

Nucléaire On/Off

Tout le catalogue sur
www.dunod.com



François LÉVÊQUE

Nucléaire On/Off

Analyse économique d'un pari

DUNOD

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.

Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2013
ISBN 978-2-10-070510-8

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

À Ch. L.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	XI
---------------------	----

PARTIE 1

LES COÛTS DU NUCLÉAIRE : REPÈRES ET INCERTITUDES

1 L'addition des coûts	3
La notion de coût	4
Coût social, coût externe et coût privé	6
Les effets externes en matière d'indépendance et de sécurité	7
Le prix du carbone	9
Le démantèlement et les déchets : quel taux d'actualisation choisir ?	14
La responsabilité en cas d'accident de réacteur	24
Les coûts techniques et financiers de production	25
Comment additionner les coûts ? La méthode du coût moyen actualisé	28
2 La malédiction des coûts croissants	31
L'escalade des coûts du nucléaire	32
Comment expliquer la différence observée entre la France et les États-Unis ?	37
L'escalade va-t-elle se poursuivre ?	40
3 Le MWh nucléaire et les autres	48
La compétitivité relative du nucléaire par rapport au gaz et au charbon	49
La compétitivité du nucléaire et des énergies renouvelables	54

PARTIE 2

LE RISQUE D'ACCIDENT NUCLEAIRE MAJEUR :
CALCUL ET PERCEPTION DES PROBABILITES

4	Calculer le risque	63
	Un coût de 0,10 €/MWh, 1 €/MWh ou 10 €/MWh ?	63
	La fréquence calculée d'accident majeur	67
	L'écart entre le nombre d'accidents observés et le nombre d'accidents prévus par les modèles	71
5	Probabilités perçues et aversion aux désastres	80
	Les biais de perception des probabilités	80
	Des biais de perception défavorables au nucléaire	87
6	La magie bayésienne	93
	La règle de Bayes-Laplace	93
	Avons-nous la bosse des statistiques ?	96
	Le choix de la probabilité <i>a priori</i>	99
	Prédire la probabilité de l'événement d'après	102
	Quelle est la probabilité d'une fusion de cœur demain dans le monde ?	105

PARTIE 3

LA RÉGULATION DE LA SÛRETÉ : ANALYSE
DES CAS AMÉRICAIN, FRANÇAIS ET JAPONAIS

7	La nécessité de réguler la sûreté nucléaire	113
	Des incitations privées insuffisantes	114
	Responsabilité civile	118
	La responsabilité civile du nucléaire dans les faits	120
	Une subvention déguisée ?	122
8	Comment réguler ? Les fondamentaux	126
	La régulation de sûreté vue par l'ingénieur	126
	La régulation japonaise : l'exemple à ne pas suivre	128
	La capture du régulateur japonais par l'industrie	134

9 Quel objectif de sûreté fixer et comment l'atteindre ?	138
Normes technologiques <i>versus</i> normes de performance aux États-Unis	140
Le choix d'un objectif global de sûreté : des mots et des chiffres	144
L'approche française aux antipodes du modèle américain	149
Le régulateur et le régulé : ennemis ou pairs ?	155
Mérites et défauts des régulations américaine et française	160

PARTIE 4

**POLITIQUES NATIONALES,
GOUVERNANCE INTERNATIONALE**

10 L'entrée dans le nucléaire	170
Des atomes pour la paix	171
Les pionniers et les suiveurs	174
Les prétendants	180
11 La sortie du nucléaire	183
Sortie accélérée ou progressive, l'hésitation allemande	183
La France, fermeture prématurée d'une centrale et réduction de la voilure nucléaire	190
12 Gouvernance supranationale : les leçons de l'Europe	197
Pourquoi le niveau national ne suffit-il pas ?	197
Les normes européennes de sûreté	200
La mosaïque européenne de la responsabilité	202
La difficile cohabitation entre pays européens pro- et anti-nucléaire	206
13 La gouvernance internationale contre la prolifération, la politique et le commerce	214
L'AIEA et le TNP : forces et faiblesses	215
Le commerce nucléaire	217
Modèle de l'industrie de défense ou de l'industrie parapétrolière ?	221
Le contrôle des exportations	228
Conclusion	241
Notes et références	247
Index	271

INTRODUCTION

L'énergie nucléaire est-elle devenue trop chère et trop dangereuse ? Ne suffit-il pas de lire les journaux pour s'en convaincre ? Les chantiers de construction de nouvelles centrales nucléaires en France et en Finlande ont connu des retards et des dépassements de budget considérables. Les États-Unis, submergés par le gaz de schiste, se détournent du nucléaire. Un pays reconnu pour son savoir-faire technologique, le Japon, n'a pas été capable d'éviter un accident majeur. Enfin, au Moyen-Orient, l'Iran, sous prétexte de développement énergétique, est vraisemblablement en train de se doter de la bombe atomique. L'affaire semble entendue : poussé par la croissance de la demande mondiale en énergie et la nécessité de réduire les émissions de CO₂, le nucléaire devait au début du nouveau millénaire se développer un peu partout sur la planète, il est aujourd'hui sur une voie de garage. Mais ce diagnostic est-il sûr ? Si tel est le cas, il faut organiser le repli : étaler la fermeture des réacteurs pour éviter un trop brusque manque d'électricité ; développer le démantèlement, et le stockage des déchets ; aider la filière industrielle du nucléaire à faire face à la crise et ses effets négatifs sur l'emploi ; réduire les budgets de R&D consacrés aux technologies nucléaires de demain et les réallouer aux énergies renouvelables. Si tel n'est pas le cas, les décisions économiques et politiques doivent être différentes. Mieux vaut donc se donner la peine de regarder les choses de près. Examiner en détail les coûts, les dangers, les risques, les mesures de sûreté, les règles de la gouvernance internationale de l'atome, etc. En bref, étudier et comprendre l'économie de l'énergie nucléaire à l'échelle de la planète. Tel est le parti de cet ouvrage.

Il est le résultat d'un double pari.

Le premier est qu'une analyse ne prenant pas fait et cause pour ou contre l'énergie nucléaire peut intéresser les lecteurs.

J'espère montrer que l'absence de position normative sur la question du maintien ou de la sortie du nucléaire ne conduit pas nécessairement à délivrer de l'eau tiède. La démarche économique ici adoptée est positive : il s'agit de comprendre les situations, d'expliquer les phénomènes, et de prévoir certaines évolutions futures. En un mot, de s'intéresser aux conséquences : conséquences politiques pour un pays d'entrer ou de sortir du nucléaire,

conséquences de l'introduction d'une taxe carbone sur la compétitivité du nucléaire, conséquences des accidents observés et des biais de perception des risques par les citoyens, conséquences de la libéralisation des marchés électriques sur l'investissement nucléaire, conséquences du nationalisme industriel dans l'exportation de réacteurs, etc. L'économie nous sert ici à analyser les effets, non à dicter aux décideurs publics et privés les choix à effectuer, encore moins à enseigner aux citoyens la seule bonne façon de penser et d'agir.

Second pari : reconnaître les puissantes incertitudes qui marquent le coût, le risque, la régulation et la politique de l'énergie nucléaire est la meilleure façon d'éclairer les choix individuels et collectifs. L'ouvrage aurait pu porter comme sous-titre *Les lumières de l'incertitude*. Croire ou faire croire qu'il existe un vrai coût du nucléaire, élevé ou bas ; que le risque d'un nouvel accident majeur dans le monde d'ici vingt ans est certain ou, à l'opposé, qu'une catastrophe est impossible en Europe ; que la régulation de la sûreté est parfaite en France ou, inversement, inféodée au lobby nucléaire ; que la filière nucléaire nationale est sans aucun doute un atout pour la balance commerciale future de la France, ou va au contraire droit dans le mur, etc., autant d'énoncés catégoriques qui servent d'abord à habiller des décisions ou des prises de position déjà arrêtées. Les nombreuses questions sur l'énergie nucléaire doivent être tranchées en incertitude, ce qui exige de la cerner. L'ouvrage montre comment les débats sur le nucléaire peuvent être éclairés par la théorie de la décision – dite justement en incertitude –, par l'analyse probabiliste qui permet de réviser les croyances, ou encore par la théorie de l'électeur médian et du marché politique qui expliquent certaines décisions publiques.

L'ouvrage est divisé en quatre parties, consacrées successivement au coût, au risque, à la régulation et à la politique. Chaque partie approfondit son sujet avec un grand niveau de détails sur les faits, les explications théoriques et les références aux travaux académiques. Ce choix est guidé par la conviction qu'un certain niveau d'immersion du lecteur dans un sujet lui apporte, en proportion, beaucoup plus d'aperçus pénétrants qu'un résumé synthétique de thèses et d'arguments.

Les coûts du nucléaire : repères et incertitudes

Il n'est pas surprenant que l'ouvrage d'un économiste débute par une partie entièrement consacrée à la compétitivité de l'énergie nucléaire : son coût est-il plus faible, ou plus élevé, que celui de l'électricité produite à partir du

charbon, du gaz ou du vent ? La construction d'une centrale nucléaire est-elle rentable pour un producteur d'électricité ? À l'échelle d'un pays, l'investissement dans la technologie nucléaire profite-t-il à l'intérêt général ? L'énergie nucléaire a été marquée par une escalade des coûts. À quelles conditions pourra-t-elle demain y échapper et la compétitivité relative du nucléaire éviter ainsi de s'éroder ? Les considérations financières et économiques offrent aujourd'hui des arguments de poids aux militants anti-nucléaire.

Le risque d'accident nucléaire majeur : calcul et perception des probabilités

L'élévation du niveau de sûreté est l'une des causes du renchérissement de l'énergie nucléaire. Les risques d'accident ainsi que les efforts pour les limiter sont étudiés dans la deuxième partie. D'un côté, même si le risque nucléaire reste difficile à mesurer précisément, il peut être analysé avec détachement, en employant toute une batterie d'instruments et de méthodes. En tendance, il décroît. D'un autre côté, le risque perçu par le public, à la suite des grandes catastrophes comme Tchernobyl et Fukushima Daiichi, augmente. L'attitude du public face au danger nucléaire est-elle irrationnelle ? La décision publique doit-elle se fonder sur l'évaluation du risque par les experts ou par les citoyens ? L'écart entre risque calculé et risque perçu peut-il être réduit ? Cette partie détaille les biais de perception des probabilités mis en évidence par la psychologie expérimentale, discipline qui influence fortement aujourd'hui l'analyse économique. Elle montre comment l'analyse probabiliste permet de conjuguer l'*a priori* sur le danger et l'apport d'une connaissance objective.

La régulation de la sûreté : analyse des cas américain, français et japonais

Il y aura d'autant moins d'accidents que la régulation de la sûreté nucléaire sera bien conduite. Comment cette technologie peut-elle inspirer la confiance des citoyens si les normes de sûreté des réacteurs sont mal conçues par les autorités, ou inappliquées par les exploitants ? Mais comment parvenir à une régulation efficace ? L'affaire n'est pas simple, car la régulation de la sûreté est cernée d'imperfections et entourée d'incertitudes. La troisième partie de l'ouvrage analyse de près plusieurs cas de figure : la régulation japonaise, en tant qu'exemple à ne pas suivre, ainsi que l'a révélé l'accident de Fukushima Daiichi ; les régulations américaine et française, très

différentes mais toutes deux exemplaires, car fondées sur la transparence, l'indépendance et la compétence de leurs autorités de sûreté nucléaires. Si ces critères étaient partout appliqués dans le monde, le risque d'accident serait significativement réduit.

Politiques nationales, gouvernance internationale

La dernière et quatrième partie de l'ouvrage porte sur la politique, pouvoir de décision dans l'incertain. Elle joue un rôle considérable dans l'énergie nucléaire. En témoigne la diversité des choix nationaux. Certains pays sont entrés dans le nucléaire pour des raisons à la fois militaires et économiques, quand d'autres, le plus grand nombre en fait, ont uniquement développé les applications civiles de l'atome. Aujourd'hui, des pays veulent sortir du nucléaire, tandis que d'autres veulent y entrer. Pourquoi ? À ces politiques nationales s'ajoutent des mécanismes de gouvernance internationale qui tentent de contenir les risques de prolifération et d'améliorer la sûreté des réacteurs et de leur exploitation. La sécurité et la sûreté présentent en effet une dimension planétaire. Ces tentatives de gouvernance supranationale doivent composer avec la souveraineté des États. Les intérêts économiques et commerciaux des pays exportateurs de technologie nucléaire entrent également en jeu. L'étude du marché international des réacteurs montre à quel point il est encore fortement déterminé par des considérations politiques et stratégiques.

L'approche adoptée dans cet ouvrage est non partisane : ni nucléariste, ni écologiste. Elle ne se prétend pas pour autant objective. Comme dans tout essai, les questions retenues, les angles choisis, les faits sélectionnés témoignent de la personnalité de l'auteur et de sa situation. J'enseigne à l'École des mines de Paris, dont de nombreux bâtisseurs de la filière nucléaire française sont issus. Nombreux sont mes anciens élèves qui y travaillent aujourd'hui. Par ailleurs, des recherches de mon laboratoire sont financées par EDF, et ma société de conseil compte cette entreprise parmi ses clients ainsi que d'autres électriciens européens. Ces états de service pourront conduire certains lecteurs à douter de l'indépendance des points de vue exprimés dans cet ouvrage, voire à soupçonner son auteur d'être « vendu » au lobby nucléaire. D'autres, connaissant la liberté intellectuelle qui prévaut à l'École des mines et l'esprit ouvert des ingénieurs de l'énergie, écarteront vite ce soupçon. D'autres encore se diront qu'après tout, les liens de l'auteur avec les « nucléocrates » sont le garant de la solidité des informations avancées.

PARTIE 1

LES COÛTS DU NUCLÉAIRE : REPÈRES ET INCERTITUDES

Le débat est passablement confus. La production d'électricité nucléaire est présentée au public comme étant tantôt bon marché, tantôt trop chère. Cette discordance fait douter le consommateur et le citoyen des chiffres qu'il croit manipulés. Chaque partie défendrait son intérêt et le vrai coût du nucléaire resterait caché.

Il est vrai que les entreprises et les associations militantes adoptent des positions variables selon ce qui les arrange. Mais il est également vrai que l'idée d'un coût unique et véritable est un leurre. En effet, ainsi que nous le verrons dans ce chapitre, LE coût du nucléaire n'existe pas : il faut évoquer LES coûts du nucléaire et distinguer le coût privé du coût social. Le coût privé est celui sur lequel un opérateur s'interroge quand il réfléchit à l'opportunité de construire une centrale nucléaire. Il varie en fonction des investisseurs, notamment de leur attitude face au risque. Le coût social en revanche pèse sur la société, celle-ci pouvant tenir compte, par exemple, des dangers de la prolifération ou des émissions de carbone ainsi évitées. Le coût de construction d'une nouvelle centrale nucléaire diffère également selon les pays. Chercher à savoir si le nucléaire est rentable ou non, bénéfique à la société ou non, ne relève donc pas de la quête du « vrai » coût, mais requiert, outre la collecte de données, d'élaborer des méthodes et de formuler des hypothèses. C'est moins simple que de bombarder le public de chiffres contradictoires, mais plus sûr pour éclairer les choix économiques des entreprises et de la puissance publique.

Sans évaluation des coûts, il n'est pas possible d'établir le prix de revient et donc de comparer la production d'électricité nucléaire avec celle issue de technologies rivales. Vaut-il mieux construire une centrale à gaz, un réacteur nucléaire ou un parc éolien ? Quelle est la technologie qui conduit au coût du kWh le plus bas ? À quelles conditions financières, de l'environnement réglementaire, ou du prix du carbone, la production nucléaire peut-elle être rentable pour l'investisseur privé ? Du point de vue de l'intérêt général, la prise en compte du coût du démantèlement et du stockage des déchets modifie-t-elle la compétitivité du nucléaire ?

Cette partie répond à ces questions en trois chapitres. Dans le premier chapitre, les différents postes de coûts du nucléaire sont observés de près. Leur sensibilité à différents facteurs (taux d'actualisation, prix du combustible, par exemple) est étudiée pour comprendre les fortes variations qui les affectent. La dynamique des coûts est retracée dans le deuxième chapitre. Historiquement, la technologie nucléaire se caractérise par des coûts croissants. Or, le plus probable est que cette tendance, liée en particulier aux préoccupations de sûreté, se poursuive. La médiocre compétitivité-coût du nucléaire, analysée dans le troisième chapitre, offre aujourd'hui un argument de poids aux opposants à cette technologie.

L'ADDITION DES COÛTS

En France, le coût de revient du MWh produit par les centrales nucléaires existantes est-il de 32 € ou de 49 € ? L'investissement dans un réacteur de nouvelle génération de type EPR est-il proche de 2000 €/kW ou plutôt du double ?

La controverse sur le coût de revient supporté par EDF a surgi à l'occasion d'une nouvelle loi sur l'électricité adoptée en 2010¹, qui oblige l'opérateur historique à céder une partie de la production du parc nucléaire à ses concurrents situés en aval. Selon cette loi, le prix de cession est fixé par la puissance publique et doit refléter les coûts de production du parc nucléaire actuel. GDF Suez, principal concurrent d'EDF, les estime à environ 32 € le MWh, tandis que l'exploitant du parc nucléaire les évalue à presque vingt € de plus. Comment un tel écart peut-il s'expliquer ? S'agit-il uniquement de chiffres jetés en l'air par un vendeur et un acheteur, soucieux chacun d'influencer le gouvernement pour obtenir le prix le plus favorable ? Ou bien une des deux valeurs est-elle la bonne, l'un ayant raison et l'autre tort ?

Pour les investissements dans de nouvelles centrales nucléaires, les chiffres sont également très discordants. Prenons l'exemple de l'EPR, le réacteur de troisième génération d'Areva. Il a été vendu en Finlande sur la base d'un coût de construction de 3 milliards d'euros, soit environ 2 000 € par kW de capacité installée. Ce coût devrait finalement doubler. À Taishan, en Chine, où deux EPR sont en cours de construction, la facture devrait avoisiner 4 milliards d'euros, soit un ordre de grandeur de 2 400 € par kW installé. Comment un simple changement géographique ou temporel peut-il faire varier dans de telles proportions le coût de construction d'un même équipement ?

LA NOTION DE COÛT

La disparité dans le chiffrage dérange car l'idée selon laquelle le coût est une valeur unique, objective en quelque sorte, est bien ancrée dans les esprits. Donnez un bien à évaluer à un économiste, et il vous délivrera, en bon géomètre, sa valeur. Cela ne marche pas comme cela, hélas. Contrairement aux grandeurs physiques, le coût n'est pas une donnée objective. Ce n'est pas une distance qui s'évaluerait avec une certaine marge d'erreur imputable au manque de précision des télémètres, même pour le plus perfectionné d'entre eux ; il n'est pas non plus comparable à la masse d'un corps invariante et intrinsèque. Le coût ressemble plutôt au poids. Prenez n'importe quel objet : sous l'effet de la force gravitationnelle, il pèsera moins en altitude qu'au bord de la mer, et plus au pôle qu'à l'Équateur. Pareillement, le coût dépend de l'endroit où l'on se place. Il diffère selon que l'on adopte la position d'un investisseur privé ou celle de la puissance publique, il diffère si l'opérateur est localement soumis à la concurrence ou s'il est placé en monopole, il diffère en fonction de la richesse en hydrocarbures du territoire national, etc. Changez de référentiel et votre coût varie.

Dans le monde économique, l'opportunité joue le rôle de la gravité pour la physique. Face à deux choix qui s'excluent, l'agent économique perd l'occasion de réaliser l'un s'il choisit l'autre. Si je vais au cinéma ce soir, je rate un concert ou un dîner entre amis. Le coût de ce renoncement est appelé coût d'opportunité. Les agents économiques étant le plus souvent placés devant des choix non binaires, le coût d'opportunité désigne plus précisément la valeur de la meilleure autre option non réalisée, ou seconde meilleure option. Comme les préférences sont hétérogènes (Pierre préfère un film à une soirée entre amis, Jean l'inverse), le coût d'opportunité dépend de l'agent économique considéré. Il est donc éminemment variable. À la limite, il y a autant de coûts que de consommateurs ou de producteurs. Pour la question qui nous intéresse, le coût de construction d'un parc nucléaire pour la Russie, exportatrice de gaz, sera différent de celui qu'aura à supporter un autre État. L'équipement en centrales électronucléaires plutôt qu'en turbines à gaz à cycle combiné permet en effet de destiner le gaz produit localement à un débouché plus rémunérateur. La notion économique de coût d'opportunité nous éloigne définitivement de l'idée d'un coût qui serait une grandeur objective et invariante.

Le coût se rapporte alors non à un bien ou à un service, mais à une décision ou à une action. Le coût d'opportunité n'est pas le coût de quelque chose, mais le coût de *faire* (ou de ne pas faire) quelque chose. Cela vaut

bien entendu pour le coût de production. Il est défini par l'économiste à partir d'une équation, la fonction de production. Cette dernière relie, pour une technologie donnée, la quantité produite – un kWh par exemple – au minimum de facteurs de production nécessaires pour y parvenir : travail, capital, ressources naturelles. La fonction de production permet de définir le coût d'une unité supplémentaire du bien, ou coût marginal, l'opportunité de cette production additionnelle se mesurant par rapport à la décision de ne pas la produire. La fonction de production permet aussi de définir le coût fixe de production par rapport, cette fois, à l'option alternative de rien produire du tout. Son coût n'est pas nul car, avant de produire la première unité, il a fallu investir dans des bâtiments et des machines. Alors même qu'on n'utilise pas l'infrastructure, il faut en payer les traites.

Pour évaluer officiellement le coût d'un bien ou d'un service, mieux vaut s'adresser au comptable et à ses méthodes. Il calculera les charges directes, c'est-à-dire les coûts immédiatement imputables au produit (par exemple, les achats d'acier pour la fabrication d'une voiture) et indirectes (par exemple, les dépenses de R&D, les frais généraux), en fonction de diverses clés de répartition. Il distinguera les charges d'exploitation et de maintenance, les dépenses en capital à partir des fonds propres et l'emprunt ayant permis les investissements. Pour l'année 2010, la Cour des comptes² évalue ainsi le coût comptable, hors démantèlement, de la production nucléaire d'EDF à 32,30 €/MWh. Ce chiffre correspond à des dépenses annuelles d'exploitation et de maintenance de près de 12 milliards pour une production de 408 TWh et un coût annuel du capital de 1,3 milliard, ce dernier se réduisant ici à l'amortissement comptable. Bien entendu, le coût de production auquel parvient le comptable dépend de la méthode qu'il retient. En utilisant la méthode du coût comptable complet de production, la Cour des comptes aboutit à un montant de 39,80 €/MWh. Ce chiffre est plus élevé que le précédent, car la première méthode citée n'inclut que l'amortissement en coût de capital et elle ne tient pas compte du fait que le parc serait plus cher, en euros constants, à construire aujourd'hui qu'il ne le fut hier. Dans la méthode du coût comptable complet de production, le capital non amorti est cette fois rémunéré, et l'investissement initial est remboursé en monnaie constante.

Observons que ni l'approche comptable, ni l'approche économique, ne permettent d'avancer un coût unique. Pour le kWh nucléaire, comme pour n'importe quel bien ou action, l'idée d'un vrai coût ou d'un coût intrinsèque que la comptabilité ou l'économie permettrait d'approcher à travers leurs méthodes est une chimère. En revanche, comme nous le verrons, leurs

méthodes permettent de bien comprendre les variations de coûts, d'identifier les facteurs déterminant les coûts, de comparer les coûts selon les technologies, ou encore d'observer l'efficacité des opérateurs. Informations utiles et nécessaires pour décider d'investir ou non dans tel ou tel moyen de production d'électricité.

COÛT SOCIAL, COÛT EXTERNE ET COÛT PRIVÉ

Ainsi, le coût n'est pas invariant. Parfois, il n'est même pas chiffrable. Cette seconde complication concerne les effets externes de la production électronucléaire, qu'ils soient négatifs – comme la production fatale de déchets radioactifs et les dommages en cas d'accident – ou positifs – à l'instar de la production évitée d'émissions de dioxyde de carbone et de la moindre dépendance énergétique. Ces effets externes (ou *externalités* dans le jargon économique) sont à l'origine d'un écart entre le coût privé – celui subi par le producteur ou le consommateur – et le coût social – celui que supporte la société dans son ensemble.

La théorie économique prescrit de combler cette différence. En effet, à cause de cette dernière, les décisions des ménages et des entreprises ne sont alors plus optimales pour l'intérêt général ; elles ne maximisent plus la richesse pour l'ensemble de la société. Par exemple, si la production d'électricité à partir de charbon est moins chère de 10 € par MWh que la production d'électricité à partir du gaz, mais que le dommage dû à ses émissions de carbone est de 11 € plus élevé, il vaut mieux substituer le gaz au charbon. À défaut, la société perd 1 euro pour chaque MWh produit. Mais, en l'absence d'une taxe ou d'un autre instrument faisant payer les émissions de carbone, l'investisseur privé optera pour la construction de centrales à charbon. D'où le précepte économique d'internaliser les effets externes.

Comment évaluer les externalités pour parvenir à déterminer le coût social du nucléaire ? Quel est le coût du démantèlement des réacteurs et des déchets à vie longue ? Quel prix fixer pour l'émission d'une tonne de carbone dans l'atmosphère ? Comment appréhender le coût d'un accident nucléaire majeur ? Comment calculer les effets externes de la production électronucléaire sur la sécurité en matière d'indépendance énergétique ou de risque de prolifération des armes nucléaires ?

Nous verrons que la réponse à ces questions soulève moins de problèmes théoriques ou conceptuels que de difficultés pratiques dues au manque de données et d'informations. Partant, les effets externes positifs et négatifs de

l'énergie nucléaire ne sont que partiellement internalisés. Il en est d'ailleurs de même pour les autres énergies.

LES EFFETS EXTERNES EN MATIÈRE D'INDÉPENDANCE ET DE SÉCURITÉ

Débutons par la question la plus difficile : le chiffrage des effets sur l'indépendance nationale. C'est un point tellement compliqué qu'il n'a même pas encore été tenté. Les analyses restent qualitatives. On entend souvent que la production électronucléaire contribue à l'indépendance énergétique du pays qui la développe. Elle apporterait une plus grande sécurité énergétique. Ces allégations justifient de nombreuses initiatives politiques (*voir chapitre 10*) mais les termes du débat sont confus. Traditionnellement, la dépendance énergétique se réfère à l'approvisionnement en produits pétroliers. Ceux-ci grèvent la balance commerciale des pays importateurs et les soumettent à des chocs de prix et à des risques de pénurie en cas de conflits internationaux. La production électronucléaire ne se substitue cependant que de façon marginale au pétrole et à ses dérivés. Dans le monde, 5 % seulement de l'électricité sont produits à partir de dérivés du pétrole.

La contribution du nucléaire à l'indépendance et à la sécurité énergétique doit plutôt être recherchée du côté du gaz. En la matière, l'Europe est, par exemple, dépendante d'un petit nombre de pays exportateurs. Elle importe les deux tiers de ses besoins en gaz, et la Russie est son principal fournisseur. Tout le monde garde en mémoire l'interruption du transit du gaz russe en Ukraine au cours de l'hiver 2008-2009. Par contrecoup, les livraisons en Europe avaient été quasiment bloquées pendant près de trois semaines. Des millions de Polonais, Hongrois et Bulgares se sont retrouvés sans chauffage, et des centaines d'usines à l'arrêt. Il ne fait pas de doute que la volonté de la Pologne de se lancer à terme dans la production électronucléaire est motivée en partie par le souci de diminuer sa dépendance à l'égard de la Russie. En revanche, nous n'avons connaissance d'aucun calcul chiffrant ce bénéfice espéré : un calcul aboutissant, par exemple, à accepter un coût de l'énergie nucléaire supérieur de 5 ou 10 € par MWh à celui de la production électrique à partir de gaz importé. L'indépendance et la sécurité énergétiques sont des notions trop mal définies pour être mesurées. Il est tout au plus possible d'estimer le coût du manque à gagner pour l'économie polonaise par jour de rupture d'approvisionnement. Mais, pour calculer le gain de l'indépendance accrue, il faudrait ensuite multiplier ce coût par la

probabilité d'interruption de l'acheminement. Or, en quarante et un ans, la Russie n'a failli à ses engagements qu'à deux reprises, l'une avec une coupure de deux jours, l'autre de vingt jours. Difficile, à partir d'un nombre d'événements si faible, d'extrapoler une probabilité pour l'avenir.

Pour être complet en matière de sécurité, il faudrait également tenir compte du risque de prolifération des armes nucléaires (*voir chapitre 13*), ainsi que du risque d'attaque militaire ou terroriste. L'externalité est cette fois négative et pourrait contrebalancer l'avantage du nucléaire sur le plan de l'indépendance énergétique. Une centrale nucléaire constitue un site vulnérable à des attaques ennemies. Par exemple, pendant la guerre entre l'Iran et l'Irak, la centrale nucléaire en construction de Bushehr en l'Iran a été bombardée à plusieurs reprises par les forces irakiennes. Toutes choses égales par ailleurs, plus le nombre de centrales nucléaires dans un pays est élevé, plus le nombre de cibles offertes à ses ennemis est grand.

Le développement des applications civiles de l'atome peut également entraîner un risque supplémentaire de prolifération des armes nucléaires. Les armes nucléaires peuvent être fabriquées à partir d'uranium hautement enrichi ou de plutonium. Le premier peut être obtenu grâce à l'utilisation et l'amplification des capacités d'enrichissement pour la fabrication du combustible des réacteurs nucléaires. Le combustible doit contenir de l'ordre de 5 % d'uranium 235, tandis que la teneur en isotope fissile nécessaire à la fabrication d'une bombe est de plus de 80 %. Le plutonium est quant à lui produit lors du retraitement du combustible usé.

À ce jour, aucun pays n'a utilisé de matière fissile de réacteurs commerciaux pour produire des armes (*voir chapitre 13*). Des réacteurs utilisés dans le cadre de recherches à des fins civiles – au moins affichées comme telles – ont cependant été utilisés pour produire du plutonium utilisable dans l'armement. L'Inde et la Corée du Nord en fournissent deux illustrations. De son côté, le programme nucléaire iranien nourrit le soupçon d'un détournement de l'atome civil vers des fins militaires. Pour de nombreux observateurs, le développement de l'énergie nucléaire commerciale y sert de couverture à la production de matière fissile pour la fabrication d'armes.

L'une des solutions pour réduire le risque de prolifération consiste à garantir aux pays s'engageant dans l'énergie nucléaire l'approvisionnement en combustible de leurs centrales. Ils n'ont plus besoin de disposer de capacité d'enrichissement sur leur territoire. La diffusion des technologies d'enrichissement pouvant être détournées de leurs fins civiles est alors

restreinte. Les Émirats Arabes Unis se sont par exemple engagés à ne pas fabriquer leur propre combustible ; ils devront donc l'importer. Autre exemple, la Turquie : la Russie a garanti l'approvisionnement des centrales qu'elle doit y construire. De tels accords vont cependant à l'encontre de l'objectif de réduction de la dépendance énergétique souvent associé au choix nucléaire. Le nombre de fournisseurs de combustible est en effet réduit. Certains pays pourraient à terme souhaiter disposer de leurs propres unités d'enrichissement, au moins lorsque la taille de leur parc nucléaire deviendra suffisante.

Les effets externes de l'énergie nucléaire sur la sécurité nationale et internationale ne sont pas plus chiffrés que ceux de l'indépendance énergétique. Le chiffrage achoppe sur le périmètre à la fois trop étendu et trop malléable de ces concepts. Laissons aux diplomates et aux stratèges militaires le soin de persuader – par des arguments qualitatifs – leurs gouvernements de revoir à la baisse ou à la hausse le coût de l'engagement de leur pays dans le nucléaire.

LE PRIX DU CARBONE

Comment évaluer la contribution de l'énergie nucléaire à la lutte contre le réchauffement climatique de la planète ? Ainsi formulée, la question reste trop générale pour permettre à l'économiste d'apporter une réponse chiffrée. Elle comporte trop d'incertitudes sur le but recherché et sur les conséquences en cas d'inaction. Comment définir le réchauffement ? Quelle part est due à l'homme ? Quels gaz à effet de serre prendre en compte ? On retombe sur le problème précédent. En revanche, des valeurs peuvent être avancées en ce qui concerne le bénéfice de l'énergie nucléaire lié à la réduction des émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Pour le calculer, il faut disposer d'un prix pour la tonne de carbone émise, que l'on rapporte ensuite aux émissions évitées par MWh produit. *A priori* rien de plus facile : côté théorie, la détermination du prix optimal d'un polluant est expliquée dans tous les manuels d'économie de l'environnement ; côté pratique, les échanges de droits à émettre du CO₂ fournissent des observations de prix du carbone. En réalité, le problème reste difficile : les données manquent pour appliquer la théorie et, dans les faits, les marchés de carbone envoient de mauvais signaux de prix.

La détermination théorique du prix optimal d'une émission polluante est simple dans son principe. Le prix optimal se situe en effet à l'intersection