CHOIX ÉNERGÉTIQUES: ÉVALUATION COMPARATIVE DES RISQUES LA SIGNIFICATION DES RÉSULTATS

RICHARD WILSON, MIKE HOLLAND, ARI RABL ET MONA DREICER

D'importants progrès ont été accomplis tant dans la mise au point de techniques d'évaluation comparative des risques que dans l'exploitation et l'interprétation de leurs résultats. Cela vaut en particulier pour l'évaluation des choix qui s'offrent en matière de production et de transport de l'électricité. Les résultats sont devenus une aide précieuse à la prise de décision, même s'il faut souvent les intégrer à d'autres facteurs sociaux, politiques et économiques avant de pouvoir prendre quelque décision que ce soit.

Sept études, publiées depuis 1990, analysent les chaînes "complètes" du combustible (*voir encadré et tableaux pages 15 et 16*). Dans chacune d'entre elles, les risques ont été convertis en coût monétaire, même si on y examine également certains coûts non monétaires.

Il ressort de l'examen des résultats:

- Qu'on obtient différentes estimations des dommages du fait des différentes hypothèses et méthodes utilisées. Ces différences mettent également en évidence l'élaboration d'une approche méthodologique plus complète dans des études récentes telles que le projet ExternE de la Commission européenne;
- Que les importantes différences entre les hypothèses et les méthodes utilisées rendent toute comparaison directe difficile;
- Qu'aucune des évaluations n'a été à même d'inclure tous les effets possibles (réchauffement

planétaire – sauf dans une mesure limitée – ou éventuel détournement de matière fissiles). Ces limites doivent être portées à l'attention des décideurs de sorte qu'ils puissent en tenir compte dans leurs décisions.

Les principales controverses, en matière d'évaluation comparative des risques, concernent le réchauffement planétaire pour les combustibles fossiles; les catastrophes, en particulier pour les centrales nucléaires et les grandes centrales hydroélectriques; et l'évacuation des déchets hautement radioactifs. Ces problèmes soulèvent des questions sociales et politiques techniques et complexes. L'évaluation comparative des risques, cependant, devrait fournir des informations transparentes afin que les limites et les points forts des résultats soient correctement compris.

Les problèmes et effets qui doivent être estimés dans les comparaisons de systèmes énergétiques sont notamment les suivants:

Combustibles fossiles. Les principaux effets des combustibles fossiles sont le réchauffement planétaire et la mortalité due à la pollution de l'air (particules, NO_x et SO₂). Le gaz naturel est plus propre et produit donc moins d'effets que le charbon, ces effets étant deux à quatre fois moindres pour les centrales qui respectent les normes actuelles d'émission de l'Union européenne. Le coût monétaire des effets liés à l'utilisation de combustibles fossiles est relativement important, surtout

pour la production d'électricité à partir de charbon (entre 10% et 100% du prix de marché de l'électricité pour les centrales fonctionnant actuellement dans l'Union européenne).

Il est généralement admis que le réchauffement planétaire est un risque important découlant de l'utilisation de combustibles fossiles. De nouvelles études seront cependant nécessaires pour déterminer ses effets potentiels. Le rapport du projet ExternE de la Commission européenne, publié en 1999, étudie l'influence de certains des paramètres les plus sensibles dans l'analyse du réchauffement planétaire. Ce rapport précise, sans réduire la portée des résultats déjà notifiés sur les effets du réchauffement planétaire, les incertitudes qui risquent d'être les plus importantes. Il semble probable qu'étant donné que les combustibles fossiles continueront d'être utilisés à l'avenir, les niveaux de gaz à effet de serre augmenteront et la réglementation des émissions devra être renforcée.

Énergie nucléaire. S'agissant de la production d'énergie nucléaire,

M. Wilson est professeur de physique (Mallinckrodt) à l'Université d'Harvard (États-Unis); M. Holland est conseiller de direction à AEA Technology (Royaume-Uni); M. Rabl est responsable scientifique au Centre d'énergie de l'École des Mines (Paris) et professeur de recherche en génie civil à l'Université du Colorado (États-Unis); Mme Dreicer est consultante en évaluation environnementale à Washington, DC (États-Unis).

ÉVALUATION COMPARATIVE DES RISQUES LIÉS AUX CHÂÎNES DU COMBUSTIBLE ÉNERGÉTIQUE DANS LES ANNÉES 90

ANNÉE/ÉTUDE

ÉLÉMENTS CLÉS

1991: *Environmental Costs of Electricity*, R.L. Ottinger et al, Oceana Publications, New York (1991)

Champ d'application: États-Unis. Énergie: nucléaire, charbon, pétrole, gaz, hydroélectricité, solaire, éolienne, énergie tirée des déchets. Effets analysés: santé, cultures, forêts, pêche, matières, visibilité. Réchauffement planétaire évalué par son coût d'atténuation et non son coût lié aux dommages.

1992: "The Social Costs of Fuel Cycles" D.W. Pearce, C. Bann & S. Georgiou, rapport pour le Ministère britannique du commerce et de l'industrie, CSERGE, University College of London (1992); et "Development of Externality Adders in the UK", D.W. Pearce, exposé présenté lors d'un atelier organisé par la Commission européenne, l'Agence internationale de l'énergie et l'Organisation pour la coopération et le développement économiques (30-31 janvier 1995).

Champ d'application: Royaume-Uni et Union européenne. Treize chaînes/technologies de combustible évaluées. Effets analysés: santé, cultures, forêts, biodiversité, matières, visibilité.

1993: "External Costs of Electricity Generation", R. Friedrich & A. Voss, Energy Policy (février 1993).

Champ d'application: Allemagne. Énergie: nucléaire, charbon, éolienne, photovoltaïque. Effets analysés: forêts, agriculture, faune, matières, santé.

1994: "An Analysis of Electricity Generation Health Risks: A United Kingdom Perspective", D.J. Ball, L.E.J. Roberts, & A.C.D. Simpson, Centre for Environmental and Risk Management, School of Environmental Sciences, University of East Anglia, Norwich, Royaume-Uni (1994).

Champ d'application: Royaume-Uni. Énergie: nucléaire, charbon, pétrole, gaz, éolienne, marée. Accent sur les risques pour la santé humaine. Pollution de l'air transfrontalière et réchauffement planétaire non pris en compte. Aucune évaluation monétaire.

1994: *External Costs and Benefits of Fuel Cycles*, Russell Lee, Oak Ridge National Laboratory and Resources for the Future, Oak Ridge, Tennessee, États-Unis (1994).

Champ d'application: deux sites au sud-est et sud-ouest des États-Unis. Énergie: nucléaire, charbon, pétrole, gaz, hydroélectricité, incinération de biomasse. Impacts local et régional.

1995: *The New York City Electricity Externality Study*, R.D. Rowe, C.M. Lang, L.G. Chestnut, D. Latimer, D. Rae, S.M. Bernow, & D. White, Ocean Publications, New York (1995).

Champ d'application: deux sites dans l'État de New York (États-Unis). Énergie: nucléaire, charbon, pétrole, gaz, incinération de biomasse, éolienne. Impacts local et régional.

1995: *ExternE: Externalities of Energy*, Commission européenne, Direction générale XII, Luxembourg (1995).

Champ d'application: Union européenne, nombreux sites (Royaume-Uni, Allemagne, France, Norvège). Énergie: nucléaire, charbon, lignite, pétrole, gaz, hydroélectricité, éolienne. Impacts local, régional et mondial. Étude documentaire pour le réchauffement planétaire.

1996: *Environmental Impacts and Costs: The Nuclear and Fossil Fuel Cycles*, A. Rabl, P.S. Curtiss, J.V. Spadaro, B. Hernandez, & A. Pons, Commission européenne, Luxembourg (1996).

Champ d'application: Application d'ExternE 1995 en France. Énergie: nucléaire, charbon, pétrole, gaz. Première étude systématique de la dépendance des sites.

1996: *Counting the Social Costs: Electricity and Externalities in South Africa*, C. van Horen, Elan Press and UCT Press, University of Cape Town (1996).

Champ d'application: Application d'ExternE/Rowe et al à l'Afrique du Sud. Énergie: nucléaire, charbon.

1999: *ExternE: Externalities of Energy*, Commission européenne, Direction générale XII, Sciences, Recherche & développement, Luxembourg (1999). Trois volumes: application à l'échelon national, actualisation de la méthodologie et incidences du réchauffement planétaire.

Champ d'application: quatorze pays de l'Union européenne et Norvège. Nombreuses technologies. Énergie: impacts local, régional et mondial. Nouvelle analyse pour le réchauffement planétaire. Mortalité chronique appliquée aux particules primaires et secondaires. Évaluation de la mortalité sur la base des années de vie perdues (AVP).

RÉCAPITULATIF DES IMPACTS ET DES COÛTS-DOMMAGES POUR LA CHAÎNE DU CHARBON

Étude	Impacts (décès par TWh)		Coûts-dommages (en milli-Euros par kWh)				Total étude
	Décès professionnels	Décès publics	Santé publique	Hygiène du travail	Environnement	Réchauffement planétaire	
Ottinger et al 1991							22-55
Pearce et al 1992			0,05		0,005	0,04	0,14
Pearce et al 1995							0,11
Friedrich & Voss 1993			0,01-0,07		0,013-0,015		0,02-0,09
Ball 1994	0,04-0,14						
ORNL/RFF 1994			0,01-0,64	0,08	0-0,1	nq	0,7-1,4
Rowe et al 1996			3 à 5		0,1	nq	3 à 5
ExternE 1995	0,13-0,23		4 à 13	1 à 2	0,2 à 0,8	10 à 18	16 à 34
						(taux d'actualisation 0%)	
Rabl et al 1996			5 à 14	nq	0,02	15	20 à 29
ExternE 1999			10 à 50		0,5 à 2	10 à 50	20 à 100

Notes: Les nombres ont été arrondis. Pour les totaux, se reporter aux autres colonnes pour voir ce qui est inclus.
nq = non quantifié

RÉCAPITULATIF DES IMPACTS ET DES COÛTS-DOMMAGES POUR LA CHAÎNE DU NUCLÉAIRE

Étude	Impacts (décès par TWh)		Coûts-dommages (en milli-Euros par kWh)					Total étude
	Décès publics	Décès professionnels	Santé publique	Hygiène du travail	Environnement	Réchauf. planétaire	Accident grave	
Ottinger et al 1991			4,9				18,5	23
Pearce et al 1992			0,003-0,009			0,0012	0,002-0,006	0,007-0,017
Pearce et al 1995						0,0012	0,006-0,044	0,006-0,044
Friedrich & Voss 1993			0,001-0,005		0-0,002		0,0005-0,004	0,002-0,01
Ball 1994	0,01-1,23	0,02-0,09						
ORNL/RFF 1994			0,012	0,08-0,09				0,09-0,1
Rowe et al 1996								0,09
ExternE 1995	0,65	0,04	2,4	0,15				2,6
Dreicer et al 1995	0,62	0,02	2,4	0,14			0,0005-0,023	2,5

Notes: Les nombres ont été arrondis. Pour les totaux, se reporter aux autres colonnes pour voir ce qui est inclus.

les principaux effets sont d'éventuels cancers et des effets héréditaires résultant de l'exposition à des niveaux accrus de radioactivité dans l'environnement.

Pour le public, les risques individuels liés aux rejets ordinaires du cycle complet du combustible nucléaire sont relativement limités en l'absence d'accident. Le risque collectif, toutefois, intégré sur de longues périodes de temps pour l'ensemble de la population mondiale, semble important selon les hypothèses généralement acceptées par les spécialistes de la radioprotection.

D'autres problèmes ont trait aux hypothèses concernant l'évolution du climat politique

international et le respect, par les gouvernements, des normes internationalement acceptées. Compte tenu des enseignements des dix dernières années, sans parler des événements des quelques milliers d'années écoulées, il est clair qu'on ne peut ignorer les facteurs politiques.

Si l'on part, comme certains analystes, du principe que les gouvernements respectent toutes les réglementations relatives à la sûreté et si l'on exclut toute catastrophe, les effets de l'énergie nucléaire sont faibles (le "coût" monétaire de ces effets est un faible pourcentage du prix de marché de l'électricité et est nettement inférieur à celui des combustibles fossiles).

Il faut, par ailleurs, tenir compte du coût social d'autres problèmes publics tels que la prolifération des matières fissiles. Ces problèmes, même s'ils ont été évoqués dans le dernier rapport ExternE, n'ont pas été pris en compte dans la plupart des évaluations comparatives des risques.

Sources d'énergie renouvelables. Il existe de nombreuses technologies utilisant les énergies renouvelables, mais il est difficile de les évaluer car certains de leurs effets sont fortement fonction du site. Leurs effets, pendant la phase de production d'électricité, sont faibles à l'exception de la biomasse (lorsque des matières sont brûlées

sur place) et de certaines centrales hydroélectriques implantées en certains endroits (lorsque le changement de débit risque de nuire gravement à l'environnement).

Globalement, cependant, les énergies renouvelables peuvent avoir des effets importants au stade de la production des équipements et de la construction des centrales. C'est pourquoi la quantité de matières utilisées par unité d'électricité effectivement produite est plus importante que pour d'autres systèmes énergétiques. Certaines technologies d'exploitation d'énergies renouvelables peuvent avoir un effet négatif non négligeable (bruit) sur l'agrément d'un site. L'expérience de certaines centrales hydroélectriques indiennes a montré la nécessité de prendre en compte l'utilisation des sols ainsi que les effets sociaux et culturels, notamment lorsqu'on déplace d'importantes populations.

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Méthodes de comparaison. Les questions clés, en matière d'évaluation comparative des risques, ont trait aux méthodes de calcul d'un dénominateur commun permettant de comparer les résultats. Ces questions ont une incidence directe sur la méthode d'évaluation et sont importantes pour l'interprétation des résultats. Dans tous les cas, les méthodes auront une grande incidence sur la façon dont les informations pourront être utilisées pour prendre des décisions.

De nombreuses études, après avoir évalué les rejets et/ou les effets de différentes chaînes du combustible énergétique, les ont quantifiés et convertis en valeur monétaire, souvent appelée "coût externe". Cette évaluation demeure controversée, en particulier pour la vie humaine et pour d'autres effets qui ne sont

pas influencés de la même façon par le marché dans différents pays.

Des méthodes tenant compte de ces types de "coûts sociaux" ont été élaborées, mais elles n'ont pas été acceptées par tous les analystes.

Une autre méthode utilisable dans certaines situations consiste à fonder l'interprétation des résultats sur le "dépassement" de normes environnementales; en d'autres termes, sur la mesure dans laquelle elles sont dépassées. De nombreuses études ont comparé les risques de cette façon. Cette méthode est particulièrement appropriée lorsqu'on doit examiner des questions de biodiversité et d'impact écologique et qu'une évaluation monétaire serait fortement subjective.

Lorsqu'on utilise cette méthode, il est essentiel de comprendre le fondement et l'opportunité des normes utilisées. Les normes retenues doivent être adaptées à l'évaluation comparative des risques qui est faite, car elles ne sont généralement pas transférables à d'autres études, et risquent de compliquer l'interprétation des résultats. Des accords internationaux tels que le Protocole de Montréal et l'Accord de Kyoto de 1997 peuvent servir de référence pour interpréter les résultats.

Une autre méthode de comparaison consiste à classer les risques au moyen de techniques telles que l'analyse multi-critères et la sélection des risques par éliminations successives. Ces techniques présentent, par rapport à l'évaluation économique, l'avantage de permettre au moins, en théorie, d'attribuer des coefficients de pondération à tous les effets connus sans nécessiter d'autre évaluation expérimentale. Les coefficients de pondération attribués à chaque effet peuvent influencer sur les résultats, et l'analyse de sensibilité est alors précieuse pour interpréter ces derniers.

Actuellement, la méthode de l'évaluation monétaire présente un

avantage essentiel: la mesure utilisée est connue pratiquement dans le monde entier. Les résultats sont donc mieux compris que ceux obtenus en appliquant des coefficients de pondération à l'analyse multi-critères.

Échelles temporelles et spatiales. L'interprétation des résultats des évaluations comparatives des risques dépend en outre de l'échelle de temps sur laquelle les effets se produisent et sont évalués. Lorsqu'on pratique une évaluation monétaire et une actualisation, il est encore plus important d'utiliser des échelles de temps analogues lorsqu'on évalue différents effets. Le choix du taux d'actualisation doit être pris en compte dans l'interprétation des résultats, car le taux choisi peut servir à minimiser les risques à long terme, ce qui n'est acceptable pour personne.

De même, des périodes de plus de 25 ans poseront des problèmes d'équité intergénérationnelles qui risqueront d'influencer fortement aussi bien l'interprétation que l'utilisation subséquente des résultats. Lors du choix des taux d'actualisation applicables aux coûts intergénérationnelles, on néglige généralement une variable essentielle: l'évolution des futures technologies et des coûts.

Si l'on trouve, par exemple, un remède simple et indolore au cancer, la plupart des effets et, partant, des coûts de la chaîne du combustible nucléaire peuvent devenir négligeables. De même, pour le réchauffement planétaire, plusieurs mesures pourraient atténuer les effets et les coûts imputables aux chaînes de combustibles fossiles. Compte tenu de ces facteurs, la pondération des effets à long terme dépendra généralement d'un certain nombre de scénarios.

Mis à part les gaz à longue période dispersés à l'échelle mondiale (gaz à effet de serre, carbone 14, iode 129), la plupart des effets sont relativement localisés et propres à un site.

Pour les polluants gazeux de l'air (NO_x et SO₂), les effets peuvent facilement varier en fonction des caractéristiques du site et de la hauteur des cheminées.

Une cheminée élevée, par exemple, disperse les polluants plus loin du site, ce qui rend l'emplacement de la centrale électrique bien moins important dans l'évaluation des effets à long terme des particules. La dépendance du site est particulièrement forte pour la pollution de l'eau, les déchets solides et l'extraction (y compris l'évaluation des accidents).

Incertitudes. L'incertitude des données utilisées pour l'évaluation comparative des risques et l'interprétation des résultats est une question qui mérite une attention particulière.

Quatre types d'incertitude doivent être pris en compte:

- techniques/scientifiques (modèles, paramètres d'entrée, données, fonctions dose-réponse);
- choix politiques/éthiques (valeur de la vie dans les pays, taux d'actualisation intergénérationnels);
- scénarios d'avenir (modes de vie, taille et répartition de la population, progrès technologiques et médicaux);
- omission de certains types d'effets.

Le choix des méthodes techniques/scientifiques, les scénarios et l'évaluation de certains effets sont influencés par le jugement d'experts. Ces opinions étant par nature subjectives, elles doivent être clairement indiquées de façon que les décideurs puissent en tenir compte lorsqu'ils interprètent les résultats.

À cet égard, il importe de noter que la perception des risques par le public est un facteur important dans l'élaboration de politiques et la prise de décisions. Cela vaut en

ÉTUDES COMPARATIVES DES CHAÎNES DU COMBUSTIBLE ÉNERGÉTIQUE: APPLICATIONS POSSIBLES

■ **Application:** choix et dosage des technologies pour une planification énergétique stratégique (par exemple charbon/nucléaire/énergies renouvelables). **Informations nécessaires:** impacts et coûts du cycle du combustible (agrégation sur tous les niveaux des technologies envisagées).

■ **Application:** choix d'une nouvelle centrale. **Informations nécessaires:** impacts et coûts de la centrale (agrégation sur les émissions pour chacune des technologies envisagées).

■ **Application:** répartition optimale des centrales existantes. **Informations nécessaires:** impacts et coûts de chacune des centrales du réseau électrique (agrégation sur tous les niveaux).

■ **Application:** optimisation de la réglementation (limites d'émission, objectifs de qualité de l'environnement - qualité de l'air, droits négociables, taxation de la pollution, etc.). **Informations nécessaires:** impacts et coûts, pour chaque polluant et chaque pollueur (aucune agrégation).

■ **Application:** comptabilité écologique (PNB corrigé des dommages environnementaux). **Informations nécessaires:** coûts (agrégation sur toutes les sources d'émission d'un pays).

particulier pour les préoccupations du public en matière de risques écologiques, où les perceptions peuvent ne pas toujours coïncider avec l'avis des experts.

APPLICATION DES RÉSULTATS

Les résultats des évaluations comparatives des risques peuvent servir à diverses applications. La façon dont ils sont appliqués revêt une grande importance (*voir encadré*).

Le transfert des résultats d'un scénario à un autre, ou d'un pays à un autre, peut poser des problèmes. Actuellement, par exemple, les résultats de l'évaluation d'un important accident survenu dans des pays d'Europe orientale pourront ne pas s'appliquer, en raison des différences de situation économique, à un accident survenu ailleurs.

D'autres exemples soulignent encore la difficulté qu'il y a à tenter d'appliquer les résultats d'une évaluation à une autre.

Certains ont trait à l'évaluation des coûts environnementaux sur la base d'études estimant la "disposition à payer" d'une société donnée. Les différences en matière de législation environnementale, de réglementation et autres qui existent entre les pays doivent toutes être prises en considération.

Comme c'est le cas dans toutes les évaluations de risques, la présentation finale des résultats influence directement l'efficacité avec laquelle les informations peuvent être utilisées. Dans l'industrie chimique, les évaluations comparatives présentent souvent les risques au moyen de listes ordonnées ou matrices. Le projet ExternE de la Commission européenne a présenté les résultats de tous les stades de la chaîne du combustible et

de tous les stades de la voie d'impact (charge, impact, valeur), de façon à offrir le maximum de transparence.

En matière de prise de décisions, la présentation des résultats peut revêtir une importance particulière.

Lorsqu'on présente les résultats d'évaluations comparatives des risques, il faut préciser plusieurs facteurs:

- la nature précise du système énergétique évalué;
- les effets qui ont été quantifiés;
- ce qui a été exclu de l'analyse;
- l'origine des données utilisées pour l'évaluation;
- les hypothèses qui ont été formulées;
- ce que les analystes et autres experts ont considéré comme étant particulièrement sensible dans l'analyse.

Lorsque tous ces facteurs sont pris en compte, l'évaluation comparative des risques peut aider à prendre les décisions appropriées en matière de choix et de politique énergétiques. □