

Effet de taille et effet des réseaux sur les coûts du nucléaire

par Jean-Guy DEVEZEAUX de LAVERGNE
et Frédéric LEGÉE

La question de la "taille optimale" des réacteurs nucléaires est souvent posée. Le marché actuel est très largement constitué de réacteurs de grande taille, avec des avantages bien connus, effet d'échelle notamment. Cet article tente d'éclairer la question en prenant en compte les effets de localisation de la demande et donc d'insertion dans un réseau. On y montre que la taille reste, en règle générale, un atout - si l'on excepte les aspects financiers non abordés ici.

Dans cet article, nous précisons quelques éléments relatifs à la comparaison des avantages respectifs des petits et des gros réacteurs nucléaires, en les mettant en perspective avec le réseau électrique (voir l'édito de ce numéro de la lettre).

Elle porte sur les comparaisons économiques et ne suppose pas de rupture technologique, qu'on ne peut *a priori* exclure, tant dans le domaine des petits réacteurs que des réseaux dont les performances augmentent graduellement. Notons que ces ruptures joueraient l'une en faveur des petits réacteurs et l'autre des gros.

On traite ici de la fourniture d'une puissance donnée, et des conditions dans lesquelles il apparaîtrait souhaitable de construire des petits réacteurs pour y satisfaire. Ceci en intégrant les besoins en réseau liés à ces réacteurs, par rapport à la construction de plus grosses unités. L'analyse est menée, compte tenu de besoins supérieurs en réseau liés à un gros réacteur (plus éloigné de la consommation répartie) approximés par une ligne très haute tension d'interconnexion entre ce réacteur et les centres de consommation éloignés (au sens du réseau).

Le sujet a été traité en partant de l'hypothèse de systèmes de transport et distribution satisfaisants, car un optimum ne peut être trouvé si le réseau s'éloigne trop d'une situation acceptable (il faut alors le renforcer).

Le coût au kWh est sensible à la taille

Les dépenses en capital d'un réacteur nucléaire de type REP représentent environ 60% du coût total actualisé du kWh, les 40% restant étant répartis à parts à peu près égales entre les coûts du combustible et les coûts d'exploitation et de maintenance. La part de l'uranium proprement dit représente un tiers du coût

du combustible, soit 5 à 7% du coût total du kWh d'origine nucléaire contre un coût du combustible représentant près de 75% pour une centrale à gaz par exemple, et de l'ordre de 40% pour une centrale à charbon, hors coût CO₂.

Le capital lui-même est largement lié au réacteur (il y a aussi des coûts de bâtiments et équipements classiques et de site). Les coûts d'un réacteur et des parties classiques dépendent de sa taille, *via* ce qu'on appelle l'effet d'échelle (sachant que se combinent souvent des effets de série et de site). Une formule qui donne, en ordre de grandeur et pour une technologie donnée, l'effet de la taille sur le coût du kWh (partie investissement) est la suivante:

$$C/C_0 = (P/P_0)^x$$

Où x est compris généralement entre 0,4 et 0,7. C est le coût total du réacteur et P est la taille. Il faut toutefois noter que ce type de formule peut être erroné si l'on sort de plages où les extrapolations sont possibles : qu'on se rappelle par exemple les limites en taille des réacteurs UnGG, à puissance volumique très faible.

Ainsi, selon les cas, on doit retenir qu'un réacteur de 300 MW peut être de l'ordre de 50% plus cher qu'un EPR, rapporté à la puissance installée, pour un concept comparable.

L'insertion d'un réacteur dans un réseau est contrainte

La première contrainte est de disposer d'un site acceptable techniquement et vis-à-vis de l'acceptation du public. L'augmentation de la taille du réacteur diminue cette contrainte en ce sens qu'elle permet de construire moins d'unités et permet de disposer un peu mieux des sites possibles.

La seconde contrainte forte, lors de la construction d'une unité électrique de taille donnée dans un parc donné, est le *ratio* entre la puissance de l'unité à construire et la puissance du parc interconnecté (puissance totale, ou puissance en base, selon les modalités d'exploitation) : il faut en effet des réserves tournantes suffisantes pour stabiliser le réseau en cas d'arrêt inopiné de la nouvelle capacité. Il faut aussi disposer d'unités capables de garantir la puissance nécessaire, en période d'arrêt programmé.

Un chiffre communément admis est que la taille de la nouvelle unité ne doit pas excéder de l'ordre de 10% de la puissance installée pour satisfaire la base de la demande.

Développer les réseaux est, en règle générale, une question annexe : c'est la puissance installée qui prime

Ainsi, pour un pays qui souhaite s'équiper en nucléaire et qui prévoit un accroissement de la demande de 1500 MW dans les 10 ans à venir, la question de l'achat d'un gros réacteur (de type EPR par exemple) peut se poser. Il est envisageable d'opter pour un tel choix si la puissance attendue à cet horizon est de l'ordre de 15GW au total. Si l'on considère les taux de croissance de la demande électrique de l'énorme majorité des pays, il apparaît que tous ceux dont la puissance installée en base est inférieure actuellement à de l'ordre de 5 GW n'atteindront pas une puissance suffisante pour installer un EPR dans les 10 ans prochains (période de doublement pour une demande dynamique). On peut supposer, pour ce type de pays, une puissance de pointe de l'ordre de 30 à 50% supérieure à la puissance de base. Alors, le critère pertinent pour examiner d'un coup d'œil quels sont les candidats au nucléaire est donc plus la puissance du parc que son taux de croissance, avec une zone d'intérêt au-delà de 7 à 8 GW. Mais il s'agit d'ordres de grandeurs et d'autres facteurs peuvent jouer.

Si ces critères ne sont pas remplis, il faut opter pour des réacteurs plus petits, qui sont plus chers, sauf rupture technologique attendue depuis des dizaines d'années sans percée majeure à ce jour. Développer "coûte que coûte" des grandes capacités engendrerait soit des forts risques d'instabilité de réseaux et de coupures, soit des surcoûts importants liés à la construction de capacités de réserve (typiquement des turbines à gaz).

Pour améliorer les choses, il est possible de travailler à mieux interconnecter les pays entre eux (exemple de l'Afrique du Nord ou du Golfe Arabo-persique). Il est difficile de poser des ordres de grandeurs de l'intérêt

de ces interconnexions et de leurs effets sur l'émergence plus rapides de réacteurs nucléaires de puissance importante, sans travailler sur des cas réels. Les cas où des interconnexions entre zones peu ou prou indépendantes pourraient augmenter la puissance totale et –de ce fait– permettre une construction plus facile de réacteurs nucléaires de grande taille doivent surtout être recherchés dans les connexions entre pays auxquels des tensions géopolitiques n'ont pas encore permis d'optimiser les réseaux.

A titre d'exemple de la complexité des stratégies, le Koweït a aujourd'hui une puissance de pointe de 10 GW, avec une croissance forte de la demande. On pourrait donc envisager d'y construire un réacteur de 1000 MW au début des années 2020. Toutefois, le Ministère de l'Electricité et de l'Eau souhaite par principe que la puissance du réacteur soit couverte par la puissance totale des interconnexions avec les pays voisins. Avec les prévisions actuelles, ceci rend difficile d'envisager de construire un EPR à cette échéance.

Ordre de grandeur de coûts de lignes

En règle générale, plus la production est répartie sur le territoire, meilleure est la gestion du réseau. Ainsi, c'est un avantage de diviser la puissance et de "remplacer" un projet de gros réacteur par deux petits. Cette stratégie implique de renforcer significativement moins le réseau.

En outre, il est vrai qu'un avantage de disposer des deux réacteurs au lieu d'un est de disposer d'une puissance garantie de meilleure qualité en enchaînant les périodes d'arrêt pour rechargement et en diversifiant les risques d'indisponibilité fortuite. Mais, pour un grand réseau, cette valeur est faible. En fait, elle est d'autant plus grande que le réseau est petit, ce qui disqualifierait de fait la construction d'un gros réacteur (par manque de taille du réseau).

La question abordée ci-après est celle de la construction d'un gros réacteur, dont une partie de la puissance (la moitié par exemple) serait acheminée à distance *via* un réseau THT, pour y être distribuée. C'est un cas qui ressemble un peu à celui des régions françaises PACA et Bretagne, qui bénéficient du nucléaire produit ailleurs. La comparaison porte sur cette option par rapport à la construction de deux petits réacteurs répartis.

Pour évaluer ces aspects en termes de coûts, partons de la ligne THT de Flamanville 3 qui traversera 64 communes dont 44 dans la Manche, 1 dans le Calvados, 5 en Ille-et-Vilaine et 14 en Mayenne sur

une longueur de 160 km. La ligne comptera 300 pylônes et deux postes électriques (à l'extrémité de la ligne). Le coût serait de 240 millions d'€.

Sur cette base, on peut établir que le coût d'une ligne de capacité moitié moindre, prise normalement à 500 km (distance choisie entre deux petits réacteurs pour mutualiser le réseau) serait un peu supérieur: de l'ordre de 300 à 400 millions environ, compte tenu d'ordre de grandeur des coûts des postes aux "extrémités". Ces distances correspondent à un pays dont l'étendue géographique peut justifier l'étude proposée (un petit pays choisira le réacteur de la taille la plus grande).

Si un réacteur de 1000 MW coûtait 2,5 milliards d'euros, avec un exposant de 0,6 dans la formule précédente, 2 réacteurs de 500 MW coûteraient 3,3 milliards. Et donc le coût de la ligne qui pourrait être tirée dans le cas du gros réacteur pour alimenter le réseau distant ne permet pas de compenser l'écart de coût. Même si les coûts peuvent ne pas paraître excessivement différents (ici une différence de 10%), il faut se rappeler qu'il s'agit d'un majorant et que disposer d'un réseau important offre des avantages certains en termes de qualité d'approvisionnement.

On retrouve donc le résultat selon lequel des petits réacteurs dans des petits réseaux ne sont pas une bonne solution s'il est possible d'élargir la taille du réseau, *via* une meilleure interconnexion. Il faut donc régulièrement se doter d'un réseau tant que possible bien dimensionné et ensuite y placer en priorité des réacteurs de taille importante (de l'ordre de 1000 MW ou plus), si on le peut. C'est en règle générale le choix le moins cher.

Les contre exemples existent (îles par exemple), mais

sont l'exception. On pourra aussi revisiter cette question d'ici quelques années à l'aune de l'évolution rapide de la technologie des réseaux, de leurs fonctionnalités (réseaux HVDC par exemple) et de leurs coûts. Des réseaux plus performants iront dans le sens des gros réacteurs.

Pour conclure

Au total, construire des petits réacteurs alors que des plus gros sont envisageables, si le réseau est bien dimensionné, apparaît comme une moins bonne solution économique. Sans même parler des contraintes de sites.

Si le réseau est mal interconnecté, il est fort probable que l'optimum économique commence par la mise en place d'interconnexions supplémentaires. Une décision amenant à construire plusieurs petits réacteurs sur des sites éloignés pour tenir compte du défaut de maillage du réseau manquerait de robustesse dans le temps.

Ainsi, de gros réacteurs construits dans un réseau donné impliquent des renforcements de ce réseau plus importants par rapport à la construction de réacteurs plus petits. Mais les surcoûts induits sont plus que contrebalancés par les gains économiques liés à la taille, avec les ordres de grandeur considérés.

Enfin, si les coûts d'interconnexion sont très élevés (archipels par exemple), on est ramené à de l'optimisation par sous-ensembles disjoints: des faibles puissances peuvent alors être envisagées... mais la compétitivité du nucléaire risque alors de ne pas aller de soi.

Arguments en faveur des réacteurs de petite taille

Les promoteurs de ces réacteurs avancent plusieurs arguments :

- Ils peuvent répondre à une demande d'électricité modérée
- Ils peuvent être intégrés plus facilement dans un réseau électrique de taille modeste. Il est classiquement admis qu'un nouveau réacteur ne doit pas représenter plus de 10% de la puissance déjà installée sur un réseau.
- Ils pourraient être plus rentables que des gros réacteurs, car le retour sur investissement serait plus rapide et cette différence pourrait être décisive en périodes d'incertitudes des marchés. Dans des conditions extrêmes de volatilité du prix de l'électricité, un réacteur de 300 MWe pouvait présenter des avantages économiques par rapport à un réacteur nucléaire de puissance (référence [2]).
- Ils permettent à un Etat, pour un coût d'investissement plus faible qu'un réacteur de forte puissance, d'accéder à l'énergie nucléaire.
- Ils permettent une plus grande modularité. Dans un climat d'incertitude sur la demande ou sur les prix, celle-ci peut permettre de construire un module tout en se gardant la possibilité d'en rajouter d'autres, en privilégiant la flexibilité