



Transition énergétique : quel rôle pour le nucléaire ?

Recherches & Documents

N°14/2020

Annabelle Livet

Septembre 2020



Résumé

Laissé en retrait depuis quelques décennies en Europe et dans les autres pays du Nord, le nucléaire pourrait sembler, à première vue, condamné à rester une question épineuse à l'avenir incertain. Toutefois, au niveau mondial, le nucléaire semble plutôt apparaître à l'aube d'un nouvel essor, à la fois plus modéré que les vagues précédentes d'engouement pour la technologie de l'atome, mais également transformé, en phase avec les critères de la demande énergétique. En effet, au-delà de l'efficacité de production qu'offre le nucléaire (puissance, prédictibilité, etc.), c'est désormais l'argument bas-carbone, et donc écologique, ainsi que celui de la cogénération qui sont désormais mis en avant auprès des pays confrontés à une forte demande énergétique ou à une urbanisation croissante et rapide.

De plus, deux cas de figure sont actuellement observables : d'une part la gestion du vieillissement des parcs nucléaires existants – ainsi que la question de leur renouvellement ou démantèlement –, d'autre part la question des pays primo-accédants, c'est-à-dire qui veulent acquérir du nucléaire civil pour répondre à leurs besoins énergétiques tout en respectant les engagements climatiques. Les positionnements des pays sont donc très hétéroclites – entre le duopole sino-russe promoteur du nucléaire, les réticents, tels que l'Allemagne, les primo-accédants comme les Emirats arabes unis ou encore les pays hésitants sur leur positionnement, à l'instar de la France, des Etats-Unis ou encore du Japon.

De manière générale, raisonner sur l'avenir du nucléaire nécessite des réflexions en phase avec les technologies actuelles (génération II/III) et celles d'un futur très proche (SMR, génération IV). En plus d'une véritable amélioration technologique – pour la sûreté, la réduction des déchets, la gestion des combustibles –, ces innovations ouvrent également des champs d'applications autres que la production d'électricité, comme la production d'hydrogène, de chaleur et la désalinisation de l'eau, et ce non plus uniquement à grande échelle mais aussi à petite échelle. Ainsi, le nucléaire se positionne comme solution bas-carbone pour principalement remplacer le charbon et le gaz et apporter une solution à des besoins très spécifiques, le plaçant donc comme solution complémentaire – et non rivale – aux énergies renouvelables.

Executive summary

Left aside for a few decades in Europe and in the other Western countries, nuclear power could be seen at the first sight doomed to remain a thorny issue with an uncertain future. However, at the global level, nuclear power might instead appear at the dawn of a new rise, this time more moderated than the previous waves of enthusiasm, yet also more in line with the evolution of energy demand. Indeed, beyond the production efficiency provided by nuclear power (in terms of installed capacity and cost predictability for example), it is now the low-carbon, and therefore ecological argument, as well as the cogeneration possibility, that are now put forward for countries facing high energy demand or rapid growing urbanization.

There are currently two notable specific issues. On the one hand, managing the ageing nuclear parcs (with the issues about their renewal or decommissioning); and, on the other hand, the question of first-time buyers, countries that are interested in buying civil nuclear power plants in order to meet their energy needs while respecting their climate commitments. National positions are therefore very heterogeneous – with the Sino-Russian duopoly promoting nuclear power, the skeptical countries like Germany, first-time buyer countries such as the United Arab Emirates, and hesitating ones, like France, the United States or Japan.

More generally, nuclear power requires to be considered with its current technologies (generation III/III) and those coming in the very near future (SMR, generation IV). In addition to important technological improvements – regarding safety, waste and fuel management –, those innovations open up scopes of applications other than electricity production, such as hydrogen and/or heat production, and water desalination – this not only on a large but also on a small scale. Thus, nuclear power is positioned as a low-carbon solution mostly to replace coal and gas and to provide a solution to very specific needs. They make nuclear power a complementary – not rival – solution to renewable energies sources.

SOMMAIRE

RESUME.....	1
EXECUTIVE SUMMARY.....	1
TRANSITION ENERGETIQUE : QUEL ROLE POUR LE NUCLEAIRE ?.....	5
1. INTRODUCTION	5
2. CONTEXTE	6
3. DES POLITIQUES NATIONALES HETEROGENES	9
3.1. L'Allemagne et sa sortie du nucléaire : entre enjeux idéologiques et politiques	10
3.2. Russie-Chine : le duopole promoteur du nucléaire	11
3.3. Les pays primo-accédant : une demande émergente venue d'Asie du Sud-Est, Proche-Orient et d'Afrique	13
3.4. Royaume-Uni et Europe orientale : pour une relance du nucléaire	14
3.5. Union européenne, Etats-Unis, Japon : les hésitants.....	15
4. DES INNOVATIONS PROMETTEUSES.....	18
4.1. Optimisations et innovations nucléaire en cours	19
4.2. Vers une « démocratisation » des SMR ?.....	23
4.3. L'innovation nucléaire : vers une organisation institutionnelle multilatérale ?	25
5. NUCLEAIRE ET TRANSITIONS ENERGETIQUES : DE NOUVELLES PERSPECTIVES DE MARCHÉ.....	29
5.1. Vers un élargissement des champs d'applications du nucléaire	31
5.2. L'Union européenne : placée côté demande ou côté offre ?	34
6. CONCLUSION.....	35

Transition énergétique : quel rôle pour le nucléaire ?

1. Introduction

La très forte dépendance de l'ensemble des économies mondiales aux énergies fossiles et l'absence de solution énergétique absolue impliquent un changement profond de tout le secteur énergétique, de sa production à sa consommation en passant par l'infrastructure. A *contrario* des secteurs énergétiques actuels, en pleine transition, fondés sur un mix énergétique grandement lié aux hydrocarbures, il s'agit désormais d'avoir recours à une plus grande diversité de sources énergétiques propres qui se complètent, allant de pair avec une forte électrification, pour répondre à la demande énergétique pourtant en croissance exponentielle. Si les énergies bas-carbone sont amenées à remplacer totalement les sources d'énergie fortement émettrices, il est clair que le meilleur de chacune de ces nouvelles sources d'énergie (solaire, éolien, hydrogène) doit être exploité et que des synergies entre elles doivent être trouvées. Au vu de la dépendance de certaines énergies à des conditions environnementales spécifiques (solaire, éolien, voire hydrogène), chaque Etat tente d'élaborer sa propre voie de transition énergétique en fonction de ses besoins, de ses moyens financiers comme de ses conditions géographiques.

Au sein de l'Union européenne (UE), tous les potentiels sont explorés en matière de stratégie énergétique en particulier depuis la publication du *Green Deal*¹, à la notable exception du nucléaire civil, qui reste encore dans l'ombre. Cela peut paraître paradoxal puisque le nucléaire est la première source d'énergie bas-carbone pour la production d'électricité dans l'UE (à hauteur de 18 %), et remplit les critères liés aux émissions de gaz à effet de serre². Le nucléaire a en effet été exclu des *Fonds Européens pour la Transition Juste* dans la version finale du 14 janvier 2020, à la demande du Parlement européen³. Paradoxalement, le 28 novembre 2019, donc juste avant l'annonce du *Green Deal*, ce même Parlement a reconnu le potentiel du nucléaire pour la transition énergétique dans ses résolutions sur la COP25. A cette occasion, le nucléaire a été présenté comme pouvant

¹ Appelé aussi « Pacte vert », il s'agit d'un plan européen pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 tout en conservant un système de croissance économique et en préservant la qualité de vie actuelle des citoyens européens.

² Rapport de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), « [Nuclear Power in a Clean Energy System](#) », Paris, mai 2019.

³ L'article 5 a) de la « [Proposition de règlement du Parlement européen et du Conseil établissant le Fonds pour une transition juste](#) » indique que ces fonds ne prennent en compte ni la construction, ni le démantèlement de centrales nucléaires.

« contribuer à atteindre les objectifs en matière de climat dès lors que c'est une énergie qui n'émet pas de gaz à effet de serre, et qu'elle peut également représenter une part non négligeable de la production électrique en Europe ; [le Parlement européen] considère néanmoins qu'en raison des déchets qu'elle génère, cette énergie nécessite une stratégie à moyen et long terme qui tienne compte des avancées technologiques (laser, fusion, etc.) visant à améliorer la durabilité du secteur »⁴.

Le Parlement européen reconnaît ici que le nucléaire nécessite une forte implication gouvernementale ou une « stratégie à moyen et long-terme » (à l'instar de l'interventionnisme étatique et européen pour le soutien au développement des énergies renouvelables et de l'hydrogène) – que ce soit pour son lancement, son renouvellement ou son démantèlement. De surcroît, les prises de positions liées au nucléaire, loin d'être une énergie anodine au niveau sociétal, sont souvent très tranchées – entre ceux qui veulent son redéploiement proche ou lointain et ceux qui souhaitent son arrêt définitif. Dans un contexte d'urgence climatique, mais également de fortes perturbations économiques post-Covid, rendant confuses les perspectives à court et moyen terme, les idées et prises de position sur la transition énergétique sont très hétérogènes. Par ailleurs, les perceptions de l'électronucléaire et les stratégies le concernant diffèrent énormément entre l'Union européenne et le reste du monde. Un spectre flou de possibilités, sans choix définis, risquerait de conduire à des politiques inefficaces, voire contre-productives. S'il est important de ne pas minimiser les risques liés au nucléaire, il ne faut pas pour autant nier ses intérêts technologiques, géopolitiques ainsi que sa valeur écologique (puisque bas-carbone). De fait, les différentes grandes positions nationales relatives au nucléaire, hétérogènes mais laissant apparaître une cohérence géographique, sont le socle qui permet de considérer ensuite les horizons plausibles des innovations nucléaires ainsi que l'orientation de leur application dans les systèmes énergétiques bas-carbone. Ces tendances suggèrent également de nouvelles perspectives de marché liées aussi bien à l'élargissement des champs d'application qu'à des nouveaux foyers de demande en technologies nucléaires.

2. Contexte

Après un déploiement important, notamment en Europe, aux Etats-Unis et au Japon durant les décennies 1950-1960, le développement de l'emploi du nucléaire se poursuit ensuite de manière relativement continue mais à un rythme plus modéré dans les mêmes régions. Suite à la catastrophe de Tchernobyl (1986), le nucléaire a connu un réel déclin accompagné d'une grande défiance jusqu'au milieu des années 2000. C'est la conjonction de cours pétroliers très élevés, de l'avancée technologique des nouveaux types de réacteurs (Génération III/III+ et Génération IV), mais aussi de la recherche d'une source d'énergie bas-carbone qui a permis de relancer la branche de l'atome. Cet élan fut cependant brutalement freiné avec la catastrophe de Fukushima en 2011. De là émerge une nouvelle vague de positionnements forts contre le nucléaire de la part de certains Etats. L'Allemagne décide même d'annuler la prolongation de l'utilisation de ses centrales et d'accélérer une sortie du nucléaire à très court terme – en 2022.

⁴ [Résolution 59 du Parlement européen du 28 novembre 2019](#) sur la conférence des Nations unies de 2019 sur les changements climatiques à Madrid, Espagne (COP25).

Le paysage actuel montre un vieillissement global des parcs nucléaires existants dans les pays du Nord : 90 % des réacteurs ont actuellement plus de 30 ans aux Etats-Unis et 83 % dans l'Union européenne. Ainsi, dans le cas où aucun investissement ne serait injecté dans le renouvellement du parc ou bien dans la prolongation des licences de service des réacteurs, la production d'électricité nucléaire semble devoir diminuer des deux tiers d'ici 2040⁵.

A l'inverse, d'autres pays continuent d'augmenter fortement leur parc, à l'instar de la Chine avec ses 11 réacteurs en construction ou encore l'Inde – avec 7 réacteurs en chantier. 80 % des réacteurs chinois ont moins de dix ans (40 % pour l'Inde). Avec ses 48 réacteurs fournissant 45,5 GW, la Chine possède désormais le troisième plus grand parc mondial derrière les Etats-Unis (95 réacteurs, 97,1 GW) et la France (56 réacteurs, 61,3 GW). Un peu plus des trois-quarts des réacteurs nucléaires se répartissent désormais de façon équilibrée dans les régions d'Amérique du Nord, d'Europe occidentale et d'Asie du Nord.

D'un point de vue technologique, la grande majorité des réacteurs en service sont des réacteurs à eau pressurisée⁶ (67,5 % des capacités installées) représentant 72% de l'ensemble de la production nucléaire⁷. Si les réacteurs de génération II, entrés en service à partir des années 1970, contribuent encore très majoritairement à la production énergétique nucléaire globale, ils sont progressivement arrêtés, démantelés, ou remplacés par les réacteurs de génération III. Cette tendance s'est enclenchée depuis la catastrophe de Tchernobyl (1986) et font l'objet d'une surveillance renforcée depuis l'accident de Fukushima (2011). La génération de réacteurs actuellement mise en service, dite aussi Génération III+, est principalement représentée par les modèles ci-dessous⁸.

Tableau 1 : Exemples de conceptions de réacteurs génération III+

Fournisseur	Pays	Modèle	Type	Capacité nette (MW)
CANDU Energy	Canada	EC6	PHWR	1 100
CNNC-CGN	Chine	Hualong-1	PWR	1 100
EDF	France	EPR	PWR	1 600
KECPO/ KHNP	Corée du Sud	APR1400	PWR	1 400
ROSATOM	Russie	VVER-1200 (et ses évolutions)	PWR	1 200
SNPTC	Chine	CAP1400	PWR	1 400
Westinghouse/ Toshiba	Etats-Unis/ Japon	AP1000	PWR	1 200

Source : AIE, Technology Roadmap Nuclear Energy, 2015, p. 28

⁵ AIE, [Nuclear Power in a Clean Energy System](#), Paris, 2019.

⁶ L'eau pressurisée (PWR) sert ici de caloporteur et de modérateur au système de fission fonctionnant à l'uranium enrichi.

⁷ D'après la [base de données PRIS](#) de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) [consultée le 12/08/2020].

⁸ Pour plus d'informations voir <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/advanced-nuclear-power-reactors.aspx>

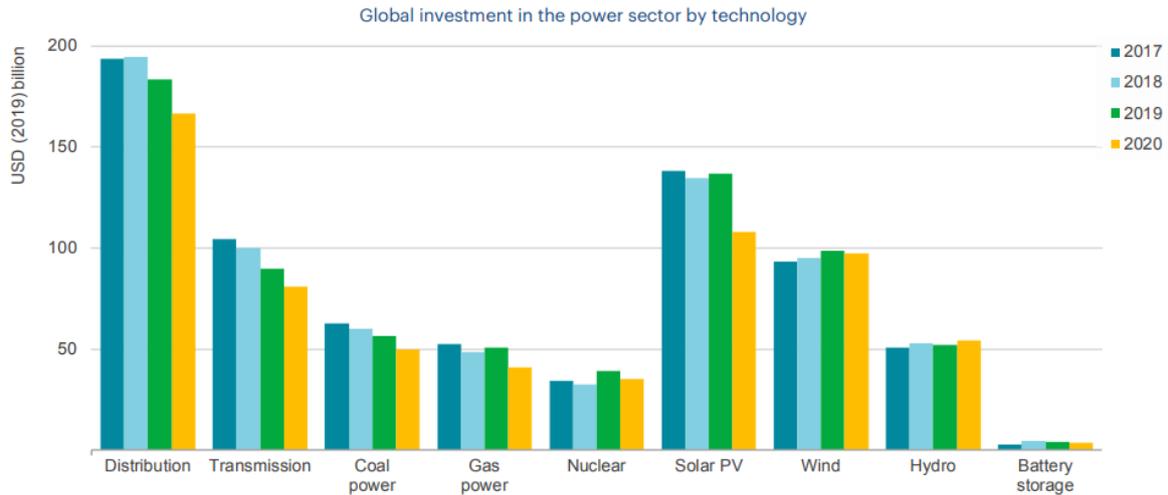
Les investissements énergétiques globaux dans la branche de l'atome sont parmi les plus faibles, devant les investissements pour les batteries et équipements de stockage, mais bien loin derrière les énergies renouvelables et les infrastructures de réseau électrique⁹. Néanmoins, jusqu'en 2010, la situation inverse dominait en matière d'investissements dans les innovations énergétiques. Autrement dit, jusqu'en 2000, le nucléaire faisait l'objet de plus de 40 % des investissements publics en R&D des pays membres de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), puis 35 % jusqu'en 2010, pour ne plus représenter qu'environ 22 % des investissements R&D publics totaux en 2019¹⁰. Par ailleurs, depuis 2010, cette part des investissements dans la recherche nucléaire diminue à mesure que les investissements généraux pour les innovations énergétiques augmentent fortement. Cependant, si la part relative des dépenses dans la branche de l'atome diminue au profit d'autres énergies, en nominal, le montant des investissements dans le nucléaire est resté relativement stable – entre 4 et 6 milliards USD (2019 PPP) depuis 1990¹¹.

⁹ De manière générale, les investissements dans le nucléaire s'articulent principalement autour du maintien des parcs en services et de la recherche, en particulier pour les pays de la Triade, tandis que la Chine et la Russie présentent des investissements surtout axés sur le développement. AIE, *World Energy Investment 2020*, Paris, 2020, p. 68.

¹⁰ *Ibid.*, p. 69.

¹¹ AIE, [Energy Technology RD&D Budgets 2020](#), Paris, 2020.

Figure 1 : Investissements mondiaux dans le secteur énergétique par technologie



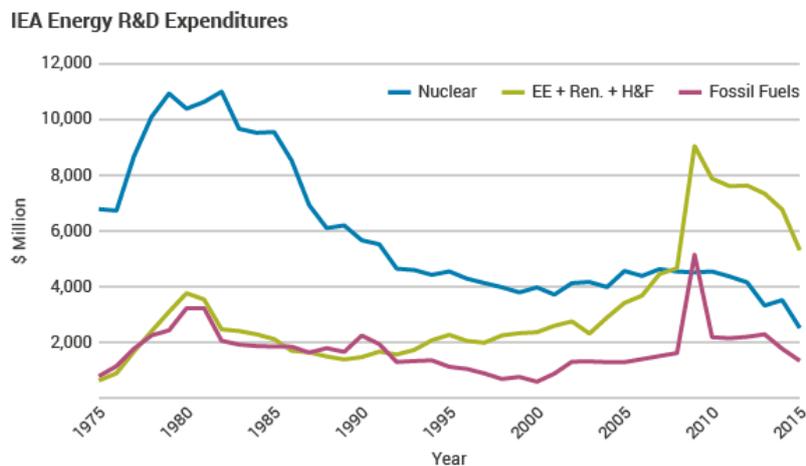
IEA 2020. All rights reserved.

Notes: Gas-fired generation investment includes large-scale plants as well as small-scale generating sets and engines. Hydropower includes pumped hydro storage.

Source: IEA analysis with calculations for solar PV, wind and hydropower based on costs from IRENA (2020).

Source : AIE, « World Energy Investment 2020 », p. 69

Figure 2 : Dépenses de recherche et développement de l'AIE par type d'énergie



Source : [AIE](#)

3. Des politiques nationales hétérogènes

La place du nucléaire dans la transition énergétique diffère selon les pays et le degré d'avancement dans leur processus de décarbonation de la production électrique. Au-delà des enjeux économiques s'ajoutent à l'équation des enjeux politico-sociaux exprimés

notamment par l'acceptation sociale et la vision du nucléaire propre à chaque pays. D'un point de vue européen, le nucléaire se trouve dans une voie incertaine. Aucune place ne lui est véritablement attribuée dans la transition énergétique, mais sans qu'il en soit pour autant exclu. A l'échelle mondiale, le nucléaire n'est cependant pas une branche en perdition : son pôle moteur s'est déplacé des pays du Nord (Europe, États-Unis, Canada, Japon) vers le duopole sino-russe et fait l'objet d'une attention particulière chez les pays primo-accédants (Turquie, Egypte, Emirats arabes unis, etc.).

3.1. L'Allemagne et sa sortie du nucléaire : entre enjeux idéologiques et politiques

Le scepticisme allemand envers l'énergie nucléaire, également qualifié de *peur (Nuklearangst)*¹², vise historiquement le principe de réaction en chaîne du processus de fission nucléaire. De la prise de conscience, selon laquelle même « l'usage pacifique » du nucléaire ne pouvait présenter un risque zéro, est né le lien entre les effets d'un accident nucléaire civil avec les effets des bombes atomiques¹³. Cette peur fut alors alimentée par la situation géopolitique très particulière de l'Allemagne pendant la Guerre froide, faisant craindre le pire en cas de catastrophe sur un territoire restreint avec une forte densité de population. A cela venait s'ajouter le fait que le nucléaire était perçu comme une énergie rivale pour le charbon national, expliquant en partie l'absence d'un fort soutien politique au développement de la branche de l'atome¹⁴. Par la suite, en 1980, le concept initial de l'*Energiewende* fut développé dans le rapport *Transition énergétique : croissance et prospérité sans pétrole ni uranium* par l'Institut d'écologie (Öko-Institut e.V.) de Fribourg¹⁵. Si le climat n'était pas encore l'argument phare de ce rapport¹⁶, celui de l'environnement ainsi que celui de la sécurité – d'approvisionnement pour le pétrole et de fonctionnement des unités de production pour le nucléaire – constituaient les clés de ce manifeste.

De 1998 à 2005, la sortie du nucléaire faisait partie du programme politique de la coalition du Parti social-démocrate (SPD) et du parti Les Verts (*Bündnis 90/die Grünen*) et correspondait à l'amendement de 2002 de la loi allemande sur l'énergie atomique¹⁷. En 2010, la date de la sortie du nucléaire avait été soumise à une révision par la coalition conservateurs-libéraux (CDU-FDP) arrivée au pouvoir l'année précédente, prévoyant une

¹² P. Gassert, « Popularität der Apokalypse: Zur Nuklearangst seit 1945 », *Ende des Atomzeitalters?*, issu de la série : *Aus Politik und Zeitgeschichte*, bpb, Bonn, 14 novembre 2011, pp. 48-54.

¹³ En Allemagne, cette prise de conscience émane du débat en RFA sur l'implantation d'une centrale à Ludwigswafen, bordant le centre urbain qui faisait écho au refus d'accueillir deux réacteurs de 600 MW sur le site de Ravenswood (Etats-Unis) en 1963 car cela était jugé trop proche des zones urbaines.

¹⁴ J. Radkau, « Eine kurze Geschichte der deutschen Antiatomkraftbewegung », *Ende des Atomzeitalters?*, issu de la série: *Aus Politik und Zeitgeschichte*, bpb, Bonn, 14 novembre 2011, pp.7-15.

¹⁵ Titre original : *Energiewende : Wachstum, Wohlstand ohne Erdöl und Uran*, F. Kraus, H. Bossel, K-F Müller-Reißmann, Öko-Institute Freiburg, Fribourg, 1980.

¹⁶ A noter que seul le pétrole et le nucléaire devaient être remplacés au profit des énergies dites *propres* telles que la biomasse, l'éolien et le solaire, mais également au profit du charbon domestique.

¹⁷ Deux ans plus tôt, le Ministère allemand pour l'environnement et la sûreté nucléaire avait publié un rapport issu de sondages sur la « conscience environnementale en Allemagne en 2000 ». Il apparaît que les risques liés à l'énergie atomique étaient déjà considérés par la moitié de la population comme « très dangereux » et « dangereux » par 35 %. Voir [étude](#), p.73.

extension de la durée de service des réacteurs de huit à quatorze années. L'année suivante (2011), la catastrophe de Fukushima provoqua des répercussions politiques immédiates et radicales : l'arrêt dans les trois mois des huit plus anciens réacteurs ainsi qu'un retour définitif au plan initial de sortie du nucléaire pour la fin 2022. L'approbation de la sortie du nucléaire par les quatre grands partis traduit une constellation politique devenue unanime quant à la position de l'Allemagne sur l'énergie atomique¹⁸. La conception d'une transition énergétique écologique au sens strict (zéro émission carbone et zéro nucléaire) devient alors le *leitmotiv* de la politique énergétique de l'Allemagne, qui poursuit en ce sens le déploiement massif des énergies renouvelables lancé depuis les années 2000 et son soutien à l'hydrogène vert depuis 2020.

Les positionnements radicalement anti-nucléaires sont principalement le résultat de pressions sociétales dans des pays qui étaient souvent déjà moyennement favorables au nucléaire. Précurseur dans cette démarche d'abandon du nucléaire, l'Autriche a pu par exemple remplacer la part du nucléaire par l'hydraulique, s'inscrivant dans une doctrine de production énergétique exclusivement verte. A l'inverse, pour l'Allemagne, qui ne bénéficie pas des mêmes atouts géographiques, le remplacement du nucléaire doit se faire par l'installation massive de parcs éoliens, prochainement par de l'hydrogène bleu et vert, sinon par du charbon et des importations.

3.2. Russie-Chine : le duopole promoteur du nucléaire

Au contraire de la position allemande, le nucléaire représente un fleuron industriel historique pour la Russie, nouveau pour la Chine. Pour la Russie, si la croissance du secteur est constante jusque dans les années 1970, l'ensemble du tissu nucléaire s'effondre avec la catastrophe de Tchernobyl en 1986. Le secteur fut assaini et porté à bout de bras par l'Etat russe jusqu'en 2007. La loi sur l'énergie de la même année présente une stratégie énergie pour 2020 et rend au nucléaire une dimension politique grâce à la création de la société d'Etat Rosatom, qui coordonne tous les acteurs régionaux et nationaux liés au nucléaire¹⁹. Cette position originale s'est développée à contre-courant des autres nations traditionnellement développées dans le nucléaire (à savoir les pays de la Triade) dont les branches nucléaires respectives sont progressivement entrées en récession. Cette politique proactive dans un contexte international du nucléaire civil morose a permis à la Russie d'acquérir des points d'attraction stratégiques tels que la construction du centre international d'enrichissement de l'uranium à Angarsk en accord avec l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), ce qu'elle fait aujourd'hui valoir comme argument de garantie de standards de qualité et de sécurité élevés²⁰. Ces positions stratégiques sécurisent et légitiment l'avancée technologique en matière de nucléaire, qu'il s'agisse des réacteurs flottants ou des réacteurs à plus grande échelle de Génération III+ et IV.

¹⁸ [Résultat des votes des parlementaires allemands au Bundestag sur la sortie du nucléaire en 2022](#) : 512 parlementaires ont voté pour sur les 619 membres à l'assemblée du Bundestag, 30 juin 2011.

¹⁹ Loi fédérale russe de 2007 sur « [L'entreprise d'Etat pour l'énergie nucléaire, Rosatom](#) ».

²⁰ La Russie détient au total 70 % du [centre international](#), le reste étant partagé également entre le Kazakhstan, l'Ukraine et l'Arménie (N. Mazzucchi, « Nucléaire civil, un enjeu stratégique pour la Russie », in Anne de Tinguy (dir.), [Regards sur l'Eurasie. L'année politique 2018](#), CERI/SciencesPo, février 2019.

Principal fournisseur de matières premières et d'énergie au niveau mondial, la Russie s'adapte au contexte de transition énergétique général. Dans son éventail d'offre en produits énergétiques, elle avance ainsi le nucléaire comme sa solution énergétique bas-carbone contrairement aux autres types d'énergie qu'elle propose (gaz et pétrole). Malgré une présence majoritaire dans les projets de construction de réacteurs, dans les innovations technologiques ou bien dans les services périphériques (enrichissement de l'uranium, formation de la main-d'œuvre, etc.), le nucléaire n'occupe qu'une place secondaire dans les exportations et recettes russes issues du secteur énergétique, loin derrière les produits pétroliers et le gaz naturel. Pourtant, entièrement souveraine sur la chaîne d'approvisionnement, de production et d'innovation du nucléaire, la Russie se positionne comme *leader* dans l'offre de produits et services nucléaires. Cela permet à la Russie de bâtir de nouvelles relations économiques et géopolitiques avec de nouveaux acteurs et potentiels clients (notamment en Afrique, au Moyen-Orient, en Amérique du Sud).

Quant à la Chine, bien qu'elle ne fasse pas partie des puissances nucléaires traditionnelles, il est indéniable qu'elle tend aujourd'hui à s'imposer sur le même plan que les nations occidentales. Engagée dans les années 1980 avec les premiers projets de construction de centrales nucléaires (Oinshan, connectée en 1991, et Daya-Bay, connectée en 1995), cette évolution rapide est le fruit d'une phase d'étude d'abord basée sur une coopération de transfert de technologie avec la France (à travers Framatome) jusque dans les années 1990. A partir des années 2000, la Chine s'oriente vers les technologies états-uniennes – via Westinghouse et son AP1000 –, puis continue jusqu'en 2014 avec tous les modèles de réacteurs nucléaires existants alors (EPR, VVER, Candu, AP1000). Cette phase d'étude a permis d'adapter l'AP1000 pour en proposer une version améliorée, le CAP1400, destinée à l'export. En parallèle, les projets de construction des « Hualong One » HPR (Hualong Pressurized Reactor 1000), également inspirés des technologies françaises et états-uniennes, ainsi que la démonstration des SMR, « Lianglong One », positionnent la Chine à la pointe de l'innovation dans le nucléaire civil. Si la Chine est aujourd'hui troisième en matière de production d'électricité nucléaire (derrière les Etats-Unis et la France), le développement de sa flotte déjà imposante de 48 réacteurs devrait se poursuivre jusqu'à une centaine d'unités de production d'ici 2035.

Cet intérêt pour le nucléaire répond à plusieurs logiques. Dans un premier temps, le nucléaire est conçu comme source énergétique pour produire une quantité suffisante d'énergie dans des endroits isolés et difficiles à raccorder aux autres réseaux existants, ce qui explique notamment la volonté de développer des SMR. En outre, le nucléaire apparaît comme un moyen de réduire les émissions carbone issues principalement de l'exploitation du charbon, qui constitue encore aujourd'hui 60 % de la consommation énergétique nationale. A l'instar de la Russie, le but n'est pas de faire du nucléaire une source énergétique majeure puisque la Chine s'est fixé pour objectif d'atteindre seulement 10 % de nucléaire dans son mix de production énergétique d'ici 2035 (contre à peine 5 % aujourd'hui). Mais elle entend l'intégrer comme solution à des cas particuliers, notamment pour le chauffage avec un système de cogénération. Enfin, la maîtrise de la technologie et de la chaîne logistique du nucléaire contribue à la souveraineté énergétique du pays et, surtout, lui permet de se positionner comme acteur majeur pour les exportations de réacteurs nucléaires.

Plus généralement, le développement du nucléaire en Chine reste modéré bien que constant. L'objectif majeur est de se donner le temps de former la main-d'œuvre qualifiée, encore manquante, ainsi que de répartir les lourds investissements pour soutenir la cadence d'une production d'un maximum de dix réacteurs par an (dont six à huit sur le sol chinois)²¹. Au niveau technologique, la Chine est passée d'accords d'échanges de savoirs classiques²² au statut de fournisseur de savoirs et de formateur. Suivant l'exemple de la Russie, la Chine dispense des formations pour les étudiants ingénieurs étrangers issus de pays en voie de développement et prépare l'ouverture d'une université de recherche dédiée à l'énergie atomique²³. En somme, la Chine et la Russie sont actuellement les nations les plus dynamiques dans leur approche du nucléaire mais également par le très grand nombre de projets de construction en cours. Toutefois, pour les deux pays, le nucléaire reste une énergie secondaire – loin derrière le gaz naturel pour la Russie et en dernière position dans le mix énergétique chinois.

3.3. Les pays primo-accédants : une demande émergente en provenance de l'Asie du Sud-Est, du Proche-Orient et de l'Afrique

Face au problème climatique mondial, le marché international et les politiques énergétiques sont également en transformation. Chaque pays, à son échelle, traite des questions énergétiques et différentes pistes de transition énergétique sont explorées. Pour ce qui est du nucléaire, 30 pays issus de tous les continents envisageraient un recours au nucléaire, toutefois à des stades différents²⁴. En effet, les Emirats arabes unis (EAU), le Belarus, le Bangladesh, l'Égypte et la Turquie sont désormais qualifiables de pays « primo-accédants » au nucléaire puisque des constructions de réacteurs sont lancées²⁵. Pour d'autres pays, à l'instar de la Jordanie ou de l'Ouzbékistan les projets nucléaires sont encore à des stades d'élaboration plus ou moins avancés (infrastructures, législatifs, etc.). Par exemple, la Bolivie, le Kenya, le Laos, le Maroc ou encore les Philippines et la Pologne mènent actuellement des discussions politiques ou élaborent des programmes nucléaires sans avoir encore de projets concrets.

Dans ce contexte, le nucléaire est présenté comme une énergie tremplin afin d'accélérer la transition énergétique et atteindre les objectifs climatiques dans les temps. De surcroît, l'intérêt pour le nucléaire provient d'une même caractéristique partagée par ces pays primo-accédants, à savoir une urbanisation croissante qui va faire augmenter fortement la

²¹ « [China to Start Building 6-8 New Reactors this Year – Govt](#) », Reuters, 7 mars 2018.

²² A l'instar du projet [ECNET](#) (*EU-China Nuclear Education and Training Cooperation*) de 2011 à 2013 dans le cadre d'Euratom.

²³ AIEA, « [China Signs Agreement to Provide Training in Nuclear Technology](#) », Vienne, 18 août 2017 ; « [China to establish first nuclear research university](#) », University World News, 28 juin 2018 ; AIEA, « [China Trains Nuclear Engineers from Nuclear Newcomer Countries – IAEA Facilitates Selection Process](#) », Vienne, 6 mai 2019.

²⁴ Pour plus d'informations sur l'émergence des pays primo-accédants voir : <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/others/emerging-nuclear-energy-countries.aspx> [consulté le 12/08/2020].

²⁵ Respectivement à Barakah (Emirats arabes unis, 31 juillet 2020, KECPO), à Ostrovets (Belarus, 2020, Rosatom), à Roopur (Bangladesh, décembre 2017, Rosatom), à El Dabaa (Égypte, 2021, Rosatom) et à Akkuyu (Turquie, 2018, Rosatom).

demande énergétique, y compris avec des usages spécifiques comme le dessalement au Proche et Moyen-Orient. En ce sens, le nucléaire apparaît comme une énergie adaptée face à cette demande intense et concentrée, tout en permettant de servir un système énergétique bas-carbone.

Ces pays rencontrent également des problèmes communs quant à la mise en place de tels projets. Le premier, d'ordre technique, concerne les infrastructures des réseaux électriques actuellement montées, qui sont inadaptées (en termes de quantité et de qualité). La capacité de production d'une centrale nucléaire pourrait ne pas être supportée par les infrastructures réseaux existantes. Des investissements supplémentaires pour changer ces infrastructures rendraient l'implantation du nucléaire bien moins compétitif par rapport à d'autres énergies de plus basse intensité. Le deuxième problème majeur concerne le manque de main-d'œuvre qualifiée permettant soit de fournir des expertises nationales sur la faisabilité et la sûreté de tels projets, pour mettre en opération les réacteurs, soit pour maîtriser tout le cadre de régulation (octroi de licences, etc.).

A noter que si un nombre assez élevé de pays manifestent l'intérêt d'avoir recours au nucléaire, la part de la capacité de production issue de ces pays resterait relativement faible par rapport aux pays possédant déjà un parc nucléaire. Autrement dit, il semblerait que le recours au nucléaire par les pays primo-accédants soit envisagé au cas par cas, d'après les besoins précis d'une région en phase d'urbanisation, et non envisagé en termes de « parc » ou « flotte » nucléaire comme ce fut le cas en Europe, aux Etats-Unis, au Japon dans les décennies 1950 à 1970.

3.4. Royaume-Uni et Europe orientale : pour une relance du nucléaire

Au-delà de l'exemple allemand, d'autres pays européens adoptent une posture différente vis-à-vis du nucléaire. L'élan de relance de la branche britannique de l'atome, impulsée par le gouvernement *via* son *Nuclear Sector Deal*, reste fortement teinté par la recherche d'une sobriété économique dans ce secteur qui peine à redécoller²⁶. Autrement dit, il s'agit de relancer une branche en la rendant compétitive le plus rapidement possible afin de garantir sa part dans la production énergétique à hauteur de 20 %. L'encadrement étatique de la filière s'oriente essentiellement sur la dynamisation de la branche par l'attractivité d'investissements – extérieurs –, l'augmentation de sa compétitivité et l'élaboration future d'une économie de l'export autour de petits réacteurs modulaires (SMR). Le nucléaire est pensé dès 2009 comme l'un des trois piliers du plan de transition énergétique britannique, avec l'éolien offshore et la séquestration carbone, ce qui fait, à l'heure actuelle, de la transition énergétique britannique la plus cohérente du continent européen en termes techno-économiques. Par ailleurs, même si la part du nucléaire dans le mix de production énergétique national se stabilise autour de 17 %, il fait partie intégrante de la stratégie de transition énergétique – *Clean Growth Grand Challenge* – pour atteindre les objectifs carbone de l'Accord de Paris²⁷. Au vu de l'âge des réacteurs, il est question d'augmenter la

²⁶ Department for Business, Energy & Industrial Strategy (Royaume-Uni), [Industrial Strategy – Nuclear Sector Deal](#), Londres, 2018.

²⁷ Department for Business, Energy & Industrial Strategy, [Grand Challenge – What is the Industrial Clusters Mission?](#), Londres, 2019.

durée de vie des réacteurs viables (types EPR) et de construire certains réacteurs (EPR et HPR-1000) sur des sites déjà existants.

Une relance est également notable dans le centre et l'est de l'Europe. Elle correspond le plus souvent à une reprise de projets de construction abandonnés. C'est en tout cas le cas de figure partagé par la Bulgarie (Belene), la Hongrie (Paks II), la Roumanie et la Slovaquie. Chacun de ces pays étant très dépendant des importations énergétiques en provenance de Russie, l'argument de sécurité énergétique est déterminant dans la relance du nucléaire. Certains font appel aux acteurs nucléaires russes (Rosatom) (Bulgarie et Hongrie), d'autres – aux acteurs chinois (CGN pour la Roumanie) afin de mener à bien la construction des réacteurs. Comme pour les primo-accédants, il ne s'agit pas de construire des parcs nucléaires entiers, mais seulement quelques réacteurs – en l'occurrence deux pour chacun de ces pays dans le but de disposer d'une certaine diversification de la production électrique –, avant tout dans une optique de sécurité énergétique. Parallèlement, le projet européen ALLEGRO a pour but de dynamiser la branche de l'innovation nucléaire en Europe centrale (Hongrie, Pologne, République tchèque et Slovaquie) autour du développement d'un réacteur de Génération IV à neutrons rapides refroidi à l'hélium avec l'aide du CEA²⁸.

3.5. Union européenne, Etats-Unis, Japon : les hésitants

De manière générale, des questions stratégiques se posent pour les pays possédant déjà un parc nucléaire vieillissant, ce qui concerne en particulier les pays de la Triade. Faut-il mettre à l'arrêt des vieux réacteurs sans renouvellement du parc ou prolonger l'utilisation de ces derniers, tout en réorientant la branche nucléaire vers de nouveaux modèles ?

L'un des arguments en défaveur d'un renouvellement du parc est que le nucléaire perd de sa compétitivité face aux coûts décroissants du gaz naturel et des énergies renouvelables. La perspective à long, voire très long, terme du nucléaire deviendrait alors un frein dans un contexte où les coûts des énergies renouvelables pourraient baisser plus rapidement²⁹. Par opposition, un prolongement de la durée de service des réacteurs offre certains avantages économiques tels que la répartition des coûts d'investissement pour le renouvellement ou la rentabilité de la production nucléaire, prévenant ainsi un « effet falaise »³⁰ sinon inévitable au vu de l'âge moyen des réacteurs. Suivant une logique libérale, l'objectif est de limiter au maximum l'injection d'aides étatiques sous forme de subventions ou d'investissements pour le renouvellement du parc ou de l'industrie nucléaire. En ce sens, les Etats-Unis gagnent du temps en octroyant aux réacteurs actuels des extensions de licences de service de vingt ans potentiellement renouvelables, augmentant ainsi l'âge des réacteurs à 60-80 ans, sans toutefois prévoir de nouvelles constructions.

²⁸ Voir Projet [ALLEGRO](#) pour plus d'informations.

²⁹ P. Szalai, Interview « [Mykle Schneider : Dans l'urgence climatique, le nucléaire n'est pas une solution efficace](#) », *Le Courrier d'Europe centrale*, 8 octobre 2019.

³⁰ Effet falaise : diminution prompte du nombre de réacteurs opérationnels qui apparaît lorsque les parcs nucléaires ont été construits en un court laps de temps. La prolongation de certains réacteurs est alors souhaitée afin d'éviter un « trou » dans le mix de production énergétique et le besoin soudain d'investissement massifs.

Figure 3 : Liste des réacteurs américains arrivant prochainement à l'expiration de leur licence de service

Table 8 | Early-Retirements for U.S. Reactors 2009-2025

Reactor	Owner	Decision Date	Closure/Expected Closure Date (last electricity generation)	Age at Closure (in years)	NRC 60-Year License Approval
Oyster Creek	Exelon	8 December 2010	December 2019 brought forward to 17 September 2018	49	Yes
Crystal River-3	Duke Energy	5 February 2013	26 September 2009	32	Application withdrawn
San Onofre-2 & -3	SCE/SDG&E	7 June 2013	January 2012	29 / 28	No application
Kewaunee	Dominion Energy	22 October 2012	7 May 2013	39	Yes
Vermont Yankee	Entergy	28 August 2013	29 December 2014	42	Yes
Pilgrim	Entergy	13 October 2015	31 May 2019	47	Yes
Diablo Canyon -1 & -2	PG&E	21 June 2016	November 2024 & August 2025	40	Suspended
Fort Calhoun	OPFD	26 August 2016	24 October 2016	43	Yes
Palisades	Entergy	8 December 2016/ 28 September 2017	2022	51	Yes
Indian Point-2 & -3	Entergy	9 January 2017	No later than 30 April 2020 / 30 April 2021	47 / 44	Yes
Three Mile Island-1	Exelon	30 May 2017	September 2019	45	Yes
Beaver Valley-1 & -2	First Energy	March 2018	2021*	45/34	Yes
Davis Besse-1	First Energy	March 2018	2020*	43	Yes
Perry	First Energy	March 2018	2021*	35.5	Cancelled ²

Sources: Various, compiled by WNISR, 2019

Source : World Nuclear Report 2019

Néanmoins, les enjeux nationaux de sécurité énergétique poussent les Etats-Unis à afficher un soutien à l'ensemble de la branche nucléaire présente sur le territoire. En effet, dans leur stratégie nucléaire officialisée en 2018, les Etats-Unis estiment que la maîtrise de l'énergie nucléaire est intrinsèquement liée aux enjeux de sécurité nationale³¹. La souveraineté d'approvisionnement énergétique est assurée dès lors que l'uranium est extrait et enrichi sur le territoire national. Ainsi, l'objectif est de garantir une parfaite autonomie de l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement, de production et d'opération du nucléaire³². Ce dernier point concerne plus particulièrement l'industrie, pourtant très fragilisée par la

³¹ Au total, huit aspects de la branche du nucléaire ont été définis comme relevant de la sécurité nationale. Parmi eux figurent la rareté de l'uranium, la constance de l'approvisionnement énergétique grâce au nucléaire, les besoins pour le secteur de la défense, les relations internationales basées sur un partenariat nucléaire (en particulier pour les pays membres de l'OTAN) ou encore la garantie de standards de sécurité et de non-prolifération du nucléaire (US Department of Energy, [Restoring America's Competitive Nuclear Energy Advantage – A Strategy to Assure U.S. National Security](#), 2020).

³² La Chine et la Russie sont pointées comme des menaces (économiques et stratégiques) pour les acteurs américains du nucléaire et la souveraineté des Etats-Unis ; ce qui explique la recherche de pleine indépendance.

forte intensification de la compétitivité prix des autres énergies fossiles (charbon, gaz et pétrole de schiste) ainsi que l'entrée des énergies renouvelables sur le marché énergétique.

Les situations du Japon et de la Corée du Sud vis-à-vis du nucléaire sont assez similaires : malgré une hostilité civile forte, les gouvernements japonais et coréen remettent progressivement en route une partie de leur parc nucléaire pour une durée *a priori* limitée. Leur objectif répond à une double logique issue des conséquences de la catastrophe de Fukushima. Il s'agit d'une part de réduire les importations énergétiques dont le Japon est devenu totalement dépendant (à hauteur de 90 %), et, d'autre part, de réduire drastiquement les émissions de CO₂³³. L'arrêt de toutes les centrales, dont la part représentait alors plus du quart de la production énergétique nationale, a obligé le Japon à avoir de nouveau recours au charbon et, comme pour la Corée du Sud, aux importations de gaz naturel liquéfié (GNL). Ces importations de GNL servent notamment à la production d'hydrogène bleu, lui aussi émetteur de carbone. De fait, le Japon et la République de Corée sont devenus respectivement premier et troisième plus gros importateurs mondiaux³⁴, et les émissions carbone des deux pays sont fortement reparties à la hausse – rétrogradant par exemple le Japon à ses niveaux d'émission des années 1990.

C'est pourquoi, en vertu de ses engagements climatiques, le Japon se donne jusqu'en 2030 pour redémarrer trente réacteurs et potentiellement poursuivre la construction de neuf autres³⁵ afin d'atteindre 22 % de son mix énergétique (soit 8 points de moins que la période précédant l'accident de Fukushima)³⁶. Quant à la Corée du Sud, une sortie progressive du nucléaire est théoriquement prévue pour 2060³⁷ mais la reprise de la construction des réacteurs Shin-Gori 5 et 6 envoie des signaux d'hésitation. Néanmoins, pour les deux pays, l'option du nucléaire se trouve aux antipodes des souhaits de l'opinion publique, rendant ce positionnement d'autant plus difficile³⁸.

Le nucléaire constitue pour le Japon et la Corée du Sud un choix *résigné*. La complémentarité du nucléaire par rapport aux énergies renouvelables ainsi qu'à l'hydrogène apparaît comme l'unique voie permettant de se rapprocher d'une solution raisonnable face à une équation impossible impliquant des paramètres idéologiques, géographiques et économiques. En somme, il s'agit d'un moyen de réduire les importations énergétiques tout en respectant les engagements climatiques, ce *via* des investissements relativement supportables. Ce dernier paramètre est d'autant plus important pour le Japon, dont la marge de manœuvre est limitée au vu de son endettement profond (240 % du PIB en 2019). Cependant, le nucléaire étant une énergie pilotable, il apporterait la stabilité de réponse à la très forte demande électrique nationale que ne peuvent garantir les énergies renouvelables

³³ Pour davantage d'informations concernant le Japon voir le site de [l'Agence japonaise pour les ressources naturelles et l'énergie](#), actualisation du 3 août 2019.

³⁴ BP, [Statistical Review of World Energy](#), Londres, 2019, p. 39.

³⁵ Constructions ayant débuté avant l'épisode de Fukushima.

³⁶ N. Mazzucchi, « L'énergie au Japon : dépendance aux hydrocarbures et course à la technologie », *Les grands dossiers de Diplomatie*, n° 56, mai-juin 2020.

³⁷ E. Lim, « South Korea's Nuclear Dilemmas », *Journal for Peace and Nuclear Disarmament*, 2:1, 2019, pp. 297-318.

³⁸ Voir S. C. Kim & Y. Chung, « Dynamics of Nuclear Power Policy in the Post-Fukushima Era: Interest Structure and Politicisation in Japan, Taiwan and Korea », *Asian Studies Review*, 2018, 42:1, pp. 107-124.

Dans cet éventail de stratégies, la France a une position assez particulière, puisque la part actuelle du nucléaire dans son mix électrique (70 %) est de loin la plus élevée au niveau mondial. Cependant, la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) 2020 poursuit clairement la volonté politique de 2015 de décentraliser les unités de production d'énergie et de trouver un équilibre nucléaire/énergies renouvelables pour des raisons de diversification du mix énergétique français³⁹. Autrement dit, la part du nucléaire devrait diminuer de 70 % à 50 % d'ici 2035 (2025 étant un objectif déjà considéré comme non atteignable)⁴⁰ et correspondrait à la fermeture de 14 réacteurs à l'occasion de leur cinquième visite décennale. Ces fermetures devraient être opérées de manière progressive afin d'éviter un effet falaise. Par ailleurs, le risque de perdre les savoir-faire de haute qualité a été identifié, ce qui pousse le gouvernement à envisager la possibilité d'installer de nouveaux réacteurs. Parallèlement a été dressé le constat d'un avenir difficile à prévoir en termes technologique et sociétal pour la branche du nucléaire. La France décide donc d'attendre jusqu'en 2030 pour donner une réelle orientation à la branche de l'atome. Ainsi, la France se positionne comme observateur de l'évolution de son propre contexte énergétique. Elle n'y intègre pas le nucléaire, mais tente d'évaluer son potentiel jusqu'en 2030.

Faisant écho à la fois aux difficultés de positionnement du Japon sur la question du nucléaire et aux hésitations stratégiques américaines, l'enjeu pour la France est donc de concilier une volonté idéologique de diversification d'un mix énergétique totalement propre avec une réalité économique limitante. Mener à bien une transition énergétique ambitieuse et convergente par rapport à la vision européenne, en priorisant au maximum les énergies renouvelables, nécessite encore davantage d'investissements massifs dans le déploiement d'énergies alternatives. Pourtant, au vu de l'absence de politiques préparatoires antérieures à 2015, et surtout au vu de la conjoncture économique actuelle, il paraît difficile de concrétiser cette volonté dans les temps impartis. A cela s'ajoute, depuis quelques décennies, l'absence de définition du rôle de l'Etat dans le soutien à long terme de l'industrie nucléaire, pourtant traditionnellement considérée comme fleuron national. L'absence d'impulsion de la part de l'Etat français dans la branche nucléaire depuis quelques années laisse présager une perte qualitative de l'industrie, comme en témoignent les incidents à répétition sur les chantiers en cours d'EPR⁴¹.

4. Des innovations prometteuses

Par le premier principe de fission de l'atome d'uranium, l'énergie nucléaire figure parmi les plus récentes formes de sources d'énergie découvertes à ce jour. Sa maîtrise exige une haute technicité dans de nombreux domaines périphériques. En parallèle, l'innovation occupe

³⁹ Cette volonté d'équilibrer le mix énergétique entre le nucléaire et les énergies renouvelables remonte à la *Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte*, 17 août 2015, Art. L.100-4, paragraphe 5.

⁴⁰ PPE 2020, Synthèse, p. 29 : « L'objectif de 50 % d'électricité d'origine nucléaire dans la production d'électricité en 2025 apparaît impossible à atteindre, sauf à risquer des ruptures dans l'approvisionnement électrique de la France ou à relancer la construction de centrales thermiques à flamme qui serait contraire à nos objectifs de lutte contre le changement climatique. »

⁴¹ Voir notamment le rapport de Jean-Martin Folz, *La construction de l'EPR de Flamanville*, octobre 2019.

traditionnellement une place de choix dans l'optimisation des processus. Sur le plan international, l'accès et la capacité d'application de la technologie nucléaire représentent pour les pays un moyen de souveraineté énergétique ainsi qu'une véritable vitrine de prestige. Ce dernier aspect est d'autant plus accentué par le nombre restreint de pays qui sont en mesure de maîtriser l'ensemble de la chaîne de production nucléaire (extraction, enrichissement de l'uranium, opération des réacteurs, recyclage). A ce jour, seuls les Etats-Unis, la France, la Russie et le Japon ont les moyens technologiques de couvrir l'ensemble de la chaîne.

L'innovation nucléaire peut se diviser en deux axes majeurs. En règle générale, le premier axe concerne l'optimisation des technologies existantes ; soit l'amélioration du fonctionnement de la centrale et de ses éléments connexes. Le second axe, émergent et annonciateur d'une nouvelle dynamique pour la branche de l'atome, cible la cogénération – c'est-à-dire l'utilisation du nucléaire pour des applications non électriques. Par ailleurs, à l'image d'ITER, la configuration même du développement des innovations nucléaires semble migrer vers une priorisation des coopérations internationales.

4.1. Optimisations et innovations nucléaires en cours

Les réacteurs dits de génération III+ sont désormais en stade de déploiement industriel, comme en témoignent par exemple les EPR en construction en Europe (Flamanville III, Hinckley Point-C, Olkiluoto) et en Chine (Taishan 1 et 2), ainsi que les constructions de VVER1200 (Rosatom), AP-1000 (Westinghouse), APR-1400 (KEPCO) et Hualong-1 (CGNPC)⁴². D'autres innovations technologiques liées au fonctionnement des centrales sont en cours de développement à des stades différents. Ces innovations font partie de la génération IV de réacteurs nucléaires dont le GIF (forum international pour la GenIV), instauré en 2000 à l'initiative du Département américain de l'Energie (US DoE), promeut l'avancée des innovations technologiques dans le domaine. L'objectif était de sélectionner au plus tôt les technologies nucléaires remplissant des critères durables⁴³ afin de soutenir plus efficacement leur développement. Les grands enjeux des technologies nucléaires sont essentiellement liés au volume et à la toxicité des déchets, la sûreté du fonctionnement et l'acceptabilité sociale.

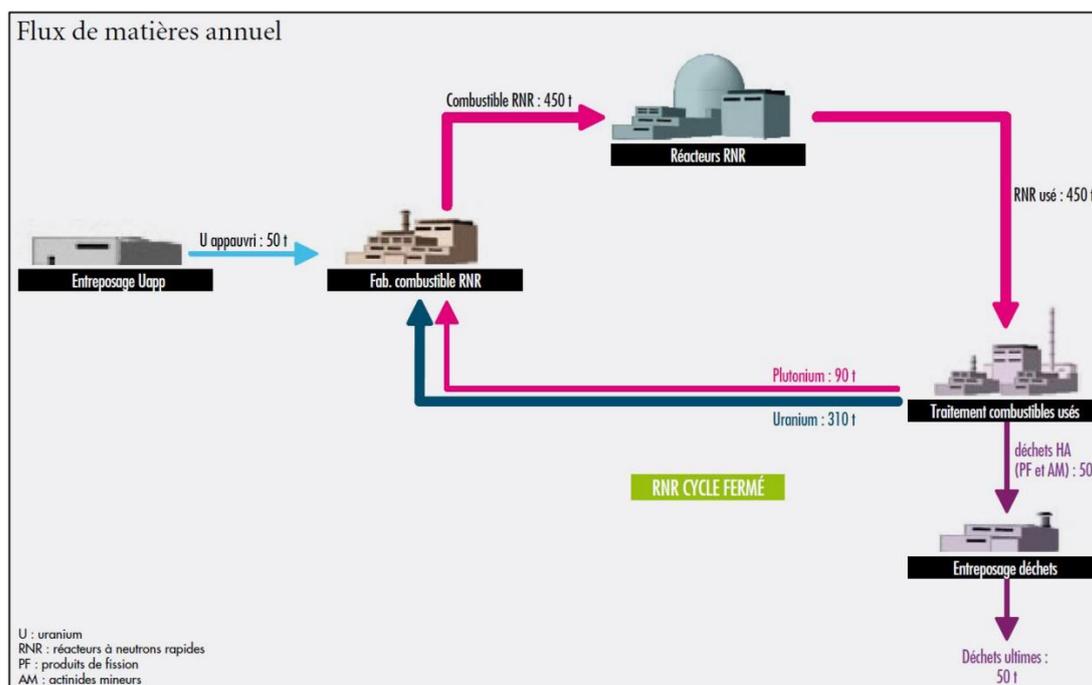
Au total, six types de réacteurs ont été sélectionnés et font l'objet de projets de recherche et développement. Parmi eux, trois technologies suivent le principe des réacteurs à neutrons rapides (RNR). A la différence des réacteurs d'anciennes générations (hormis les réacteurs à eau lourde), qui nécessitent de l'uranium enrichi, les réacteurs à neutrons rapides utilisent de l'uranium naturel (U238). Une fois irradié par les neutrons rapides, l'uranium naturel devient plutonium (Pu239 fissile), pouvant être ainsi utilisé de nouveau sous forme d'oxyde mélangé (MOX). La possibilité du multi-recyclage, et donc le très faible apport initial en

⁴² Pour plus d'information voir la [base de données ARIS](#) de l'AIEA [consultée le 12/08/2020].

⁴³ Les critères sont d'ordre : écologique (développement d'une énergie durable et propre, gestion et réduction des déchets nucléaires) ; économique (un rapport coût/cycle de vie avantageux, des risques financiers alignés sur les autres projets énergétiques) ; liés à la sûreté et aux mesures d'urgences ; et contribuant à la non-prolifération des armes nucléaires. Voir : https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9502/generation-iv-goals

uranium naturel nécessaire au lancement, permet de concevoir le circuit comme fermé⁴⁴. Ce principe apporte le double avantage de réduire drastiquement la quantité de déchets mais également leur niveau de radioactivité.

Figure 4 : Schéma de principe d'un cycle de réacteur à neutrons rapides (RNR) fermé (63GWe)



Source: [CEA](#) (2015)

⁴⁴ A ce jour, le recyclage monocycle (combustible MOX) est utilisé en France pour les réacteurs à eau et contribue déjà à 10 % de la production électrique nationale d'origine nucléaire (utilisé dans 22 réacteurs sur 57). Pour de plus amples informations, voir la fiche récapitulative du service de presse en ligne La connaissance des énergies, [Réacteurs de 4^e génération](#), 19 août 2014.

Tableau 2 : Types et caractéristiques majeures des réacteurs de génération IV

Type	Caractéristiques majeures	Principaux pays et projets actifs
SFR (réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium)	Très modulable dans la conception des tailles (de 50MWe à 1 500MWe) avec des températures moyennes (500-550°C). Cycle fermé par le multi-recyclage de l'uranium puis plutonium et réduction en parallèle de la radiotoxicité des déchets. Innovation relativement mature et apparaissant comme économiquement compétitive.	Chine (CEFR, raccordé au réseau depuis 2011, CFR1000) Corée du Sud (PGSFR) Etats-Unis (PRISM, ARC-100) France (ASTRID, abandonné) ⁴⁵ Inde (PFBR) Russie (mise en route du BN600 et BN800 à Beloiarsk, BN-1200)
GFR (réacteur à neutrons rapides refroidi à l'hélium)	Système à haute température (env. 850°C, sur le même principe que le VHTR) permettant notamment d'orienter son utilisation pour le secteur de la chaleur et la production d'hydrogène. Fonctionnement à cycle combiné fermé (même processus de recyclage que le SFR) ⁴⁶ .	UE (ALLEGRO, coopération entre la Slovaquie, la Hongrie, la République tchèque et la Pologne en partenariat avec le CEA et encadré par Euratom)
LFBR (réacteur à neutrons rapides refroidi au plomb)	Le plomb offrirait ici des avantages non négligeables : il peut être utilisé à basse pression et reste inerte à l'air ou l'eau, ce qui assure une plus grande sûreté. Au vu de la température d'ébullition très élevée du plomb (1749°C), le risque de surchauffe est quasiment éliminé. En outre, en cas d'accident, le plomb contiendrait mieux les produits de fission et autres matériaux.	Chine (CLEAR-I) Etats-Unis (SSTAR, abandonné) Union européenne (ALFRED, ELFR) Russie (BREST-300)
VHTR (réacteur à très haute température)	Réacteur refroidi au gaz dont le système pourrait dépasser les 1000°C. Application orientée pour la production directe d'hydrogène décarboné (par décomposition thermo-chimique de l'eau ou électrothermique). La capacité d'atteindre de très hautes températures pourrait servir aux entreprises chimiques, sidérurgiques, voire pétrolières.	Chine (construction d'un prototype de réacteur à haute température (HTR-PM) en préparation du VHTR)

⁴⁵ La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE 2020) n'estime pas « utile » de déployer le RNR (réacteur à neutrons rapides) du projet Astrid, du moins tant que « les ressources en uranium naturel sont abondantes et disponibles à bas prix », c'est-à-dire « jusqu'à la deuxième moitié du 21^{ème} siècle ». La priorité serait donc d'orienter les investissements à court-moyen terme sur le « multi-recyclage dans les réacteurs à eau sous pression (REP) de 3^{ème} génération ». Voir [PPE 2020](#), p. 144.

⁴⁶ A noter que le principe de cycle combiné est un système déjà répandu dans les centrales électriques au gaz naturel, à la différence toutefois que le circuit du GFR est fermé.

<p>SCWR (réacteur à eau supercritique)</p>	<p>Utilisation de l'eau supercritique (374°C, 221 MPa) permettant d'augmenter les rendements d'environ 30 %. Sa conception est flexible : il peut utiliser l'eau légère ou l'eau lourde comme modérateur, fonctionner en thermique ou à neutrons rapides. En plus d'être une innovation relativement mature, il peut être développé à partir des réacteurs refroidis à l'eau.</p>	<p>Canada (EC6) Chine (CSR1000) Corée du Sud (SCWR-SM) Japon (Yamada, abandonné) Russie (VVER-SCP) UE (HPLWR initié par l'Allemagne)</p>
<p>MSR (réacteur à sel fondu)</p>	<p>Le combustible devient du sel de fluorure fondu, dont le point de fusion est à 459°C et le point d'ébullition à 1430°C, ce qui signifie qu'il peut fonctionner sans risque de surchauffe et éviter tous les problèmes liés à l'eau pressurisée. Par ailleurs, il peut être construit partout (et non plus à proximité d'eau). Sont explorées les pistes de retraitement du sel et/ou de recyclage dans les centrales solaires à concentrateur.</p>	<p>Canada (IMRS-400) Chine (TMSR-SF, TMSR-LF, TMSFR-LF) France (MSFR) Russie (MOSART) UE (SAMOFAR)</p>

Source : [GIF](#)

Parallèlement au développement des réacteurs à fission de Génération IV, le projet ITER⁴⁷ incarne l'innovation de rupture nucléaire par excellence. Malgré des résultats prometteurs, cette technologie ne connaîtra un réel déploiement qu'à l'horizon 2050, à condition que le projet ne rencontre pas de dérapage. Contrairement à la technique de fission, dont la fracture des atomes d'uranium produit de l'énergie, c'est la collision et la fusion des atomes d'hydrogène – plus précisément la collision du deutérium et du tritium⁴⁸ –, formant alors un noyau d'hélium. La masse perdue pendant la collision multipliée par la très haute vitesse de mouvement des atomes d'hydrogène émet une très forte énergie. A l'issue de ce processus, aucune matière fissile telle que l'uranium ou le plutonium n'est rejetée. En résumé, la production de fusion nucléaire est assurée par de l'hydrogène, largement disponible, et ne produit aucun déchet hautement radioactif à longue vie. Toutefois, cette réaction nécessite une chaleur extrême (150 millions de degrés Celsius) et une densité de particules suffisante pour pouvoir déclencher une réaction forte. Autrement dit, à l'instar des centrales nucléaires actuellement en opération, il s'agit d'une production énergétique à grande échelle, envisagée entre 1 GW et 1,7 GW lors de son déploiement industriel. Le *tokamak* (abréviation russe pour *chambre toroïdale avec bobines magnétiques*) est la structure développée pour pouvoir accueillir une telle source de chaleur, puis confiner et contrôler le gaz hydrogène alors devenu plasma auto-entretenu grâce à des champs magnétiques puissants pendant tout le temps de service. L'intensité énergétique est d'ailleurs quatre fois supérieure à celle de la fission.

⁴⁷ Projet ITER : <https://www.iter.org/fr/proj/inafewlines> [consulté le 12/08/2020]. A noter que d'autres projets autour de la technique de fusion existent, notamment en Allemagne avec le Stellarator (Wendelstein 7-X) ou encore au Etats-Unis avec le Livermore Fusion SC et la Z machine.

⁴⁸ Le deutérium et le tritium sont des isotopes avec un nombre de protons et de neutrons différent de l'hydrogène.

Le développement de cette méthode prometteuse fait depuis le début des années 1930 l'objet d'une grande attention, aboutissant en novembre 1985 à une coopération internationale inouïe à l'initiative du président de l'Union soviétique, Mikhaïl Gorbatchev, auprès du président des Etats-Unis, Ronald Reagan. L'Union européenne (*via* Euratom) et le Japon ont rejoint le programme ITER deux ans plus tard, suivis dans les années 2000 par d'autres pays désormais membres. Depuis 2006, le contrat ITER à sept parties (Chine, Corée du Sud, Etats-Unis, Inde, Japon, Russie et Union européenne) stipule un partage des coûts de construction (45,6 % pour l'UE et respectivement 9,1 % pour les autres membres), d'exploitation et de démantèlement de l'installation mais également le partage des résultats expérimentaux ainsi que toute propriété intellectuelle générée par la phase d'exploitation entre 2022 et 2042. Depuis fin juillet 2020, ITER est entré dans la phase I de l'assemblage final, dont le lancement très progressif est *a priori* prévu pour fin 2025 avec l'arrivée du premier plasma.

Regroupant au total 35 pays membres et plus encore si l'on compte les accords et coopérations, comme c'est le cas avec le Canada et le Kazakhstan, le projet ITER symbolise véritablement le principe d'innovation multilatérale et possède une résonance particulière aussi bien en termes d'avancées scientifiques que sur le plan des coopérations internationales pour l'innovation, l'énergie et le nucléaire. Par ailleurs, le projet regroupe les espoirs d'un nucléaire amélioré, c'est-à-dire sans déchets et dommages radioactifs, ni de risque de prolifération des matières fissiles pouvant être déviées à des usages militaires. La fusion nucléaire est donc unanimement présentée comme une énergie d'avenir répondant aux critères durables et écologiques qui devra occuper une place non négligeable dans les mix énergétiques nationaux.

4.2. Vers une « démocratisation » des SMR ?

Par son format réduit, le SMR (*Small Modular Reactor*) permet de repenser l'utilisation nucléaire à une tout autre échelle et pour les différentes générations technologiques (génération III/III+ et génération IV). En effet, comparé à la traditionnelle conception centralisée des unités nucléaires, les SMR offrent la possibilité d'intégrer le nucléaire dans un système de production énergétique décentralisé, voire une utilisation à petite échelle en totale autarcie. Comme pour les modèles en cours de construction et les réacteurs de génération IV, les SMR peuvent également produire en cogénération. Cette particularité élargit encore le champ d'application de l'utilisation du nucléaire avec, d'un côté, la possibilité de produire à très grande échelle, de l'autre, de proposer une solution d'appoint adaptable aux besoins.

Là encore, la Chine et la Russie se distinguent par l'avancée de leurs projets technologiques autour des SMR. Le réacteur SMR chinois ACP100 (ou Linglong One), dont la capacité est inférieure à 300 MW, fut le premier réacteur de ce type à avoir passé les examens de sûreté de l'AIEA en avril 2016, devenant ainsi une référence au niveau mondial⁴⁹. Il représente

⁴⁹ Cet événement est d'autant plus marquant qu'il s'inscrit dans la stratégie chinoise, depuis son 12^e plan quinquennal pour la technologie énergétique nationale (2011-2016), d'augmenter ses standards de sûreté et d'accroître son soutien politique et technique dans ce sens au sein de l'AIEA. Pour de plus amples informations : <http://www.cnnc.com.cn/cnnc/300582/fcjh/494367/index.html>

l'aboutissement d'une stratégie d'innovation technologique par le gouvernement chinois poursuivie depuis 2011, dans laquelle les SMR (Linglong One) représentent une constante priorité⁵⁰. En juillet 2018, la China National Nuclear Corporation (CNNC) a annoncé le lancement de la construction d'un réacteur Linglong One (125MW) dans la zone pilote de libre-échange insulaire de Hainan (extrême sud de la Chine) avec une cogénération envisagée pour la désalinisation. La mise en opération est attendue pour 2025. La Chine conçoit son ACP100 comme un moyen de production énergétique sûr et résistant à des conditions climatiques difficiles pour pouvoir être installé dans des zones géographiques délicates et ainsi désenclaver les zones isolées et encore non raccordées.

De son côté, la Russie ne conçoit pas de SMR dans le sens de réacteurs modulaires, mais se focalise sur une taille réduite de réacteurs (types KLT-40 et son dérivé RITM-200) devenant adaptables et susceptibles d'être installés dans des zones géographiques qui autrement seraient difficiles à raccorder. Inspirés des technologies embarquées dans les brise-glaces nucléaires, la plupart des projets de réacteurs à petite taille menés par Rosatom sont sur des structures flottantes. L'*Akademik Lomonosov* est la première centrale sur mer russe transportant deux réacteurs (KLT-40) de 35MW à son bord pour se raccorder à la région côtière arctique du Tchoukotka (extrême Est de la Russie), jusqu'ici approvisionnée par du charbon⁵¹. Cependant, les modèles du KLT-40 ne sont pas repris dans les projets actuels, et laissent la place aux RITM-200 (50MWe) conçus par l'OKBM Afrikantov et construits par ZiO-Podolsk⁵². En tout, six de ces RITM-200 sont prévus pour les trois nouveaux brise-glaces (issus du projet 22220)⁵³. Les RITM-200, d'une capacité de 50 à 57MWe, incluent une cogénération pour la chaleur, la désalinisation, et un couplage possible avec les énergies renouvelables⁵⁴. Par ailleurs, un système de recyclage permet un approvisionnement pouvant aller jusqu'à dix ans⁵⁵. Rosatom envisage cette technologie principalement pour l'export vers les zones côtières, surtout dans l'hémisphère sud (Amérique du Sud, Afrique, Asie du Sud). Des versions *onshore* de ces RITM-200 sont en cours de développement mais restent pour le moment à un stade moins avancé que les versions *offshore*, dont le développement commercial n'est pas envisagé avant 2027. Un projet de construction a été signé en septembre 2019 pour la région de Iakoutie (à l'Ouest du Tchoukotka), et un protocole d'entente a été également signé par la région de Tcheliabinsk (Sud-Ouest de la Russie) pour répondre aux besoins énergétiques des mines de fer. Enfin un autre projet sur terre est également à l'étude dans la région du Tchoukotka, cette même région qui accueille désormais l'*Akademik Lomonosov*⁵⁶.

⁵⁰ Il est désigné comme priorité d'innovation technologique nationale dans le 12^e Plan quinquennal pour la technologie énergétique nationale (2011), le Plan d'action pour les technologies énergétiques et l'innovation (2016-2030) et la Feuille de route des actions clés de l'innovation pour la révolution des technologies énergétiques. De surcroît, l'entreprise *China Nuclear New Energy Corporation* a été créée dans le but de promouvoir exclusivement le Linglong One.

⁵¹ « [Russia Connects Floating Plant to Grid](#) », World Nuclear News, 19 décembre 2019.

⁵² Pour plus d'information ainsi qu'une comparaison entre le KLT-40 et le RITM-200, voir Rosatom, présentation [Development of Floating Reactor Technologies](#), 13 décembre 2019, pp. 6-10.

⁵³ Il s'agit de l'*Antartika* (mis en service en 2020), le *Sibir* (prévu pour 2021) et l'*Ural* (prévu pour 2022). Chacun des brise-glaces possède 2 RITM-200.

⁵⁴ Une cogénération pour la production d'hydrogène est également prévue pour les versions sur-terre.

⁵⁵ Article Nuclear Engineering International, [Russia: Keeping the SMR Dream afloat](#), 3 octobre.2018.

⁵⁶ Article Nuclear Engineering International, [Rosatom Looks to Smaller Reactors](#), 24 mars 2020.

Si d'autres projets SMR existent dans le monde, ces projets sont à des stades de conception ou éventuellement d'octroi de licence dans le cas du projet SMART de la Corée du Sud (KAERI)⁵⁷. Outre-Atlantique, le projet NuScale représente le principal projet SMR aux États-Unis qui approfondit la cogénération pour la production d'hydrogène⁵⁸. Du côté de l'Union européenne, l'usage d'un réacteur type SMR semble intéresser et devenir une piste sérieusement envisagée par l'Estonie, en raison de sa taille et de sa particularité modulaire. L'entreprise estonienne Fermi Energia a d'ailleurs signé une déclaration d'intention avec les acteurs finlandais Fortum et l'entreprise belge Tractebel, ensuite rejoints par Vattenfall et l'entreprise américaine Last Energy⁵⁹. Au niveau mondial, la Chine est le deuxième pays à débiter la construction d'un SMR et la Russie – le premier pays à avoir mis en opération des petits réacteurs flottants.

A la différence des réacteurs de plus grande capacité, il semblerait qu'un intérêt commun ait émergé entre les pays traditionnellement producteurs mais actuellement hésitants. L'intérêt commercial des SMR a été également soulevé par le Canada, le Royaume-Uni et les États-Unis, qui qualifient cette configuration de réacteur comme « adaptable, pratique et à des coûts raisonnables »⁶⁰. Par ailleurs, l'offre se transformerait pour proposer la vente de petits réacteurs modulaires en flotte. Cela laisserait donc présager que toutes les sous-branches pour la réalisation de réacteurs pourraient renaître durablement. Toutefois, du côté de ces trois pays, encore aucun modèle concret ou en développement ne semble émaner dans un horizon court-moyen terme. Le Canada a tout de même lancé sa feuille de route sur les SMR en 2018 et se donne jusqu'à 2026 pour proposer un prototype de démonstration complet⁶¹ alors que le Royaume-Uni ne devrait voir sa première construction de SMR que d'ici 2030⁶². Par ailleurs, le Canada justifie également son engouement pour les SMR comme le moyen d'affirmer un statut de référent pour les technologies liées aux SMR, notamment pour instaurer les standards de sécurité et de conception.

4.3. L'innovation nucléaire : vers une organisation institutionnelle multilatérale ?

Alors que l'Agence internationale pour l'énergie atomique ne prévoit une véritable percée des innovations nucléaires qu'après 2030, la Chine et la Russie se démarquent largement par l'avancée de leurs projets d'innovation. En effet, la Chine termine la construction d'un réacteur modulaire avancé à haute température refroidi au gaz ; quant à la Russie, elle possède déjà deux réacteurs rapides à sodium opérationnels (BN-600, BN-800). A l'exception de la Chine et de la Russie, qui possèdent un programme d'innovation nucléaire fort et

⁵⁷ Détails du projet issus de la [base de données ARIS](#) de l'AIEA, 4 avril 2011.

⁵⁸ Lien vers le projet : <https://www.nuscalepower.com/projects/carbon-free-power-project>

⁵⁹ <https://www.nuklearforum.ch/fr/actualites/e-bulletin/vattenfall-soutient-letude-du-smr-en-estonie>

⁶⁰ Le développement des SMR forme d'ailleurs la pierre angulaire de la *Flexible Nuclear Campaign (pour l'intégration du nucléaire/renouvelables)* lancée à l'occasion du 10^e CEM (Clean Energy Ministerial) à Vancouver en 2019 pilotée par la Canada, le Royaume-Uni et les États-Unis

⁶¹ Comité directeur de la feuille de route pour les SMR canadiens, [A Call to Action: A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors](#), 2018.

⁶² Energy Technologies Institute, [Preparing for Deployment of a UK Small Modular Reactor by 2030](#), 2016.

développé, la gestion de l'innovation nucléaire tend à être largement transférée du cadre national vers un cadre institutionnel international.

L'une des principales raisons en est le paradoxe suscité par la volonté de poursuivre le développement des technologies nucléaires malgré le désengagement des investissements publics et nationaux de ce domaine depuis la fin des années 1970. Plusieurs raisons à ce désengagement financier : d'une part, la compétitivité en forte hausse des énergies fossiles (gaz et pétrole), d'autre part, la demande en baisse en nouveaux réacteurs destinés aux parcs nationaux déjà bien pourvus.

De ce fait, depuis 2000, l'AIEA a mis à disposition des outils et services permettant de mener des analyses scientifiques et techniques d'après une méthodologie précise⁶³. Ces derniers ont pour objectif de développer des scénarios régionaux pour l'implantation du nucléaire mais également d'évaluer l'ensemble des risques. Ces outils sont censés mettre en avant les options disponibles pour développer les technologies nucléaires durables auprès des pays membres. S'ajoute depuis 2018 l'outil de *Roadmapping*, basé sur cette méthodologie, dont le but est d'accompagner les Etats intéressés par des solutions nucléaires. Il s'agit alors de leur fournir l'ensemble des possibilités d'utilisation du nucléaire durables et, le cas échéant, de trouver des options de cogénérations⁶⁴. Cet outil est par ailleurs soutenu par les cours en ligne dispensés par l'AIEA pour apporter l'assistance technique aux experts nationaux dans leur modélisation de scénarios énergétiques, ou encore dans la comparaison de systèmes énergétiques. Il semblerait que le développement de tels outils s'élargisse depuis quelques années et accompagne les pays dans leur stratégie d'implantation de solutions nucléaires ainsi que sur la conception de leurs feuilles de route. La mise à disposition par l'AIEA de quatre nouveaux cours en ligne depuis le mois d'avril 2020 témoigne de l'intérêt général pour ces formats de soutien et d'accompagnement⁶⁵.

Par ailleurs, cette intensification de l'offre d'aide à l'implantation des produits nucléaires innovants est largement orientée vers la recherche de cogénération, dans le cas où l'utilisation du nucléaire n'est pas uniquement destinée à la production d'électricité. A cet effet, mais sans que cela soit exhaustif, l'AIEA a déjà manifesté un intérêt prononcé pour mettre en avant le nucléaire dans la production d'hydrogène à l'occasion du 16^e GIF⁶⁶.

En parallèle, l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'OCDE (NEA) renforce cette tendance au soutien des innovations par le lancement, en 2015, d'une grande initiative pour l'innovation

⁶³ Il s'agit de la méthodologie INPRO, qui prévoit d'analyser une série de critères, dits de durabilité, impliqués dans le système énergétique nucléaire. Le système énergétique nucléaire est défini par l'AIEA comme étant le complexe des infrastructures physiques et institutionnelles qui vont couvrir plusieurs générations humaines, les mines d'uranium, la production d'électricité, la gestion des déchets radioactifs, l'élimination permanente des déchets hautement radioactifs et le cadre réglementaire et légal impliqué. De fait, les critères retenus dans la méthodologie INPRO sont d'ordre économique, environnemental, ou sont liés aux infrastructures, à la gestion des déchets, contribuant à la non-prolifération du nucléaire militaire, à la sûreté. Pour davantage d'informations, se référer au manuel [INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Infrastructure](#), No. NG-T-3.12, Vienne, 2014.

⁶⁴ AIEA, « [IAEA Project Develops Roadmapping Tool for Future Nuclear Energy Systems](#) », 14 juin 2018.

⁶⁵ AIEA, « [New IAEA E-learning Course : Analysis Support for Enhanced Nuclear Energy Sustainability](#) », 17 avril 2020.

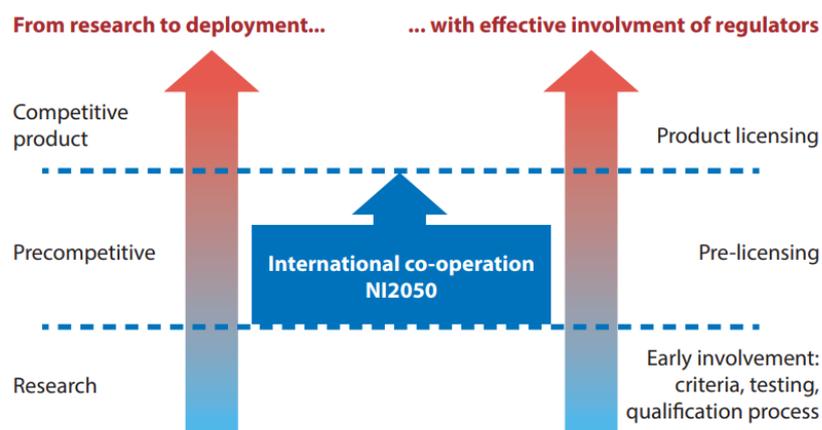
⁶⁶ AIEA, « [Next Generation Nuclear Reactors: IAEA and GIF Call for Faster Deployment](#) », 17 juillet 2020.

nucléaire, la NI2035, devenue NI2050 en 2019⁶⁷. Cette initiative couvre l'ensemble des éléments liés aux technologies, qu'il s'agisse de la sûreté, de la gestion des déchets, des matériaux et combustibles ou encore de la gestion de la vieillesse des réacteurs ainsi que de leur démantèlement en passant par les nouvelles pistes de cogénération. La NEA identifie l'absence de prise de décision politique, et donc l'absence de pilotage ou de stratégies nationales claires, comme le principal problème que rencontrent les innovations nucléaires. A ce sujet, trois points sont précisés :

- la complexité des financements et l'augmentation des coûts pour les innovations dont la durée est prolongée ;
- l'évolution du cadre réglementaire (très dépendant du cadre législatif national) ;
- les besoins en infrastructures nécessaires à la phase de démonstration des innovations (réacteurs de recherche, chaîne d'approvisionnement, octroi de licences ainsi que toute la main-d'œuvre qualifiée).

La NEA veut ainsi donner de l'ampleur à son rôle d'institution multilatérale en préparant au mieux les autorités nationales et internationales compétentes dans l'octroi de licence afin d'accélérer le passage de l'innovation à celui de la démonstration. Au-delà d'une simple fluidification du développement d'innovation, il s'agit également pour la NEA d'instaurer un processus systématique de développement *via* une phase de test et de validation avant que les produits technologiques ne soient industrialisés.

Figure 6 : “A key to success: better aligning technology and licensing readiness”



Source : [NI2050 Roadmap](#), NEA, OCDE (2019)

⁶⁷ AIEA et OCDE, [Nuclear Innovation 2050: An NEA Initiative to Accelerate R&D and Market Deployment of Innovative Nuclear Fission Technologies to Contribute to a Sustainable Energy Future](#), 7 juin 2018.

Les acteurs impliqués désignés dans l'initiative sont les industries, comme demandeurs et utilisateurs de la technologie, et les autorités de régulation et de sûreté, chargées d'attribuer les licences. Dans tous les cas, le rôle des Etats est toujours considéré comme primordial pour l'impulsion et la dynamique générale du processus. Ainsi, cette initiative est également dédiée aux Etats afin de leur fournir des éléments pour élaborer une stratégie et une feuille de route précise à long terme.

Par rapport aux conceptions traditionnelles de gestion de l'innovation nucléaire, se résumant à une plateforme d'échange des savoirs et à une harmonisation des standards de sécurité, l'AIEA et la NEA veulent, au travers de ces initiatives, un rôle institutionnel pro-actif dans le processus. C'est ainsi que la Communauté européenne de l'énergie atomique, Euratom, régie par l'un des traités fondateurs de la Communauté européenne, continue de s'inscrire dans ce schéma plus classique et restreint de gestion de l'innovation. Les priorités sont largement tournées sur l'amélioration des systèmes de sûreté, le traitement des déchets radioactifs et la fusion nucléaire⁶⁸. En somme, seules les innovations d'optimisation de technologies déjà existantes (à l'exception de la fusion) sont abordées, mais pas les innovations impliquant une cogénération ou des applications autres que celle de la production d'électricité⁶⁹.

Créée en 2007 et devenue ONG en 2019, la Plateforme technologique pour une énergie nucléaire durable (SNETP) a été établie pour promouvoir le système nucléaire (sûreté, durabilité, efficacité) pour les générations de réacteurs en cours et à venir⁷⁰. Celle-ci fait d'ailleurs partie du plan SET (Plan européen stratégique pour la technologie énergétique), qui regroupe diverses alliances pour la recherche et l'innovation dans l'ensemble des secteurs énergétiques⁷¹. Si le nucléaire n'est que très peu représenté dans le SET, la SNETP apparaît comme une structure encore naissante qui se subdivise en trois parties :

- NUGENIA : l'alliance nucléaire des Générations II et III
- ESNII : l'initiative industrielle européenne pour le nucléaire durable, chargée de faciliter la mise en place de prototypes de démonstration pour les projets européens de réacteurs de Génération IV : ASTRID, MYRRHA, ALFRED et ALLEGRO
- NC2I : l'initiative industrielle pour la cogénération du nucléaire, chargée de mener à bien des projets d'innovation et de démonstration pour des solutions de cogénération énergétiques compétitives.

Si l'initiative NC2I pose un premier jalon pour ouvrir une voie d'exploration vers la cogénération, cette piste n'est clairement pas encore une priorité au niveau européen. L'Union européenne n'envisage la durabilité et un possible atout bas-carbone du nucléaire que dans la perspective de l'amélioration de sa sûreté et de la gestion des déchets

⁶⁸ Commission européenne, EURATOM Supply Agency, [Annual Report 2018](#), Bruxelles, 2019.

⁶⁹ Seule la technologie des SMR a fait l'objet d'une attention particulière au cours du 13^e ENEF (European Nuclear Energy Forum) en 2018. Encore une fois, ce sont les aspects sécuritaires et de sûreté énergétique qui ont largement occupé les discussions tandis que la possibilité de cogénération a été seulement évoquée. Voir https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/2018_10_01_enef2018conclusionsfinal.pdf

⁷⁰ Lien de présentation de la SNETP : <https://snetp.eu/the-snetp-association/>

⁷¹ Voir la page d'information de la Commission européenne, [Strategic Energy Technology Plan](#), 10 mars 2020.

radioactifs, orientant ainsi massivement ses investissements et projets dans ce sens. A l'inverse, ce type d'initiatives pourrait laisser présager le développement d'une alliance entre les acteurs concernés de façon analogue aux autres alliances formées récemment autour des acteurs pour les batteries et prochainement pour l'hydrogène. Auquel cas la caractéristique multilatérale ne serait pas impulsée par les institutions européennes (Commission, Euratom) mais par les acteurs économiques eux-mêmes.

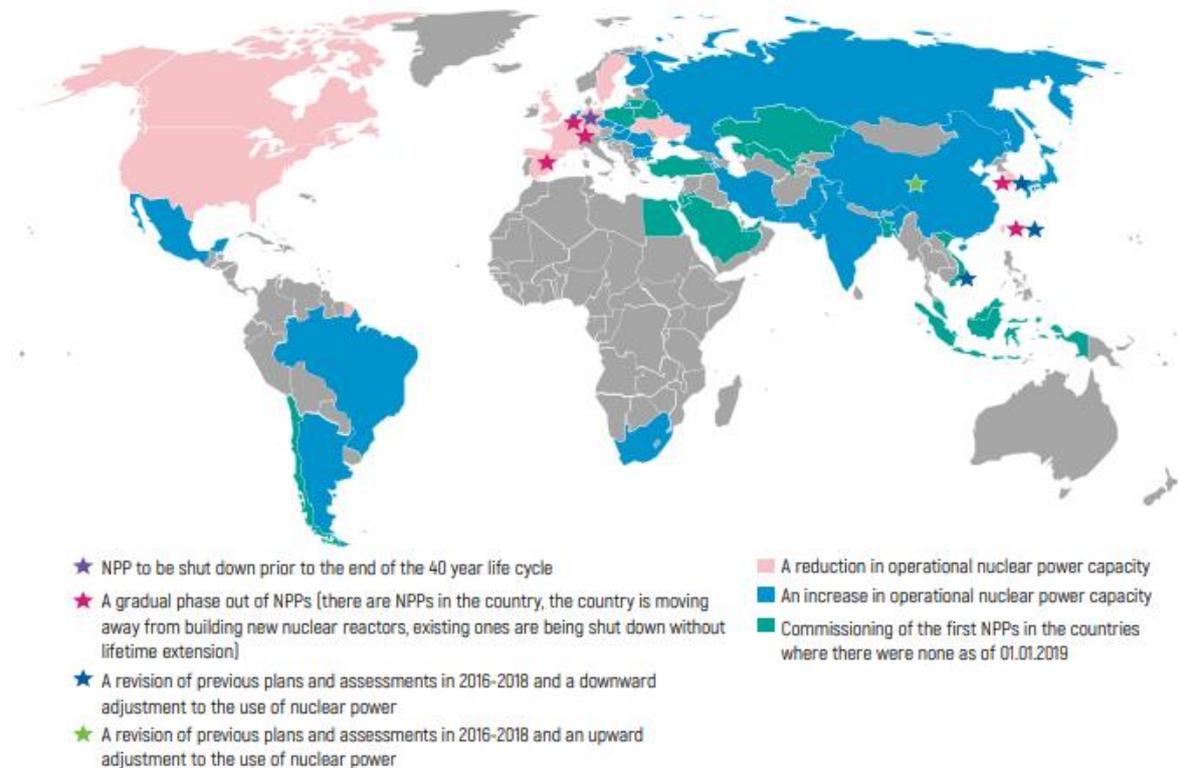
5. Nucléaire et transitions énergétiques : de nouvelles perspectives de marché

Au-delà d'une stratégie nucléaire uniquement axée sur les besoins nationaux, il s'agit pour certains pays de redynamiser tout un secteur pour percer dans le marché mondial du nucléaire. A cette fin est élaborée une véritable économie de l'export. En plus de l'argument climatique, la volonté de pays jusqu'ici non nucléarisés d'acquiescer ces technologies civiles offre aux pays constructeurs de réacteurs l'assurance d'un avenir dans la construction de réacteurs hors frontières. De fait, un nouveau paysage international d'offre et de demande émerge sur le marché nucléaire, mettant face à face les pays se positionnant comme fournisseurs de produits nucléaires (équipement, matière première, enrichissement, retraitement) et ceux manifestant l'intérêt de recourir au nucléaire, de renouveler ou d'agrandir leur parc.

Ce regain d'intérêt pour dynamiser la branche de l'atome converge avec l'identification de nouveaux types de besoins énergétiques. La Russie et la Chine orientent clairement leurs offres vers les pays dont les besoins énergétiques sont fortement croissants ; autrement dit les pays émergents dans l'Asie du Sud-Est, au Moyen- et Proche-Orient et l'Afrique en particulier⁷². Le nucléaire est alors perçu comme une solution pour soutenir la très forte demande énergétique, issue principalement de l'industrie et d'une urbanisation croissante.

⁷² Voir rapport de la NEA, [Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment](#), Vienne, 2016, pp. 36-39.

Figure 2 : positions sur l'utilisation de la capacité de production nucléaire et sur les ajustements de la capacité, par pays



Source : [ERI RAS](#)

En plus de la spécificité des modèles qu'elle propose, la Russie adapte son offre aux pays primo-accédants. De plus, elle ne vend pas uniquement des réacteurs nucléaires comme un bien, mais y ajoute le service de construction, d'entretien et de démantèlement, aussi appelé BOO (pour *Build, Own, Operate*)⁷³. L'objectif ici est de permettre aux pays ne maîtrisant pas l'atome et/ou n'ayant pas suffisamment de main-d'œuvre qualifiée de pouvoir tout de même avoir recours à cette énergie dans son mix énergétique. Le système BOO implique que la Russie reste entièrement propriétaire et opérateur des réacteurs et centrales exportés. De plus, la Russie étant déjà l'un des principaux fournisseurs d'uranium enrichi sur le plan mondial, cela signifie que l'offre nucléaire russe apporte une solution complète aux Etats acheteurs. Ce principe s'est concrétisé pour la première fois avec la Turquie, pour la centrale d'Akkuyu et le lancement de la construction de quatre réacteurs (VVER-1200) pour une capacité totale prévue de 4,8 GW⁷⁴. Dans le cas de la centrale d'Akkuyu, s'ajoute à cette offre BOO l'envoi d'étudiants turcs dans les universités et instituts

⁷³ N. Mazzucchi, « [Nucléaire civil, un enjeu stratégique pour la Russie](#) », *op. cit.* ; voir aussi « [Financing Nuclear Projects – New Options?](#) », *Nuclear Engineering International*, 12 mars 2014 ; AIEA, [Financing Nuclear Power in Evolving Electricity Markets](#), avril 2018, pp. 8-9.

⁷⁴ Présentation du projet : <http://www.akkunpp.com/index.php?lang=en> ; présentation de Rosatom, [World's First Nuclear Power Plant Project Implemented on BOO](#), 1er avril 2014.

techniques russes pour les former à l'ingénierie nucléaire⁷⁵. Le contrat BOO confèrerait à la Russie les mêmes capacités d'influence que pour le modèle contractuel du gaz. En effet, le contrat BOO dépasse le cadre de la simple vente technologique, en y ajoutant le contrat d'opération et d'approvisionnement sur trente ans, ce qui rend les pays acheteurs totalement dépendants de la Russie pour le fonctionnement des centrales.

5.1. Vers un élargissement des champs d'application du nucléaire

Si la plupart des innovations aspirent à améliorer la technique de fission nucléaire actuelle ou à développer la technique de fusion pour la production électrique, les possibilités de cogénération et d'applications non électriques tendent à se démocratiser. Elles s'inscrivent dans la même dynamique que pour les autres sources d'énergie, à savoir le besoin de trouver des solutions combinatoires afin d'établir un mix énergétique diversifié propre, efficient et pilotable.

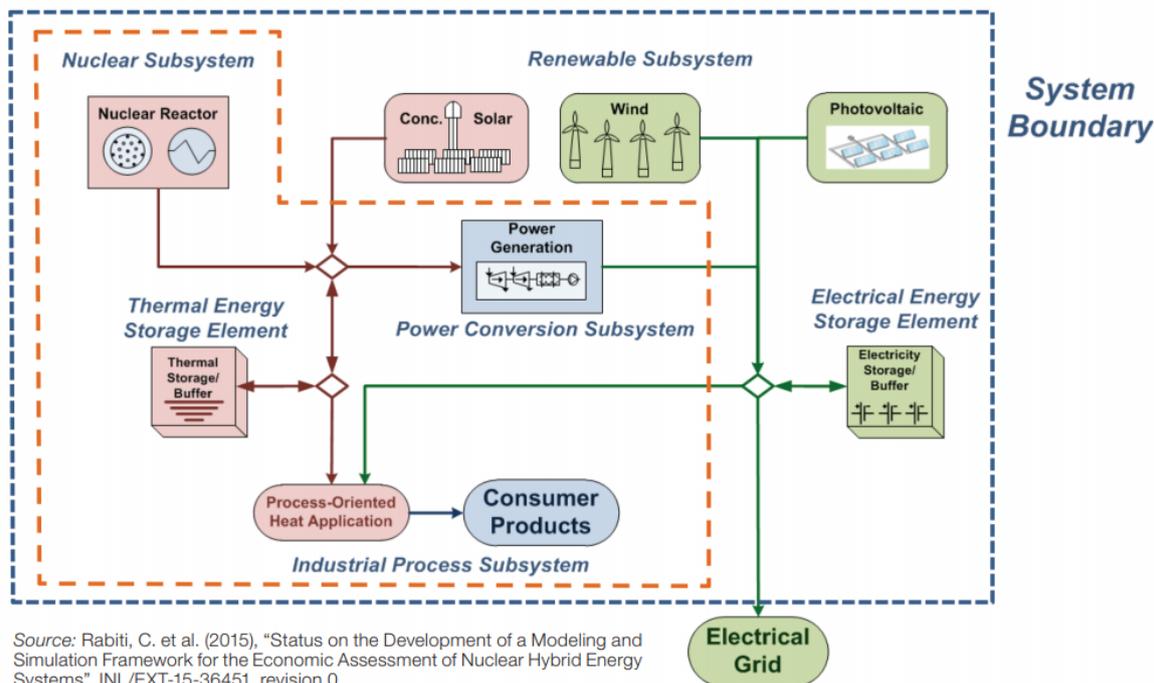
Le principe de cogénération tend à devenir le *leitmotiv* des nouvelles conceptions des principaux types de réacteurs (à eau légère, à eau lourde, petits réacteurs modulaires, GFR, LFR, SCWR, SFR, MSR). Il s'agit de repenser l'efficacité et l'application du nucléaire, en l'envisageant comme moyen de production électrique et comme source de chaleur pouvant servir à d'autres applications. Repenser le nucléaire dans un système de cogénération permettrait alors d'accentuer l'idée de complémentarité – et non de rivalité – du nucléaire vis-à-vis des énergies renouvelables. La double qualité propre au nucléaire – son intensité énergétique et le fait qu'il s'agisse d'une énergie pilotable – permet de compenser l'intermittence de production et la moyenne capacité des énergies renouvelables tout en offrant un moyen alternatif de production et d'utilisation de l'hydrogène⁷⁶. Cette piste est très largement portée par les acteurs et institutions du nucléaire, en particulier l'Agence nucléaire de l'OCDE et l'AEIA, car elle implique le nucléaire dans un système complexe mixte avec les autres sources énergétiques, et non plus de manière isolée⁷⁷.

⁷⁵ De manière similaire, la Russie forme des étudiants égyptiens dans le cadre de la construction de la centrale d'El Dabaa.

⁷⁶ Dans le sens où le nucléaire peut produire de l'hydrogène mais également s'en servir comme gaz de refroidissement.

⁷⁷ Pour de plus amples informations, voir le « [Guide sur la cogénération nucléaire](#) » (*Guidance on Nuclear Energy Cogeneration*) de l'AEIA, Vienne, 2019.

Figure 3 : Systèmes hybrides pour un futur très bas-carbone



Source : [NEA](#) (2018)

La cogénération implique ainsi d'autres applications et productions que celle de l'électricité. La première autre piste envisageable est celle du couple nucléaire-hydrogène⁷⁸. En effet, la production d'hydrogène peut s'opérer de deux manières : par décomposition thermochimique obtenue par une grande source de chaleur, ou bien par électrolyse qui va « craquer » la molécule d'eau par source électrique. Dans les deux cas, le nucléaire peut donner l'impulsion nécessaire à la production d'hydrogène. Toutefois, l'apport thermique nécessaire au processus de décomposition thermochimique nécessitant une température très élevée (supérieure à 800°C), il faudra attendre le développement de certains modèles issus de la Génération IV, en particulier les VHTR. Les projets relatifs à cette technologie en cours de développement semblent avancer doucement aux Etats-Unis tandis que la Chine a mis en opération la première centrale de cogénération nucléaire (pour la chaleur)⁷⁹.

Par rapport à la méthode par électrolyse, le nucléaire étant de base l'énergie la plus efficace pour la production électrique, il est économiquement sensé d'envisager l'utilisation d'une centrale nucléaire pour produire de l'hydrogène (qualifié parfois d'hydrogène jaune). L'avantage étant d'assurer une production électrique suffisamment stable et intense pour l'électrolyse, ce dans des coûts moins élevés que la production d'hydrogène vert – dont l'électricité est issue des énergies renouvelables. Néanmoins, force

⁷⁸ Pour plus de détails, voir N. Mazzucchi, A. Livet, [La course à l'hydrogène décarboné : une nouvelle course énergétique globale](#), Recherches & Documents, FRS, Paris, 20 juillet 2020, pp. 45-48.

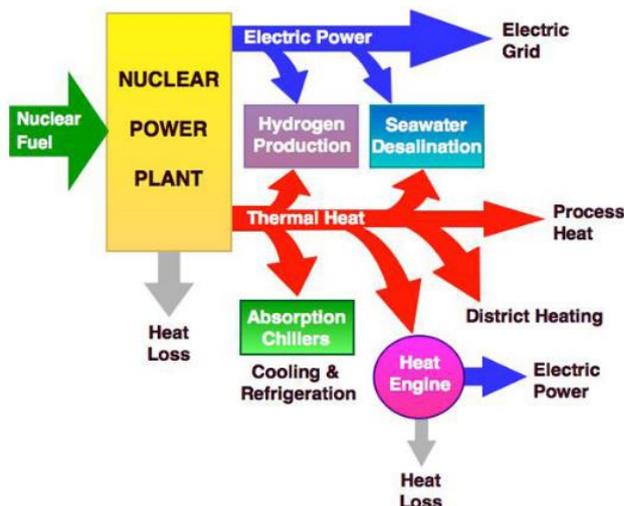
⁷⁹ Aux Etats-Unis, c'est le projet [NuScale](#) qui incarne l'intérêt du DoE pour l'application du nucléaire (précisément des SMR dans la production d'hydrogène). Pour la Chine, voir « [China Starts up First Nuclear Cogeneration Project – at AP1000 Plant](#) », *Powermag*, 3 décembre 2019.

est de constater que la piste de l'hydrogène jaune est restée inabordable dans les stratégies hydrogène publiées jusqu'à présent, ce qui montre que tous les champs de production d'hydrogène tout comme les champs d'application du nucléaire n'ont pas été encore explorés par les gouvernements.

Dans la même optique de cogénération, la haute température de certains réacteurs, tels que les LFR, GFR (et HTGR pour « réacteur à haute température refroidi au gaz »), ou encore les SCWR, peut varier entre 500°C et 800°C, ce qui permet la réutilisation dans l'industrie lourde comme la sidérurgie. Une cogénération est également envisageable pour des réacteurs à plus basse température (entre 280°C et 325°C) que peuvent fournir les réacteurs à eau légère ou à eau lourde comme les petits réacteurs modulaires pour le secteur du chauffage urbain et la désalinisation⁸⁰. Pour mettre en place de telles cogénérations, la plupart des réacteurs envisagés sont de génération IV, donc par définition encore non déployés au niveau industriel, mais pas uniquement. Les EPR actuels et autres réacteurs de génération III en construction pourraient par exemple potentiellement déjà servir à la gamme de cogénération autour de 300°C pour soutenir le secteur du chauffage urbain⁸¹. Par ailleurs, un premier partenariat a été formé entre la République de Corée et l'Arabie saoudite pour le développement de petits réacteurs modulaires (SMR) destinés à la désalinisation⁸².

Plus généralement, envisager une cogénération de la production nucléaire permettrait d'atteindre plusieurs objectifs simultanément, en permettant la fourniture d'une énergie propre, efficiente, rentabilisant *de facto* plus largement les coûts d'investissement, même face à une perte certaine de compétitivité face aux énergies renouvelables pour la production d'électricité.

Figure 4 : Applications industrielles et cogénération du nucléaire



Source : [NEA](#)

⁸⁰ Page du site de l'AIEA, « [Industrial Applications and Nuclear Cogeneration](#) » [consulté le 12/08/2020].

⁸¹ En France par exemple, cette option a été pour le moment écartée en raison de l'éloignement des centrales nucléaires par rapport aux foyers urbains. Voir [PPE 2020](#), p. 140.

⁸² « [Korea, Saudi Arabia Progress with SMART Collaboration](#) », *World Nuclear News*, janvier.2020.

Il est à préciser que d'autres innovations, qui se trouvent toutefois à des stades encore peu avancés, sont en cours de développement et peuvent attirer l'attention pour aider à repenser les usages ou les champs d'application nucléaire. La présentation en 2017 des batteries en diamant par le Dr. Neil Fox de l'Université de Bristol en est ici un exemple. Les déchets nucléaires, plus particulièrement le Carbone 14, est capturé dans un cristal artificiel qui retiendrait la radioactivité émanant du déchet mais dont l'énergie resterait exploitable. Auquel cas la conception de l'emploi d'un nucléaire sûr et sans déchet pourrait s'élargir aux applications des batteries. Bien supérieure à celle des batteries conventionnelles, la durée de vie d'une batterie en diamant (ou nucléaire) se mesurerait alors en milliers d'années⁸³.

5.2. L'Union européenne : côté demande ou côté offre ?

Que ce soit en termes de projets de construction, de démantèlement ou d'arrêt de réacteurs, d'innovations technologiques, il serait inexact de dire que l'Europe n'est pas active en matière de nucléaire civil. Toutefois sa composition hétérogène rend difficile de déterminer une tendance pour l'Union européenne dans son ensemble. Il est néanmoins possible de distinguer plusieurs groupes.

L'Europe de l'Est et du Nord (notamment la Hongrie, la Roumanie, la Finlande et la Bulgarie) forme la troisième région mondiale pour le nombre de chantiers lancés pour des réacteurs⁸⁴. Le nucléaire représente pour ces pays une énergie bas-carbone à haute capacité de production, de surcroît déjà introduite pendant la Guerre froide par l'Union soviétique, dont les investissements se limitent souvent aux coûts d'acquisition et de maintenance (sans les coûts supplémentaires liés à la création de nouvelles infrastructures réseaux comme pour les énergies renouvelables ou l'hydrogène). A ce jour, hormis la Finlande, qui fait construire un EPR à Olkiluoto, les partenariats avec Rosatom et CGN sont majoritaires⁸⁵.

Quant à l'Europe occidentale, la situation est plus divisée entre les pays sortis du nucléaire (Autriche, Allemagne, Italie et l'Espagne). La France reste traditionnellement un pays producteur, constructeur et exportateur de technologies nucléaires, bien que son rayonnement diminue progressivement, notamment à cause d'un positionnement national peu clair. Outre-Manche, le Royaume-Uni a émis la volonté de continuer sur la voie de la production et de l'innovation nucléaire en se concentrant sur les SMR, mais il est également acquéreur de produits nucléaires *via* la construction de Hinkley Point-C (EPR) et Bradwell (Hualong One). Le chantier Bradwell possède d'ailleurs une résonance particulière puisque c'est la première fois qu'un pays non traditionnellement acteur du nucléaire, qui plus est hors des pays de la Triade, mène un chantier dans un pays de la Triade. Pour cette raison, la construction du Hualong One par l'entreprise chinoise CGN porte tout un symbole et représente une vitrine de prestige technologique et commercial.

⁸³ Description détaillée du projet : <https://www.bristol.ac.uk/cabot/what-we-do/diamond-batteries/>

⁸⁴ Voir la base de données [PRIS](#) de l'AEIA.

⁸⁵ Par ailleurs, ces opérations sont soumises à l'approbation de l'Union européenne en vertu de l'article 41 du traité d'Euratom : « Les personnes et entreprises relevant des secteurs industriels [énumérés à l'annexe II] du présent traité sont tenues de communiquer à la Commission les projets d'investissement concernant les installations nouvelles ainsi que les remplacements ou transformations répondant aux critères de nature et d'importance définis par le Conseil, statuant sur proposition de la Commission. »

Par ailleurs, le projet de pont énergétique entre l'Union européenne et l'Ukraine ambitionnerait de raccorder cette dernière au marché énergétique européen. Bien que le projet n'ait à ce jour vu aucune concrétisation depuis son lancement en 2015, il reste un sujet actif du côté ukrainien⁸⁶. Joignant l'Etat ukrainien à un consortium d'investisseurs (Westinghouse Electric Sweden, Polenergia International et EDF Trading), il s'agirait d'exporter l'électricité produite par les réacteurs Khmelnytsky 3 et 4 (actuellement en projet de construction) vers la Hongrie, la Roumanie, et la Slovaquie via une extension du Burshtyn⁸⁷.

En somme, la diversité des pays, de leurs besoins et de leurs stratégies ne permet pas à l'Union européenne de considérer une position double d'acqureur de technologie nucléaire et de vendeur. Il est cependant important de constater que les réacteurs issus de technologies européennes (EPR) rencontrent actuellement des difficultés à s'exporter. En revanche, les technologies chinoises et russes sont les plus importées par les pays européens.

Il est à noter que la question du nucléaire n'a pas été abordée par la Commission européenne, ni dans le Green Deal en décembre 2019, ni dans sa stratégie hydrogène en juillet 2020. Dans cette dernière, c'est la question de l'hydrogène jaune, soit de l'hydrogène issu d'une électrolyse fournie par de l'électricité nucléaire, qui n'a pas été explorée. Si l'hydrogène vert a été défini comme une priorité par la Commission européenne en raison de la négativité de son bilan carbone, la production d'hydrogène jaune, *de facto* également négative en carbone, aurait toute sa place dans les projets européens à venir.

6. Conclusion

Ce tour d'horizon sur les stratégies et technologies du nucléaire permet d'ores et déjà de dégager certaines explications quant au rôle contrarié du nucléaire en matière de transition énergétique. Le contexte dans lequel les systèmes énergétiques sont en cours de planification étant profondément bouleversé, il est encore difficile de retirer une vision claire de leurs configurations futures. La place du nucléaire est d'autant plus confuse qu'elle n'est pour le moment pas pensée en phase avec les transformations des secteurs énergétiques – puisqu'elle est mise à l'écart dans les discussions sur la transition énergétique –, ni en phase avec ses propres transformations et avancées technologiques, en raison d'impulsions nationales frileuses vis-à-vis d'innovations nucléaires relativement matures (génération IV) et de leurs champs d'application (cogénération).

⁸⁶ Ministère ukrainien de l'Energie et de l'Industrie manière, [Avis d'appel d'offre pour un partenariat privé-public pour l'implantation du projet « Pont énergétique Ukraine-UE »](#), Kiev, 23 janvier 2019 ; « [Ukraine-EU Energy Bridge: a Window into Energy Independence or Neverending Energy Project?](#) », *Ukrainska Energetika*, 24 août 2019 ; Melissa Hersch, Edward Kee, « [What Role can Energy Bridge Play in Ukraine's Energy Resilience](#) », Atlantic Council EnergySource Blog (partie 1 sur 3 de la série *Energy Bridge*), 3 octobre 2018.

⁸⁷ Voir le rapport [Ukraine and Energy Community: On the Road of Reforms](#), 18 novembre 2015, p. 29 Pour davantage d'informations sur le projet d'extension du gazoduc Burshtyn, voir : <https://pipeline.github.org/Project/ProjectDetails/798>

Force est de constater que le nucléaire conserve des atouts majeurs tels que son intensité énergétique, sa stabilité et le pilotage de sa production, et, comme nous l'avons vu précédemment, les possibilités variées de cogénération (chauffage, hydrogène, désalinisation, électricité) ainsi que la modularité de sa capacité de production (SMR, EPR). De plus, d'un point de vue technologique, le nucléaire apparaît comme une alternative efficiente et bas-carbone pour des besoins énergétiques intenses et concentrés. De ce fait, le nucléaire s'impose comme solution de substitution au charbon et au gaz. Cette particularité positionne le nucléaire non pas comme rival mais comme solution complémentaire aux énergies renouvelables et à l'hydrogène. Cette position fait notamment l'objet d'un consensus entre l'AIE et le GIEC, qui, depuis 2018, réintègrent pleinement le nucléaire dans le processus de transition énergétique, le considérant comme nécessaire pour atteindre les objectifs climatiques de l'Accord de Paris – ce en appelant même à une augmentation de sa part au niveau mondial⁸⁸. Le développement des énergies renouvelables et de l'hydrogène s'avère très adapté aux besoins énergétiques décentralisés ou dispersés mais avec des besoins moins intenses et constants. A l'inverse, le nucléaire peut soutenir les productions électriques renouvelables et hydrogène en cas de pic de demande ou de chute de production issue des énergies renouvelables, tout en continuant à approvisionner d'autres secteurs qui requièrent une forte production et une grande stabilité d'approvisionnement. Le nucléaire offrirait de surcroît diverses possibilités de cogénération pour les productions de chaleur, d'hydrogène, de désalinisation en plus de la production d'électricité.

Les secteurs énergétiques futurs s'adaptant aux avancées des innovations, leurs conceptions restent encore libres et malléables. Toutefois, il apparaît clair que les secteurs énergétiques répondent à une diversification des sources d'énergie, qui vont donc devenir de plus en plus complexes et interconnecter ces multiples sources d'énergie entre elles, que ce soit par les infrastructures types *smart grids* ou par la cogénération pour augmenter l'efficacité énergétique. C'est pourquoi la place du nucléaire semble condamnée à rester incertaine tant qu'il ne sera pas pleinement intégré dans ces conceptions de systèmes énergétiques avec les autres énergies bas-carbone.

Sur le plan international, les enjeux du nucléaire semblent de moins en moins liés aux enjeux de rareté de l'uranium ou de son enrichissement, surtout avec l'arrivée des réacteurs de génération IV et le recours de plus en plus systématique au recyclage des combustibles. Les jeux d'influence se concentreraient surtout sur l'innovation technologique dont le *leadership* permettrait aux acteurs qui l'obtiennent de peser davantage sur la mise en place de standards de production mais également d'être pionniers à percer sur un marché nucléaire qui se trouve *a priori* à l'aube d'une expansion au niveau mondial. Les enjeux directs du nucléaire seraient donc principalement d'ordre économique et technologique pour ensuite devenir géopolitiques. Par ailleurs, il est à noter que les pays *leaders* en termes de technologie nucléaire (Russie, Chine, France) partagent un modèle commercial relativement similaire, comprenant un très fort soutien et pilotage gouvernemental. Autrement dit, il semblerait que les particularités d'investissement du nucléaire (coûts d'investissements initiaux très élevés pour une rentabilité sûre mais à long voire très long terme) soient peu compatibles avec les modèles libéraux et à une forte concurrence intra-sectorielle, ce qui pourrait dans un premier temps rendre le nucléaire moins attractif ou difficile à mettre en

⁸⁸ Voir rapport spécial du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), [Réchauffement planétaire de 1,5°C](#), 2019.

place pour les pays ayant un marché énergétique très libéralisé⁸⁹. En ce sens, la France et l'UE, qui sont en pleine transition libérale depuis le début des années 2000 s'agissant du secteur énergétique, n'apparaissent pas, loin s'en faut, comme les mieux préparées.

Le nucléaire est donc une énergie délicate à planifier et à orienter, ne serait-ce qu'en raison du raisonnement à très long terme qu'il implique. Comme l'ont déjà saisi l'AIEA et la NEA, il est primordial de conserver une ligne directrice stable mais également d'établir un cadre législatif adapté au développement des innovations ainsi qu'à la pleine intégration des technologies nucléaires dans des systèmes hybrides afin d'éviter plus d'exclusion⁹⁰. De là découle aussi un extrême besoin de régularité dans les financements d'innovations et de projets, d'un véritable travail de prospection sur les enjeux et les paramètres énergétiques à venir (offre, demande, matières premières, etc.), ainsi que d'un travail de fond pour garantir la sûreté des installations mais aussi conserver l'acceptation sociale. Si beaucoup de paramètres sont effectivement à prendre en compte, ils restent parfaitement liés les uns aux autres et répondent finalement aux mêmes raisonnements pour l'élaboration d'une feuille de route énergétique, mais également à la même logique de durabilité et de réduction carbone que pour les autres formes d'énergie.

Dès lors, il paraît nécessaire et urgent pour les gouvernements de ne plus seulement reconnaître le potentiel que peut représenter le nucléaire mais bel et bien de définir et d'assumer clairement une position sur son rôle dans les transitions énergétiques respectives. Sur la question du nucléaire, il incombe aux autorités gouvernementales de mener exactement les mêmes que pour les énergies renouvelables et l'hydrogène :

- donner l'orientation de long terme avec des objectifs clairs ;
- former une cohésion sociétale autour de la stratégie énergétique nationale ;
- créer la synergie nécessaire pour concrétiser les ambitions énergétiques. L'engagement des gouvernements pour la transition énergétique est primordial, mais surtout, la stratégie qui en résulte se doit d'être pertinente au vu de la configuration géo-économique nationale et internationale.

⁸⁹ Cette particularité pourrait peut-être partiellement expliquer l'absence de prise de position de l'Union européenne pour les questions nucléaires, notamment depuis l'entrée en vigueur d'une Union de l'énergie qui se veut favoriser au maximum la concurrence entre les acteurs énergétiques et réduire les situations de monopole.

⁹⁰ La NEA a d'ailleurs publié en juin 2020 quatre notes politiques pour intégrer le nucléaire dans les plans de relance économique post Covid-19. Celles-ci s'articulent notamment autour des aspects financiers (relance économique, compétitivité, mécanismes de financement) ainsi que la résilience qu'offre le nucléaire : NEA, [Nuclear power and the cost-effective decarbonisation of electricity systems](#), juin 2020 ; NEA, [Creating high-value jobs in the post-COVID-19 recovery with nuclear energy projects](#), juin 2020 ; NEA, [Unlocking financing for nuclear energy infrastructure in the COVID-19 economic recovery](#), juin 2020 ; NEA, [Building low-carbon resilient electricity infrastructures with nuclear energy in the post-COVID-19 era](#), juin 2020.

Les opinions exprimées ici n'engagent que la responsabilité de leur auteur.

*Édité et diffusé par la Fondation pour la Recherche Stratégique
4 bis rue des Pâtures – 75016 PARIS
ISSN : 1966-5156
ISBN : 978-2-490100-35-4
EAN : 9782490100354*