

se substituent avant 2031 au parc actuel, jugé trop dangereux.

Le second scénario fait l'hypothèse d'une sortie du nucléaire et d'une politique volontariste d'économies d'électricité, en particulier dans les secteurs résidentiel et tertiaire. Ces économies reposent sur deux piliers principaux. D'une part, il s'agit d'augmenter l'efficacité des appareils électriques (électroménager, audiovisuel, éclairage, froid, etc.), qui représentent plus des deux tiers de la consommation électrique des secteurs résidentiel et tertiaire ; d'importantes réductions de la consommation d'électricité sont ainsi possibles, et à faible coût. Il s'agit d'autre part de supprimer progressivement le chauffage électrique à effet Joule, au profit de pompes à chaleur ou d'autres combustibles (bois, gaz naturel).

Dans ce second scénario, le besoin d'électricité tomberait alors à 340 térawattheures en 2030. La production d'électricité, en l'absence complète de nucléaire, y serait assurée par de l'électricité d'origine renouvelable et, très partiellement, par des turbines à gaz naturel (voir la figure 1).

Depuis l'automne 2011, sont apparus de nombreuses notes ou scénarios, principalement élaborés par des groupes proches des producteurs d'électricité ou de l'industrie nucléaire (UFE, AREVA, CEA, RTE), qui mettent en scène des visions contrastées du mix électrique français et en discutent les vertus et les faiblesses. Seule l'Association *négaWatt* a publié à cette époque un scénario énergétique complet, qui ne se limite pas à l'électricité mais inclut toutes les autres demandes et offres d'énergie.

Les scénarios autres que ceux de *négaWatt* et de *Global Chance* ont une caractéristique commune : la demande d'électricité y constitue une donnée externe qui, dans la plupart des cas, est au moins aussi élevée qu'en 2010. Les économies possibles d'électricité y sont donc ignorées. Seule l'UFE (Union française de l'électricité) justifie cette position, mais à partir de considérations financières qui donnent des résultats erronés (voir l'encadré page 35).

La Commission *Énergies 2050* s'est focalisée sur la comparaison de ces scénarios, sans chercher à en évaluer la cohérence interne et les limites. Elle est ainsi

L'AUTEUR



Benjamin DESSUS, ingénieur et économiste, préside l'association *Global Chance*, composée de scientifiques s'intéressant aux enjeux environnementaux et prônant un développement mondial équilibré.

Ce que coûte et coûtera l'électricité d'origine nucléaire

Le coût de l'électricité produite par le parc nucléaire français actuel, largement amorti puisqu'il a en moyenne 26 ans, est selon la Cour des comptes de 49 euros par mégawatttheure, supérieur de 15 pour cent au coût officiel (42 euros). Mais les opérations de mise à niveau de la sûreté des réacteurs, indispensables à très court terme, et les opérations de jouvence nécessaires en cas de poursuite de l'exploitation du parc au-delà de 40 ans amènent la Cour à rehausser ce coût autour de 55 euros par mégawatttheure.

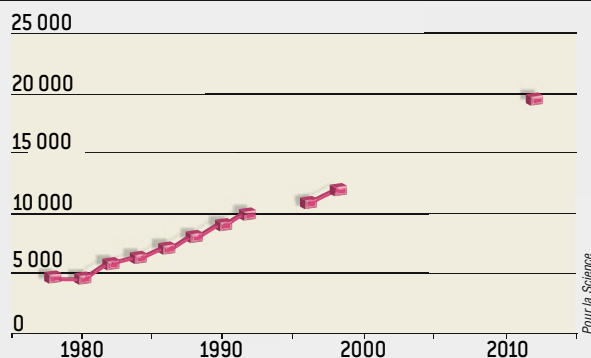
La Cour signale cependant que ce coût est très sensible au coût réel des investissements post-Fukushima ; l'estimation de ce dernier lui apparaît comme minimale et ne prend en compte qu'une infime partie de l'assurance (quelques pour mille) contre un éventuel accident grave ou majeur qui pourrait se produire sur ce parc de réacteurs anciens, dont les cœurs et les enceintes de confinement ne peuvent être réhabilités.

Il est bien sûr très difficile d'estimer à la fois la probabilité d'un tel

accident et le montant des dégâts. Sur les bases historiques d'occurrence d'accidents majeurs de réacteurs que nous avons constatés depuis 30 ans dans le monde (quatre accidents pour 470 réacteurs), l'indemnisation des 100 milliards d'euros de dégâts consécutifs à un accident majeur sur le parc français demanderait, pour constituer la cagnotte nécessaire, d'y affecter de l'ordre de 1,5 milliard d'euros par an, soit 3 euros par mégawatttheure, tout au long de la durée de vie restante du parc.

Bien entendu, on peut espérer, mais sans en être sûr, que les probabilités d'accident en France soient très inférieures aux occurrences historiques mondiales. Mais, d'un autre côté, on sait qu'un accident tel que celui de Fukushima coûtera beaucoup plus que 100 milliards d'euros (l'IRSN prévoit de l'ordre de 600 milliards pour les trois réacteurs de Fukushima).

Globalement, il paraît raisonnable, compte tenu des incertitudes nombreuses que signale la Cour, de s'attendre à un coût de l'ordre de



Évolution du coût d'investissement (en francs constants par kilowatt), de la filière électronucléaire française au cours de son histoire.

60 euros par mégawatttheure pour le parc de réacteurs actuel, si l'on souhaite (et si l'on peut, sans prise de risques trop importants) en prolonger la durée de vie de 10 à 20 ans.

En ce qui concerne la nouvelle génération de réacteurs PWR (les EPR) dont le coût d'investissement est beaucoup plus élevé que le parc ancien (3 700 euros par kilowatt contre 1 150 euros par kilowatt en moyenne pour le parc actuel), la Cour situe le coût du mégawatttheure des premiers réacteurs dans une fourchette

allant de 75 à 90 euros. Ce calcul ne tient pas compte d'un effet (à la baisse) d'apprentissage industriel éventuel pour les réacteurs suivants, qui d'ailleurs ne s'est pas produit historiquement (voir le graphique ci-dessus). À l'inverse, le calcul n'intègre aucun surcoût dû au renforcement des exigences de sûreté consécutives à l'accident de Fukushima, ni de prime d'assurance contre le risque d'accident majeur. Il semble donc raisonnable de maintenir cette fourchette de coûts.

✓ BIBLIOGRAPHIE

Les coûts de la filière électronucléaire, rapport de la Cour des comptes, janvier 2012 [disponible sur www.ccomptes.fr/fr/CC/Theme-290.html].

B. Dessus et B. Laponche, **En finir avec le nucléaire, pourquoi et comment**, Seuil, 2011.

World Energy Outlook, Agence internationale de l'énergie, 2009 [rapport téléchargeable sur www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/weo2009.pdf].

J. M. Charpin, B. Dessus et R. Pellat, **Étude économique prospective de la filière électrique nucléaire**, rapport au Premier ministre Lionel Jospin, La Documentation française, 2000 [www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/004001472/0000.pdf].

Études de l'association *Global Chance* : www.global-chance.org

tombée dans le travers d'une confusion entre « système énergétique » et « mix électrique » en 2050, sans analyser ce qui détermine les demandes nationales d'énergie ou d'électricité.

La confusion entre optimisation du système électrique et optimisation du mix de production électrique a des conséquences importantes sur les résultats économiques des comparaisons. Dans le paradigme du « mix », on est tout naturellement conduit à donner un poids essentiel (aux côtés de critères physiques ou techniques, comme l'intermittence ou les émissions de CO₂ mises en jeu) aux coûts de production du kilowattheure pour chacune des filières. La facture des ménages comme celle de la collectivité s'en déduisent aisément, les divergences des scénarios sur la demande électrique étant marginales.

Le nucléaire, un coût difficile à estimer

Pour la plupart des filières de production d'électricité arrivées à maturité, on connaît assez bien les coûts d'investissement des unités. Il en est de même pour l'éolien terrestre. Les fourchettes d'appréciation sont moins étroites pour le secteur photovoltaïque et l'éolien marin. Quant aux coûts des combustibles fossiles (charbon, gaz, etc.), les incertitudes sont telles qu'il semble prudent d'établir des fourchettes assez larges de coûts (à la hausse), en tenant compte de l'incidence du coût des émissions de CO₂ associées (voir la figure 2).

La question du coût du kilowattheure d'origine

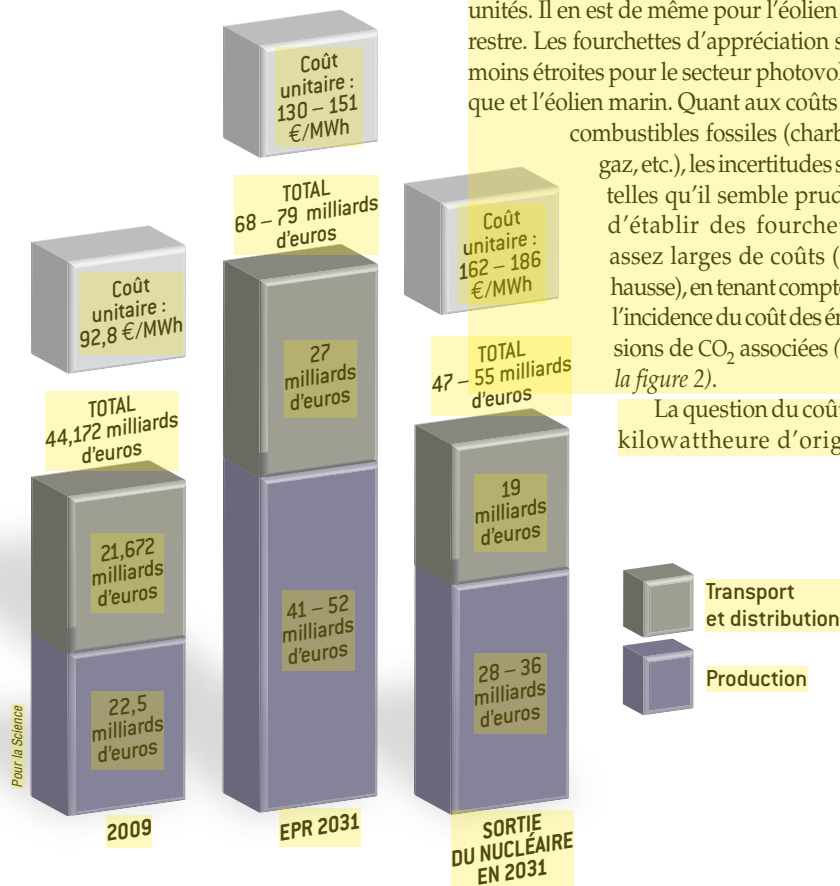
nucléaire est bien plus difficile. En effet, il n'existe pas de marché international du nucléaire qui permettrait d'établir des coûts sur des bases statistiques sérieuses. Il faut donc se fonder sur des données nationales, qui sont très peu transparentes. C'est cette question controversée du coût actuel et futur de la filière électronucléaire que la Cour des comptes vient d'analyser, dans un rapport remis au Premier ministre le 31 janvier 2012. Les chiffres obtenus par cette autorité indiquent un coût actuel de production d'environ 50 euros par mégawattheure, qui devrait notablement augmenter dans le futur (voir l'encadré page 33).

Dans l'esprit de la plupart des décideurs, on dispose dès lors de l'ensemble des données permettant de comparer le coût unitaire des différentes filières de production d'électricité, et donc celui des factures électriques, en tenant éventuellement compte des spécificités des réseaux de transport et d'électricité associés aux différents scénarios (les réseaux intelligents d'électricité ou *smart grids*, par exemple, voir page 15 dans ce numéro). Il en est de même pour les investissements à consentir.

Sur ces bases, il devient assez facile de classer les scénarios par ordre de mérite économique décroissant. C'est à cet exercice que la Commission *Énergies 2050* s'est livrée. Elle a distingué trois grandes options. La première est de ne rien faire ou presque : se contenter de remettre aux normes les centrales nucléaires actuelles pour prolonger au maximum leur durée de vie, si possible à 60 ans (ce qui revient à accepter le risque d'un accident majeur). On évite ainsi à la fois d'avoir à construire un nouveau parc nucléaire, et on laisse à nos petits-enfants plutôt qu'à nous ou à nos enfants la délicate question du démantèlement, dont on sait qu'il va coûter cher, sans que l'on soit en mesure de préciser la note.

La deuxième option considérée par la Commission *Énergies 2050* est de remplacer le parc actuel à la fin de sa durée de vie par un parc de réacteurs de type EPR, réputés beaucoup plus sûrs. Enfin, la troisième option consiste à remplacer le parc actuel par des solutions à énergies renouvelables, complétées éventuellement par de l'électricité d'origine fossile.

La Commission *Énergies 2050* conclut que la première option – ne rien faire ou presque – est celle qui coûte le moins cher. Ce n'est guère étonnant, puisque l'écart de coût entre le nucléaire ancien rénové (autour de 50 euros par mégawattheure



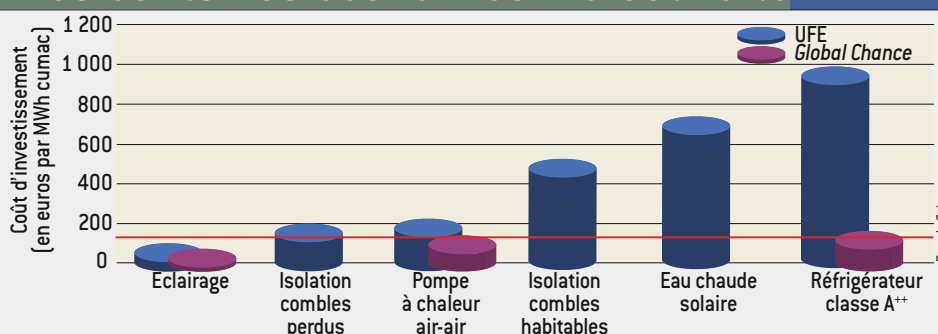
3. COMPARAISON DES FACTURES annuelles hors taxes, pour l'ensemble des usagers, de la production d'électricité en France. L'année 2009 est ici comparée à l'année 2031 pour les deux scénarios considérés par l'association *Global Chance*.

Le calcul des coûts des économies d'électricité

Pour estimer l'intérêt d'un investissement d'économie d'énergie, la méthode la plus classique consiste à calculer un temps de retour de l'investissement, temps au bout duquel le surinvestissement dû au choix d'un appareil de meilleure qualité énergétique est remboursé par les économies financières associées aux économies d'énergie réalisées.

Prenons l'exemple d'un réfrigérateur haut de gamme (classe A++) dont le surcoût, par rapport au réfrigérateur standard (classe A), est de 100 euros, mais qui permet d'économiser 100 kWh par an, avec un tarif d'électricité pour le consommateur de 13 centimes par kWh. Le temps de retour de ce surinvestissement est de $100 / (100 \times 0,13) = 7,7$ ans.

Il existe une autre méthode de calcul, qui fait appel à la notion de « cumul actualisé des économies d'énergie » au cours de la durée de vie de l'appareil investi. L'introduction d'une préférence pour le présent



Classement par ordre de mérite économique de quelques mesures d'économie d'électricité selon l'UFE et selon Global Chance. Les opérations dont le coût est inférieur au tarif de l'électricité (ligne horizontale) sont rentables.

par rapport au futur peut être traduite par le choix d'un taux d'actualisation. Si un taux de 10 pour cent est choisi par un acteur économique, cela traduit le fait qu'il lui est équivalent de disposer aujourd'hui d'un euro ou dans un an de $1/(1,10)$ euro, ou dans deux ans de $1/(1,10)^2$ euro, etc. Dans cette logique, on calcule le cumul actualisé des économies annuelles réalisées pendant la vie de l'appareil pour déterminer un « coût d'investissement au kilowattheure cumulé actualisé (ou kWh cumac) ».

Ce coût d'investissement est alors comparé au prix payé par l'acteur pour se fournir en électricité.

Dans l'exemple du réfrigérateur, le cumul actualisé des économies d'électricité sur 15 ans (durée de vie supposée de l'appareil) est égal à : $100 \text{ kWh} (1 + 1/1,10 + 1/1,10^2 + \dots + 1/1,10^{14}) = 840 \text{ kWh}$. Il aura donc fallu investir 100 euros pour économiser 840 kWh cumulés actualisés, soit 120 euros par MWh cumac, ou 12 centimes par kWh cumac. Dans ce cas, la comparaison

avec le tarif électrique (13 centimes) indique que l'investissement d'économie est rentable.

C'est à partir de ce type de calculs que l'UFE a élaboré un ordre de mérite des mesures d'économie d'électricité (voir le graphique). Mais ses résultats sont erronés. Sur l'exemple du réfrigérateur, l'UFE trouve, sans explications, un coût cumac de 960 euros par MWh, huit fois supérieur à la valeur obtenue plus haut et qui ne correspond pas aux coûts constatés sur le marché actuel.

selon son estimation) et les solutions à énergies renouvelables ou les réacteurs EPR va de 25 à 40 euros par mégawattheure selon les filières.

Mais l'étude de la Commission ne va pas plus loin : pas d'analyse des factures globales annuelles pour la collectivité et les ménages, pas d'analyse de scénarios se distinguant par la demande électrique, pas d'analyse des coûts d'économie d'énergie produits par l'UFE et par Global Chance. Il y a là une carence significative de l'ostracisme dans lequel est maintenue en France la question des économies d'électricité...

Quand on compare par exemple les scénarios « Sortie du nucléaire en 2031 » et « EPR 2031 » mentionnés plus haut, on constate en effet que ce sont les économies d'électricité qui donnent une justification non seulement physique, mais aussi économique, au scénario de sortie du nucléaire. Les coûts au kilowattheure de ces mesures d'économie sont nettement plus faibles en moyenne que celui du kilowattheure distribué à l'utilisateur : ils sont de l'ordre de 9 centimes d'euro par kilowattheure économisé, tandis que le kilowattheure consommé coûte à l'utilisateur

environ 13 centimes. Les économies réalisées sur les quantités d'électricité à produire, à transporter et à distribuer constituent la part principale de l'avantage économique calculé.

Sortir du nucléaire en 2031 est possible

Dans le scénario « Sortie du nucléaire en 2031 », le coût du kilowattheure est certes supérieur de 20 pour cent, mais la facture globale (et donc celle des ménages) est inférieure de 25 pour cent. Une analyse de sensibilité au coût du nucléaire montre qu'avec un coût de 60 euros par mégawattheure, la facture annuelle dans le scénario « EPR 2031 » tomberait en 2031 à 63 milliards d'euros et se situerait en haut de la fourchette des coûts globaux annuels du scénario « Sortie du nucléaire en 2031 ». Il n'est ainsi pas sûr, d'un strict point de vue économique, que la stratégie de prolongation de la durée de vie du parc actuel soit la meilleure.

Au-delà du débat sur les chiffres, on voit bien apparaître le risque que fait courir une analyse du mix de production

d'électricité sans se préoccuper du niveau de demande et de sa maîtrise.

Le débat énergétique de la campagne électorale est bienvenu dans un pays où il est resté confiné trop longtemps dans les seules sphères du pouvoir exécutif et de l'administration. Mais il faut prendre garde qu'il ne se réduise pas très vite au seul débat sur la production d'électricité et à des considérations purement économiques.

Un an après le sommet de Copenhague et l'accident de Fukushima, les œillères de l'économisme productif risquent de nous faire oublier les enjeux principaux de la transition énergétique, et de nous inciter à poursuivre, par conservatisme méthodologique, des politiques inadaptées aux enjeux du long terme. Parmi ces enjeux et ces risques figure l'irréversibilité du nucléaire, qui laisse aux décennies futures, parfois lointaines, des coûts considérables que le calcul économique peine à prendre en compte.

Prenons garde enfin que la focalisation actuelle des principales forces politiques sur le débat économique n'ait pas aussi pour conséquence, voire pour fonction chez certains, de passer Fukushima par pertes et profits.