

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 978-2-10-070511-5

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 versus 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.