

# Évolution du cadre d'activité de la filière de l'électronucléaire au niveau mondial : de 1950 à aujourd'hui

Par Marc DEFFRENNES

Analyste principal en énergie nucléaire – Division de l'économie et du développement des technologies nucléaires, Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN)

et Daniel IRACANE

Directeur général adjoint et directeur des Affaires nucléaires, Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire (AEN)

L'énergie nucléaire de fission est utilisée à des fins civiles, essentiellement pour la production d'électricité, et ce depuis plus de cinquante ans. Après une première phase de construction de prototypes et de démonstrateurs basés sur une grande diversité de combustibles, caloporteurs et modérateurs, le choix s'est porté essentiellement sur la filière à eau légère, qui constitue aujourd'hui la grande majorité du parc des quatre cent cinquante réacteurs en fonctionnement dans le monde, lesquels produisent 10 % de l'électricité. Dans les pays de l'OCDE utilisant la technologie nucléaire, on constate un ralentissement significatif du nombre des constructions nouvelles, lequel résulte des conséquences combinées de l'impact des trois accidents nucléaires majeurs sur les opinions publiques, de la libéralisation du marché de l'électricité et du développement privilégié des énergies renouvelables intermittentes. La Chine est dans une phase de rattrapage rapide et elle devient aujourd'hui un fournisseur de technologie nucléaire. Un certain nombre de nouveaux pays montrent leur intérêt pour la filière nucléaire, voire même ont engagé la phase de construction de leurs premières centrales. Le monde d'aujourd'hui est bien différent de ce qu'il était il y a encore vingt ans. Notamment, le changement climatique impose son urgence, telle une épée de Damoclès. Dans le même temps, les pays pionniers dans le développement scientifique et industriel de la technologie nucléaire civile, en dehors de la Russie, voient leur capacité d'innovation et leur *leadership* technique s'éroder dans le domaine du nucléaire.

Dans ce contexte, il est utile de revisiter brièvement l'histoire nucléaire des cinquante dernières années afin d'en tirer des enseignements qui pourront éclairer les décideurs politiques auxquels revient la responsabilité du choix d'un mix énergétique durable, c'est-à-dire propre, économique et fiable.

## Introduction

Dans cet article, nous présentons un bref rappel historique des développements scientifiques, technologiques et industriels qui ont conduit à un parc installé de près de quatre cent cinquante centrales électronucléaires en fonctionnement aujourd'hui dans le monde et à environ soixante unités en construction.

Cela est à la fois peu et beaucoup. C'est peu par rapport aux ambitions de départ, puisque le nucléaire ne génère aujourd'hui qu'environ 10 % de l'électricité consommée dans le monde. C'est beaucoup pour les pays qui ont largement misé sur le nucléaire, la France étant la première dans le rang, car cela permet à ces pays d'améliorer leur bilan en termes de coût de production de l'électricité et

d'émission de carbone par kWh. La France atteint ainsi pour sa production électrique l'objectif imposé par l'Accord de Paris (50 gCO<sub>2</sub>/kWh) alors que la moyenne dans les pays OCDE se situe à 430 gCO<sub>2</sub>/kWh<sup>(1)</sup>.

Et au-delà des centrales électronucléaires, c'est bien sûr tout le cycle du combustible qui doit être considéré pour

(1) Les statistiques disponibles sur le site de l'OCDE ("Compare your country", <http://www.compareyourcountry.org/climate-policies?cr=oced&lg=en&page=2&visited=1>) permettent d'opérer une comparaison pays par pays. Elles montrent qu'un petit nombre de pays sont déjà en conformité avec l'objectif de l'Accord de Paris dans le domaine de la génération de l'électricité, essentiellement la Suisse, la Suède et la Norvège, grâce à l'hydraulique, et la France, grâce à l'énergie nucléaire.

avoir une vision exhaustive de la filière électronucléaire, avec sa gestion intégrée de l'amont vers l'aval.

Ces développements scientifiques, technologiques et industriels doivent être mis en perspective et compris à l'aune des cadres politiques, économiques, environnementaux et sociétaux qui ont fortement évolué au cours des sept décennies qui se sont écoulées.

L'analyse du passé permet de tirer quelques conclusions qui soutiendront utilement notre réflexion sur ce que pourrait être le rôle de la technologie nucléaire dans les années et décennies à venir, dans un monde en évolution rapide et complexe.

## Des origines à 1980 : de la science au déploiement industriel

Sans retourner bien loin dans le passé, on peut rappeler que les avancées scientifiques à la base de ce qu'est aujourd'hui l'électronucléaire, ne remontent qu'à un peu plus de quatre-vingts ans. En effet, c'est en 1932 que fut découvert le neutron, la brique indispensable à la fission, qui elle-même fut découverte en 1938, par hasard, lors de manipulations visant à créer des transuraniens.

On connaît la suite : l'engagement du projet Manhattan dans le contexte de la Seconde Guerre mondiale qui a mobilisé des moyens importants sur les technologies nucléaires. Comme pour bien d'autres avancées technologiques, le développement des applications civiles nucléaires doit beaucoup à cette période de conflit mondial. Ainsi, le programme Manhattan avait investigué diverses options de cycle de combustible : l'enrichissement de l'uranium et son retraitement pour en extraire le plutonium, technologies qui seront plus tard au cœur des stratégies nationales.

La crainte d'une prolifération des armements nucléaires a été aussi un facteur décisif dans le lancement en 1953 du programme Atoms for Peace par le président Eisenhower, et la création de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) en 1957, sous l'égide des Nations Unies. Ce programme prend de l'ampleur avec la signature du Traité de Non-Prolifération (TNP) en 1968 (il faudra attendre 1974 pour sa mise en œuvre) concrétisant, entre autres, l'engagement des pays disposant des technologies nucléaires civiles à aider les pays souhaitant bénéficier de ces mêmes technologies.

La période couvrant la fin des années 1950 et les années 1960 fut dès lors florissante en coopérations entre les pays, en particulier en Europe, et fructueuse sur le plan de l'exploration technologique.

En 1955, 1958 et 1964, trois grandes Conférences internationales sur l'utilisation de l'énergie nucléaire à des fins civiles furent organisées à Genève, sous l'égide des Nations Unies et de l'AIEA, permettant ainsi à un grand nombre de scientifiques d'échanger des informations sur leurs programmes respectifs de recherche et développement. Elles ont permis de dresser un état des lieux assez clair de ce qu'était l'état de l'art à cette époque et de ce que l'on pouvait en espérer.

1957 a été l'année de la signature du traité Euratom par les six membres fondateurs de l'Union européenne, conjointement à la création de la Communauté économique européenne. L'Europe avait une vision pour rebâtir son économie. Pour cela, elle avait besoin d'énergie : après la CECA (la Communauté européenne du charbon et de l'acier créée en 1951), le nucléaire fut choisi comme son projet phare, méritant un traité promotionnel spécifique couvrant tout le champ d'activité : de la recherche à l'investissement, en passant par la radioprotection, le contrôle de sécurité et l'approvisionnement en combustible.

En 1958, le Conseil de l'Organisation européenne de coopération économique (OECE), qui avait été mis en place en 1948 pour gérer le Plan Marshall, créa l'Agence européenne pour l'énergie nucléaire (AEEN). Elle deviendra plus tard, avec l'extension de son champ géographique, l'Agence de l'énergie nucléaire (AEN) de l'Organisation pour la coopération et le développement économique (OCDE).

Cette dynamique de création de cadres multinationaux reflétait la volonté partagée des pays d'accélérer la maturation technologique dans le domaine nucléaire à des fins civiles.

Les années 1960 ont ensuite vu un foisonnement de programmes nationaux visant à construire des prototypes de réacteurs électrogènes qui, pour la plupart, étaient contraints par l'accès à la technologie du cycle du combustible. En particulier, les pays ne disposant pas de la capacité d'enrichissement devaient se rabattre, pour se doter de réacteurs à neutrons lents, sur un couple modérateur/caloporteur plus efficace que l'eau légère. Cette dernière prédominera essentiellement aux États-Unis comme résultante du programme de développement des moteurs de sous-marins. Le couple graphite/gaz sera choisi en France (UNGG) comme en Grande-Bretagne (Magnox, puis AGR), et l'eau lourde au Canada (CANDU). Les Russes, quant à eux, ont développé un réacteur graphite/eau légère (RBMK), avant de se tourner, à leur tour, un peu plus tard, vers une modération et un refroidissement à l'eau légère (VVER).

Par ailleurs, quelques pays disposant de la technologie du retraitement (par exemple, les États-Unis et la Russie) permettant l'extraction de plutonium développaient également des prototypes de réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium ou au plomb.

Et au-delà des technologies à eau utilisées par les « grandes filières » nucléaires naissantes, de nombreux prototypes de réacteurs ont été développés et construits durant cette décennie : en particulier, des réacteurs à haute température graphite/hélium (par exemple, le projet coopératif OECE Dragon au Royaume-Uni et le projet AVR en Allemagne), et des réacteurs à sels fondus (aux États-Unis, notamment). Ces prototypes sont à la base des réacteurs à haute température (HTR) aujourd'hui en construction en Chine.

On peut dire que pratiquement tous les types possibles de réacteurs, en termes de combinaison combustible/modérateur/caloporteur, ont été développés et pour la plupart

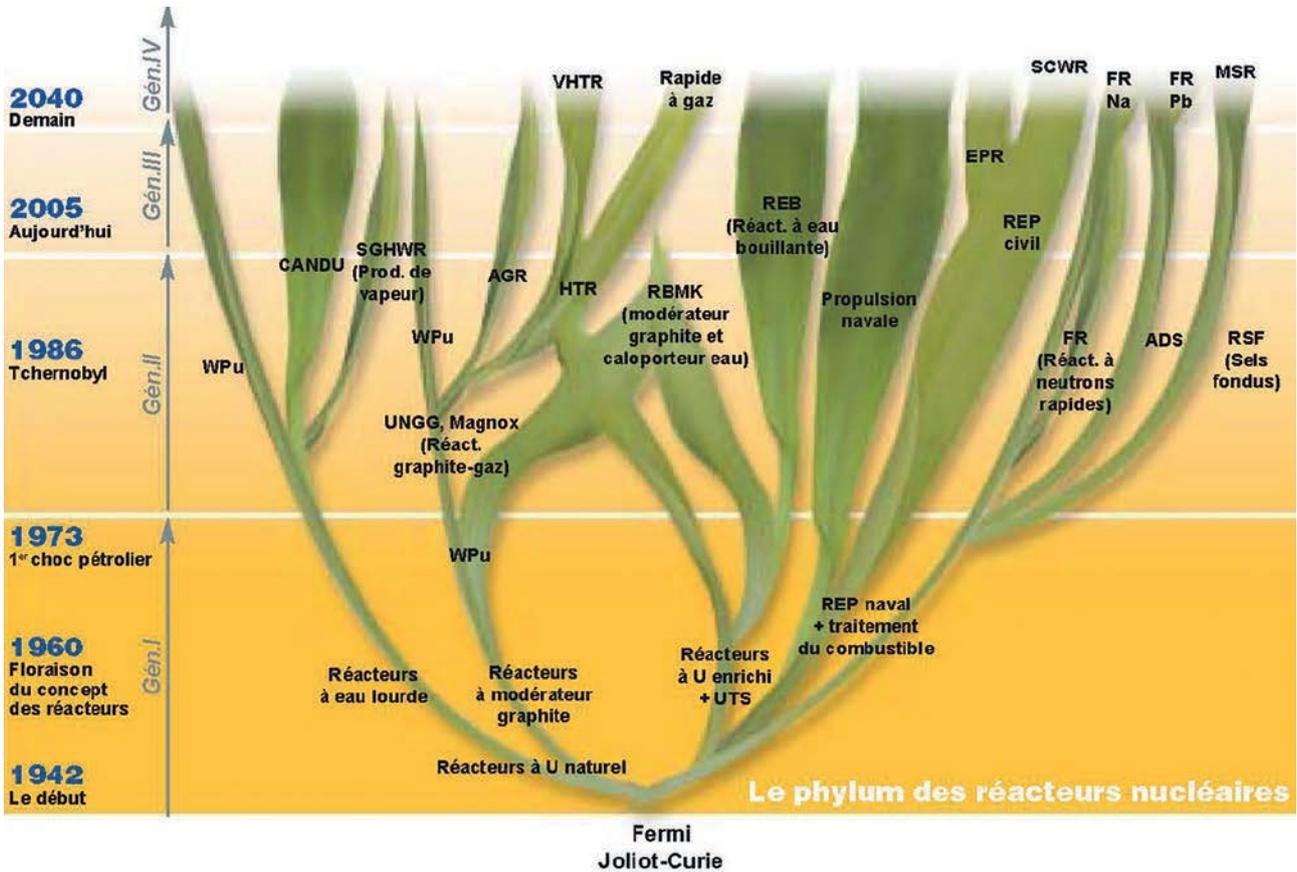


Figure 1 : Le phylum des réacteurs nucléaires (source : « L'Énergie nucléaire du futur : quelles recherches, pour quels objectifs ? », CEA Saclay et Groupe Moniteur (Éditions du Moniteur), Paris, 2005).

testés sous forme de prototypes durant les années 1960, ouvrant ainsi la porte aux choix stratégiques et au lancement des grands programmes électronucléaires intervenus au cours des deux décennies suivantes.

La Figure 1 ci-dessus produite par le CEA donne une bonne représentation du développement des différentes filières nucléaires dans le monde.

Si les premiers réacteurs électrogènes à avoir été couplés au réseau l'ont été en 1954 en Russie (Obninsk) et en 1957 aux États-Unis (Shippingport), il faudra attendre fin des années 1960-début des années 1970 pour voir le véritable démarrage du déploiement industriel de réacteurs nucléaires pour la production d'électricité.

Concernant les développements dans le cycle du combustible, outre les programmes nationaux d'enrichissement et de retraitement, essentiellement dans les pays dotés d'un arsenal nucléaire, on doit mentionner le projet coopératif OEEC Eurochemic (à Dessel en Belgique) – pilote industriel de retraitement de combustibles usés pour la récupération des matières fissiles et la production de combustible MOX (Oxides Mixtes U-Pu) – qui a fonctionné de 1966 à 1974 et a retraité 185 tonnes de combustibles usés, servant de précurseur à l'usine de La Hague, la référence mondiale aujourd'hui dans le domaine du retraitement à des fins civiles.

C'est l'année 1974 qui verra naître un véritable engouement pour l'électronucléaire. La crise pétrolière a en effet

apporté une dimension nouvelle à la problématique de l'énergie : la sécurité d'approvisionnement. Le nucléaire, de par sa forte densité d'énergie et la facilité de transport et de stockage du combustible, présentait des avantages incomparables par rapport aux énergies fossiles.

Cette crise a conforté les pays déjà engagés dans une filière nucléaire, parfois au prix d'une réorientation vers une nouvelle technologie de réacteur (c'est le cas de la France qui est passée de la technologie graphite à la filière des réacteurs à eau pressurisée), et a amené beaucoup d'autres pays à s'y intéresser. De gros investissements, la plupart du temps publics, ont été consentis pour construire non seulement les réacteurs mais aussi toute l'infrastructure nécessaire, en particulier les installations du cycle du combustible civil.

C'est la Suède qui détient le record de vitesse pour la construction de son parc nucléaire : une dizaine d'années ont suffi pour voir la part de son électricité d'origine nucléaire passer de zéro à 50 %. En combinaison avec le recours à l'hydraulique, cela a eu pour effet de réduire très efficacement l'empreinte carbone de la production électrique en Suède ; si cela n'avait pas d'importance en 1970/1980, cela en aura plus tard. Comme le montre la Figure 2 de la page suivante, la Suède a fait la démonstration que le nucléaire peut efficacement aider à réduire drastiquement et rapidement les émissions de carbone de la production électrique. Certains pays ayant favorisé un déploiement massif de technologies renouvelables

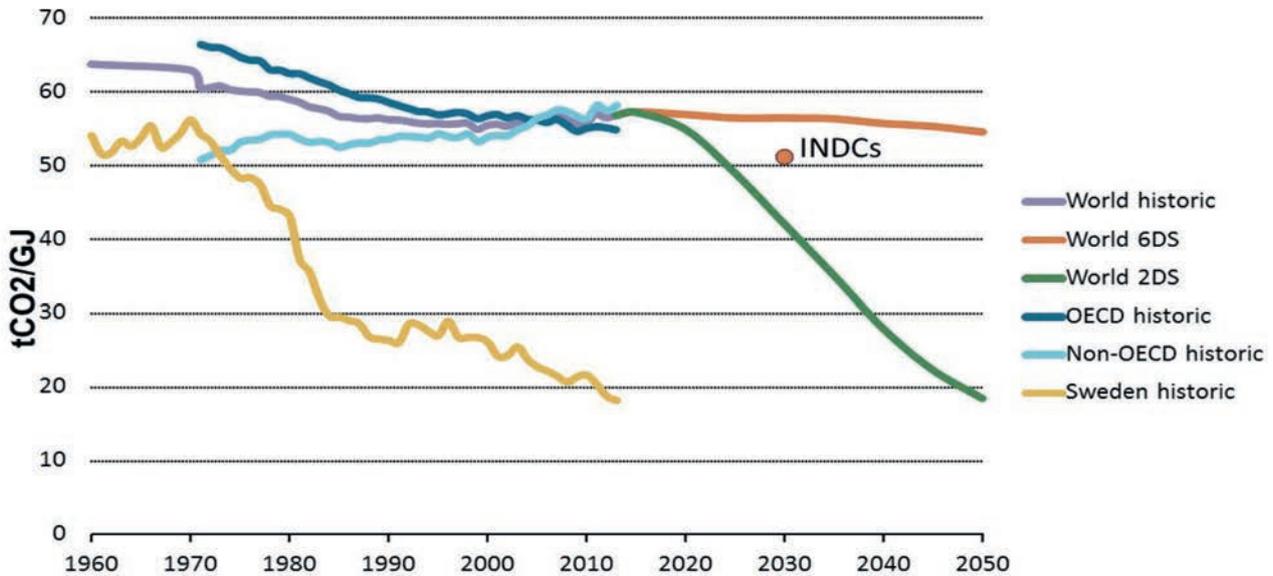


Figure 2 : Émission de CO<sub>2</sub> par unité produite : évolution historique et tendances futures en fonction de scénarios AIE d'évolution de la température (2°C et 6°C en 2100) (source : Agence internationale de l'énergie (IEA), *Energy Technology Perspective 2016*).

NB : Le point INDCs montre où devrait se situer le monde en 2030 si tous les pays respectent leurs engagements pris dans le cadre de l'Accord de Paris (COP21).

variables associées à des technologies fossiles n'atteignent pas du tout ce niveau de performance ; ce qui pose la question stratégique de la fixation de la part optimale des technologies bas carbone dans le mix électrique.

Puis vint 1979 et l'accident de Three Miles Island, qui, s'il n'a pas eu de conséquences en termes de rejets radiologiques, a provoqué une onde de choc dont les conséquences se font encore ressentir aujourd'hui. Certaines sont positives, telles que le renforcement de la gestion de crise à travers la mise en place de procédures d'urgence précises pour venir en aide à l'opérateur, et la priorité donnée à la sûreté nucléaire dans son ensemble et son contrôle par une autorité indépendante de l'exploitant. D'autres sont négatives, en particulier la dégradation durable de l'image du nucléaire dans l'opinion publique et l'impact sur les décideurs politiques à un moment où ils doivent faire des choix délicats de politique énergétique.

### De 1980 à 2000 : le temps des hésitations et la transition vers une économie de marché de l'électricité

La décennie 1980 et le début de la suivante ont donc vu essentiellement la finalisation de la construction des centrales déjà commandées, de telle manière que la plupart des tranches en exploitation aujourd'hui, dans le monde occidental et en Russie, ont été construites entre 1970 et 1990, et sont donc aujourd'hui proches de la durée de vie initialement prévue lors de leur conception (quarante ans pour les premières). Il y eut assez peu de décisions visant à la construction de nouvelles centrales dans ces pays au cours de cette période.

En revanche, les programmes nucléaires du Japon et de la Corée ont été véritablement lancés durant cette période, pour se poursuivre au-delà de l'an 2000. À cette date, la Chine a commencé à acheter un grand nombre de mo-

dèles de réacteurs dans la plupart des pays fournisseurs de la technologie, afin de rapidement développer son propre parc et acquérir la compétence.

Une évolution importante qui intervient durant cette période et aura un grand impact sur le futur de l'électro-nucléaire et de son industrie est la libéralisation du marché de l'électricité. C'est durant la décennie 1990 que cette transformation fut engagée, essentiellement aux États-Unis et dans l'Union européenne sous l'impulsion de la Grande-Bretagne, sans que, du fait de la complexité du processus, toutes les conséquences aient pu être évaluées. Cette transformation est toujours en cours, trente ans après son lancement. Elle s'est traduite durant cette période par une succession de mesures visant à la libéralisation du marché, et de contre-mesures visant à compenser les effets pervers qui n'avaient pas été anticipés, rendant le tout éminemment complexe, en particulier dans l'Union européenne, où la politique énergétique reste une prérogative nationale des États membres, alors que les réseaux électriques sont de plus en plus interconnectés. Une conséquence majeure de cette évolution vers un système complexe, et donc plus incertain, est la grande difficulté de la prise des décisions relatives à des investissements lourds et intensifs en capital ; cela pénalise structurellement les technologies bas carbone, le nucléaire bien sûr, mais aussi les énergies renouvelables (hors régime de subventions).

Le Japon et la Corée se sont eux aussi lancés dans ce processus de libéralisation de l'électricité, mais plus récemment. En Russie et en Chine, en revanche, les décisions d'investissement dans l'électro-nucléaire continuent d'être prises essentiellement au niveau de l'État ou dans un cadre piloté par l'État.

Il faut bien sûr mentionner ici la catastrophe de Tchernobyl survenue en 1986. Cet accident majeur, qui a affecté

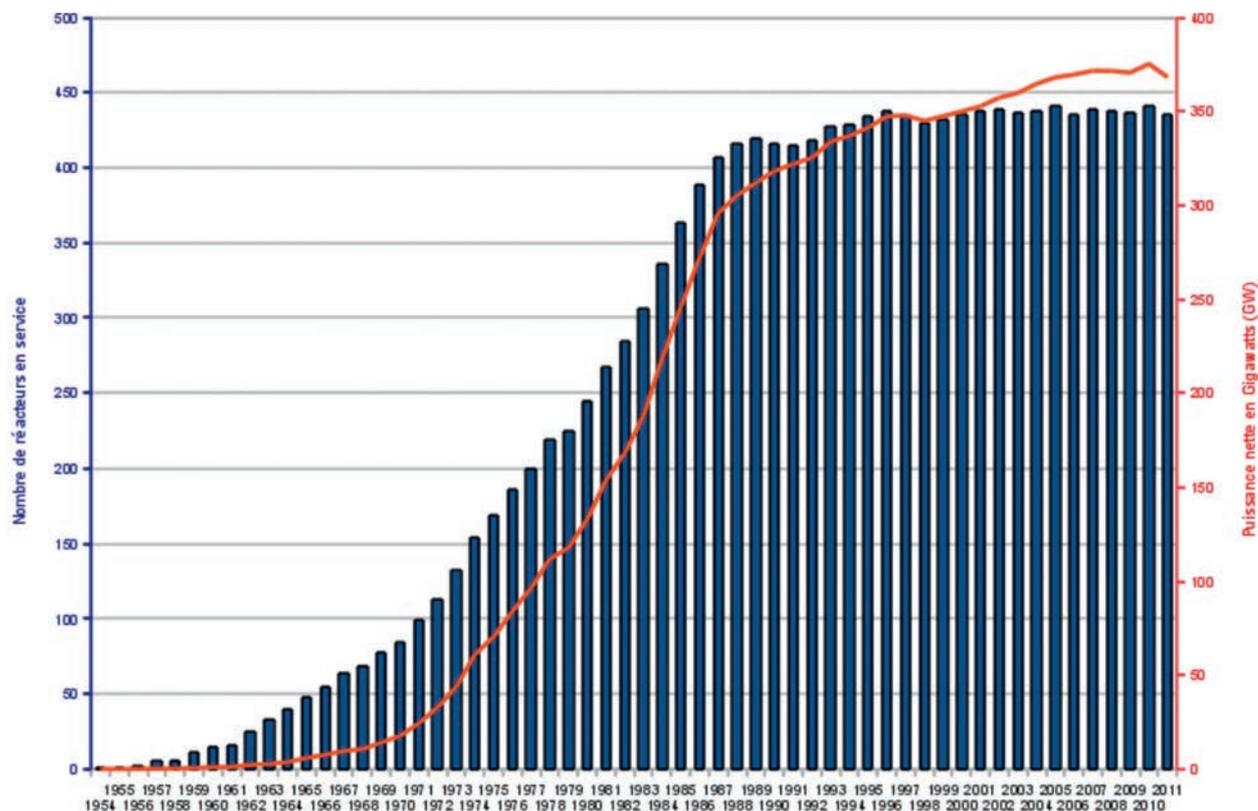


Figure 3 : Nombre et puissance des réacteurs nucléaires en service dans le monde (source : Nuclear Power Reactors in the World (RDS-2), édition 2011, AIEA).

la santé de plusieurs milliers de personnes et a impacté radiologiquement une grande zone géographique, a eu un effet psychologique durable sur l'opinion publique et les décideurs politiques. Même si le contexte de cet accident et la technologie RMBK du réacteur accidenté ne sont en rien extrapolables aux autres réacteurs en fonctionnement, des leçons en ont été tirées en termes d'analyses d'accidents sévères, de leurs conséquences et des mesures supplémentaires à prendre en matière de gestion de crise. La sûreté nucléaire s'est trouvée au centre de toutes les attentions : elle a été érigée en priorité des priorités, conduisant à la conception d'une nouvelle génération de réacteurs renforçant significativement les niveaux de protection (Génération III) et à l'instauration de l'indépendance des autorités de sûreté qui est devenue une exigence ne souffrant aucun compromis. Il n'en reste pas moins qu'aujourd'hui encore l'accident de Tchernobyl est « la référence négative » de l'électronucléaire.

### De 2000 à aujourd'hui : un changement de paradigme, avec la nouvelle donne climatique et l'essor des énergies renouvelables

Depuis deux décennies, la problématique du changement climatique a pris de plus en plus d'importance, au point de devenir un enjeu politique central. Il y a aujourd'hui un très large consensus pour reconnaître l'impact anthropologique sur le réchauffement du climat, du fait du rejet massif de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère.

Réduire ces rejets dans tous les domaines de l'activité humaine (énergie, transports, industrie, agriculture...) est au centre des préoccupations. La production d'électricité à partir d'énergies fossiles étant un contributeur non négligeable, l'objectif est de la produire en faisant appel à d'autres moyens, en visant une électricité quasiment totalement décarbonée pour 2050 : l'ambition est énorme.

Le recours aux énergies renouvelables, qui ont pour elles d'être très peu émettrices de carbone, est fortement soutenu par l'opinion publique et les décideurs politiques, ce qui se concrétise en particulier par divers mécanismes de soutien financier à l'investissement et des subventions. Certaines de ces énergies, par ailleurs diffuses, présentent des caractéristiques de décentralisation, de variabilité et d'intermittence qui exigent une adaptation globale de tout le système électrique, impactant aussi les autres formes de production, dont l'électronucléaire, qui est lui aussi non émetteur de carbone.

Cela, combiné simultanément à la transition vers un marché libéralisé de l'électricité, rend les mécanismes décisionnels de choix et d'investissements encore plus complexes, à la fois pour les autorités responsables et pour les industriels.

Les premières années post-2000 ont vu poindre un nouvel engouement en faveur du recours au nucléaire civil, souvent qualifié de « renaissance nucléaire ». Cela est relativement vrai pour les pays occidentaux, dans lesquels quelques projets de construction de centrales de

nouvelle génération (dites de génération III) ont été planifiées et mis en chantier. C'est surtout le cas de la Russie et de la Chine qui, chacune suivant ses méthodes et à son rythme, se sont engagées dans la planification et la réalisation de programmes nationaux de grande ampleur. Cela concerne aussi un ensemble non négligeable de nouveaux pays souhaitant s'engager dans un programme électronucléaire ; on citera notamment les Émirats arabes unis qui construisent la centrale nucléaire de Barakah dotée de quatre réacteurs, dont le premier entrera en service début 2020. Durant cette période, les perspectives d'une augmentation globale du parc nucléaire mondial étaient optimistes : doublement à triplement d'ici à vingt ans. On signalera que cette période fut propice, dans le cadre de l'Union européenne, à l'établissement d'un cadre réglementaire de sûreté nucléaire contraignant à travers la directive Sûreté de 2009 et la directive Déchets de 2011, toutes deux contribuant à établir une base commune favorable à une approche moins controversée de l'électronucléaire entre les États membres.

Il faut aussi mentionner le lancement en 2001 du Generation IV International Forum (GIF), qui rassemble une dizaine de pays (dont les États-Unis, le Canada, la France, le Japon, la Russie, la Chine et la Corée) ayant pour objectif de mutualiser la recherche nucléaire dans les réacteurs avancés du futur.

L'année 2011 a vu l'accident de Fukushima, premier accident nucléaire majeur causé par un événement externe et qui impacta quatre tranches nucléaires d'un coup. Cela entraîna une nouvelle onde de choc qui se traduit dans des décisions très diversifiées dans différentes parties du monde. Au Japon, d'abord et avant tout, où même si l'on ne déplore pas de victimes directes des radiations, l'évacuation massive de populations locales a engendré un traumatisme conséquent et a eu un impact économique important. En Europe, on retiendra le cas symptomatique de l'Allemagne qui a réagi très rapidement en revenant sur sa décision d'extension de la vie de ses tranches au profit d'un arrêt immédiat de la moitié de ses centrales, et de l'autre moitié en 2022. L'Union européenne, quant à elle, lança un processus de *stress tests* de toutes les centrales, visant à évaluer, sous forme de revue par les pairs, le risque lié à des accidents externes non pris en compte jusqu'alors dans les analyses de conception. Cela entraîna aussi une révision de la directive Sûreté nucléaire (2014). Sur le plan technique, les enseignements tirés de cet accident conduisirent une nouvelle fois à l'adoption partout de systèmes et de mesures de sûreté supplémentaires ayant pour objectif de se prémunir contre les effets d'événements externes majeurs.

Au-delà des grandes tendances mondiales, il existe bien sûr des dynamiques locales diversifiées. Ainsi :

- Durant la dernière décennie, aux États-Unis, le développement massif du gaz de schiste à des coûts défiant toute concurrence a fragilisé l'économie des centrales nucléaires, dont certaines ont été mises à l'arrêt avant leur fin de vie technique.
- La Russie s'est engagée dans un processus très actif

de coopération pour permettre le développement du nucléaire dans un certain nombre de pays nouvellement intéressés par cette technologie.

- La Chine, après deux décennies pendant lesquelles elle a importé un ensemble diversifié de technologies, a aujourd'hui développé son propre programme national avec des modèles domestiques, devenant ainsi un fournisseur de technologie.
- Récemment un changement politique majeur est intervenu en Corée du Sud dans le domaine nucléaire : ainsi, malgré un succès notoire à l'export avec un contrat de 20 milliards de dollars lié au programme émirati, ce pays s'est engagé à terme vers une sortie possible du nucléaire.
- Au Japon, la moitié des cinquante centrales en fonctionnement avant Fukushima ne redémarreront pas, et les autres le seront, mais à un rythme très lent.
- En Europe, l'Allemagne poursuit sa sortie du nucléaire qui sera effective en 2022. Mais le recours aux énergies renouvelables intermittentes complétées par plus de fossiles en remplacement du nucléaire ne va pas lui permettre d'atteindre les objectifs de décarbonisation annoncés.
- La France est engagée dans une transition énergétique visant à terme la réduction à 50 % de l'électricité générée par le nucléaire (contre 75 % depuis trente ans).
- Le Royaume-Uni a depuis une dizaine d'années adopté une approche pragmatique et positive du rôle du nucléaire comme contributeur à la décarbonisation, générant le besoin de construire un nouveau parc en remplacement des anciens réacteurs gaz-graphite domestiques en fin de vie.
- Les pays d'Europe centrale ont, eux aussi, une vision positive du rôle du nucléaire et une volonté affichée de construire de nouvelles centrales.

Aujourd'hui, la construction de nouvelles centrales de génération III apparaît diversement problématique dans nombre de pays. En particulier, dans le monde occidental, où la combinaison des effets de la libéralisation du marché et d'une certaine perte d'expertise dans le tissu industriel<sup>(2)</sup> entraîne des augmentations importantes des coûts et des délais, ce qui rend les investisseurs plus que frileux.

Enfin, la coopération internationale multilatérale dans la recherche sur les réacteurs du futur, génération IV ou Small Medium Reactors (SMRs), semble aussi ralentir, probablement en écho à un marché futur dont il est bien difficile d'anticiper l'ampleur et la dynamique.

## Perspectives pour l'avenir : le nucléaire est-il durable ?

On se trouve donc aujourd'hui à la croisée des chemins en ce qui concerne le futur du nucléaire. L'analyse histo-

(2) Cette perte d'expertise résulte de l'absence de programme de construction en Occident pendant une longue période. Dans le même temps, le dynamisme du programme chinois a produit un système industriel performant qui a pu démarrer dans les délais les technologies AP1000 et EPR conçues en Occident.

rique présentée ci-dessus, en associant l'évolution de la technologie à un ensemble de facteurs et d'événements environnants qui ont pris diverses formes dans différentes parties du monde en fonction du temps, ouvre un champ d'opportunités que les acteurs du nucléaire (autorités politiques et industriels, en particulier) pourront ou non saisir.

Dans chaque pays, les choix seront pilotés par une politique énergétique devant définir un point d'équilibre entre les trois piliers suivants : le respect de l'environnement, le coût pour les consommateurs industriels et privés, et la sécurité d'approvisionnement. Ces trois piliers constituent les éléments de la durabilité du mix énergétique, au sens où le rapport Brundtland (1987) l'a définie : un mix qui soit au bénéfice de la société d'aujourd'hui sans préjudice pour la société de demain. Ces trois piliers interagissent bien sûr les uns avec les autres, et, à ce jour, il n'existe pas de source d'énergie magique unique, optimale au regard de ces trois piliers. Il n'y a pas aujourd'hui de *silver bullet*.

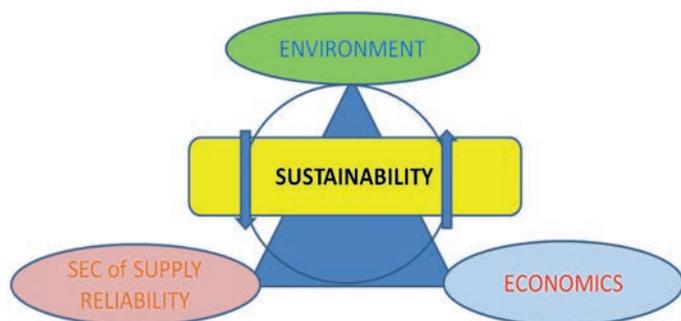


Figure 4 : Les trois piliers de l'*energy sustainability* (source : Mission, weCARE).

Dès lors, puisque le changement climatique est un défi majeur et une priorité politique affirmée haut et fort, et que le nucléaire est la seule source de production massive d'électricité à très bas carbone disponible à tout moment

et modulable, il semble évident qu'il faut garder l'option ouverte.

La plupart des pays occidentaux ayant des centrales nucléaires envisagent des programmes d'extension de la vie de celles-ci, permettant ainsi, après approbation par les autorités de sûreté, de fournir une électricité décarbonée pour une vingtaine d'années, *a minima*, au-delà de la durée de vie prévue lors de leur conception. Pour les pays souhaitant préserver leur capacité de choix futurs, cela permet de créer les conditions favorables à la construction de nouvelles centrales et de développer l'innovation nécessaire pour assurer la sûreté et l'efficacité économique des technologies nucléaires.

Le rôle des États dans la mise en place de conditions favorables au développement des énergies bas carbone est essentiel comme le démontrent amplement la Chine et la Russie en matière de nucléaire. Cela peut concerner des domaines aussi variés que la disponibilité des compétences et des infrastructures de recherche, des standards et des processus de sûreté adaptés aux technologies nouvelles, une ingénierie financière optimisée pour les investissements capitalistes liés sans exclusive à toutes les énergies bas carbone, une évolution du marché de l'électricité valorisant la performance carbone et la sécurité d'approvisionnement, etc.

Dans le domaine du nucléaire, les processus d'innovation menant de la recherche au marché ralentissent significativement dans de nombreux pays de l'OCDE. Or, la disponibilité de technologies adaptées aux besoins et susceptibles de faire l'objet de décisions de déploiement dans le cadre de futures politiques énergétiques exige de réaliser dès aujourd'hui des investissements significatifs. Une part de la solution peut résider dans un accroissement de la coopération multinationale qui seule permet de mutualiser les ressources et les intelligences pour arriver à faire mûrir les technologies les plus prometteuses, qui soient à la fois plus respectueuses de l'environnement et plus efficaces économiquement.

Mais, en définitive, c'est aux politiques de le vouloir.