dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991.

<sup>3</sup> Avis n°2018-AV-0300 de l'ASN du 11 janvier 2018 dossier d'options de sûreté projet Cigéo.

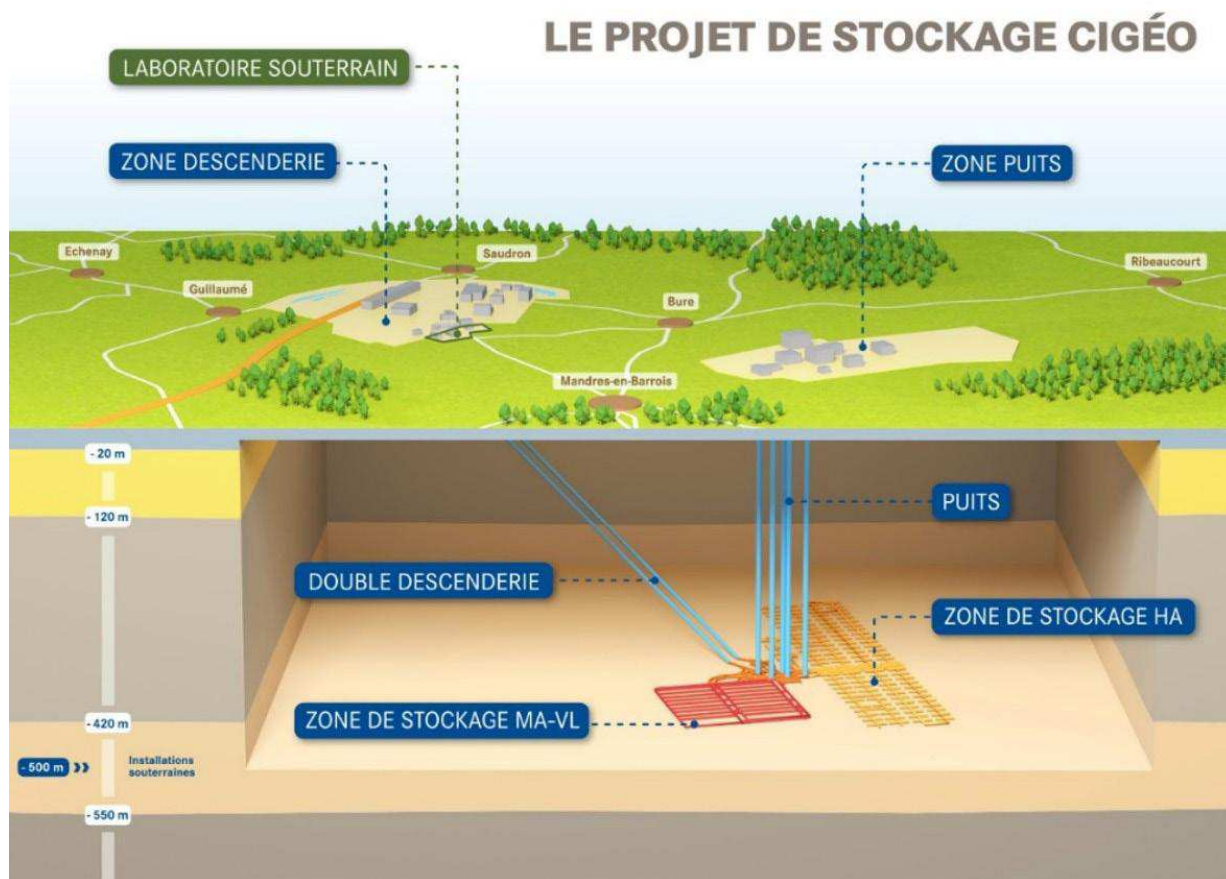


Figure 4 : Le projet Cigéo est composé de deux zones de surfaces éloignées de quelques kilomètres, et d'une installation souterraine comprenant différentes zones de stockage adaptées aux types de déchets à stocker.

d'une instruction de plusieurs années pilotée par l'Autorité de sûreté nucléaire.

### Le principe du stockage géologique

Le stockage géologique consiste à placer les colis de déchets radioactifs dans des ouvrages construits en profondeur, dans le sous-sol, et à tirer parti des propriétés naturelles de la roche pour contenir les éléments radioactifs, et très fortement ralentir leur déplacement. Les quelques éléments radioactifs les plus mobiles seront ainsi retenus dans la roche pendant plusieurs centaines de milliers d'années, et ne présenteront plus aucun danger pour l'homme et l'environnement.

### Le principe de réversibilité

Cigéo a pour objectif d'offrir aux prochaines générations une solution pérenne de gestion des déchets les plus radioactifs sur le long terme, tout en leur laissant des options ouvertes. En effet, il est conçu pour être réversible tout au long de son exploitation, pendant au moins 100 ans. Cela repose sur un concept industriel qui permet de garantir que le stockage est flexible et adaptable et que son développement permettra d'intégrer le fruit des progrès scientifiques et technologiques, ainsi que le retour d'expérience acquis au fur et à mesure de l'exploitation du stockage. Enfin, la réversibilité

permet de garantir, si cela était décidé, qu'il serait possible de récupérer les colis de déchets radioactifs. Le Conseil constitutionnel a confirmé dans sa décision 2023-1066 QPC du 27 octobre 2023 la constitutionnalité du projet Cigéo<sup>4</sup>.

### La construction progressive

La construction de l'installation sera progressive dans le temps. Elle se déroulera par phases de creusement successives définies en fonction des besoins. Ce développement progressif laisse la possibilité de conduire des réévaluations périodiques, d'intégrer le retour d'expérience et le progrès technique et technologique de manière régulière. Cette progressivité offre également aux générations suivantes une souplesse d'évolution dans la conduite du projet pour, par exemple, temporiser ou accélérer la construction, en fonction de leurs choix, de leurs besoins et de leurs contraintes.

Si le projet Cigéo est autorisé, il démarrera, progressivement, par une phase industrielle pilote qui sera elle-même progressive. Cette phase industrielle pilote se décompose en une succession de différentes phases permettant la prise en main de l'installation, de confir-

<sup>4</sup> [https://www.conseil-constitutionnel.fr/decision/2023/20231066\\_QPC.htm](https://www.conseil-constitutionnel.fr/decision/2023/20231066_QPC.htm)

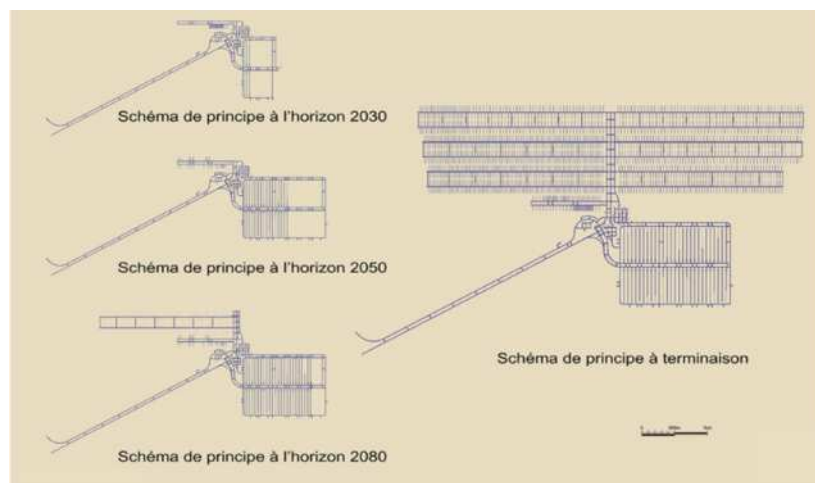


Figure 5 : La phase industrielle de Cigéo.

mer les données et d'acquérir les connaissances nécessaires à l'avancement du projet.

### L'adaptabilité

Cigéo est conçu sur la base d'un inventaire de référence qui comprend l'ensemble des déchets HA et MA-VL déjà produits et à produire par les installations actuelles, soit environ 10 000 m<sup>3</sup> de déchets HA et 73 000 m<sup>3</sup> de déchets MA-VL.

En complément, l'Andra mène des études d'adaptabilité pour vérifier que Cigéo pourrait être adapté si l'inventaire des déchets à stocker venait à évoluer. Pour ce faire l'Andra s'appuie sur un « inventaire de réserve » qui prend en compte de possibles évolutions ayant un impact sur les déchets à stocker dans Cigéo. Les études d'adaptabilité permettent de vérifier que la conception du projet ne contient pas d'éléments réhibitoires au stockage des déchets compris dans cet inventaire ou que leur stockage n'aurait pas de conséquences sur la sûreté de Cigéo.

Par exemple, la France a fait le choix du recyclage du combustible usé (qui implique la production de MOX) dans la perspective de réacteurs de quatrième génération qui permettraient de valoriser tout l'uranium et le plutonium. Dans le cadre de la démarche d'adaptabilité, l'inventaire de réserve prend en compte le stockage des MOX usés (en cas de monocyclage) ou les combustibles usés (en cas d'abandon du retraitement). Cela permet de ne pas enfermer dans les choix actuels, les générations à venir, celles qui exploiteront Cigéo, et de leur laisser des options ouvertes.

### La récupérabilité des colis pendant toute la durée d'exploitation

La récupérabilité des colis de déchets radioactifs dans le cadre de l'exploitation de Cigéo constitue un des principes directeurs de sa conception. D'un point de vue technique et conformément à une demande sociale forte traduite dans la loi, Cigéo est conçu pour permettre la reprise des colis pendant toute la durée de son exploitation, c'est-à-dire pendant plus d'une centaine d'années.

## L'impact de nouveaux réacteurs sur les filières de gestion de déchets radioactifs

La question de la gestion des déchets a fait partie intégrante des travaux préalables à la décision de l'État concernant la mise en œuvre de nouveaux réacteurs. Sur sollicitation du Gouvernement dans la perspective du rapport « Travaux relatifs au nouveau nucléaire »<sup>5</sup> publié en février 2022, l'Andra a réalisé une évaluation technique préliminaire de l'éventuel impact de 6 nouveaux réacteurs EPR sur les filières de stockage de déchets radioactifs en exploitation ou en projet<sup>6</sup>.

Cette évaluation préliminaire de l'Andra se fonde sur les hypothèses figurant dans le rapport du Gouvernement. Elle constitue une pré-analyse technique de la faisabilité du stockage, mais ne préjuge pas des processus règlementaires et démocratiques requis pour la création de nouveaux réacteurs et pour la gestion des déchets induits.

### L'impact sur les filières de gestion en exploitation

#### Le centre de stockage de l'Aube (CSA)

Les volumes supplémentaires de déchets FMA-VC et leur chronique de livraison ne conduisent qu'à un décalage de quelques mois des besoins de renouvellement des capacités de stockage. L'atteinte de la capacité autorisée du CSA interviendrait à l'horizon 2060, échéance peu différente de celle envisagée aujourd'hui sur le périmètre du parc actuel, et avec un écart d'environ 12 mois entre les deux scénarios.

<sup>5</sup> [https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2022.02.18\\_Rapport\\_nucleaire.pdf](https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2022.02.18_Rapport_nucleaire.pdf)

<sup>6</sup> <https://www.andra.fr/sites/default/files/2022-11/ZNTADG210022.pdf>

Types de déchets MA-VL	Volumes estimés de déchets produits par l'exploitation de 6 EPR2		
	Multi-recyclage	Mono-recyclage	Arrêt du recyclage
CSD-C	1 273 m <sup>3</sup>	710 m <sup>3</sup>	0 m <sup>3</sup>
Déchets activés et/ou contaminés d'exploitation et de démantèlement des réacteurs EPR2 et des autres installations du cycle14	2 678 m <sup>3</sup>	3 219 m <sup>3</sup>	2 574 m <sup>3</sup>
<b>Total</b>	<b>3 951 m<sup>3</sup></b>	<b>3 929 m<sup>3</sup></b>	<b>2 574 m<sup>3</sup></b>

Types de déchets HA	Volumes estimés de déchets produits par l'exploitation de 6 EPR2		
	Multi-recyclage	Mono-recyclage	Arrêt du recyclage
CSD-V	1 872 m <sup>3</sup>	971 m <sup>3</sup>	0 m <sup>3</sup>

Figure 6 : Les volumes estimés de déchets MA-VL et HA produits par l'exploitation de 6 réacteurs EPR2.  
CSD-C : colis standards de déchets compactés ; CSD-V : colis standards de déchets vitrifiés.

### Le centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage (Cires)

Les volumes supplémentaires de déchets TFA générés par le déploiement des 6 réacteurs EPR2 resteraient relativement faibles le temps de leur exploitation jusqu'aux années 2100, date à laquelle démarreraient les premières opérations de démantèlement. Ces volumes pourraient être absorbés dans le cadre de l'exploitation du Cires jusqu'à environ 2040 (sous réserve de l'obtention de l'autorisation d'augmentation de capacité de stockage, projet « Acaci » actuellement en instruction) puis du futur centre de stockage TFA, dont la nécessité est déjà inscrite dans le PNGMDR.

### L'impact sur le projet Cigéo

Les volumes de déchets MA-VL et HA produits par l'exploitation de 6 réacteurs EPR2 varient en fonction de la stratégie de retraitement du combustible considérée.

À titre de comparaison, les volumes inscrits dans l'inventaire de référence de Cigéo sont de l'ordre de 10 000 m<sup>3</sup> pour les déchets HA et de 73 000 m<sup>3</sup> pour les MA-VL. Ces volumes comprennent les déchets déjà produits et qui seront produits par les installations

nucléaires existantes ou qui disposent de leur autorisation de création, avec l'hypothèse d'une durée de fonctionnement des réacteurs de 50 ans en moyenne et de la poursuite de la stratégie actuelle de fermeture du cycle du combustible.

Dans le cadre des stratégies d'arrêt du recyclage et de monorecyclage, les volumes de combustibles usés produits par 6 réacteurs EPR2 et pouvant être requalifiés en déchets sont les suivants.

L'étude préliminaire n'identifie à ce stade aucun élément technique réhibitoire à leur prise en charge dans Cigéo. La prise en compte des déchets issus de 6 réacteurs EPR supplémentaires conduirait à un allongement de la durée de vie de l'installation et une augmentation de l'emprise du stockage sans remettre en cause sa faisabilité. L'emprise souterraine des ouvrages du centre de stockage Cigéo resterait comprise dans la zone géologique au sein de laquelle se trouve une couche d'argile ayant les propriétés requises. Sur le plan des exigences de sûreté en exploitation et à long terme la prise en compte dans le stockage des déchets de 6 EPR2 ne remet pas en question les modalités actuelles de maîtrise des risques.

Types de combustibles	Nombres estimés d'assemblages combustibles produits par 6 réacteurs EPR2 pouvant être requalifiés en déchets	
	Mono-recyclage	Arrêt du recyclage
UNE	Sans objet	18 720
URE	5 295	1 358
MOX	3 712	0
<b>Total</b>	<b>9 007</b>	<b>20 078</b>

Figure 7 : Volumes estimés de combustibles produits par 6 réacteurs EPR2 et pouvant être requalifiés en déchets.

# Nouveau nucléaire, participation et décision : une difficile mise en cohérence

Par Michel BADRÉ

Président de la commission nationale du débat public sur les réacteurs EPR2 d'EDF

Le projet de « nouveau nucléaire » présenté par EDF, portant sur une paire de réacteurs EPR2 à Penly dans le cadre d'un programme de six réacteurs du même type, a fait l'objet d'un débat public en 2022/2023. Les annonces des pouvoirs publics sur une décision comprise comme déjà arrêtée, et la rareté ou l'absence des informations sur quelques questions essentielles, ont rendu difficile l'exercice des droits constitutionnels reconnus à toute personne d'être informé et de participer à l'élaboration des décisions. Une trentaine de questions restées sans réponse ont été consignées dans le compte rendu du débat. Seule la réponse à ces questions permettra d'apprécier l'utilité de sa contribution à l'exercice de ces droits.

Une note d'analyse de la Commission nationale du débat public (CNDP) sur 17 ans de débats nucléaires<sup>1</sup>, publiée en février 2022, avait relevé dans ces débats « un sentiment constant que les décisions concernant le nucléaire sont prises sans tenir compte de la parole citoyenne ».

Le programme de « nouveau nucléaire » pouvait être l'occasion d'infirmier ce constat sévère.

Le projet présenté par EDF et RTE consistait à construire une première paire de deux réacteurs à Penly dans le cadre d'un programme de six réacteurs EPR2. Il a fait l'objet, sur saisine des maîtres d'ouvrage, d'un débat public organisé sous la responsabilité de la CNDP d'octobre 2022 à février 2023.

Ce débat a été difficile et parfois tendu. Sans écarter les responsabilités des organisateurs dans ces difficultés, on s'attachera ici à comprendre leur origine, et ce qui pourrait encore être fait pour les réduire.

Le lecteur se reportera pour tout élément plus précis nécessaire à la compréhension de cet article au compte rendu complet du débat<sup>2</sup> publié par la CNDP le 27 avril 2023.

## Le cadre et la préparation du débat

Rappelons d'abord qu'un débat public n'est pas un référendum ou un sondage pour ou contre un projet, ni une opération pédagogique relevant de la communication du maître d'ouvrage.

C'est la mise en œuvre de deux droits liés entre eux, ouverts à toute personne par la charte constitutionnelle de l'environnement de 2005 : accéder aux informations détenues par les autorités publiques, et participer à l'élaboration des décisions.

Le débat doit pour cela, selon la loi<sup>3</sup>, présenter le projet du maître d'ouvrage, permettre d'en apprécier l'opportunité et les conséquences, et les raisons qui ont conduit à écarter les solutions alternatives envisageables. Sa crédibilité suppose évidemment que la décision de réalisation ne soit pas encore prise.

L'analyse rétrospective de la CNDP citée plus haut montre que ces conditions sont rarement toutes remplies, mais la préparation du débat laissait penser qu'elles pourraient l'être ici.

Le cadre de mise en œuvre du nouveau nucléaire relève en effet de la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE). La PPE en vigueur, datant de 2020, ne permettait pas de lancer un nouveau programme mais en définissait les conditions préalables. Le vote d'une loi de programmation sur l'énergie prévue pour 2023 doit conduire à établir une nouvelle PPE, futur cadre de définition de l'opportunité du projet.

Au vu du dossier du maître d'ouvrage et des modalités proposées par la commission chargée du débat, la CNDP a estimé en avril 2022 qu'il serait possible d'examiner l'opportunité de la proposition et ses options alternatives, ses impacts, ses conditions de bonne fin, ses conséquences économiques, et la prise en compte des risques, notamment climatiques et géopolitiques.

Le débat devait ainsi contribuer à éclairer les décisions parlementaires et gouvernementales à venir sur la

<sup>1</sup> <https://www.debatpublic.fr/nucleaire-les-enseignements-de-17-ans-de-debats-publics-et-concertations-2936>

<sup>2</sup> <https://www.debatpublic.fr/sites/default/files/2023-04/PenlyEPR-Compte-rendu.pdf>

<sup>3</sup> Article L.121-1 I du code de l'environnement.

future PPE, puis les décisions d'autorisation de création à prendre, le cas échéant, sur chaque nouveau réacteur.

## Le déroulement du débat

Préparé sur ces bases, le débat s'est ouvert en octobre 2022 avec la participation de toutes les organisations représentatives des parties prenantes, pro ou anti-nucléaires, ce qui ne s'était jamais produit jusque-là. La mise en place par le Gouvernement de la Délégation interministérielle au nouveau nucléaire et le dépôt du projet de loi sur l'accélération des procédures nucléaires avaient conduit les organisateurs du débat à rappeler que ces mesures ne préjugeaient pas des décisions de lancement du programme, relevant de la loi de programmation et de la PPE qui devait la suivre. Ils avaient été entendus par les participants.

Les premières séances publiques, animées, se sont déroulées sans incident particulier.

C'est en janvier 2023, lors de l'examen par le Sénat du projet de loi destiné à accélérer les procédures nucléaires, que le vote d'amendements levant les limitations à la construction de nouveaux réacteurs a mis fin au consensus des parties prenantes sur l'utilité du débat. Ce vote portant sur l'opportunité du nouveau nucléaire et non sur des mesures de procédure était confirmé par l'Assemblée nationale avec l'approbation tacite du Gouvernement quelques jours après la fin du débat et avant la publication de son compte rendu. Indépendamment de toute appréciation sur la nature de la disposition votée, relevant évidemment de la légitimité du seul Parlement, ce vote contredisait par son calendrier l'affirmation des organisateurs sur la justification d'un débat destiné à éclairer ensuite les délibérations parlementaires.

Quelques jours après ce vote du Sénat, dans un climat devenu plus tendu, des perturbations dues à des manifestants anti-nucléaires lors de deux séances à Lille et Lyon conduisaient à interrompre ces séances, dans le calme et sans intervention des forces de l'ordre. Signe de l'ambiance dégradée du débat, quelques personnes présentes ou absentes à ces séances reprochaient publiquement aux organisateurs un comportement considéré comme une complicité de fait avec les manifestants<sup>4</sup> et l'aveu d'un parti pris anti-nucléaire<sup>5</sup>. On laissera chacun apprécier les conséquences qu'auraient pu avoir une évacuation forcée des manifestants préconisée par ces commentaires, en l'absence de toute menace à la sécurité qui pouvait seule la justifier en droit.

Constatant ces difficultés, la CNDP décidait le 7 février 2023 que les modalités du débat seraient modifiées pour les trois dernières semaines, et consacrées au seul thème de la participation du public à la gouver-

nance des projets nucléaires. Les nombreuses contributions écrites et orales reçues pour la séance du 27 février montraient l'intérêt suscité par cette question. Elles confirmaient aussi le clivage entre les partisans d'un débat ouvert et ceux qui estiment suffisants des travaux préparatoires limités aux experts institutionnels et au Parlement, la question étant jugée par eux trop complexe pour être abordée par d'autres et trop cli-vante pour permettre un débat serein.

## Quelques enseignements du débat

Trois thèmes méritent une attention particulière.

### La déconnexion entre participation du public et processus de décision

Les processus de décision sur des grands projets sont toujours complexes : ils s'insèrent dans des politiques plus larges, supposées définies et dont ils permettent l'application, et ils sont liés à de multiples autres décisions simultanées ou successives, ne dépendant pas du seul maître d'ouvrage.

La logique voudrait que les politiques soient définies avant les projets, et que les préalables à une décision soient levés avant que la décision soit prise. Il en est rarement ainsi dans la vraie vie, par exemple en matière de financement. Mais il est assez rare de voir un processus de décision aussi déroutant que celui du nouveau nucléaire au regard de la logique d'une information et d'une participation du public préalables à la décision : le projet a été annoncé à la France entière (certes comme un « souhait » et pas comme une décision) par le discours présidentiel de Belfort en février 2022, la saisine de la CNDP est intervenue avec le projet précis d'EDF quelques jours plus tard, les premiers éléments de cadrage ont été arrêtés en cours de débat en janvier 2023, le reste de ce cadrage résultera de la PPE à venir, et les justifications de la proposition en matière économique et financière et en matière de garantie de bonne fin et de maîtrise des risques ne sont encore que très partiels à la fin de 2023.

On notera au passage que le calendrier surprenant de ce processus de décision, du discours de Belfort à la PPE et aux futures décisions d'autorisation de création de réacteurs, n'a été en rien allongé par le calendrier du débat public, contrairement à la critique fréquemment faite aux procédures de concertation.

Concernant les éléments justificatifs de la proposition, l'exemple de l'évaluation économique et financière du projet et de ses conséquences sur les coûts de production et les prix de vente futurs de l'électricité est révélateur de cette situation étonnante. Malgré les priorités économiques des pouvoirs publics en matière de compétitivité, de pouvoir d'achat et de maîtrise des dépenses publiques, aucune indication n'a été fournie au public par le Gouvernement ni par EDF sur les coûts et les prix à venir de l'électricité pendant le débat. Il a fallu attendre des articles de presse en octobre 2023 pour prendre connaissance des débats entre le Gouvernement et EDF sur ces évaluations de coût et de prix. Les montants cités et leurs écarts sont tels

<sup>4</sup> Cf. Contribution écrite de l'association « Les Voix du nucléaire » au séminaire du 27 février 2023, pp. 2-3.

<sup>5</sup> Intervention de Guillaume Roquette, directeur de la rédaction du *Figaro Magazine* sur France Inter le 14 février 2023, et article de G. Woesner sur le Point.fr le 11 février 2023.

qu'ils ne peuvent être considérés comme sans effet sur la justification d'un programme aussi important par ses effets au regard d'autres options : comment débattre, en l'absence de toute information sur un sujet aussi essentiel ?

Mais concernant le cadrage de la proposition en opportunité, le point le plus sensible reste celui de l'écrasement du calendrier du débat par celui de la décision : pourquoi débattre, quand les votes du Parlement et les annonces gouvernementales laissent comprendre que la décision est déjà prise ?

### L'expertise et les questions controversées

Tous les éléments sur lesquels doit porter le débat, rappelés plus haut, reposent sur une expertise fiable et accessible au public, y compris dans ses aspects controversés.

Malgré une opération préalable d'analyse de controverse effectuée avec les représentants des parties prenantes, généralement appréciée, le débat a donné lieu en permanence à des tensions, exprimées en ligne plutôt qu'en séance publique, autour d'affirmations contestées. La commission s'est vu reprocher de ne pas avoir mis en place un dispositif de vérification instantané de ces affirmations. Elle a estimé qu'au-delà de quelques cas très simples, une telle vérification immédiate d'éléments de débat par définition controversés ne pouvait pas être effectuée de façon fiable. Il n'en reste pas moins qu'un dispositif de vérification robuste serait utile dans un débat de cette nature, avec les validations externes et les délais nécessaires. Les affirmations controversées sont venues aussi bien de partisans que d'adversaires du projet, indépendamment des nombreuses prises de position non argumentées ou des procès d'intention, échappant à toute objectivation et polluant significativement les transmissions en ligne.

Plus généralement et comme dans d'autres débats nucléaires, la concentration de la communauté professionnelle spécialisée au sein de quelques organisations très importantes a posé un problème d'accès à une expertise contradictoire qualifiée et disponible : le déséquilibre entre les capacités d'expertise des parties en présence ne facilite pas un débat serein et équilibré, ouvert à toutes les options. Il s'agit là d'un sujet sensible, renvoyant à des questions sur la séparation entre expertise et décision, sur les moyens de l'expertise non institutionnelle, et sur la possibilité réelle de contre-expertises indépendantes. Ces questions ne se posent pas dans les mêmes termes pour d'autres grandes infrastructures publiques, par exemple dans le domaine des transports, où la structure professionnelle est différente.

### La diversité des publics

Comme dans d'autres débats organisés précédemment, les séances publiques ouvertes à tous ont laissé peu de place à l'expression du « grand public » non professionnel : les présentations précises du maître d'ouvrage et des experts et les interventions de parties prenantes souhaitant, légitimement, faire connaître leur point de vue complet sur les thèmes abordés se

prêtent mal à des échanges réellement ouverts avec des non-spécialistes, qui demandent du temps.

En revanche toutes les modalités de travail réunissant des groupes restreints sur des durées plus longues pour approfondir des questions posées par le projet ont suscité un vif intérêt de la part des personnes sollicitées : étudiants, groupes de personnes réunies par des centres sociaux, Conseil régional des jeunes de Normandie, panel de personnes tirées au sort pour réfléchir à la question des risques, etc. Toutes les expressions ainsi recueillies contredisent l'avis, parfois exprimé, selon lequel des questions aussi techniques que celles mises en débat ne peuvent être traitées que par des experts du domaine, seuls qualifiés pour éclairer les décisions à prendre par les politiques.

On ne peut par ailleurs faire abstraction des difficultés provoquées, ou accrues, dans un débat difficile par l'agressivité des commentaires exprimés sur le fil de discussion des transmissions en ligne et les réseaux sociaux. Cette situation appelle une réflexion sortant du cadre du présent article.

## Conclusion

Revenons aux analyses critiques de la CNDP sur 17 ans de débats nucléaires : a-t-on fait mieux ici ?

Certes, les obligations légales en matière de débat public ont été respectées : le débat s'est tenu jusqu'au bout, malgré les tensions et les critiques de toute sorte.

Mais le but d'un débat public n'est pas seulement d'exister, il est de permettre l'information du public et sa participation à la préparation des décisions, selon le dessein idéal exprimé par Jürgen Habermas pour qui « le couplage d'une participation inclusive et d'une délibération discursive explique l'espoir de parvenir à des résultats acceptables en raison »<sup>6</sup>.

Cette exigence démocratique, de portée constitutionnelle, ne peut prendre corps que si le processus d'élaboration des décisions n'est pas déconnecté dans sa méthode et son calendrier de l'information et de la participation du public.

On est resté assez loin ici de l'idéal habermassien, au risque de maintenir le doute sur des décisions réellement « acceptables en raison », et de créer des frustrations durables.

Le débat a cependant listé une trentaine de questions restées ouvertes en fin de débat.

Ces questions portent sur le cadre général de réalisation du projet, sur son équilibre économique, sur les risques de dérive des coûts et leur maîtrise, sur la gestion des combustibles et des déchets, sur les réponses aux risques climatiques et géostratégiques pris en compte.

Elles ne sont pas toutes secondaires.

Souhaitons qu'il leur soit apporté des réponses complètes.

<sup>6</sup> *Espace public et démocratie délibérative : un tournant*, Nrf essais 2023, p. 22.

# Quelles conditions pour relancer durablement le nucléaire en France ?

Par Yves BRÉCHET

Professeur associé à l'Université de Monash (Australie) et à l'Université de McMaster (Canada), directeur scientifique de la compagnie Saint-Gobain et président du conseil scientifique de Framatome

On donne dans cet article les conditions pour relancer durablement le nucléaire, mais aussi la nécessité de mettre en place une stratégie pour un nucléaire durable. Ces conditions sont d'ordre politique aussi bien qu'organisationnel. Elles exigent de rendre à sa filière son attractivité, de développer un vivier de formations, et de relancer sans attendre une filière à neutrons rapides qui est indispensable pour que le nucléaire soit une solution soutenable dans un monde en tensions géopolitiques fortes.

## Une volonté politique ferme

La première condition pour relancer durablement le nucléaire en France est d'être convaincu de sa nécessité. Cela implique une double prise de conscience politique. L'énergie est le sang de notre industrie, tout comme les matières premières en sont la chair. L'énergie est une composante incontournable de notre souveraineté industrielle (Bouttes, 2023a). Dans notre vieux pays colbertiste, l'énergie fait partie des missions régaliennes de l'État, elle lui assure sa souveraineté, et l'État doit jouer un rôle essentiel dans la politique énergétique. La nécessité de décarboner notre industrie en notre société impose une électrification croissante, et l'existence d'une industrie énergivore nécessite une production d'électricité stable, centralisée, confortée par un réseau électrique sans défaillance. Ces exigences conduisent naturellement à une source d'électricité pilotable et centralisée, et, dans un pays comme le nôtre sans ressources minérales, l'énergie nucléaire s'impose. Cette évidence était à la racine du plan Messmer en 1973. Cette évidence, du rôle indispensable de l'État (c'est-à-dire de renoncer à la mystique du marché pour un produit non stockable) et du caractère incontournable de l'énergie nucléaire (n'en déplaise à deux décennies de propagande anti-nucléaire) doit redevenir ce qu'elle n'aurait jamais dû cesser d'être : la pierre d'angle de la politique énergétique du pays (Bouttes, 2023b).

La deuxième condition est la prise de conscience des échelles de temps (Bréchet, 2023). Dans un monde où le discours prime l'action et l'événement sur la durée, on a juste oublié les échelles de temps nécessaires pour une politique énergétique rationnelle : compte tenu des investissements nécessaires, et de leur durée d'exploitation, une politique énergétique doit être définie

à l'échelle de plusieurs décennies. Les « programmations pluriannuelles de l'énergie » qui portent sur quelques années seulement, sont des outils de communication, pas des outils de programmation, il est urgent d'en prendre conscience. Et cette prise de conscience doit aller de pair avec une analyse technique des dossiers par des institutions dont c'est le métier, comme le CEA. Encore faut-il que sa mission soit réaffirmée en ce sens, et que la direction de l'institution ait le niveau scientifique nécessaire pour la mettre en œuvre, ce qui jusqu'à récemment avait toujours été le cas dans son histoire.

La troisième condition pour relancer durablement le nucléaire est de réaliser que c'est une énergie durable et pas une énergie de transition. Tant que les énergies renouvelables, par nature intermittentes, n'auront pas capacité à être stockées efficacement, et tant que le vecteur électrique ne pourra pas être efficacement remplacé, le recours au nucléaire et à l'hydraulique sera incontournable. Parier sur des développements « à venir » (pour le stockage) au moment où il y a urgence à décarboner notre économie en réponse à la crise climatique, relève de l'inconscience. Renoncer à une version « durable » de cette énergie en fermant le cycle du combustible par le moyen des Réacteurs à Neutrons Rapides, ce qui est exactement ce qu'a fait le Gouvernement en arrêtant le projet Astrid à l'automne 2019, est une faute historique (Bréchet, 2019).

Cette triple prise de conscience du rôle nécessaire de l'État dans la souveraineté énergétique, du rôle central du nucléaire dans cette souveraineté, et du caractère « durable » de cette solution économe de ressources et de matière, est nécessaire pour définir une politique énergétique qui ne soit pas un opportunisme toxique.



## Une autorité de sûreté compétente et indépendante

La relance du nucléaire en France ne peut se faire aux dépens de la sûreté. Mais la sûreté ne saurait être synonyme d'inefficacité. La variabilité des exigences, l'idée qu'augmenter les coûts de la sûreté augmenterait nécessairement la sûreté, et l'idée étrange que la justice est mieux rendue si l'instruction est faite sur la place publique et qu'il n'y a pas de procédure d'appel, ont conduit à une sûreté « notariale » plutôt qu'à une « sûreté d'ingénieur ». Il y aurait beaucoup à gagner à réexaminer l'évolution de la sûreté nucléaire aux États-Unis dans les années 1980, au moment où une même sûreté notariale manquait de paralyser tout le système sans aucun bénéfice pour le consommateur. L'idée simple de distinguer clairement la définition des méthodes et l'analyse des dossiers, et de revenir au fonctionnement du BCCN des années de la construction du parc serait grandement bénéfique (Bréchet, 2022).

Un premier pas dans cette direction de simplification est le rapprochement entre l'ASN et l'IRSN. Cette question a été abordée de la pire façon possible sous la forme d'une « injonction venue d'en haut » sans que l'explication nécessaire ait été fournie. De telle sorte qu'une décision allant dans le bon sens, à savoir vers une plus grande efficacité et une plus grande indépendance de l'autorité de sûreté, a pu apparaître comme une tentative maladroite et autoritaire de la contrôler. C'est d'autant plus dommageable que la relance affichée du nucléaire va faire peser sur les autorités de sûreté une charge de travail considérable aussi bien pour garantir la prolongation du parc dans de bonnes conditions, pour construire les nouveaux réacteurs EPR, pour examiner les options proposées pour le nouveau nucléaire (divers SMR), et enfin pour relancer la question de la fermeture du cycle du combustible *via* les réacteurs à neutrons rapides. Avoir une autorité de sûreté compétente et indépendante est une garantie de la sûreté du programme nucléaire. Avoir une autorité de sûreté efficace est une condition indispensable pour mener à bien un programme de « reconstruction de la filière électronucléaire » indispensable au pays, indispensable pour remplir ses objectifs environnementaux et pour assurer sa compétitivité industrielle. C'est dire que cette question mérite mieux que le traitement pour le moins maladroit qui en a été fait, et mieux que les réactions épidermiques qu'il a suscitées. Il faut une autorité de sûreté indépendante et compétente. L'ASN est par construction indépendante du pouvoir, et elle en réfère au Parlement (*via* l'OPECST). L'IRSN est son « bras armé » en termes de compétences, et elle en réfère au Gouvernement (ministère de la Transition écologique, ministère de la Défense), ce qui lui donne une indépendance moindre et *de facto* l'inscrit comme un contre-pouvoir. Il n'y a aucune raison objective que l'IRSN soit moins indépendante que l'ASN, il n'y a aucune raison qu'elle en soit séparée. Cette spécificité française (Bréchet, 2022) n'a pas lieu d'être. Le rattachement de l'IRSN à l'ASN, les deux entièrement financées par l'État et rapportant annuellement au Parlement assurerait à la fois l'indépendance totale de la sûreté, et

éviterait les querelles de préséance qui ont trop souvent empoisonné les relations entre les deux institutions. Un tel rapprochement à l'évidence devrait être sous une autorité unique, celle qui est responsable des décisions prises, à savoir l'ASN. Une gouvernance duale ne peut mener qu'à la confusion, et la confusion ne peut mener qu'à l'inefficacité (y compris à l'inefficacité en termes de sûreté). Notez que l'intégration de l'expertise à l'ASN n'est pas une nouveauté révolutionnaire, c'est déjà le cas avec la DEP qui s'occupe des instruments sous pression, et cela depuis des années, en donnant entière satisfaction. L'autorité unique ainsi constituée aurait en son sein même une capacité d'expertise et de recherche, mais elle pourrait de surcroît faire appel à des compétences extérieures (universités, centres de recherche...) pour compléter ses compétences au meilleur niveau.

## Un vivier de compétences professionnelles

### La question de la formation est essentielle

La filière électronucléaire nécessite des formations dans des domaines très divers, et à des niveaux aussi bien de techniciens que d'ingénieurs. La nature même du nucléaire impose une formation au meilleur niveau associée avec une intégrité irréprochable. Toute déviation de ces deux exigences, soit par perte de compétence, soit par perte de rigueur, peut être très dommageable. C'est pour cela que la formation est une question essentielle, et que le futur de la filière dépendra de sa capacité à attirer des techniciens et ingénieurs compétents et motivés.

### Les compétences spécifiques et les compétences partagées

Dans le domaine des compétences, on doit distinguer les compétences spécifiques à la filière (neutronique, radioprotection...) des compétences partagées avec d'autres filières (mécanique, thermique, matériaux, forge, soudage...). Les compétences spécifiques doivent être cultivées avec soin car leur disparition est difficilement réparable : il faut attirer des jeunes excellents vers la filière nucléaire, et il faut le faire de telle façon que l'expertise existante soit conservée : la notion de *mentoring* est ici essentielle. Les compétences partagées nécessitent d'avoir un vivier de formation et de recrutement qui puisse être accessible pour les grandes filières industrielles (automobile, aéronautique...). Si les compétences spécifiques pâtissent de l'image dégradée du nucléaire, les compétences partagées pâtissent de la destruction méthodique du tissu industriel français depuis 30 ans. Il est urgent pour la filière nucléaire, mais aussi pour les grandes filières industrielles, de « ranimer la flamme », de redonner aux jeunes ingénieurs et techniciens la passion de construire, de fabriquer.

### Apprendre en faisant

Dans le domaine nucléaire, mais plus généralement dans tous les domaines de l'industrie lourde, on

apprend en faisant. Le problème majeur de la filière électronucléaire a été l'absence de grand projet industriel pendant 20 ans. Quand le parc électronucléaire a été lancé, les premières années n'ont pas été faciles, non plus que les années actuelles : à l'époque on n'avait pas encore fait, aujourd'hui on n'a pas fait depuis longtemps. Outre la sagesse de choisir un modèle de réacteur éprouvé, ce qui a aidé au début du nucléaire est que les compétences partagées étaient solides grâce à une industrie en pleine expansion ; ce qui pénalise le nucléaire aujourd'hui est que c'est l'ensemble du tissu industriel qu'on a laissé en déshérence par une négligence coupable. Ce qui a entraîné le nucléaire à ses débuts a été la volonté collective d'un pays de résoudre un problème majeur d'autonomie énergétique. Ce qui a pénalisé le nucléaire jusqu'à l'inflexion récente, c'est l'incapacité politique à avoir le courage de reconnaître que le nucléaire est une composante essentielle de la lutte contre le réchauffement climatique. Il faut apprendre en faisant, on ne peut faire qu'en pouvant assurer une certaine stabilité, et cette stabilité nécessite un État véritablement stratégique.

Les atouts de la filière électronucléaire française sont nombreux, ses faiblesses dangereuses. En particulier pour sa compétitivité. La montée en qualité de ce point de vue passe par une augmentation de la compétence, qui elle-même nécessite un investissement fort dans la formation. Framatome s'est résolument engagé dans cette direction, investissant dans des jeunes, ingénieurs, techniciens, travaillant avec les centres de formation publics mais ayant aussi ses écoles de formation internes. La remontée en compétence, au service de la compétitivité de la filière est une pièce essentielle de son redressement.

La dimension internationale des activités de l'entreprise est à la fois un facteur attractif pour les jeunes, mais aussi une façon de bénéficier d'une image positive partout et trop peu valorisée dans notre pays.

Le GIEC l'a encore dit dans son dernier rapport : le nucléaire sera une composante importante de la lutte contre le réchauffement climatique. La France a une filière industrielle de qualité dans ce secteur, et des structures de formation qui ne demandent qu'à être mobilisées, à tous les niveaux du technicien à l'ingénieur, elle a une histoire et une expérience, elle pourrait, pour peu qu'elle prenne conscience de sa valeur, être un des acteurs majeurs du futur nucléaire.

## Une capacité à gérer les grands chantiers

Au risque de choquer, je dirais que, une fois réglée la question des viviers de compétences et de l'attractivité de la filière, le problème majeur de l'industrie électronucléaire est un problème organisationnel. La filière des réacteurs à eau pressurisée (REP) est une technologie mature, il n'y a pas d'obstacles scientifiques dont on ne voit pas comment les contourner, les marronniers habituels des antinucléaires, l'incapacité de démanteler, l'impossibilité de gérer les déchets ne résistent pas deux minutes à un examen, non seulement de ce que

dit la physique, mais encore simplement de l'histoire des réalisations en dehors de l'hexagone depuis trois décennies.

La vraie difficulté est de réapprendre à mener des grands chantiers, à retrouver l'esprit et l'organisation mise en place au temps du plan Messmer par Marcel Boiteux et Michel Hug (Bréchet et Fluchère, 2020).

C'est un problème organisationnel qui a laissé une ingénierie « en roue libre » accumuler les « innovations » sans se préoccuper outre mesure de la constructibilité et moins encore des coûts. C'est une tentation compréhensible quand on ne construit plus, elle devient toxique quand on doit construire. Ce serait sans doute un exercice intéressant, et peut être douloureux, que de chiffrer le nombre d'architectes par modèles de réacteurs chez les concurrents étrangers comme Westinghouse. Cette accumulation d'innovations dans un cadre réglementaire non stabilisé (et il est difficile de l'être sur des durées de temps aussi longues...) a fait oublier que c'est la réplication industrielle dans une approche en série et avec un calendrier resserré qui permettra une courbe d'apprentissage de l'ensemble de l'outil industriel, génératrice d'économies d'échelle importantes qui rendra *in fine* acceptable et supportable économiquement ces programmes. Il faut donc avoir le courage de lutter contre les modifications, d'accepter un *design* simple tel qu'il est même s'il n'est pas parfait (le mieux est l'ennemi du bien) et de s'y tenir. Cela implique une discipline concernant tous les acteurs de la filière (Autorités de sûreté, clients/opérateurs, concepteurs et constructeurs) ainsi qu'une stabilité réglementaire sur le long terme.

Toujours sur le plan de l'organisation industrielle, il faut éviter de mettre à l'arrêt l'outil industriel en charge des constructions en ne le concentrant que sur la maintenance. En France, par exemple, si nous devions reconstruire des réacteurs de type 900 ou 1 300 MWe, nous rencontrerions probablement certaines des mêmes difficultés que pour FA3, du fait de notre perte d'expérience de construction, alors que nous connaissons très bien ces *designs* et que nous les avons construits il y a 40 ans dans un rythme et une vitesse inégalée (le contexte était aussi différent à cette époque, et la désindustrialisation n'avait pas fait son œuvre délétère dans l'indifférence générale). Le *design*, lorsqu'il a été mis en œuvre une première fois sur une tête de série (FOAK), pour peu qu'il soit suffisamment simple et constructible, n'est plus le sujet au premier ordre, mais bien la préparation et l'entraînement de l'outil industriel (capacités et ressources).

La maîtrise des grands chantiers gagnerait à s'inspirer des grandes industries qui l'ont conservée (les pétroliers, l'aéronautique, les grands acteurs du génie civil...). Il ne me semblerait pas scandaleux de faire appel à leurs services. Mais *a minima*, une idée claire des rôles respectifs de la maîtrise d'œuvre et de la maîtrise d'ouvrage est un prérequis pour sortir de l'ornière ou vingt ans d'absence de grands projets nous ont embourbés.

Le maître d'ouvrage (MOA) est celui qui finance, définit l'expression du besoin et le planning directeur du pro-

gramme ou du projet à réaliser. Il est assisté si besoin d'une expertise technique indépendante lui permettant de challenger et d'émettre un avis technique sur ce que lui propose le maître d'œuvre (MOE). La MOA est une organisation permanente qui incarne ce rôle et ses responsabilités. Elle exerce une autorité vis-à-vis du maître d'œuvre qui travaille à son profit. C'est la MOA qui réceptionne et accepte les livrables et le « produit » réalisé par le MOE. Dans le domaine nucléaire la MOA est l'organisation qui a la charge de la relation avec l'autorité de sûreté (AS) nucléaire et qui a la charge de l'organiser au sein de son programme en y incluant la MOE et les fournisseurs. Toute relation avec l'AS ne se conçoit qu'à travers la MOA et selon les modalités que celle-ci a défini au sein de son programme ou projet. La MOA définit l'organisation industrielle du programme et valide aussi l'organisation que la MOE souhaite mettre en place avec ses fournisseurs. La MOA définit ou précise les référentiels réglementaires applicables ainsi que la politique de surveillance qu'elle souhaite mettre en place sur l'ensemble de son programme/projet.

Le maître d'œuvre (MOE) est chargé de traduire l'expression de besoin du MOA, en lui proposant notamment une organisation, avec des fournisseurs, et un planning pour réaliser le produit demandé et en tenant du budget qui aura été validé par le MOA. Le MOE peut se faire assister si besoin d'une assistance à MOE. Le MOE est chargé de décliner dans le projet (et les fournisseurs) les référentiels techniques, réglementaires, de surveillance (qualité, sûreté, sécurité), demandés par le MOA au titre de la réalisation du projet. Le MOE rend compte régulièrement à la MOA de l'exécution opérationnel, de la tenue des jalons et de l'exécution budgétaire du projet.

Au-delà de la position d'autorité que la MOA exerce vis-à-vis de la MOE, leur relation réciproque doit se comprendre dans un jeu de rôle entre ces deux acteurs où chacune des parties doit défendre des intérêts qui lui sont propres mais dont l'objectif commun est la réalisation du produit. Pour simplifier la MOA définit et commande un produit qu'elle acceptera ultérieurement et devra *in fine* « vivre avec » ; il y a une notion de temps long MOA. La MOE doit réaliser un produit dans un calendrier donné un budget donné et des performances à atteindre. Le « tout » devant être livré le plus rapidement possible afin d'éviter de perdre de l'argent ; la MOE s'inscrit dans un temps plus court que celui de la MOA.

## Une stratégie d'ensemble incluant la fermeture du cycle du combustible

### Simplifier

Ce serait une erreur de penser que la réalisation de l'EPR soit l'alpha et l'oméga de la renaissance du nucléaire en France. Comme rappelé ci-dessus, on ne réduit pas les coûts par l'innovation, mais par la répétition, par l'effet de série.

En passant du CP 900 à l'EPR, on est passé de 100 000 m<sup>3</sup> de béton à 350 000 m<sup>3</sup>, de 10 000 tonnes de ferrailage à 45 000 tonnes, de 30 km de tuyaux à 145 km, et tout est à l'avenant, jusqu'aux nombres de robinets qui passe de 3 900 à 12 000 ! La seule modification acceptable sur l'EPR est de simplifier et de construire.

### Pour une version à puissance moyenne

Il est évident qu'il faut, au moins pour un déploiement à l'international, un modèle de puissance moyenne. Il serait utile en ce sens de regarder objectivement les causes de l'arrêt regrettable de l'ATMEA en codéveloppement avec les Japonais, après 10 ans de développement. La question du développement de cette filière de moyenne puissance, en respectant tous les critères de souveraineté industrielle, nécessite d'être posée dès aujourd'hui.

À l'international, le marché des réacteurs nucléaires neufs est essentiellement un marché calibré pour des réacteurs de moyenne puissance (entre 1 000 et 1 200 MWe). Cela s'explique essentiellement par la capacité des réseaux électriques à accepter et gérer des sources de production électriques de cette gamme de puissance. Seuls quelques pays (dont la France, l'Allemagne, le Royaume-Uni, la Chine, l'Inde...) ont des réseaux plus modernes pouvant accepter et gérer ses sources de production de hautes puissances (de l'ordre de 1 500 MWe). Disposer d'une offre sur la moyenne puissance est important pour la filière nucléaire française si l'on ne veut pas faire porter seulement à la France le coût de possession industriel (capacités et ressources) sur le long terme. L'obtention de marché de construction neuves de réacteurs nucléaires à l'export est aussi une façon de contribuer à une sécurisation ou une prise de part de marché sur les futurs parcs en exploitation que l'on aura contribué à réaliser.

### Se garder des mirages

On parle beaucoup de SMR. On trouve dans cette auberge espagnole à peu près tout et n'importe quoi, le meilleur comme le pire. S'autorisant de la faveur du temps et du prince pour les *start-up* on en oublie de poser les questions évidentes en préliminaire de tout financement public. À commencer par son intégration dans la logique du parc électronucléaire français, à savoir la filière U/Pu. Il est en préliminaire indispensable de définir les applications visées, c'est à dire celles où le surcoût des petites tailles est justifié (comme les sites miniers loin des réseaux électriques, ou les usines de désalinisation). Le minimum qu'on puisse demander est que la physique (en termes de thermo-hydraulique, de neutronique, de thermodynamique) soit saine. Les aspects structurants : « quels combustibles ? quels caloporteurs ? quels dispositifs de sûreté ? » doivent être analysés. Les aspects nécessaires pour réaliser doivent être explicités : « quels matériaux ? quels problèmes éventuels de corrosion, de fatigue, de fluage ? », « quels procédés de fabrication ? ». Une discussion sur les « points qui font mal » : fabrication, sûreté, contrôle non destructifs, est indispensable. Les questions géopolitiques, en particulier en termes de pro-

lification, en termes de ressources en combustible sont aussi essentielles. En toile de fond de cet ensemble de questions, il faudrait demander la liste des équipes et laboratoires scientifiques avec qui les demandeurs de fonds publics collaborent et le contenu « réel » de ces collaborations (ce qui éviterait les projets lunaires de tous ceux qui « imaginent le nucléaire ». C'est un métier qui ne s'improvise pas). Il ne suffit pas pour reprendre une formule connue, de « sauter comme des cabris » en disant « SMR, SMR », et d'arguer de l'implication des États-Unis dans ce secteur (qui ne va pas à ce jour jusqu'à la construction...), il faut réaliser que les financements aux États-Unis sont dans la main de fer du DOE qui a une évaluation scientifique des dossiers qu'on aimerait trouver en France dans l'appareil d'État. Il ne faudrait pas que sur ces questions, l'État français, après avoir passé quelques décennies à ne rien faire et, plus récemment, quelques années à défaire, se contente aujourd'hui, pour des raisons de communication, de faire semblant.

### **Pour un nucléaire durable : de la nécessité de reprendre un programme structuré sur les réacteurs à neutrons rapides**

Pour relancer durablement le nucléaire, il me paraît indispensable de maîtriser le « nucléaire durable » (Kerboul, 2023). Cela signifie de faire le meilleur usage possible de la ressource en Uranium (nous disposons de 300 000 tonnes d'Uranium appauvri ce qui nous donnerait un millénaire d'autonomie énergétique). La solution scientifique à cette question est connue : l'utilisation des neutrons rapides. Elle permet d'utiliser l'Uranium appauvri mélangé au Plutonium produit par les réacteurs à neutrons thermiques, et de régénérer le Plutonium sans accumuler les actinides mineurs. Le résultat est un meilleur usage de la ressource et une meilleure gestion de l'aval du cycle. Cette technologie est maîtrisée dans son principe, et la France a été pionnière dans ce domaine avec les projets Mazurka, Rapsodie, Phénix, Superphénix et Astrid. Les arrêts de Superphénix et d'Astrid sont des fautes graves contre l'intérêt du pays, et il est encore temps de les corriger.

Sur une question aussi importante, il faut se garder de deux stratégies d'évitement des évidences physiques.

La plus sournoise est d'imaginer qu'une solution alternative (naïvement déduite de l'utilisation du MOX) serait le multi-recyclage en REP (MRREP). La physique est têtue : les neutrons rapides favorisent la fission, les neutrons lents génèrent une quantité importante d'absorption de neutrons. Le Plutonium passé en neutrons lents se transforme progressivement en actinides mineurs qui ont le double inconvénient d'être des déchets et non des ressources, et de polluer le fonctionnement des réacteurs : prendre cette voie revient à rendre plus difficile l'opération du parc (qui n'a vraiment pas besoin de cela...) et de complexifier la gestion de l'aval du cycle. Tout cela est connu depuis trente ans. C'est payer bien cher le fait de pouvoir dire au Gouvernement qu'arrêter le projet Astrid n'était pas une sottise. Le MRREP est une fausse solution (Greneche, 2017).

La seconde façon pour l'État de se défausser de son devoir est de penser déléguer à des *start-up* le développement d'une filière à neutrons rapides directement calquée sur l'acquis de trois décennies de recherche en France dans ce secteur. Le faire sans précaution en ce qui concerne la propriété intellectuelle revient à brader le savoir-faire acquis en le mettant à la merci d'un investisseur (Bill Gates qui, lui, a parfaitement compris que la filière à neutrons rapides est la clé de voûte d'un nucléaire durable, s'en frotte déjà les mains...).

Une relance durable du nucléaire signifie aussi une relance du nucléaire durable, et une relance du nucléaire durable nécessite un programme de recherche, porté par l'État, pour développer un prototype de réacteur et d'une usine de fabrication du combustible, pour être en état de déployer cette filière le moment venu. Ce projet doit être lancé maintenant, en repousser le lancement expose à une perte des compétences acquises et à se trouver contraints d'acheter à terme, à des investisseurs plus clairvoyants, une technologie dont nous sommes les inventeurs, et dans laquelle nous avons été jusqu'à récemment, les *leaders*.

## **Conclusions**

Les conditions de relance durable du nucléaire en France sont assez faciles à identifier, mais les réaliser suppose de regarder en face les erreurs accumulées et d'en tirer les conséquences.

Il faut une volonté politique ferme et sans ambiguïté pour définir une politique énergétique sur plusieurs décennies, ce qui suppose de cesser l'exercice vain des programmations pluriannuelles de l'énergie, pour le remplacer par une « programmation glissante » sur 30 ans, avec réévaluation tous les 5 ans (Shellenberger et Armand, 2023). Il est indispensable qu'au niveau politique la conception délétère d'une énergie nucléaire comme une phase de transition, qui ne repose sur aucune analyse scientifique sérieuse, cesse d'être le pré-supposé non explicité qui a sous-tendu les décisions ou les absences de décisions depuis une décennie. Il faut une organisation de la sûreté qui soit opérationnelle et efficace. Il faut relancer dans les plus brefs délais, et sous le pilotage de l'État, une filière de réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium de façon à être en état de la déployer quand la tension sur le marché de l'Uranium se fera sentir (une croissance de 2 % par an du nucléaire mondial conduirait à une telle nécessité vers 2050, pour être prêts et souverains dans la décision à prendre, c'est dès aujourd'hui qu'il faut relancer un programme RNR, imprudemment arrêté, et qui ne peut raisonnablement être délégué à des *start-up*).

Il faut recréer un vivier de compétences et une attractivité de la filière qui aille de pair avec la rénovation en cours de l'outil industriel. Il faut une réorganisation en profondeur de l'organisation industrielle en termes de maîtrise d'œuvre et de maîtrise d'ouvrage qui permette de gérer efficacement de grands chantiers.

Et en arrière-plan de tout cela, il est indispensable que des dossiers hautement techniques comme celui de l'énergie nucléaire soient instruits scientifiquement

avec rigueur et cessent d'être ballotés au gré des stratégies de communication. La stabilité qu'offre une analyse scientifique et technique est garante de la solidité d'une politique.

Le corps des Mines de la grande époque avait admirablement rempli cette mission. Il est grand temps que leurs successeurs se montrent dignes de leur héritage et le reconstruisent efficacement.

## Références

BOUTTES J.P. (2023a), *Énergie*, PUF.

BOUTTES J.P. (2023b), *Souveraineté, maîtrise industrielle et transition énergétique*, vol. 1 et 2, Fondation pour l'innovation politique.

BRECHET Y. (2019) « De l'État stratège à l'État caméléon, deux décisions politiques, Astrid et les SMR », *Commentaire*, 168, pp. 871-880.

BRECHET Y. (2022), « Politique et nucléaire, une histoire d'échelles de temps », *Commentaire*, 181, pp. 1-10.

BRECHET Y. & LEBRIS C. (2021), « Sureté nucléaire, arguments scientifiques pour une évolution », *Commentaire*, 176, pp. 785-795.

BRECHET Y. & FLUCHERE J. (2020), « À propos d'une mort passée inaperçue, Michel Hug », *Progressistes*, mars, pp. 1-7.

GRENECHE D. (2017), *Histoire et techniques des réacteurs nucléaires et de leurs combustibles*, EDP.

KERBOUL C. (2023), *L'urgence du nucléaire durable*, De Boeck Sup.

# The new nuclear

## Preface

**Joël Barre**, Interministerial Delegate for New Nuclear

## Introduction

**Vincent Le Biez** and **Paul de Lapeyrière**, Interministerial Delegation for New Nuclear (DINN)

## What is the need for a new nuclear programme?

### Changes in demand for carbon-free electricity

**Pierrick Dartois**, Doctoral student in post-quantum cryptography at the Inria centre at Bordeaux University and **Marie Suderie**, Deputy Chief of Staff at the Directorate-General for Competition, Consumer Affairs and Fraud Control (DGCCRF)

Moving away from fossil fuels while reindustrialising France will require a significant increase in electrification between now and 2050. While there are alternatives to decarbonised electricity, such as biomass, their potential is too limited to cover future needs. According to our estimates, France's electricity consumption could reach 850 TWh by 2050. To meet this level of electricity demand, an ambitious revival of nuclear power is essential.

### The decarbonisation of the aviation sector and the challenge of access to decarbonised energy

**Thibaud Normand**, Programme Director at Safran Nacelles

In 2021, the aviation sector adopted the goal of carbon neutrality by 2050, and rapidly converged on the decarbonisation levers required to achieve this objective. However, this decarbonisation requires the massive and rapid development of a sustainable aviation fuel industry. Alongside biomass, whose resources are fraught with uncertainty, decarbonised electricity appears key to the production of synthetic fuels. The French aviation sector could account for indirect electricity consumption of around 150 TWh by 2050.

The development of a new, highly electro-intensive industrial sector for the production of synthetic fuels represents an opportunity for a new use for nuclear electricity. However, new nuclear power will have to be competitive with centralised renewable electricity sources in the global market for Sustainable Aviation Fuels (SAF).

## Financing new nuclear power and risk management in carbon-constrained economies

**Jan Horst Keppler**, Senior Economic Adviser at the OECD Nuclear Energy Agency (NEA)

As the only low-carbon power generation technology that can be scaled up or down at will, nuclear power is set to play an important role in achieving the net-zero emissions targets to which a growing number of OECD countries have committed. However, achieving the level of installed nuclear capacity needed over the next few years and decades will require the ability to raise significant amounts of capital at competitive rates.

To this end, the NEA is presenting a new framework for analysing the financial risks associated with the construction of new nuclear power plants. Minimising the cost of capital depends on optimising financial risk management. The framework proposed here leads to two key conclusions. First, in a carbon-constrained world, the real capital costs of nuclear power and other low-carbon generation sources are lower than generally assumed because of their ability to offset systemic financial risk. Incorporating investments in low-carbon generation can therefore reduce overall portfolio risk. Secondly, there are effective policies and measures to radically reduce the economic and financial costs of other components of risk, such as construction risk, price risk and political risk.

These conclusions apply equally to private and public investment. However, governments also have an important role to play. Firstly, they must ensure credible and effective commitments to the goal of zero net carbon emissions by 2050. They must also implement the necessary measures to eliminate or reduce the economic costs associated with construction risks, price risks and political risks. Finally, governments can intervene as direct project promoters in the event of market failure when private players fail to recognise the true economic value of a nuclear project. Beyond reducing financial risk, governments then have a role to play in establishing effective project management structures for large, complex projects such as new nuclear power plants, as well as in macroeconomic stability.

If the measures outlined below are fully implemented and new nuclear power plant projects are fully de-risked, private and public investors will compete for the benefits of low-carbon, controllable electricity, reducing the required return on capital to rates significantly lower than today.

## Reducing consumption and decarbonising: the two pillars of France's energy and climate strategy

**Sophie Murlon**, Director General for Energy and Climate at the Ministry of Energy Transition

In line with the Paris agreement on climate and our international commitments, France enshrined in law in 2019 the objective of achieving carbon neutrality by 2050. This commitment for climate requires an acceleration of the decarbonization of our economy and lifestyle, a reduction in energy consumption as well as a redefinition of our energy system, which is still dependent on fossil fuels for about 60%, by developing low-carbon energies: renewables and nuclear. This transition must also ensure security of energy supply and reduce our dependence on imports, preserve the competitiveness of our economy and protect French consumers. It is a major industrial challenge.

## Rediscovering the path to industrial mastery and technical excellence in the nuclear industry

### Following the difficulties encountered on Flamanville, EDF's excell plan

**Alain Tranzer** and **Anne-François de Saint Salvy**, EDF Group

After Flamanville 3, EDF's excell plan.

On December 11, 2019, EDF decided to implement a major plan, engaging EDF and the entire nuclear industry to regain the level of quality, rigor and excellence that presided over the construction of the French nuclear fleet. The excell plan has three main pillars: industrial quality control, skills, and governance of major projects.

The operational implementation of the excell plan began in June 2020 with the arrival of Alain Tranzer at EDF's Executive Committee. It is organized according to five axes: Project governance, Skills, Manufacturing and achievements, Supply Chain, Standardization and Replication, completed by the Welding plan.

Two years after the launch of the excell plan, 90% of the commitments made have been met. The dynamics created have become the rule within EDF and in the nuclear industry. Its impact on the results of nuclear projects is monitored in a quarterly dashboard with ambitious targets.

### Strengthening industrial quality at Framatome

**Bernard Fontana**, Chairman of the Management Board and CEO of Framatome

For over 60 years, Framatome has contributed to the development of safe, low-carbon and competitive nuclear solutions in France and around the world.

After the end of new construction in France and the associated loss of skills, the nuclear market is now dynamic again, driven by its strong integration in future low-carbon electricity mixes and the reinforced need for energy independence.

Framatome has been pursuing a program of skills and quality enhancement for several years, in order to meet the diverse demands of the French and inter-

national markets and achieve ever-higher levels of performance.

### Improving the constructability of the EPR2 to gain competitiveness

**Gabriel Oblin**, EDF Group EPR2 Project Director

The EPR2 is an optimized and industrialized version of the EPR. It capitalizes on the strengths of the EPR: the same power, and the same safety and environmental performances among the highest in the world. It also takes into account lessons learned from previous EPRs and the fleet in operation, to facilitate construction; lessons learned both by EDF and France's nuclear industry mobilized towards a return to excellence, via its "excell plan".

The difference with the EPR therefore lies mainly in the fact that the EPR2 will be easier to build, within optimized deadlines and therefore more competitive. Construction will be facilitated by:

- simplifying the design;
- standardizing equipment;
- strengthening prefabrication in factories;
- involving suppliers as early as possible;
- adapting organizations and addressing the issue of skills;
- profoundly transforming and digitalizing EDF's engineering.

EDF aims to start the first work on the Penly site (Normandy) in mid-2024. The following projects are planned in Gravelines (Hauts-de-France) and Bugey (Auvergne-Rhône-Alpes).

### MATCH or how the nuclear industry is looking to the future

**Olivier Bard**, General Delegate of the French Nuclear Energy Industry Group (GIFEN)

The announcement of a new nuclear program in France is a first after more than 50 years. It will contribute to reindustrializing our country while fighting against climate change and strengthening energy sovereignty. For this program to be successful, the nuclear industry has equipped itself with a robust tool, led by GIFEN and developed collectively with more than 100 companies: the Match program.

The Match program aims to ensure the adequacy of the capacities of the sector with its industrial and human needs. It gives a visibility over 10 years, which will be updated on a yearly basis and it drives the required action levers based on three main pillars: mobilization of resources, operational efficiency to optimize their use and economical and financial sustainability of companies in the nuclear industry. Match is designed to help the nuclear industry to "do it right the first time" and to strengthen its collective production capacity over time.

### Relaunching the nuclear industry: a Marshall Plan to secure skills

**Hélène Badia**, President of the Université des Métiers du Nucléaire

The question of skills is crucial for the nuclear industry, and is first and foremost a question of safety. In addition to the specific technical skills they need to acquire, all new recruits have to integrate safety-related requirements and behaviours, an acquisition of skills that takes place over a “long period”. The resource requirements arising from future large-scale industrial projects also explain the importance attached to skills development by industry players, who have set up the Université des Métiers du Nucléaire in 2021. The revival of the nuclear industry has reinforced the need for a structured action plan that brings together all the players involved. This action plan, submitted by the Université des Métiers du Nucléaire to the public authorities in June 2023, is based on an analysis of the 20 sensitive professions in the industry and highlights the fact that the creation of new training courses must be supplemented by measures to enhance the visibility and attractiveness of existing training courses and target new recruitment pools.

### HEFAÏS, welding training par excellence

**Corentin Lelièvre**, HEFAÏS

HEFAÏS, Haute École de Formation Soudage, is a unique welding school in France designed by and for industrial businesses as a response to the lack of highly qualified welders that are needed to work on major current and future industrial projects.

This high-end industrial school was founded by four leading industrialists located in the Cotentin (Normandy) – EDF, Naval Group, Orano and CMN (Constructions Mécaniques de Normandie) – with the ambition to train the best welders in France for both the nuclear and naval industries.

Supported by several local institutional partners, HEFAÏS offers modern innovative training methods and environments that allow the welders to learn or improve their skills in near-real conditions.

HEFAÏS offers training of excellence to metalworking industry employees as well as to jobseekers who are interested in the welding industry, whether they are beginners or experienced workers, men and women, from Normandy or elsewhere.

### New nuclear power to help reindustrialise the country

#### Nuclear power to help re-industrialise France

**Hubert Virlet**, Project Director in the Industry Department of the Directorate General for Enterprise

France is facing massive growth in its need for stable, competitive electricity generation to meet the dual

challenge of decarbonisation and re-industrialisation. Nuclear power is a strategic asset in this context, with electricity price regulation enabling consumers to reap the benefits. The revival of nuclear power is also in itself an industrial opportunity for the country, whether it be the EPR2 programme or the development of innovative reactors.

### Successfully decarbonising French industry through the competitive advantage of nuclear power

**Nicolas de Warren**, Chairman, Union des industries utilisatrices d'énergie (Uniden)

The historic partnership between nuclear production and electro-intensive industries has structured the French industrial landscape, with the former needing large, stable and predictable consumers and the latter needing abundant, safe and competitive electricity. Renewing this partnership today would meet two challenges: firstly, that of decarbonising industry, nuclear being the low-carbon energy par excellence and industry being called upon to multiply its electricity consumption by 1.5 by 2035, and by 2 or 3 by 2050 in order to decarbonise. Only nuclear power can meet these needs. Then there is the challenge of competitiveness, with nuclear power guaranteeing the availability of resources over the long term, independence from the impact of energy crises on prices, as long as it is not subject to the uncertainties of the wholesale market, and a reasonable production cost, as the existing nuclear fleet has been written off.

### Orano, leader in the fuel cycle, could double or even triple its investments to support the nuclear revival

**Claude Imauven**, Orano

Orano, as a global industrial expert in the fuel cycle, is ideally positioned to support and strengthen French energy sovereignty as well as to support the development of nuclear power around the world. The group has never stopped investing, whether in mining, conversion or enrichment, with the renewal of factories over the last decade.

In order to support this recovery in France first, then in Europe and in the world, Orano could double or even triple its investments in the cycle. While the project to extend the Georges Besse II plant, which was approved by the group's Board of Directors last October, will be mostly self-financed, financial support will have to be found if the group wants to be able to deploy other major projects such as the renewal of mining capacities or recycling facilities, for which decisions will have to be taken by the end of 2023.

### How to strengthen the innovation dynamic in the French nuclear industry?

**Jean-François Debost**, Managing Director of the Nuclear Valley competitiveness cluster and **Bernard Salha**, GIFEN Innovation Commission, Chairman of SNETP, CTO and Director of R&D at EDF



The civil nuclear industry is restarting around the world, providing many opportunities to position an ambitious French technological offer. With 67 years of experience in civil nuclear power and the accelerated innovation projects of the « France Relance » and « France 2030 » plans, France is racing at the forefront of global nuclear power. In the face of competition, we will have to accelerate innovation and bring our SMEs' and startups' technological solutions to market. This will require significant support from public authorities over time, as well as strengthening the equity of our ETIs - SMEs, which are strongly capital-intensive industries. Finally, Europe will have to protect the industrial and economic interests of its member countries in the already highly competitive market for new nuclear power.

### Is the New Space model the future of smart modular reactors?

**Antoine Chesne**, Engineer and economist

The nuclear industry is currently experiencing a period of great excitement, given the development of small modular reactors (SMR) and the emergence of innovative start-ups. Also, the nuclear industry shares similarities with space industry. Both sectors have experienced common origins and have been developed in parallel, with rapid growth in the 1960s and 1970s, followed by a period of relative stability from the 1980s to the 2000s. However, over the last decade, the space industry has been turned upside down by what we refer to as the "New Space" revolution. Today, this transformation is inspiring the rise of the SMRs driven by the "New Nuclear" trend, whose technical, economic and political inspiration comes directly from the New Space. By adopting its codes: miniaturisation, replicability, reusability, by attracting its entrepreneurs, and by pursuing similar public policies, the new nuclear is seeking to replicate the success of the New Space and is aiming to find the path that will enable it to play a leading role in the energy transition.

## Governance and social acceptability of nuclear power

### Changes in public opinion on nuclear power in France and Europe

**Henri Wallard** and **David Lévy**, Co-founders of NewCovalence

Nuclear energy, an invisible and relatively recent source of power, has had a tumultuous history marked by its dual civil/military nature and three accidents with global repercussions. Ideology and politics have often taken precedence over economics and technology.

In Europe, after 30 unproductive years, the situation changed in 2022. This shift appears to be more connected to the war in Ukraine and concerns about shortages than to the fight against greenhouse effect.

Around the world, many countries are relying on nuclear power to decarbonize their electricity generation. And voices of young environmental activists are starting to advocate for nuclear power, contrary to historical doctrines.

The new nuclear era will require a high level of professionalism in the deployment process and an impeccable democratic framework, similar to what has been established for deep storage sites.

Insufficiently prepared announcements and plans could make some projects much more challenging despite this favourable environment.

### A new nuclear dynamic in the EU

**Pierre Jérémie**, Chief engineer of the Mines

Upholding the balance between European energy and climate targets and the sovereign competence of Member-States to defined their energy mixes that was enshrined in TFEU Article 194 has been a sensitive topic over the past months. European cooperation in the field of nuclear energy was at the core of the European project in the 1950s, within the framework of the Euratom treaty: it since the 1990s has focused on the most consensual aspects of nuclear energy, such as waste management, workplace safety, and general principles for nuclear safety.

Since 2020, European energy policy evolves in a dramatically changed landscape. Our joint climate targets have been moved forward at an unprecedented pace, fossil energies are becoming increasingly scarce and expensive following the Ukraine invasion, and access to capital has become more difficult in a higher-for-longer rates environment. This has revealed renewed tensions between the main Member-States energy choices, between market prices and national system costs, between the total costs of the leading low-carbon energies. It is in that new landscape that a growing number of Member-States have coordinated together to defend jointly a strict vision of technological neutrality and subsidiarity, within the Nuclear Alliance: this has allowed key advanced, that will be built upon in the next European Commission mandate.

### Legislative changes to speed up nuclear projects

**Anne-Cécile Rigail**, Head of Legal and Regulatory Affairs at the Interministerial Delegation for the New Nuclear Power Plant, and **Pierre Guillot**, Head of the Technological Risks Department at the Directorate-General for Risk Prevention

The French law n°2023-491 promulgated on June 22nd 2023 is part of an ambitious program for building new nuclear facilities. It aims at facilitating and legally securing the construction of these new units. This very technical legal text achieves three main objectives: removing the legal obstacles to launching a new nuclear program, especially any ceiling for nuclear power in the energy mix, speeding the administrative procedures for building new units next to existing nuclear sites, and speeding the litigation process, while legally securing

some technical aspects of the project (right to build on the sea shore, endangered species special provisions). This law paves the way for constructing six new EPR units, as wished by the French President of the Republic in his Belfort speech on the decarbonation of the French power mix.

### The safety implications of a revival of nuclear power in France

**Julien Collet**, Deputy Director General of the French Nuclear Safety Authority (ASN)

The relaunch of a major nuclear power programme is a challenge for the French nuclear industry, which must rebuild its capabilities, particularly in terms of skills. The ASN is drawing attention to the risks associated with the very rapid start-up of the EPR2 programme and is adapting its control accordingly.

At the same time, projects for small modular reactors are multiplying, with ambitious objectives, including in terms of nuclear safety. Most of these projects are at an early stage of development and have yet to prove their worth. The ASN has put in place appropriate procedures for discussion and work with these projects, which raise new questions or call into question current safety doctrines.

### Responsible and sustainable management of radioactive waste in France

**Pierre-Marie Abadie**, Director General of the French National Radioactive Waste Management Agency (Andra)

Nuclear energy is the largest producer of radioactive waste in France (ahead of research, defence, the non-electronuclear industry and the medical sector). This waste can present risks for humans and the environment, and needs to be managed according to its level of radioactivity and lifespan. The long-term management of this waste has been entrusted to Andra, the French national radioactive waste management agency.

The vast majority is stored in surface facilities. This is very low-level or short-lived waste, which accounts for more than 90% of volumes but a very small proportion of total radioactivity.

On the other hand, high-level and long-lived intermediate-level waste, which comes from the reprocessing

of spent fuel and the operation of nuclear power plants, represents very small volumes but concentrates 99% of total radioactivity and cannot be managed in surface facilities. They are destined to be stored in Cigéo, the deep geological repository project for which Andra has applied for authorisation in early 2023.

### New nuclear power, participation and decision-making: a difficult balancing act

**Michel Badré**, Chairman of the National Commission for Public Debate on EDF's EPR2 reactors

The "New Nuclear" project presented by EDF, involving a pair of EPR2 reactors at Penly as part of a programme of six reactors of the same type, was the subject of a public debate in 2022/2023.

The announcements made by the public authorities concerning a decision that was understood to have already been taken, and the scarcity or absence of information on a number of key issues, made it difficult to exercise the constitutional rights of every individual to be informed and to participate in the preparation of decisions.

Some thirty unanswered questions have been recorded in the minutes of the debate. Only the answers to these questions will enable us to assess the usefulness of our contribution to the exercise of these rights.

### What are the conditions for a sustainable revival of nuclear power in France?

**Yves Bréchet**, Associate Professor at Monash University (Australia) and McMaster University (Canada), Scientific Director of Saint-Gobain and Chairman of Framatome's Scientific Advisory Board.

This article sets out the conditions for a sustainable revival of nuclear power, as well as the need to put in place a strategy for sustainable nuclear power. These conditions are both political and organisational. They include making the industry attractive again, developing a pool of training courses, and relaunching the fast neutron industry without delay, which is essential if nuclear power is to be a sustainable solution in a world of high geopolitical tensions.

Issue editor:  
**Vincent Le Biez**

# Ont contribué à ce numéro



D.R.

**Pierre-Marie ABADIE** est ingénieur général des mines, ancien élève de l'École polytechnique.

Il est directeur général de l'Andra, l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs en France, depuis le 23 octobre 2014.

Il était précédemment directeur de l'Énergie à la direction générale Énergie et du Climat du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie depuis 2008. Il était à ce titre Commissaire du Gouvernement au sein du conseil d'administration de l'Andra et de celui d'EDF et vice-président du conseil des gouverneurs de l'Agence internationale de l'énergie.

Auparavant, il a été conseiller pour les affaires industrielles au cabinet du ministre de la Défense de 2002 à 2007.

De 1998 à 2002, il a occupé plusieurs postes au sein de la direction du Trésor.

De 1994 à 1998 il a été adjoint au directeur de la direction régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement (Drire) de Lorraine et chef du service régional de l'Environnement industriel (SREI), en charge du contrôle des installations classées pour l'environnement (ICPE).



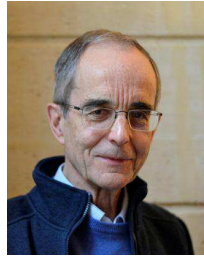
D.R.

**Hélène BADIA** est diplômée de Centrale Nantes et de l'International Institute for Management Development de Lausanne où elle obtient un Executive MBA. Elle a dirigé différentes structures pour le groupe EDF au sein de l'industrie nucléaire : une entité d'ingénierie en charge de la définition des programmes de maintenance des matériels et gros composants

des centrales nucléaires en fonctionnement ; l'entité en charge du transport du combustible nucléaire, neuf et usé, et des déchets radioactifs pour l'ensemble des centrales nucléaires en fonctionnement ; une entité de 1 500 personnes dédiées aux activités de maintenance et de logistique, en appui au parc des centrales de production d'électricité.

Elle a également travaillé dans le domaine de la formation pour les managers et les dirigeants du groupe EDF.

Elle a été nommée présidente de l'Université des Métiers du Nucléaire en septembre 2022 pour coordonner les démarches de la filière visant à adapter l'offre de formation et renforcer son attractivité.



D.R.

**Michel BADRÉ**, Ingénieur général des ponts, des eaux et des forêts (e.r.), a été ingénieur à l'Office National des Forêts de 1973 à 2002 dans les Hautes-Alpes, en Alsace, en Champagne-Ardenne et en Franche-Comté, puis à la direction générale de l'ONF comme DGA au moment des tempêtes de 1999 et jusqu'en 2002.

Il a rejoint ensuite l'Inspection générale du ministère chargé de l'Environnement, et il a mis en place puis présidé de 2009 à 2014 l'Autorité environnementale nationale, instance collégiale d'expertise environnementale sur les grands projets et programmes.

Il a été membre puis vice-président du Conseil économique, social et environnemental (CESE) de 2015 à 2021.

Il a fait partie en 2017 de la mission de médiation sur le conflit de Notre-Dame-des-Landes.

Membre de la commission chargée du débat public sur le plan national de gestion des matières et déchets radioactifs en 2019, il a présidé celle chargée du débat sur les réacteurs EPR 2 d'EDF en 2022-2023.

Il préside le comité d'ouverture à la société sur l'expertise de l'IRSN, et le groupe de suivi des concertations sur le projet Cigéo de stockage géologique des déchets nucléaires, mis en place par le Haut Comité pour la Transparence et l'Information sur la Sûreté Nucléaire (HCTISN).

Président du comité d'éthique commun INRAE-Ifremer-Cirad-IRD, il est membre du Comité consultatif national d'éthique.



D.R.

**Olivier BARD** est délégué général du Groupement français de l'industrie nucléaire (GIFEN) depuis novembre 2022.

Auparavant, il a occupé plusieurs fonctions en France et à l'international au sein du groupe EDF. Il a successivement été chef de service à la centrale de Paluel, directeur de cabinet du directeur exécutif en charge de la production

d'électricité et de l'ingénierie, directeur général adjoint de la JV propriétaire-exploitante des 2 EPR de la centrale nucléaire de Taishan en Chine, puis directeur de l'offre pour un programme nucléaire en Afrique du Sud.

De 2017 à 2022, il a été directeur du programme français de construction de nouvelles centrales nucléaires

pendant le processus de développement, qui a conduit à la proposition soumise au Gouvernement par EDF avec le reste de la filière nucléaire.

Expert en grands projets industriels, il a plus de 25 ans d'expérience dans l'industrie nucléaire.

Il est diplômé de Centrale-Supélec et de l'INSEAD (MBA).



D.R.

**Joël BARRE** commence sa carrière d'ingénieur de l'armement en 1979 au sein de la direction générale de l'Armement. Entre 1987 et 1995, il contribue puis dirige successivement le programme du missile air-sol moyenne portée (ASMP) et celui du satellite d'observation optique Hélios. Il est par la suite nommé adjoint au chef du service technique des systèmes

stratégiques et spatiaux, avant de rejoindre la direction des Systèmes de forces et de la prospective jusqu'en 1997.

Il devient ensuite directeur des programmes au Centre national d'études spatiales (CNES) de 1997 à 2001. En juin 2001, il est recruté par Safran Aircraft Engines (Snecma) en tant que directeur espace de la division moteurs fusées avant d'être nommé directeur général de la division moteurs spatiaux en mars 2002.

Joël Barre réintègre l'aérospatial public et le CNES en 2007, où il prend la direction du Centre spatial guyanais. Le 1<sup>er</sup> juillet 2012, il est nommé directeur général délégué du CNES.

Le 9 août 2017, Joël Barre est nommé délégué général pour l'Armement. Il quitte son poste le 31 juillet 2022.

Le 10 novembre 2022, il est nommé délégué interministériel au nouveau nucléaire, en charge de la supervision des programmes industriels de nouveau nucléaire en France, en particulier le programme de réacteurs EPR2.

Ingénieur général de l'armement de classe exceptionnelle, diplômé de l'École polytechnique et de l'École nationale supérieure de l'aéronautique et de l'espace, ancien auditeur du Centre des hautes études de l'armement (CHEAr), Joël Barre est commandeur de la Légion d'honneur, commandeur de l'ordre national du Mérite et Légionnaire de 1<sup>re</sup> classe d'honneur.



D.R.

**Yves BRÉCHET** est Polytechnicien, Docteur en sciences des matériaux, Professeur à Grenoble INP de 1988 à 2012. Il occupe en 2012-2013 la chaire Innovation Technologique au Collège de France. Il est membre de l'Académie des sciences, de l'Academia europea et de l'European academy of sciences. Il est actuellement professeur associé à

l'Université de Monash (Australie) et à l'Université de

McMaster (Canada), directeur scientifique de la compagnie Saint-Gobain et président du conseil scientifique de Framatome.

Il a été Haut-commissaire à l'énergie atomique de septembre 2012 à septembre 2018. Il n'a pas été candidat à son renouvellement en 2018.



D.R.

**Antoine CHESNE** est ingénieur et économiste, diplômé de l'École et Observatoire des Sciences de la Terre de Strasbourg, de l'École nationale supérieure de Géologie de Nancy, et titulaire d'un Master 2 en Économie et Finance de l'Université Paris-Dauphine, spécialité Énergie-Finance-Carbone. Après de premières expériences professionnelles au BRGM, puis au sein

des groupes TotalEnergies et EDF, il a rejoint en février 2020 la maison de commerce japonaise Mitsui&Co comme développeur d'affaires. Originellement chargé des investissements dans l'innovation et la transition énergétique, il est ensuite devenu, en complément de ses activités dans l'énergie, le représentant spatial du groupe Mitsui en Europe, pour ses filiales Mitsui Bussan Aerospace au Japon, et, aux États-Unis pour le New Space, de l'arrangeur de lancements spatiaux Spaceflight Inc., puis du réseau de stations sol Atlas Space Operations. Antoine Chesne est également auditeur-jeune de l'IHEDN et auteur dans sa revue *S'engager par la plume* d'un article sur « L'Espace, nouveau terrain de jeu du renseignement français » en 2023.



D.R.

**Julien COLLET** est ingénieur général des Mines. Il est directeur général adjoint de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) depuis 2014. Ancien élève de l'École Polytechnique, il a débuté sa carrière au sein de l'ASN en tant que chef de la division territoriale de Bordeaux puis directeur de l'Environnement et des Situations d'urgence. Il a ensuite

rejoint la direction générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des fraudes (DGCCRF) en tant que directeur de cabinet.

Il est également vice-président du comité des activités nucléaires réglementaire de l'Agence de l'énergie nucléaire de l'OCDE.



D.R.

**Pierrick DARTOIS** est polytechnicien, ingénieur du Corps des mines et doctorant en cryptographie post-quantique au centre Inria de l'Université de Bordeaux. Il a contribué aux projets de transition énergétique du grand port maritime de Marseille et travaillé au sein de l'équipe de cryptogra-

phie d'IBM Research à Zurich. Outre son intérêt pour la cryptographie, c'est également un passionné d'énergie et de climat.



D.R.

**Jean-François DEBOST** a rejoint le pôle de compétitivité du nucléaire civil et de défense, Nuclear Valley, en tant que directeur général, en septembre 2017.

Nuclear Valley anime en régions une communauté de 450 membres constitués de *start-up*, TPE, PME, ETI, grands groupes, de laboratoires de recherches publics/privés et d'organismes de formation. Il accompagne les adhérents de l'association sur leurs enjeux de R&D, d'innovation, de croissance, d'emploi, de formation, d'investissement (recherche de fonds propres) et enfin de développement économique en France comme à l'international. Nuclear Valley a été relabélisé en mars 2023 par l'État, Pôle de compétitivité, pour la période 2023-2026.

Avant 2017, Jean-François Debost a occupé différentes fonctions au sein de l'ETI française d'ingénierie ABMI. En tant que directeur général adjoint du groupe et membre du Comex, il a notamment piloté les relations institutionnelles et les partenariats stratégiques de l'entreprise dans les domaines du nucléaire et de la défense. Il a également accompagné le conseil d'administration sur les dossiers de croissance externe et managé les activités à l'international.

Lieutenant-colonel de réserve citoyenne à la BA 942, il est administrateur de l'Université des Métiers du Nucléaire (UMN-Paris), de Vivatome (Lyon), de Robotics Vallez (Dijon) et de la Vallée de l'Énergie (Belfort).



D.R.

**Bernard FONTANA** est diplômé de l'École Polytechnique et de l'École nationale supérieure des techniques avancées de Paris. Il mène sa carrière depuis 30 ans dans les secteurs de la chimie, de l'acier et des matériaux de construction (SNPE, ArcelorMittal, APERAM et Holcim). En 2012, il a été nommé CEO d'Holcim. Depuis le 1<sup>er</sup> septembre 2015, il était le directeur général délégué d'Areva NP. Il a été nommé au 1<sup>er</sup> juillet 2016, président du directoire et CEO de Framatome (précédemment Areva NP).

Il est aussi membre du conseil d'administration de Thales et de SSAB, membre du conseil d'administration de Gifen Services, après en avoir été le président pendant 4 ans ; membre de la gouvernance du GIFEN, depuis sa création en 2018 et membre du HCTISN en France.

**Pierre GUILLOT** est responsable juridique et régulation de la délégation interministérielle au nouveau



D.R.

nucléaire. Avocat de formation, il a exercé au sein des cabinets August & Debouzy, LWA et Linklaters comme collaborateur puis associé. Il a également exercé des fonctions administratives à la direction générale du Trésor et à l'Inria. Il est diplômé de l'Université Paris I Panthéon-Sorbonne.



© Orano, Éric Malemanche

**Claude IMAUVEN** est diplômé de l'École Polytechnique et Ingénieur au corps des Mines. Il a débuté sa carrière en 1983 dans l'administration au ministère de l'Industrie, où il a occupé plusieurs postes, d'abord en tant que chef de la division du Sous-sol et de l'Énergie à la direction régionale de l'Industrie et de la Recherche de Provence-Alpes-Côte d'Azur, puis en 1986 en tant qu'adjoint au chef du service du Conseil général des Mines.

À l'âge de 31 ans, il rejoint le cabinet du ministre du Commerce extérieur, où il est nommé conseiller technique, puis en 1989 passe à la direction générale de l'Énergie et des Matières premières pour diriger le service des Matières premières et du Sous-sol.

En mai 1991, il est nommé conseiller auprès du ministre au cabinet du ministre de l'Industrie et du Commerce extérieur, chargé des Affaires industrielles.

La carrière de Claude Imauven dans l'industrie chez Saint-Gobain débute en 1993 au sein de la branche Vitrage où il occupe successivement les postes de directeur de la politique industrielle puis de directeur industriel et financier. En 1996, il est nommé délégué général pour l'Espagne, le Portugal et le Maroc. De retour en France en 1999, il rejoint la branche Canalisation comme directeur général adjoint de Pont-à-Mousson SA, puis dirige cette même société à partir de 2001 en tant que PDG et directeur de la branche canalisation. En avril 2004, il est nommé directeur général adjoint de la Compagnie de Saint-Gobain en charge du pôle produits pour la construction. En 2016, Claude Imauven devient directeur général exécutif du groupe Saint-Gobain, poste qu'il occupe jusqu'en 2019.

En 2020, il est nommé président du conseil d'administration d'Orano. Il était membre du conseil d'administration depuis 2018 après avoir été administrateur d'Areva de 2015 à 2017.

**Pierre JÉRÉMIE**, Ingénieur en chef des Mines (P13), est diplômé de l'École Polytechnique (X08) et titulaire d'un Master II en Droit de l'Environnement (Paris I) et d'un DU en Japonais (LCAO de Paris VIII). Après de premières fonctions comme adjoint puis chef du service Prévention des Risques et des Nuisances à la direction régionale et interdépartementale de l'Environnement et de l'Énergie de 2014 à 2018, il a été en charge du bureau Marchés de l'électricité à la direction

générale de l'Énergie et du Climat, avant de rejoindre en 2020 le cabinet de la ministre déléguée chargée de l'Industrie, comme conseiller en charge des Industries lourdes et de l'Énergie. Depuis 2022, il exerce les fonctions de directeur de cabinet adjoint de la ministre de la Transition énergétique.



D.R.

**Jan Horst KEPPLER** est conseiller économique senior de l'Agence de l'énergie nucléaire de l'OCDE (AEN) au sein de la division du développement et de l'économie de l'énergie nucléaire. Il est également professeur d'économie à l'Université Paris Dauphine-PSL, où il codirige le Master en Énergie, Finance, Carbone (EFC) et préside le conseil de surveillance de la

Chaire European Electricity Market (CEEM). Le professeur Keppler travaille principalement dans le domaine de la recherche sur le financement et la compétitivité des technologies à faible émission de carbone, telles que l'énergie nucléaire, dans le contexte de la transition énergétique. Ses publications récentes comprennent *Financing New Nuclear Power Plants: Minimising the Cost of Capital by Optimising Risk Management* (2022), *Achieving Net Zero Carbon Emissions in Switzerland in 2050* (2022), *Ensuring the Adequacy of Funding Arrangements for Decommissioning and Radioactive Waste Management* (2021) and *The Costs of Decarbonisation: System Costs with High Shares of Nuclear and Renewables* (2019).



D.R.

**Paul de LAPEYRIÈRE** rejoint, après un stage de fin d'études à la direction juridique énergies d'EDF, la délégation interministérielle au nouveau nucléaire (DINN) en février 2023 comme chargé de mission.

Au sein de cette nouvelle structure créée en novembre 2022, il est en charge des relations institutionnelles et de la communication. Il s'occupe également des questions d'information du public et de formation / compétences relatives aux programmes industriels de construction de nouveaux réacteurs électronucléaires en France.

Il est diplômé en droit public de l'École supérieure des sciences économiques et commerciales (ESSEC) et de l'Université Paris-Panthéon-Assas.

**Vincent LE BIEZ** commence sa carrière d'ingénieur des Mines en 2010 au sein de la direction régionale et interdépartementale de l'Environnement et de l'Énergie d'Île-de-France (DRIEE-IF). Chef du service Énergie climat véhicules, il est également en charge de la qualité de l'air en Île-de-France.



D.R.

Il rejoint en 2013 la direction générale du Trésor en tant qu'adjoint au chef de bureau en charge des affaires nucléaires à l'export et participe à cette occasion aux négociations sur la levée des sanctions sur l'Iran à Vienne au sein de la délégation française.

De septembre 2015 à décembre 2022, il travaille au sein de l'Agence des Participations de l'État. Il est successivement chargé de participation EDF, puis directeur de participations adjoint énergie responsable du portefeuille énergie (EDF, Engie, Orano, RTE, Enedis...) et enfin directeur de participations industrie en septembre 2019 où il suit un grand nombre de groupes industriels (Airbus, Safran, Thales, Renault, Naval Group, Chantiers de l'Atlantique...).

Depuis décembre 2022, il est l'adjoint du Délégué Interministériel au Nouveau Nucléaire (DINN). Cette nouvelle structure, créée en novembre 2022, assure la supervision de la réalisation de programmes industriels de construction de nouveaux réacteurs électronucléaires en France.

Diplômé de l'École Polytechnique, Vincent Le Biez est ingénieur en chef des Mines.



© HEFAÏS

**Corentin LELIEVRE**, Ingénieur soudeur de formation et fort de 15 années d'expérience, entre management de centre de profit, management de centre de formation professionnelle et participation active dans les entreprises de la métallurgie, du nucléaire et du naval, est directeur d'HEFAÏS, Haute École de Formation Soudage depuis avril 2022. Son profil

technique combiné à ses différentes expériences professionnelles lui donnent les clés nécessaires pour accompagner activement le développement de cette école unique en France qui propose des parcours de formation innovants et accélérateurs de compétences pour atteindre l'excellence en matière de soudage.



D.R.

**David LÉVY** a dirigé et investi dans des sociétés technologiques depuis 25 ans, notamment dans des domaines liés à la sécurité comme Gemplus puis Bull CP8, et à la communication dans une filiale de Vivendi. Auparavant, il avait commencé sa carrière dans le secteur nucléaire, comme adjoint au directeur de la sûreté nucléaire, où il a connu Henri Wallard. Il a

ensuite représenté l'État comme actionnaire des entreprises publiques dans le secteur nucléaire, avant de diriger les activités minières d'Orano en France et en Afrique, ainsi que ses activités de R&D.

David Levy et Henri Wallard ont fondé NewCovalence, société de conseil spécialisée dans le lien entre la technicité des réacteurs nucléaires d'un côté, leur environnement humain, réglementaire, financier et institutionnel de l'autre.



D.R.

**Sophie MURLON** est directrice générale de l'Énergie et du Climat au ministère de la Transition énergétique, après avoir été directrice de l'Énergie au sein de cette direction générale. Diplômée de l'École Polytechnique et ingénieure générale des mines, elle a exercé différentes fonctions au ministère chargé de l'Environnement et dans des institutions indépendantes.

Elle a notamment été directrice régionale adjointe de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (Dreal) en Champagne-Ardenne, directrice générale adjointe de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN), rapporteure extérieure à la Cour des comptes et adjointe au directeur général de l'Aménagement, du Logement.



D.R.

**Thibaud NORMAND** débute sa carrière au sein du service de la Prévention des risques de la Dreal de Provence-Alpes-Côte d'Azur en tant qu'adjoint puis chef du service. Il occupe ensuite la fonction de chef du bureau de la Production électrique auprès du ministère de la Transition écologique et solidaire. De 2017 à 2020, il est conseiller technique

pour l'énergie auprès du président de la République et du Premier ministre. Il rejoint le groupe aéronautique Safran en 2020 en tant que chargé de mission auprès du directeur de la stratégie, puis y prend la tête en 2021 d'une nouvelle direction Climat chargée de l'ensemble des problématiques de décarbonation de l'entreprise. En 2023, il rejoint la filiale Safran Nacelles où il occupe un poste de directeur de programme. Thibaud Normand est ingénieur en chef des mines.



D.R.

**Gabriel OBLIN** a débuté sa carrière chez EDF en 2002 à la direction de la Production nucléaire où il a exercé différentes fonctions. Il a notamment été chef du service en charge de la conduite des réacteurs de la centrale de Civaux.

De 2010 à 2012, il intègre la direction de l'Audit du groupe EDF en tant qu'auditeur senior. Puis, de 2012 à 2014, il rejoint le directeur

exécutif du groupe EDF en charge de la production et de l'ingénierie, ainsi que de la zone Asie/Pacifique. Il contribue également à la réflexion stratégique sur le rapprochement avec Framatome.

Depuis 2014, il dirige le Projet EPR2 en charge de la conception du réacteur, de son *licensing* auprès de l'Autorité de Sûreté Nucléaire et de la préparation des contrats et des sites potentiels d'accueil des 3 paires de réacteurs. Il est par ailleurs membre du comité de surveillance et d'orientations d'Edvance.

Gabriel Oblin est diplômé de l'École Polytechnique et de l'École Nationale des Techniques Avancées. Il est certifié directeur de projet IPMA niveau A.



D.R.

**Anne-Cécile RIGAIL** est ingénieure générale des mines. Elle est, depuis le 20 avril 2022, cheffe du service des risques technologiques au sein de la direction générale de la prévention des risques (DGPR), au ministère chargé de l'Environnement. Elle y pilote les politiques publiques relatives à la prévention des risques d'accidents et nuisance causées

par les installations classées pour la protection de l'environnement (dont les usines Seveso) et de l'animation des agents qui les inspectent. Elle est également responsable de la sécurité des canalisations de transport de gaz, hydrocarbures et produits chimique. Elle pilote l'élaboration de corpus réglementaires qui encadrent le transport de matières dangereuses, ainsi que les activités nucléaires. Elle s'assure également de la prévention des risques dans le domaine des travaux miniers et des anciennes mines dont la responsabilité est passée à l'État.

Elle était auparavant directrice générale adjointe de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) depuis de 2017 à 2022, compétente pour le contrôle des transports de substances radioactives, des activités nucléaires de proximité, des installations de recherche, de gestion des déchets ou liées au cycle du combustible, ainsi que des installations en démantèlement. De 2015 à 2017, elle était directrice des centrales nucléaires de l'ASN. Elle avait commencé sa carrière comme chef de la division territoriale de Bordeaux de l'ASN entité régionale compétente pour le grand Sud-Ouest de la France, de 2008 à 2014.



D.R.

**Bernard SALHA** a été nommé CTO (*Chief Technical Officer*) du groupe EDF en juin 2018. Il est également CEO d'EDF R&D depuis 2010.

Avec un effectif de 2 000 personnes, le champ d'application d'EDF R&D couvre toutes les activités du groupe, de la production (nucléaire, hydroélectrique, énergies renouvelables, thermique),

des ventes et services, et du réseau (réseau national et micro-réseaux).

Il a une grande expérience dans le secteur nucléaire d'EDF où il a effectué diverses activités de conception,

de construction, de maintenance et de démantèlement. Il a dirigé la division ingénierie nucléaire d'EDF entre 2005 et 2010. Il était alors responsable du programme EPR en France. Il a été expatrié 3 ans en Chine à la fin des années 1990 en tant que responsable d'EDF pour le développement de la construction de la centrale nucléaire de LingAo. Il a presque 30 ans d'expérience dans le secteur nucléaire, allant de la R&D, la conception de base, l'ingénierie, la construction, la maintenance et l'extension de la durée de vie des centrales nucléaires. Il a été élu président de SNETP en juin 2020 (SNETP en tant que plateforme technologique européenne pour l'énergie nucléaire durable est l'une des plates-formes d'innovation technologique de l'UE créée par l'UE. C'est une association belge chargée de promouvoir la R&D nucléaire pour l'ensemble de l'UE qui rassemble plus de 100 membres issus de l'industrie, de la sécurité nucléaire et de la recherche). Il est également président de la commission Innovation du GIFEN, l'association industrielle nucléaire française.



D.R.

**Anne-François de SAINT SALVY** (vice-amiral d'escadre) a servi dans la Marine nationale pendant 38 ans. Il a assumé quatre commandements dont celui de l'équipage d'armement du porte-avions Charles de Gaulle et celui du porte-avions Foch lors du conflit du Kosovo.

Adjoint au responsable des programmes d'équipement de la Marine, responsable de la prospective, de la planification et des finances de la Marine puis directeur adjoint des relations internationales et stratégiques du ministère de la Défense, il est préfet maritime de l'Atlantique de 2008 à 2011.

Il rejoint en 2012 EDF Renouvelables en tant que directeur d'offres pour les projets éolien *offshore*. En 2014, il prend les fonctions de directeur de la politique industrielle nucléaire au sein du Groupe EDF. En novembre 2019, il conçoit à la demande du président d'EDF le plan excell de retour à l'excellence de la filière nucléaire française. Depuis juin 2020, il assure le pilotage de ce plan aux côtés d'Alain Tranzer, délégué général à la qualité industrielle et aux compétences nucléaires au sein du Comex d'EDF.



D.R.

directrice de cabinet adjointe à la direction générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des fraudes (DGCCRF).

**Marie SUDERIE** est ingénieure du Corps des mines. Elle a commencé sa carrière à l'Autorité de sûreté nucléaire dans le domaine de la gestion des déchets nucléaires puis a occupé deux postes à la Dreal d'Occitanie en tant qu'inspectrice des installations classées. Elle est aujourd'hui



D.R.

**Alain TRANZER** est ingénieur diplômé de l'École Polytechnique et de l'École des Mines de Paris. Il débute sa carrière en 1991 dans le Groupe PSA. Après un passage en ingénierie des liaisons au sol, il y occupe successivement les postes de responsable de sous-système, de directeur qualité usine, d'ingénieur en chef de la Peugeot 407, puis de directeur du programme Peugeot 208-2008. Il a ainsi acquis une solide expérience dans la direction de projets industriels, depuis la conception jusqu'à l'industrialisation, et a reçu le prix Eurostar 2013 de directeur de projet de l'année attribué par Automotive News Europe. En 2013, il prend la responsabilité des avant-projets du groupe PSA, de la politique modulaire et des projets complexes que sont les véhicules autonomes, connectés, électriques et hybrides électriques. Depuis 2018, il était pour le groupe PSA senior vice-président, en charge du programme de réduction du CO<sub>2</sub> et de la maîtrise d'ouvrage des motorisations, plateformes et modules technologiques associés. Depuis avril 2020, il est responsable du pilotage du plan excell qui vise à renforcer la qualité industrielle, les compétences et la gouvernance des grands projets nucléaires du groupe EDF.

© SIPA Tristan  
Reynaud

Lyon en 2008, en charge d'actions de développement industriel et comme chargé de mission auprès du préfet de région pour les questions économiques, avant de rejoindre l'Agence des participations de l'État de 2011 à 2016 puis l'Autorité de régulation des télécommunications, des postes et de la distribution de la presse (Arcep).

**Hubert VIRLET**, diplômé de l'École Polytechnique (X2002) et de l'École des Mines de Paris (2007), ingénieur en chef des mines, est depuis février 2023 directeur de projets au sein du service de l'Industrie de la direction générale des Entreprises, en charge des questions relatives à la compétitivité énergétique et à la filière nucléaire. Il a commencé sa carrière dans l'administration à



D.R.

Il a été également président d'Ipsos en France. Il a travaillé pour l'administration en France en tant qu'inspecteur d'environnement (Pays de Loire)

**Henri WALLARD** a été pendant 20 ans directeur général délégué d'Ipsos après avoir travaillé notamment en Asie-Pacifique (Sydney puis Hong-Kong) pendant plusieurs années dans le secteur de études de marchés pour Sofres. Il a dirigé les activités d'Ipsos dans le monde en ce qui concerne les études d'opinion publique ainsi que l'analyse des réseaux sociaux.



puis comme adjoint au directeur de la sûreté nucléaire. Il a été également directeur général de l'ANDRA, et son premier directeur quand elle est devenue une agence indépendante après sa sortie du CEA. Il est ingénieur des Mines et docteur en statistiques.

David Levy et Henri Wallard ont fondé NewCovalence.



**Nicolas de WARREN** est, depuis juin 2019, président de l'Uniden (Union des industries utilisatrices d'énergie).

Il a été de 2006 à mi-2023, directeur des relations institutionnelles d'Arkema, *leader* français de la chimie et des matériaux avancés et à ce titre est intervenu, tant en France qu'en Europe, dans tous

D.R. les domaines relatifs à la compétitivité industrielle, avec une très forte implication dans la plupart des questions relatives à l'énergie pour l'industrie.

Au sein d'Elf Atochem, puis d'Atofina depuis 1991, il a été en charge de fusions-acquisitions à la direction internationale, puis responsable de *Business Units* dans le domaine des acryliques puis des oxygénés jusqu'en 2006.

De 1984 à 1991 il suit, au ministère de l'Industrie, les secteurs des équipements mécaniques, puis de l'industrie automobile puis est conseiller technique, en charge des Industries lourdes et de l'Environnement, au cabinet de Roger Fauroux, ministre de l'Industrie (1988-1991).

Nicolas de Warren est licencié en droit, ancien élève de l'Institut d'études politiques de Paris et de l'École nationale d'administration (1984).