

Le nucléaire civil, enjeux et débats

Par Richard LAVERGNE

Ingénieur général des Mines, Conseil général de l'Économie

C oordonner un numéro des *Annales des Mines* sur le nucléaire inspire plusieurs sentiments : d'une part, l'enthousiasme qui s'attache à l'honneur de pouvoir ainsi contribuer, avec l'aide des meilleurs experts, à une vision aussi complète que possible d'un sujet traité bien trop souvent de façon partisane et passionnelle ; d'autre part, la crainte de ne pas être à la hauteur de la complexité du défi et de manquer une belle opportunité d'éclairer de façon aussi sereine que possible les enjeux et le débat sur le nucléaire.

Mais avant de poursuivre mon propos, je voudrais rendre hommage à Henri Legrand, mon camarade de promotion de Polytechnique (X75), décédé prématurément le 21 octobre 2019, qui, malgré sa cruelle maladie, m'a apporté de précieux conseils pour préparer ce numéro, fruits notamment de sa longue expérience à l'ASN⁽¹⁾.

Le présent numéro a été conçu de façon complémentaire à deux numéros précédents des *Annales des mines*, parus dans la série *Responsabilité et Environnement* : le n°93 (de janvier 2019) intitulé « L'économie du nouveau mix électrique » et le n°95 (de juillet 2019) ayant pour titre « Quel équilibre futur pour l'offre et la demande d'énergie ? ». Plutôt que d'analyser des systèmes électriques et énergétiques, de la France et du monde, ou de comprendre les motifs de l'éviction annoncée d'une partie du nucléaire français au profit des énergies renouvelables, il est proposé cette fois de faire un focus sur cette forme d'énergie, dont on ne cesse de parler mais sans toujours bien la comprendre.

Comme l'indiquent Marc Deffrennes et Daniel Iracane dans leur article, la France est entrée relativement tard dans le club des pays qui ont fait appel de manière significative à l'électronucléaire. Cependant, lorsqu'elle s'y est engagée, ce fut de façon résolue, essentiellement pour des raisons de sécurité d'approvisionnement à la suite du premier choc pétrolier de 1973. En effet, contrairement à la plupart des pays voisins qui disposent de ressources nationales d'énergies fossiles (charbon en Allemagne et Espagne, pétrole et gaz au Royaume-Uni, gaz en Italie...), la France en est quasiment dépourvue et son économie était donc particulièrement exposée à une rupture d'approvisionnement.

Les gouvernements successifs, de 1974 à 1990, ont engagé une « transition électrique » en une quinzaine d'années permettant la mise en service d'environ 4,5 GW par an de nouvelles installations de production, soit à un rythme annuel d'environ 75 W par habitant, sur la période 1980-1990. Le professeur David Reiner, membre de l'Energy Policy Research Group à l'Université de Cambridge, a montré l'ampleur de cette transition en comparant son rythme à celui d'autres engagées par certains pays :

- 30 W/habitant/an en Chine de 2004 à 2013 lors de son réveil économique, essentiellement à base de charbon et d'hydraulique ;
- 36 W/habitant/an au Royaume-Uni de 1991 à 2000 avec le passage du charbon aux cycles combinés à gaz ;
- 47 W/habitant/an en Allemagne de 2006 à 2015 grâce au développement de l'éolien.

Le développement de la production d'électricité nucléaire en France est passé de 15 TWh en 1973 à 442 TWh en 2011, essentiellement au détriment de la production d'électricité à partir de combustibles fossiles, celle-ci étant divisée par plus de deux au cours de la même période. La France est devenue le deuxième pays au monde, après la Suède, pour la quantité d'électricité d'origine nucléaire produite par an et par habitant. Certes, à l'époque, le changement climatique n'était pas une préoccupation, mais le résultat est là : outre une meilleure sécurité d'approvisionnement, la France a pris de l'avance pour baisser ses émissions de CO₂ d'origine énergétique.

Deux critiques sont parfois avancées sur cette évolution : une première porte sur la dépendance de la France au regard de ses importations d'uranium, mais les quantités sont dérisoires par rapport à celles des énergies fossiles (environ 6 000 tonnes par an, contre près de 100 millions de tonnes par an, rien qu'en pétrole) et, surtout, cet uranium est relativement abondant et bien réparti géographiquement (Australie, Canada, Niger, Kazakhstan...) ; une seconde critique porte sur l'abondance (relative) d'offre d'électricité bon marché qui a irrigué la France, puis l'Europe : loin d'être une intoxication, comme certains l'évoquent à propos du chauffage électrique, elle peut être considérée, lorsqu'elle s'accompagne de politiques d'efficacité énergétique, à la fois comme un facteur de compétitivité et comme un précurseur de l'électrification croissante et souhaitable des usages, au motif de la réduction nécessaire des consommations d'énergies fossiles. D'ailleurs, les pointes de consommation d'hiver suscitées par le chauffage électrique, qui constituaient un réel

(1) Autorité de sûreté nucléaire.

souci d'équilibre du réseau par rapport à une production « en ruban », deviennent plus faciles à gérer, selon RTE, grâce à de nouveaux outils de flexibilité, y compris le « suivi de charge » mis en place dans les centrales nucléaires.

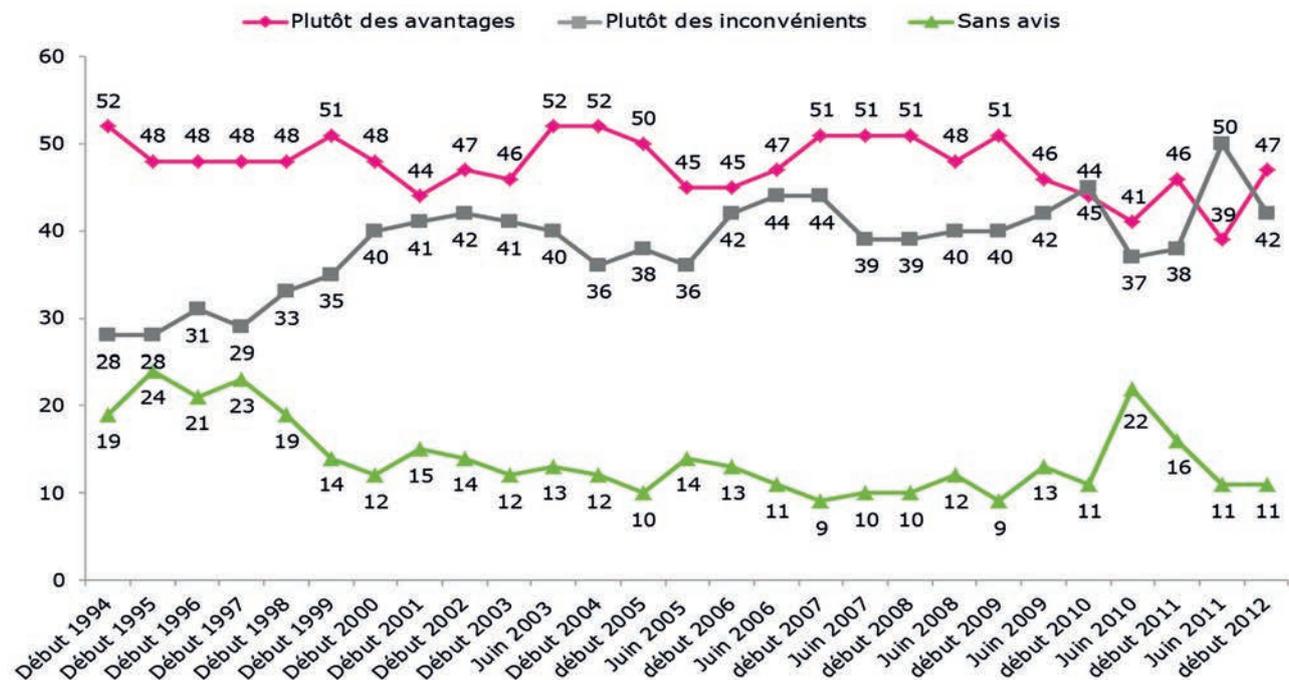
Lorsque l'on analyse le secteur de l'électricité, il est important de distinguer la puissance installée de l'énergie produite : le nucléaire, comme les centrales aux énergies fossiles ou à biomasse, mais à la différence des énergies renouvelables dites « intermittentes » ou « variables », est bien adapté à une production « en ruban », c'est-à-dire insensible aux variations journalières ou saisonnières de la demande, ainsi qu'à la plupart des aléas météorologiques, aux problèmes de maintenance près.

Pour atteindre des performances similaires, le photovoltaïque et l'éolien, qualifiés de « bas carbone » comme le nucléaire, doivent être accompagnés (*back-up*) par des centrales au gaz ou des dispositifs de stockage actuellement très coûteux. Pour l'instant, au niveau mondial, ce sont les STEP⁽²⁾ qui constituent de très loin le meilleur moyen de stockage de l'électricité pour assurer un *back-up* « bas carbone » nécessaire aux énergies renouvelables variables ; depuis quarante ans, de gros progrès ont été réalisés sur le stockage d'électricité par batterie, mais essentiellement pour des durées courtes, et le *power to X*, qui pourrait permettre dans le futur un stockage sur plusieurs jours, voire intersaisonnier (sous forme d'hydrogène ou de biométhane), reste encore très cher. Bien entendu, le « pilotage de la demande » peut soulager grandement ce *back-up*, mais dans des conditions (acceptabilité, modèle économique, etc.) qui restent encore un objet d'étude.

D'un autre côté, le nucléaire est moins réactif que les centrales au gaz pour faire face à des pointes de demande, et les canicules les plus fortes peuvent créer des soucis en matière de refroidissement des centrales nucléaires qui ne sont pas situées en bord de mer.

Mais les points sur lesquels le nucléaire est le plus contesté portent sur le risque d'accident de centrale et sur le devenir des déchets radioactifs. Les articles de Bernard Doroszczuk et Lydie Évrard, d'Anne-Cécile Rigail et Julien Collet, de Jean-Christophe Niel et Jean Couturier, de Laurent Michel et Aurélien Louis, entre autres, traitent abondamment de cette problématique qui irrigue l'ensemble des contributions. Un sujet plus rarement évoqué, si ce n'est par Pierre-Marie Abadie et Bernard Laponche, est le caractère intergénérationnel à très long terme des risques liés aux déchets radioactifs qui, même s'ils sont assez faciles à stocker⁽³⁾ dans des sites *ad hoc* à la différence d'autres polluants, nécessitent, dans l'état actuel des connaissances, une surveillance sur des centaines, voire des milliers d'années.

Lorsque le public est interrogé, il apparaît très partagé sur les avantages et inconvénients du nucléaire, chaque camp occupant une part à peu près identique, comme l'indique le graphique suivant (malheureusement interrompu en 2012).



Réponses des Français à la question suivante posée semestriellement : « Tout bien considéré, le choix du nucléaire pour produire les trois quarts de l'électricité en France présente-t-il, selon vous, plutôt des avantages ou plutôt des inconvénients ? » – Source : Baromètre CREDOC, enquêtes « Conditions de vie et aspirations ». Lecture de ce graphique : début 2012, 42 % des Français pensaient que le nucléaire présente plutôt des inconvénients et 47 % plutôt des avantages.

(2) Stations de transfert d'énergie par pompage.

(3) Les volumes à stocker depuis cent ans pour toute la France en déchets radioactifs les plus dangereux (haute activité et moyenne activité à longue vie) représentent 46 500 m³, soit un cube d'environ 36 m de côté.

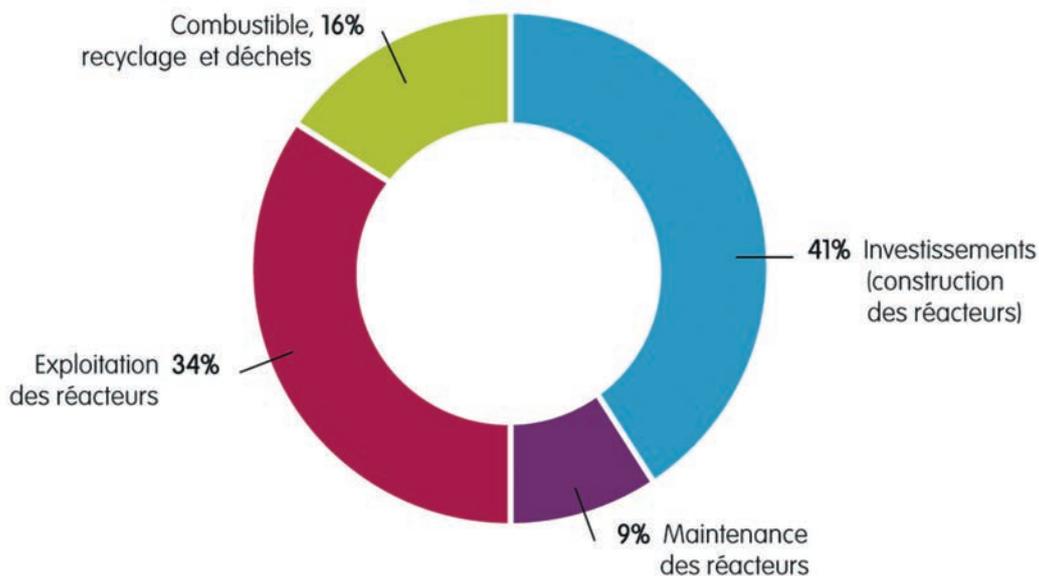
Le « récit anticipatif » de sortie du nucléaire, proposé par Bernard Laponche, représente l'opinion d'une part non négligeable de nos concitoyens qui considèrent que le nucléaire est « le moyen le plus dangereux, le plus polluant et le plus cher de ne pas émettre de CO₂ » (même si une bonne partie des Français croient, à tort⁽⁴⁾, que le nucléaire émet du CO₂). Bernard Laponche a travaillé sur le nucléaire, tout comme l'a fait Myrto Tripathi qui a une opinion complètement opposée et insiste sur le fait que « les bénéfices associés à l'énergie nucléaire sont peu connus parce que peu communiqués et, plus grave, ils sont devenus tabou ».

Une autre source d'opposition existe, peu développée dans ce numéro, qui englobe des notions plus ou moins faciles à cerner : le désintérêt ou la crainte vis-à-vis des sciences et des techniques, la défiance vis-à-vis de l'expertise, l'amour-haine des Français pour l'industrie (que l'on préférerait hors de nos frontières tout en conservant les emplois et les taxes foncières...), une interprétation hâtive du « principe de précaution » évoqué pour tout grand projet, la remise en cause du modèle économique dominant qui favorise la croissance, le militantisme de certains pays voisins, comme l'Allemagne, qui préféreraient une France sans nucléaire, etc. De fait, le nucléaire n'est pas la seule technologie qui inspire des peurs, des fantasmes et des *fake news* : en suscitent également les vaccins, les ondes électromagnétiques des réseaux de télécommunications, les éoliennes, le compteur Linky, etc.

La question du coût du nucléaire est apparue ces dernières années, concomitamment à la baisse des coûts de l'éolien et du photovoltaïque, alors qu'auparavant il était acquis que le consommateur français était, grâce au nucléaire, privilégié en matière de prix de l'électricité, par rapport à ceux en vigueur dans d'autres pays. Plusieurs études ont été menées, notamment par la Cour des comptes⁽⁵⁾.

Pour certains commentateurs, le débat n'est pas tranché et il faut reconnaître qu'il est difficile, car tant pour les filières renouvelables que pour le nucléaire, il est fait appel à des concepts et des calculs qui peuvent être source d'incompréhensions : on doit, par exemple, ajouter des coûts passés, présents et futurs, prendre en compte des coûts courants économiques, des coûts marginaux de court terme ou de développement, des coûts *cash* ou *overnight*, des coûts avec ou sans raccordement au réseau, des coûts avec ou sans *back-up* pour pouvoir comparer entre elles des électricités de même qualité (y compris au regard de leur disponibilité). En outre, l'évaluation du coût du nucléaire se heurte à des incertitudes, comme l'indique la Cour des comptes pour la France :

- les coûts du démantèlement : point sur lequel l'industrie dispose encore de peu d'expérience même si plusieurs réacteurs ont déjà été démantelés (par exemple, aux États-Unis) ;
- le coût de la gestion des déchets nucléaires les plus radioactifs, selon les options qui seront choisies ;
- le « taux d'actualisation » correspondant au coût du loyer de l'argent sur longue période, combiné à l'évolution de l'inflation.



Sources : Cour des comptes - Crédit : L. Colombel/CEA

Structure des coûts de production du parc nucléaire actuel (source : CEA).

(4) Le nucléaire émet 6 g de CO₂ par kWh, à comparer par exemple aux 7 g/kWh pour l'éolien et aux 1 060 g/kWh des centrales au charbon (source : ADEME, Base Carbone).

(5) On peut citer, par exemple, le rapport rendu public, le 27 mai 2014, sur le coût de production de l'électricité nucléaire, rapport commandé par la commission d'enquête de l'Assemblée nationale sur les coûts de la filière nucléaire.

L'industrie française du nucléaire est reconnue mondialement comme une filière d'excellence. Mais elle a connu des déboires ces dernières années, liés au fait que la dernière mise en service en France d'une centrale nucléaire de production d'électricité remonte à dix-sept ans (Civaux, 2002). Augustin Bourguignat, au nom de la CFDT, veut croire que « ces épreuves ont *in fine* renforcé la résilience de la filière, l'ont rendue plus mature et, au final, plus apte à affronter les nombreux défis futurs ».

En ce qui concerne le « nouveau nucléaire », on l'associe souvent au modèle envisagé du réacteur EPR 2 ; au cours de l'automne 2019, la presse a fait état de la mise à l'étude d'une « feuille de route » pour la construction future par EDF de trois paires de ce type de réacteurs. La question du chantier de l'EPR « Flamanville 3 » vient forcément à l'esprit : comment EDF se retrouve-t-elle dans la situation actuelle, où s'accumulent les retards, les non conformités et surcoûts successifs, alors qu'elle avait su mettre en service en un temps record cinquante-huit réacteurs répondant aux besoins, trente à quarante ans plus tôt ? La conception du réacteur ne semble pas en cause, puisque deux de ces réacteurs ont été mis en service en Chine, avec succès. Le rapport de Jean-Martin Folz sur la construction de l'EPR de Flamanville, publié en octobre 2019, n'a pas pu être pris en compte dans ce numéro du fait des contraintes d'édition, mais l'article de Xavier Ursat tire d'importantes leçons de ce cas d'école.

Il est compréhensible qu'un réacteur « tête de série » connaisse des retards de construction. Il avait fallu un peu plus de quinze ans pour construire à Chooz (département des Ardennes) les deux premiers réacteurs de type « N4 » mis en service en 2000. Ce délai n'avait d'ailleurs guère suscité de polémique à l'époque, peut-être parce qu'il n'y avait aucune urgence. Pour Flamanville 3, dont la construction a débuté en 2007, une urgence apparaît avec la lutte contre le changement climatique qui nécessite de déployer des technologies « bas carbone » (éolien, photovoltaïque, nucléaire, hydraulique, biomasse, etc.) et de réduire les consommations d'énergies fossiles, notamment à travers la fermeture des centrales au charbon. En même temps, la vitrine du nucléaire pour l'exportation repose en partie sur cette centrale d'un nouveau type. Les enjeux économiques et financiers sont colossaux et l'on imagine bien que la concurrence, les *lobbies*, voire les « adversaires »⁽⁶⁾ de chaque camp vont faire preuve d'un activisme débridé, de sorte que le citoyen va encore avoir beaucoup de mal à s'y retrouver.

D'autres grands projets ont connu ou connaissent des déboires en termes de dépassement de délais et de coûts, sans que cela ne suscite de passions aussi vives que pour Flamanville 3 : peuvent être cités le tunnel sous la Manche, la gare centrale de Stuttgart (depuis 2005) ou l'aéroport de Berlin-Schönefeld (depuis 1996). Le nucléaire n'est décidément pas une industrie comme les autres.

Le défi que pose Flamanville 3 vient justement du fait qu'il présente des caractéristiques à la fois des têtes de série et des prototypes, comme la forte puissance (1 600 MW) ou la protection contre des agressions extérieures extrêmes. Si l'on y ajoute l'absence de construction pendant plus de vingt ans et les difficultés de l'industrie française en général qui mettent en péril un écosystème de sous-traitants *high tech* à haut niveau de compétences et d'assurance qualité (soudures, chaudronnerie, etc.), ainsi que le manque de visibilité sur de futures constructions, on peut comprendre aisément en quoi ce défi était redoutable.

Avant d'achever cette introduction, je tiens à remercier chaleureusement les auteurs qui ont accepté de s'investir malgré la sensibilité du sujet. Je souhaite que ce numéro des *Annales des Mines* puisse répondre à l'ambition placée en lui, grâce à la mise à disposition d'une somme d'informations technico-économiques émanant des meilleurs experts et de points de vue contrastés en provenance de nombreuses parties prenantes. Certains de ces points de vue s'opposent fortement, mais chacun de nous pourra se forger sa propre opinion en toute quiétude sur un sujet où l'expression est d'habitude cacophonique.

(6) Selon une expression utilisée par le président de l'ADEME : « On a été attentifs aux arguments de nos adversaires » (*L'Usine nouvelle*, 11 décembre 2018).