

LETTRÉ GÉOPOLITIQUE DE L'ÉLECTRICITÉ



La Lettre « Géopolitique de l'Electricité » est la seule publication sur ce thème en langue française. Nous n'avons aucun objectif militant. Nous tentons d'approcher la vérité, en décrivant par des données objectives le passé proche et l'actualité des secteurs électriques ainsi que leurs conséquences. Les faits sont privilégiés aux jugements de valeur sur la finalité des politiques comme celles concernant le climat. Nos études sont inédites. Les données proviennent des instituts de statistiques ainsi que des acteurs du terrain : réseaux de transport, compagnies d'électricité, rapports officiels, associations professionnelles ou ONG. La diffusion de nos informations, à condition d'en citer l'origine, est libre.

Directeur de la Publication: Lionel Taccon
Rédactrice en chef : Emma Legrand



Maitriser les coûts du nucléaire *L'importance de la gestion des chantiers*

Les coûts des chantiers contribuent pour 60% à 80% au prix de l'électricité nucléaire produite. Or, ces coûts sont très variables. De 1 à 3 dans un rapport de l'OCDE de 2020, ils varient de 1 à plus de 4 aujourd'hui. L'observation de ces coûts et leur explication sont d'une importance majeure.

C'est l'objet de cette Lettre « Géopolitique de l'Electricité » écrite à l'occasion d'un appel d'offres au Kazakhstan où une offre chinoise a fait sensation. Il apparaît deux facteurs principaux pour obtenir des coûts bas de chantier : une ingénierie performante et la capacité à maintenir une industrie nucléaire dédiée compétitive. Ce qui permet la construction en série de réacteurs standardisés. Le coût du nucléaire est alors proche de celui des renouvelables compte tenu de leurs coûts indirects.

On observe deux cas où ces conditions ont été réunies : le programme chinois actuel et lors de la construction du parc nucléaire français dit historique. Les méthodes et les principes de gestion des chantiers y sont très proches, ce qui s'explique par l'histoire.

La condition première pour que le nucléaire français puisse retrouver le succès est qu'EDF possède de bonnes capacités d'ingénierie de chantier. Ce qui a déjà été obtenu dans le passé. L'industrie nucléaire française avec, entre autres, Framatome et Arabelle Solutions est compétitive. Mais pour tirer tous les avantages des constructions en série, il faudrait viser une part du nucléaire à terme dans le mix électrique français de 75%. Sinon, la taille des séries peut se révéler insuffisante.

Lettre n°131 – 5 mai 2025

Vous pouvez **recevoir notre Lettre** par simple demande par e-mail à :
geopolitique.electricite@gmail.com

Ou en vous inscrivant sur notre site
www.geopolitique-electricite.fr

Où vous retrouverez toutes nos études et des informations liées à l'actualité

Maitriser les coûts du nucléaire

L'importance de la gestion des chantiers

I. Confrontation mondiale au Kazakhstan

Un nouveau Kazakhstan est arrivé. Ce vaste Etat d'Asie Centrale a été une république soviétique et la moitié de la population était alors russe. Aujourd'hui, il ne reste plus que 15% de Russes, souvent âgés. Les Kazakhs qui connaissent un véritable boom démographique sont redevenus largement majoritaires chez eux. Le sous-sol du pays étant fort riche, les liens avec la Chine se sont renforcés. Le Kazakhstan est devenu le premier producteur mondial d'uranium, avec environ 40% du total mondial. Par ailleurs, les peuples de la région, donc les Kazakhs, se sont souvenus qu'ils faisaient partie de la grande ethnie turque et, à l'initiative de la Turquie, ont créé l'Organisation des Etats Turciques afin d'approfondir la solidarité retrouvée d'une communauté de plus de cent cinquante millions de personnes.

En conséquence, la diplomatie kazakhe se veut « multivectorielle », c'est-à-dire qu'elle n'a plus de choix privilégié. Cette même diplomatie a annoncé que cela s'appliquait à l'énergie nucléaire et, en particulier, au choix du constructeur de la centrale nucléaire dont le pays souhaite se doter. Le Kazakhstan s'est donc adressé, en 2024, à **toutes les industries nucléaires mondiales** susceptibles de proposer un réacteur de troisième génération.

Il en reste aujourd'hui cinq, celles de Russie, France, Chine, Corée du Sud et Etats-Unis. Le Kazakhstan est ainsi à l'origine d'une confrontation inédite entre ces cinq industries nucléaires.

Les Etats-Unis ont préféré rester à l'écart, proposant au Kazakhstan une coopération dans le cadre des SMR. Les Kazakhs ont donc dressé une « short list » d'industries subsistantes, composée sans surprise d'entreprises de Russie, de Chine, de Corée du Sud et de France.

Le Ministère de l'Energie local estimait que le coût du projet, d'une puissance de 2,4 MWe serait de 10 milliards de \$ soit environ 4150\$ par kWe installé (\$/kWe) et la durée de construction de dix ans. Cependant, un groupe d'experts officiels parvint ensuite à un coût de 15 milliards de \$ soit 6250\$/kWe¹.

Fin août 2024, un représentant de l'entreprise chinoise CNNC annonça que si son entreprise était sélectionnée, le coût serait de 20 milliards de yuan par GWe, soit 2,8 milliards de \$. Soit 2800\$/kWe et un temps de construction de cinq ans¹.

Ce coût annoncé est largement inférieur aux estimations kazakhes. Or, celles-ci sont basées sur des offres ou des coûts de construction qui paraissaient vraisemblables. Autrement dit, il est fort probable que le coût annoncé par CNNC soit considérablement inférieur à ceux, escomptés, de ses concurrents. CNNC est une très importante entreprise chinoise qui propose un modèle de réacteur de troisième génération destiné, entre autres, à l'exportation. Sa proposition n'a pas pu être faite sans l'aval de Pékin.

Les coûts de construction des réacteurs entrent pour 60% à 80% dans le coût de l'électricité produite². Or, ces coûts de construction varient énormément, de 1 à 4. Il est donc essentiel de comprendre la raison des différences. C'est l'objectif de cette Lettre « Géopolitique de l'Electricité ».

¹ Kursiv News-« Chinese bidder reveals estimated cost of nuclear power plant in Kazakhstan » Zhanbolat Mamyshev-August, 28, 2024. Citant Rosatom : un coût de 24 à 25 milliards de \$ pour 4800 MWe pour le projet d'Akkuyu.

² US Department of Energy-Office of Scientific and Technical Information-« A review of light water reactor costs and cost drivers »-OSTI ID 1466793-Sept 1, 2017

II. 2020 : un Rapport de OCDE

Un Rapport de l'OCDE de 2020³, rappelle qu'il existe cinq industries nationales proposant la construction des réacteurs actuels, dits de troisième génération. Il s'agit des industries russe (proposant le réacteur VVER1200), américaine (réacteur AP1000), française (EPR), coréenne (APR1400) et chinoise (Hualong One ou HPR1000). Une industrie nationale peut-elle ignorer l'étape des réacteurs de troisième génération et passer directement à la suivante, les réacteurs du futur qui, en fermant le cycle du combustible, régleraient le problème des déchets et la question d'approvisionnement en uranium ? Sur le papier probablement, mais certainement pas sur les chantiers, qui nécessitent l'existence d'une industrie préexistante avec ses gros bataillons d'entreprises. Ainsi l'avenir de l'atome civil appartient d'abord aux cinq industries indiquées ci-dessus, mais toutes ne survivront peut être pas à l'étape actuelle.

Le Rapport de l'OCDE constate une grande différence entre les deux industries américaine et française, qui ont connu une longue pause des chantiers, et les trois autres, coréenne, russe et chinoise. Les deux premières ont des coûts de construction nettement plus élevés du fait de pertes de compétences résultant d'un manque d'investissements durant une génération. Ceci est confirmé par d'autres études. Ainsi, dans une note technique, la SFEN⁴ fait état « de coûts très étalés, d'un facteur d'ordre 3 en coût \$/kWe ». Le coût des rares chantiers européens et américains, pouvaient être effectivement trois fois plus chers qu'ailleurs, mesurés en \$/kWe installé. L'explication proposée était « la qualité de l'organisation, permise en bonne part, par un rythme de production régulier » dans les pays n'ayant pas connu de pause nucléaire. La déléguée générale de la SFEN précisait : « Pour faire moins cher en Europe, il faut des programmes industriels cadencés, avec des conceptions identiques »⁵. François Lévêque, professeur à Mines Paris Tech ajoutait une autre conséquence du désamour de l'atome en Occident : « Financer une centrale est considéré comme risqué en raison « du risque réglementaire » et du « risque politique »⁴. Les investisseurs, non seulement, couraient de gros risques d'échec durant la pause nucléaire, mais les aides publiques leur étaient refusées. On retiendra que le « cadencement des programmes industriels avec des conceptions identiques », ainsi que les conditions de financement étaient considérées comme des facteurs importants des coûts de construction des réacteurs bien plus que le prix de la main d'œuvre.

Cinq ans plus tard, l'évolution de la répartition des coûts de construction des réacteurs de troisième génération est étudiée ci-dessous.

III. Russie

L'industrie nucléaire russe actuelle est bien loin de celle de Tchernobyl. Elle propose un réacteur de troisième génération nommé VVER1200 qui répond aux exigences de sûreté européennes⁶.

L'Etat russe a exigé que son entreprise nucléaire étatique, Rosatom, équilibre son budget pour les applications civiles, afin de réserver ses subsides au nucléaire militaire. En conséquence, Rosatom a basé son développement sur l'exportation. L'entreprise est compétente pour les questions de combustible et, en cassant les prix, a aisément pénétré le marché occidental. Cela a été facilité par des droits historiques à l'accès à certains gisements d'uranium kazakhs. Parallèlement, Rosatom s'est lancé dans l'exportation des réacteurs et a obtenu de réels succès comme aujourd'hui en Turquie (Akkuyu), en Hongrie (Paks) et en Egypte (El-Dabaa). Cependant, si Rosatom a des compétences d'ingénierie de chantier, l'industrie russe n'est pas suffisante pour satisfaire à autant de projets. Lors de la grande pause nucléaire occidentale, Rosatom a largement sous-traité ses constructions aux

³ OECD-IEA-NEA-« Projected Costs of Generating Electricity-Cf.Table 8.2, p.152 (entre autres)

⁴ SFEN-« Combien coûte le nucléaire ? »Note technique novembre 2022. Cf.p.57

⁵Watson-« Pourquoi les réacteurs nucléaires chinois coûtent moins cher »-26/8/2024

⁶ IRSN-« Les alternatives au réacteur EPR2 »Réponse à la saisine de la CNDP du 12 juillet 2022

entreprises européennes et nord-américaines, ce qui a bien aidé ces dernières. Ainsi, pour des projets de réacteurs dans l'est de l'Europe, 80% des commandes allaient à des entreprises occidentales.⁷ Aujourd'hui, une certaine dépendance de l'Occident vis-à-vis de la Russie persiste pour le combustible, et de l'autre côté, les exportations de réacteurs russes ne pourraient se faire sans les entreprises occidentales. Chacun se tient par la barbichette. D'où l'absence de sanctions dans ce domaine.

Ce qui signifie que l'image décrite ici et là, d'une industrie puissante russe de construction de réacteurs doit être nuancée. Elle dépend des industries occidentales. Les chantiers de Paks (Hongrie), Akkuyu (Turquie) et El-Dabaa (Egypte) ne pourraient être menés à bien sans des entreprises occidentales.

Rosatom a publié les coûts du projet d'Akkuyu (Turquie). Les quatre réacteurs VVER1200 sont revenus à 5000-5200 dollars US par kWe installés⁸. Le premier béton du premier réacteur d'Akkuyu a été coulé en août 2018, a commencé à fournir du courant en 2025. Sept à huit ans de chantier⁹.

IV. Corée du Sud

L'industrie sud-coréenne de construction de réacteurs s'est inspirée historiquement des industries françaises et américaines. Elle possède des capacités d'ingénierie de chantier et fabrique la plus grande partie des composants de réacteurs. Cependant, le pays a élu en 2017 un Président qui s'était engagé à sortir graduellement du nucléaire d'ici 2050. L'épisode a eu un certain coût pour l'industrie nucléaire locale. En 2022, est arrivé au pouvoir un Président pronucléaire qui vient d'être destitué – pour des raisons qui n'ont rien à voir avec l'atome. Il faut retenir que l'industrie nucléaire coréenne peut rencontrer des obstacles politiques.

Elle utilise sa technologie APR déclinée par les réacteurs APR1400 de puissance 1400MWe et APR1000 de puissance 1050MWe. **Sa dernière offre concerne la Tchéquie, où doivent être construits deux réacteurs APR1000 de 1050 MWe, (Dukovany 5 et 6) pour un coût total de 8,85 milliards de \$ par unité soit 8400\$/kWe. Le contrat devrait être finalisé cette année et le premier réacteur achevé en 2036¹⁰. Soit vraisemblablement un chantier de huit ans.**

En Corée, a été décidée la construction en 2024 de deux réacteurs de 1400MWe, APR1400, (Shin-Hanul) pour un coût unitaire de 8,7 milliards de \$, soit un coût par kWe installé de 6200 \$/kWe. Achèvement en 2032 et 2033¹¹. Probablement sept ou huit ans de construction.

V. Europe occidentale et Amérique du Nord

Un mouvement antinucléaire puissant s'y est développé, s'appuyant sur plusieurs accidents (Three Mile Island, Tchernobyl et Fukushima). Il a provoqué une longue pause des chantiers, interrompant les investissements et affaiblissant fortement les industries correspondantes. D'où l'observation de Rapport de l'OCDE³ constatant que les coûts de construction des réacteurs actuels, dits de troisième génération sont très élevés dans l'UE et en Amérique du Nord. L'explication étant qu'au coût de construction proprement dit s'ajoute le coût de reconstitution de compétences industrielles perdues.³

⁷ Revue Générale Nucléaire-« Rosatom, un partenaire pour la filière nucléaire française »-13 mars 2018

⁸ Kursiv News-« Chinese bidder reveals estimated cost of nuclear power plant in Kazakhstan » Zhanbolat Mamyshev-August, 28, 2024. Citant Rosatom :un coût de 24 à 25 milliards de \$ pour 4800 MWe.

⁹ Nuclear Engineering International-« Türkiye's Akkuyu NPP to become partly operational in 2025 »-Jan 10, 2025.

¹⁰ Nuclear Engineering International-« Czech Republic prepares for new Dukovany units »-March, 19 2025

¹¹ Korea JoongAng Daily-12/9/2024-« Construction permit granted for Shin-Hanul reactors units 3 and 4 »-Nuclear Engineering International-« Shin Hanul marks launch of new reactors »-October 31,2024.

France

Le coût des six premiers réacteurs EPR2 du Nouveau Programme Nucléaire est en cours de révision. Le dernier Conseil de Politique Nucléaire (17 mars 2025) demande qu'EDF, avant la fin de cette année, fournisse un chiffrage du coût et délais de construction. En attendant nous prendrons comme coût l'estimation du Président de la Cour des Comptes¹², cent milliards d'euros pour ces six premiers réacteurs (Penly, Gravelines et Bugey), d'une puissance installée de 10 GWe. Cela conduit à environ 10 000 euros/kWe soit 11 000\$/kWe. La construction démarrée en 2027 serait terminée en 2035, soit huit ans de travaux. Il paraît délicat à EDF en 2025 de s'écarter lors d'un appel d'offres de ces coûts et de ces délais de construction. On notera les réserves de la Cour des Comptes sur les exportations françaises et le jugement sévère sur la perte de compétence d'EDF concernant l'ingénierie de chantier¹³.

Etats-Unis

L'entreprise Westinghouse est considérée, à juste titre, comme emblématique du nucléaire civil américain. Cependant son histoire récente et la répartition de son capital en font une société où les intérêts canadiens et américains sont inextricablement liés. Comme les récentes déclarations du Président Trump concernant le Canada ne semblent pas avoir eu des conséquences macroscopiques pour Westinghouse, l'aspect binational de cette entreprise sera négligé ici.

Le site de Lubiawo-Kopalino, dans le nord-ouest de la Pologne, doit accueillir 3 réacteurs AP1000 de Westinghouse. Le coût total du projet est de 36,4 à 46,8 milliards de \$ pour 3 300 MW¹⁴. **Soit une fourchette importante dont la limite inférieure est environ 11 000 \$/kWe.** Ce qui fait très cher. La construction, commencée en 2026, serait terminée en 2033 (sept ans). Le problème essentiel de Westinghouse concernant l'AP1000 est le choix de construction modulaire « superbe idée en théorie, l'utilisation des modules a jusqu'à présent nui au projet et, par conséquent, a pesé sur le budget ». Un jugement de la grande entreprise d'ingénierie Bechtel²⁰.

Un consortium composé de Hyundai Engineering & Construction et de Westinghouse a été chargé de construire deux réacteurs AP1000 (2200 MWe) sur le site nucléaire de Kozloduy (Bulgarie). Westinghouse gardera le contrôle du projet mais ne participera pas à la construction, qui sera laissée à Hyundai. Le contrat est de 20 000 milliards de won soit 14,5 milliards de \$¹⁵. **Ce qui amène à un coût par kWe installé de 6600 \$.**

VI. Chine

Comme il a été indiqué fin août 2024, l'un des responsables de l'entreprise chinoise CNNC, lors d'un entretien avec le media kazakh Kursiv¹, indique que si son entreprise est choisie pour construire la centrale kazakhe le prix sera de 5,6 milliards de \$ pour une puissance installée de 2 GW. Ce qui correspond à 2800\$/kWe ou 2500euros/kWe. Bien au-dessous des coûts de construction trouvés ci-dessus pour les autres concurrents. Le temps de construction serait de cinq ans. Certes, le pouvoir de Pékin est soupçonné de bontés pour ses entreprises. Mais l'arbre ne doit pas cacher la forêt. Doit-on douter de la véracité des coûts chinois ? On notera que les délais de construction, qui ne peuvent être cachés sont également plus faibles entraînant des baisses de coûts.

La politique de l'énergie nucléaire chinoise se caractérise par la recherche de la compétitivité par des coûts les plus bas possibles et les durées de construction courtes. Elle a provoqué des compétitions et débouché sur deux modèles, le Hualong One de lointaine ascendance française, et du CAP1000, de descendance américaine.

¹²Les Echos-24/2/2025

¹³Cour des Comptes-« La filière EPR : une dynamique nouvelle, des risques persistants »-14-1-2025

¹⁴ Nuclear Engineering International-« Polish nuclear finance law signed »-March 27, 2025

¹⁵Yonhap News Agency-« Hyundai E&C signe un contrat de 20 000 Mds de won pour des réacteurs nucléaires en Bulgarie »- Nov 5, 2024

Hualong One

Après avoir fait construire sur son sol des réacteurs de technologie française, américaine, canadienne et russe, la Chine décida de posséder son propre modèle. Ce fut, suivant l'expression de la World Nuclear Association le « *China's new nuclear baby* » présenté au monde début septembre 2014. Pékin l'appela « Hualong One », en français « Dragon numéro 1 ». La World Nuclear Association le présenta comme « d'une certaine ascendance française » (les réacteurs de Gravelines), « mais né de deux grandes contestations internes » (dont une certaine rivalité entre les deux grands constructeurs chinois CNNC et CGN)¹⁶.

Aujourd'hui, le Hualong One ou HPR 1000 est un réacteur de troisième génération dont la propriété intellectuelle est entièrement chinoise. EDF a envisagé un temps d'en installer sur son site britannique de Bradwell. Ce projet est abandonné, mais à cette occasion, l'Autorité de Sûreté britannique lui avait donné son feu vert.

Le Hualong One a d'abord été considéré comme un réacteur à exporter, l'AP1000 américain ayant les faveurs de Pékin pour la Chine elle-même. Cependant, quelques déboires de l'AP1000 font qu'aujourd'hui le Hualong One a la première place en Chine elle-même. « La version « Hualong One » de CNNC sera le principal modèle national construit dans le but de réduire les prix et d'équiper le parc national à moindre coût »¹⁷.

Début 2024, CNNC a annoncé le début de la construction à Jinqimen (Province de Zhejiang) de deux réacteurs HPR1000 (Hualong One) pour un coût de 6,2 milliards de \$ (5,7 milliards d'euros)¹⁸. La puissance installée sera de 2,4 GW et le temps de construction de chaque réacteur de 5 ans¹⁹. On constate que le coût du kWe installée est 2 600\$, soit 2 400 euros. Très proches des chiffres annoncés au Kazakhstan. **Il est prévu six réacteurs Hualong One à Jinqimen.**

La déclaration du représentant de CNNC³ concernant l'offre chinoise correspondant au projet kazakh concerne ainsi deux Hualong One et le coût est très proche-2800\$/kWe de celui annoncé pour Jinqimen, 2600\$/kWe. Il est le résultat d'une politique à long terme de réduction des coûts.

CAP1000

L'AP1000 est le réacteur américain de troisième génération développé par Westinghouse. D'une manière générale les modes de construction d'un réacteur utilisent des modules fabriqués en usine et assemblés sur le site de la centrale. Mais « l'AP1000 pousse ce concept au paroxysme ». L'entreprise de construction Bechtel qui a eu à le mettre en œuvre a écrit : « bien que ce soit une superbe idée en théorie, l'utilisation des modules a jusqu'à présent nui au projet et, par conséquent, a pesé sur le budget »²⁰. La pause des chantiers aux Etats-Unis, un design inachevé et cette « superbe idée » ont fait de la construction des deux AP1000 de Vogtle (Géorgie) une aventure du même type que le chantier de Flamanville 3. En augmentant les factures et la fureur des consommateurs locaux.

Une longue collaboration s'est entamée depuis une vingtaine d'années entre Westinghouse et les entreprises chinoises du nucléaire qui appréciaient le modèle AP1000. Westinghouse qui traversait une période fort pénible se montra généreuse sur les transferts de technologie. Ainsi naquit le modèle de réacteurs CAP1000 pour China AP1000, version chinoise du réacteur américain AP1000. Mais l'industrie chinoise a des ambitions (et des moyens) que l'industrie américaine n'a pas. La construction systématique par modules a été reprise pour le CAP1000 en Chine. En 2022, la construction de deux CAP1000 a commencé sur le site de Sanmen, d'autres ont suivi ailleurs, ainsi sur le site de Lianjiang. Le premier doit être mis en service en 2027. Début janvier 2025, un module de 1100 tonnes a été installé dans l'unité 2 de la centrale de Lianjiang. Trop important pour être transporté, il a été construit sur place. Le coût de chacune deux premières unités de Lianjiang est estimé à 2 800\$/kWe ou

¹⁶ World Nuclear News –« China's new nuclear baby » Sept 2, 2014

¹⁷ World Nuclear Association-Nuclear Power in China

¹⁸ Nucnet-China-« Construction of two Hualong One Nuclear Plants Begins At Jinqimen »-Feb 20, 2024

¹⁹ Nuclear Engineering International-« Construction begins at China's Jinqimen NPP »Feb 21, 2024

²⁰ Cité dans SFEN-RGN-« Un super module de 1000 tonnes mis en place en Chine »-7 mai 2024-Gaïc Le Gros

2 500 euros/kWe²¹. Coût identique aux Hualong One. Donc bien au-dessous de l'AP1000 prévu en Pologne. Le temps de construction est cinq ans. La construction des CAP1000 ne réussira que par la présence des capacités remarquables de l'industrie chinoise, capable de construire les infrastructures nécessaires à la construction modulaire, d'assurer les transports et manutentions correspondantes. Les CAP1000 sont inexportables aujourd'hui. Ils nécessitent l'industrie locale.

En avril 2025, la World Nuclear Association constate que sur 30 réacteurs en construction en Chine 13 sont des Hualong One (ou HPR1000) et 9 des CAP1000²². Coûts par kWe 2600 et 2800\$/kWe. Le premier, Hualong One est également disponible pour l'exportation. Les capacités de construction de l'industrie locale sont immenses.

VII. Synthèse des résultats

Voici la synthèse des résultats* :

Modèle/origine	Pays	Site	Puissance MWe	Etat/remarque	Temps de construction	Coût \$/kWe
VVER1200/Russie	Turquie	Akkuyu	4800	En cours	7 à 8 ans	5000-5200
APR1400/Corée	Corée	Shin-Hanul	2800	Début chantier	7 à 8 ans	6200
APR1000/Corée	Tchéquie	Dukovany	2100	Contrat finalisé 2025	8 ans	8400
EPR2/France	France	Penly	1600	Projet/coût estimé en révision	8 ans	11 000**
Westinghouse/USA	Pologne	Lubiatowo	3300	Projet	7ans	11 000***
Westinghouse/USA	Bulgarie	Kozloduy	2200	Projet/construit par Hyundai	-	6600
Hualong One/Chine	Chine	Jinqimen	2400	En chantier	5 ans	2600
CAP1000/Chine	Chine	Lianjiang	2200	En chantier	5ans	2800

(On rappelle que la proposition chinoise à l'offre kazakhe est à 2800\$/kWe).

* : Le taux de change du dollar par rapport à l'euro a été pris comme 1,1 dollar pour un euro, la quasi-totalité des données datant d'avant avril 2025, avant la baisse du dollar.

** : le coût des six premiers réacteurs EPR2 est en cours de révision. L'estimation de 10 000 euros/kWe installé est du Président de la Cour des Comptes⁸. Le coût baisserait si EDF retrouvait ses capacités en ingénierie de chantier.

*** : le coût du projet de Lubiatowo fait l'objet d'une fourchette dont 11 000\$/kWe est la limite basse.

VIII. Energie nucléaire : le nouveau paysage mondial

L'énergie nucléaire est utilisée essentiellement pour produire de l'électricité. Le coût de construction des réacteurs représente 60% à 80% du prix de l'électricité produite²³. **Ses considérables variations sont donc un phénomène majeur dont les causes doivent être une priorité d'étude.**

²¹ Nucnet-« Super Module installed at Lianjiang-2 Nuclear Plant in China »-Jan 7, 2025

²²Nuclear power in China-Uptated 7 april 2025

²³US Department of Energy-Office of Scientific and Technical Information-« A review of light water reactor costs and cost drivers »-OSTI ID 1466793-Sept 1, 2017

Concernant les réacteurs actuels, ceux de troisième génération, leurs coûts variaient de 1 à 3 dans le Rapport de l'OCDE de 2020³. Aujourd'hui, ils varient de 1 à plus de 4. On peut distinguer trois cas :

- A. Deux industries nationales, EDF (France) et Westinghouse (Etats-Unis) affichent des coûts supérieurs à 10000 \$/kWe. En France, ces coûts ne sont pas connus exactement et, au dernier Conseil de Politique Nucléaire (mars 2025), EDF a été prié de les préciser et de s'y tenir. En attendant a été pris ici l'évaluation du Président de la Cour des Comptes¹². Aux Etats-Unis le nouveau Secrétaire d'Etat à l'Energie a simplement déclaré qu'il fallait s'occuper de la relance nucléaire « tant attendue »²³. Cinq ans après l'ambitieux programme « Restoring America's Competitive Nuclear Advantage », c'est une façon d'exprimer que cette relance ne s'est pas manifestée. Il n'y a aucun chantier nucléaire de troisième génération aux Etats-Unis. Pour la France et les Etats-Unis, et d'une manière générale, ces coûts élevés sont mis sur le compte de manque de compétence d'ingénierie de chantier et d'un affaiblissement de l'industrie nucléaire à la suite d'une longue pause des constructions de réacteurs.
- B. Ensuite viennent des coûts compris entre 5000 \$/kWe et 8400 \$/kWe. Ils correspondent à des chantiers menés par des entreprises considérées comme ayant des compétences en ingénierie de chantier et de pays n'ayant pas connu de pause nucléaire:
- Rosatom, l'entreprise russe étatique construit à Akkuyu (Turquie) une centrale nucléaire au coût affiché de 5200 à 5400\$/kWe.
 - L'entreprise coréenne KHNP propose de construire en Tchéquie deux réacteurs au coût de 8400 kWe. En Corée même, les coûts sont plus bas : 6200 kWe. Le Coréen Hyundai propose de construire en Bulgarie des réacteurs américains AP1000 pour un coût annoncé de 6600kWe.
- C. Enfin, l'industrie chinoise construit en Chine deux modèles : le Hualong One ou HPR 1000 pour 2600\$/kWe, et le CAP1000, version chinoise du réacteur américain de Westinghouse, pour un coût annoncé de 2800\$/kWe. Une compagnie chinoise propose de vendre au Kazakhstan des réacteurs Hualong One pour 2800\$/kWe

Les coûts américains aux Etats-Unis et français en France sont explicables. Par contre l'énorme différence entre les coûts chinois et ceux annoncés par Rosatom et les entreprises coréennes, pays qui n'ont pas connu de pause nucléaire est plus surprenante et demande une analyse.

IX. La Chine et le précédent français

Certes Pékin a des bontés pour ses entreprises, mais l'arbre ne doit pas cacher la forêt. Les coûts chinois sont deux à trois fois moins élevés que leurs concurrents russes et coréens et ne peuvent s'expliquer uniquement par le coût de main d'œuvre, qui a augmenté aussi dans l'Empire du Milieu, ni par des accès aisés aux capitaux à l'heure où la Commission européenne vient de donner son accord à la Tchéquie pour des aides généreuses concernant les réacteurs sud coréens de Dukovany.

Il existe un précédent historique à une telle différence de coût de construction et elle a été expliquée^{24,25}. De 1975 à 1995, les coûts de construction des réacteurs français ont toujours été

²⁴« The costs of the French nuclear scale up... »-Energy Policy-Vol38, issue 9, sept.2020pp.5174-5188-Arnulf Grubler

²⁵ « Why does nuclear power plant construction cost so much ? »-Institute For Progress(IFP)-May 1st 2023-Brian Potter-Cf. fig. non numérotée dans le § « How can we bring costs down »

un peu moins élevés qu'aux Etats-Unis. Mais de 1985 à 1995, les coûts français deviennent de deux à quatre fois plus faibles que les coûts américains²⁵. EDF a une particularité : l'un de ses fondateurs, Pierre Massé, plus connu comme le Commissaire au Plan du Général de Gaulle, décida qu'EDF serait maître d'œuvre et d'ouvrage de la construction de ses centrales. Il créa l'outil correspondant, la Direction de l'Équipement EDF, dont il fut le premier Directeur. En 1972, Marcel Boiteux était Directeur Général d'EDF. L'entreprise, sous sa houlette, vient d'opter pour le nucléaire et les premiers chantiers de ce qui n'est pas encore le programme Messmer, démarrent. Boiteux nomme Directeur de l'Équipement EDF un ingénieur hydraulicien auquel il fera toute confiance, Michel Hug. Ce dernier aura jusqu'au début de 1982 la responsabilité de la maîtrise d'œuvre et d'ouvrage du programme français. Il mettra en œuvre une stratégie nouvelle, la construction en série des réacteurs accompagnée d'une politique d'innovation importante, progressive et maîtrisée. Cette stratégie restera mal connue en France, y compris au-delà des dirigeants politiques. Sinon, elle n'aurait pas été abandonnée pour un choix totalement différent, le saut technologique de l'EPR avec les risques inévitables correspondant.

Mais cette stratégie ne passa pas inaperçue à l'étranger. La différence spectaculaire de coût entre la France et les Etats-Unis fut remarquée et analysée^{25 26}. Le fait majeur fut qu'en particulier, un autre ingénieur hydraulicien, qui était aussi ministre de l'énergie en Chine, s'intéressa énormément à la stratégie d'EDF. Il s'appelait Li Peng et vint en France. Il décida la construction en Chine (à Daya Bay) de deux réacteurs identiques à ceux de Gravelines (de puissance 900MWe), ***mais il importa aussi l'application de la stratégie industrielle d'EDF.***

La stratégie de Hug est basée sur deux piliers : une ingénierie de haute compétence et une construction en série par paliers successifs, avec renvoi des innovations acceptées au palier suivant. Ceci accompagné d'une recherche radicale de simplification et de standardisation. Le tout appliqué sans faiblesse. L'ingénierie est concentrée sur un seul modèle. L'expérience montra que les coûts de chantier en sont considérablement diminués.

Les Chinois, excellents industriels auraient peut-être trouvé eux-mêmes cette stratégie. En tout état de cause, elle a mené au modèle « Hualong One » au coût imbattable de 2600-2800\$/kWe dont 13 sont en construction, d'autres sont déjà en fonctionnement et bien d'autres en projet. Comme l'écrit la World Nuclear Association, le Hualong One est « ascendance française ». Au minimum, l'exemple français a fait gagner du temps aux Chinois !

Pour que cette stratégie fonctionne, il faut un certain rythme de construction. Il doit être tel qu'il permette de former et de maintenir une main d'œuvre nucléaire expérimentée. Ainsi se créera et se perpétuera une industrie nucléaire compétitive.

Les exemples français (historique) et chinois actuel montrent un rythme très rapide, de plusieurs réacteurs mis en service par an et des paliers qui dépassent fréquemment la dizaine d'unités de production. En une seule année (1982), l'industrie française mis en service huit réacteurs... record que les Chinois n'ont pas encore égalé ! Il est certainement possible de conserver, une fois créée, une industrie nucléaire de grande valeur en maintenant une activité permanente de rythme moins élevé. ***Mais il y a une limite au-dessous de laquelle, cette stratégie n'est plus efficace.***

La Corée n'atteint pas cette limite. Deux réacteurs en construction seulement en Corée même et pas assez d'exportations. Les Russes n'ont que quatre réacteurs en construction chez eux, mais une exportation plus importante. Mais ils ont besoin de sous-traitants de pays différents, un ensemble hétéroclite qui ne facilite pas la fidélisation, le maintien et l'optimisation permanente qui peuvent être menés dans le cadre d'une industrie nationale.

Russes et Coréens savent construire des réacteurs et leurs prévisions de prix et de délais, même s'il leur arrive d'être dépassées, ont des bases sérieuses.

Chinois aujourd'hui et Français du programme historique, avec leurs paliers de dizaines de réacteurs, ont créé une autre forme d'industrie nucléaire, incomparablement plus efficace. Telle est la raison des différences énormes de coûts de chantiers entre Chinois, d'une part, et Russes et Coréens, d'autre part.

Conclusions

En utilisant des méthodes et principes similaires à ceux de la construction du programme nucléaire historique français, les Chinois ont confirmé **que l'énergie nucléaire, si la construction des réacteurs est bien gérée, est compétitive y compris face aux renouvelables**, à condition de tenir compte des coûts complets de ceux-ci, en particulier des investissements nécessaires pour remédier à leur instabilité et dans les réseaux. **Ces coûts bas donnent aujourd'hui un avantage majeur à l'industrie chinoise, qui peut s'avérer décisif sur le marché mondial du nucléaire.**

L'industrie nucléaire française est-elle capable de faire aussi bien ? L'industrie chinoise est gigantesque et efficace. Mais le nucléaire n'y occupe qu'une place fort modeste. Il ne fournit que 5% de l'électricité chinoise. La part de l'énergie consommée sous forme d'électricité, en Chine, étant inférieure à 30%, le nucléaire chinois produit moins de 1,5% de l'énergie du pays. Il pourra atteindre 3%, mais il faudra des années. Aujourd'hui, le parc nucléaire français a une production proche du parc chinois mais surtout notre industrie nucléaire est prête avec des atouts majeurs.

Une centrale nucléaire a deux parties principales : l'îlot nucléaire où l'énergie nucléaire est produite, et la salle des machines où l'électricité est générée. Framatome fabrique les îlots nucléaires et est redevenue une entreprise très performante, réputée dans le monde entier et qui n'a rien à envier à l'industrie chinoise. Elle est même sous-traitante lors de la construction des réacteurs vedettes chinois Hualong One. Le cœur des salles des machines est la turbine, dont la plus puissante au monde, Arabelle, est fabriquée par Arabelle Solutions, filiale d'EDF. D'autres entreprises françaises pourraient être citées.

EDF doit récupérer ses compétences en ingénierie de chantier. Ingénieurs et techniciens sont déjà en nombre et de bon niveau. Il faut se souvenir qu'au siècle dernier, une grande majorité du personnel (dont son Directeur) de la Direction de l'Équipement EDF, maître d'œuvre et d'ouvrage du programme Messmer, **n'avait jamais construit auparavant de centrales nucléaires**. Une bonne ingénierie industrielle est basée sur des principes universels, au-delà des domaines techniques. La recette n'a pas été perdue en France Nous savons toujours construire des paquebots, des avions et des sous-marins nucléaires... et reconstruire des cathédrales. Lorsque les compétences en ingénierie de chantiers d'EDF auront été reconstituées, le design basique et celui de détail terminés permettront des chantiers efficaces. Les coûts de construction seront presque divisés par deux.

Mais l'industrie française, compte tenu entre autres de Framatome et Arabelle, peut aller bien au-delà. Comme au siècle dernier, toutes les équipes doivent se concentrer **sur un seul projet à la fois, cette fois-ci l'EPR2, permettant une énorme capacité d'études**. La même politique, comme en Chine, sera menée : simplification, standardisation, maîtrise des innovations pour obtenir un réacteur simple, sûr et bien défini. Le débat sur l'EPR est clos. Baisser son prix est certainement possible. Même si la comparaison est (très) audacieuse, notons que si l'AP1000 américain projeté en Pologne est hors de prix, sa version chinoise CAP1000 sera quatre fois moins chère.

Le rythme prévu actuel de construction des réacteurs est un peu faible pour recueillir tous les avantages d'une construction en série. Il faudrait viser une part du nucléaire à 75% et non à 50% du mix électrique français à terme afin d'obtenir des séries plus importantes.

Faut-il réfléchir à un réacteur moins puissant que l'EPR? Oui, si cette réflexion n'entame pas le potentiel d'études pour l'EPR2. Il suffit de reprendre le projet de construction de réacteurs chinois Hualong One sur le site EDF de Bradwell (Royaume Uni) ou ailleurs. Les Chinois restent probablement demandeurs. Un bon moyen pour observer la construction d'un réacteur de 1200 MWe.

Le financement du nouveau programme nucléaire devrait être facilité par une production plus importante du parc historique et une gestion réfléchie de la prolongation de ses réacteurs.

Il est regrettable que l'apport prévu de l'Etat soit sous forme de prêt. L'Etat et ses dirigeants politiques sont responsables d'une perte de compétitivité du nucléaire français du fait d'une longue pause des chantiers nucléaires. L'aide d'Etat devrait être un don. Certes, *in fine*, ce sont toujours les Français qui paieront, mais un don de l'Etat reconnaîtrait la responsabilité des dirigeants politiques.