

Etude comparative des effets environnementaux et sanitaires des diverses sources d'énergie

*Aperçu des conclusions
d'un document de synthèse présenté à Helsinki*

par S. Haddad
et R. Dones

La comparaison des effets environnementaux et sanitaires des différents systèmes de production d'électricité a été tentée pour la première fois dans les années 70. A l'époque, il fallait prendre des décisions fondamentales quant au meilleur moyen de répondre à une demande d'électricité en croissance rapide. Ceux qui prirent l'initiative de ces premières études comparatives cherchaient essentiellement à établir une classification unidimensionnelle des risques que les impacts négatifs des différentes options alors disponibles présentaient pour l'ensemble de la population.

Les premiers travaux ont porté sur des centrales isolées, car ce qui inquiétait le plus le public, c'était de devoir vivre à proximité de telle ou telle centrale nucléaire. Le champ de ces études comparatives s'est élargi depuis lors grâce à la mise au point de méthodologies appropriées. En effet, il est apparu très tôt que, pour comparer rationnellement différentes options de production de l'électricité, il fallait étudier tous les éléments du cycle de chaque système.

L'étape suivante de ce genre d'études doit inclure le stade de la construction et celui du démantèlement des installations. De fait, l'analyse du problème a révélé que, pour nombre d'installations, ce sont ces deux stades qui comportent le plus de risques.

L'inclusion du stade de la construction a encore agrandi le domaine des comparaisons qui englobe désormais les effets associés à la production des matériaux utilisés pour la fabrication des équipements. Dans cette perspective élargie, la comparaison des impacts sanitaires et environnementaux rejoint les considérations macro-économiques telles que l'investissement

ou l'emploi et s'approche de la notion «d'évaluation technologique». Avec la deuxième génération d'études comparatives, le principal changement réside dans l'importance accordée au contexte décisionnel du processus d'évaluation comparative du risque.

Le classement objectif des différents systèmes de production d'électricité est généralement vu comme un moyen de déterminer les mérites respectifs des divers systèmes. L'intérêt se porte actuellement sur l'intégration des effets sanitaires et environnementaux dans divers scénarios de la production d'électricité où sont incluses différentes sources d'énergie, et sur la comparaison de ces scénarios, compte tenu de contextes socio-économiques déterminés, à l'échelon tant local que régional ou national.

A noter que les études comparatives faites jusqu'à ce jour ont porté beaucoup moins sur les impacts environnementaux que sur les effets sanitaires.

Evaluation comparative des risques pour la santé

Une étude critique approfondie des premières évaluations comparatives des risques a été faite en 1980 par le *Health and Safety Executive* (HSE) du Royaume-Uni. Cette étude a bien mis en lumière les inconvénients qu'il y avait à intégrer les diverses dimensions du risque dans un seul indicateur, ainsi que les incertitudes dues à la quantification de certains risques qui peuvent ne pas se prêter à cette opération, et notamment les incertitudes que comporte la quantification des rapports dose-effet, y compris les effets différés et à long terme de l'exposition à des produits chimiques.

Le rapport du HSE montre que les risques non nucléaires sont souvent moins bien compris que les risques nucléaires du même ordre, et recommande de se pencher davantage sur a) le sens des limites supérieures et inférieures des prétendus effets chroniques du soufre; b) les effets à long terme des déchets non nucléaires;

M. Haddad et M. Dones sont membres de la Division de la sûreté nucléaire de l'AIEA. Cet article se fonde sur le document de synthèse n° 3 préparé par un groupe d'experts internationaux sous la présidence de M. J. Chadwick (Royaume-Uni) pour le Colloque international d'experts de haut niveau sur l'électricité et l'environnement réuni en mai 1991 à Helsinki. Le texte intégral de ce document sera reproduit dans le compte rendu du colloque que publiera l'AIEA.

c) les accidents graves possibles associés à certaines installations non nucléaires; d) la distinction entre le risque moyen inhérent à un système et le risque associé aux changements marginaux.

L'étude de A.F. Fritzsche (1989) est l'un des travaux les plus récents et les plus exhaustifs sur l'évaluation comparative des risques inhérents à différentes sources d'énergie. Les conséquences du risque sont fondées *grosso modo* sur les ouvrages et articles parus dans le monde sur le sujet, lesquels sont passés en revue dans un esprit critique. Les conclusions tirées de cette étude font une nette distinction entre les diverses dimensions du risque, plus spécialement celles qui sont associées aux conditions normales d'exploitation et aux accidents, et sont jugées représentatives des grandes centrales électriques modernes que l'on peut actuellement construire en Europe (voir les graphiques).

On peut classer les divers systèmes énergétiques selon les risques qu'ils présentent pour la santé, mais il faut considérer et interpréter avec prudence les valeurs absolues, et leur accorder une importance relative, à cause des variations des caractéristiques techniques et des technologies.

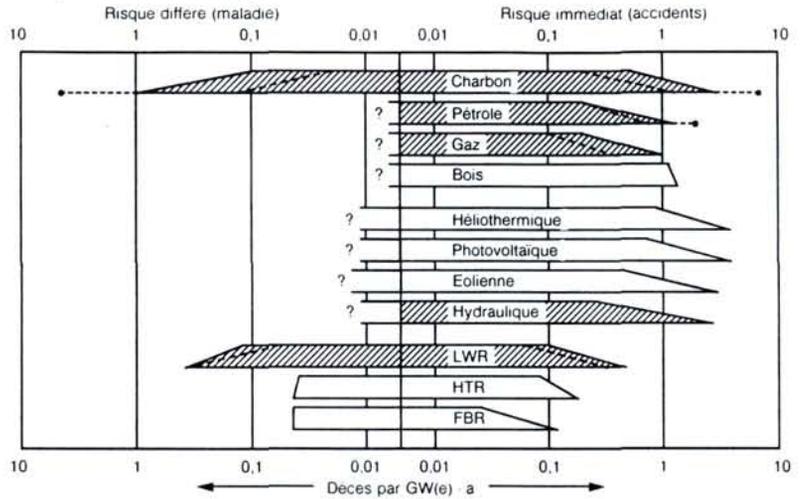
Compte tenu de ces réserves, on peut, en se fondant sur les conclusions de l'étude de Fritzsche (d'où les accidents graves sont exclus), résumer comme suit l'impact des divers risques pour la santé:

- **Risques professionnels immédiats.** Pour le cycle au charbon, le risque professionnel est nettement supérieur au risque que présentent les cycles du pétrole et du gaz; il est du même ordre de grandeur que les risques associés aux systèmes utilisant les énergies renouvelables et de 8 à 10 fois supérieur aux risques correspondants qu'impliquent les réacteurs à eau légère. Les progrès techniques futurs de l'exploitation des sources renouvelables, solaires et éoliennes, peuvent aboutir à une réduction sensible du risque professionnel immédiat associé aux systèmes qui les exploiteront (jusqu'à quatre fois). La production hydroélectrique comporte des risques professionnels immédiats relativement importants.

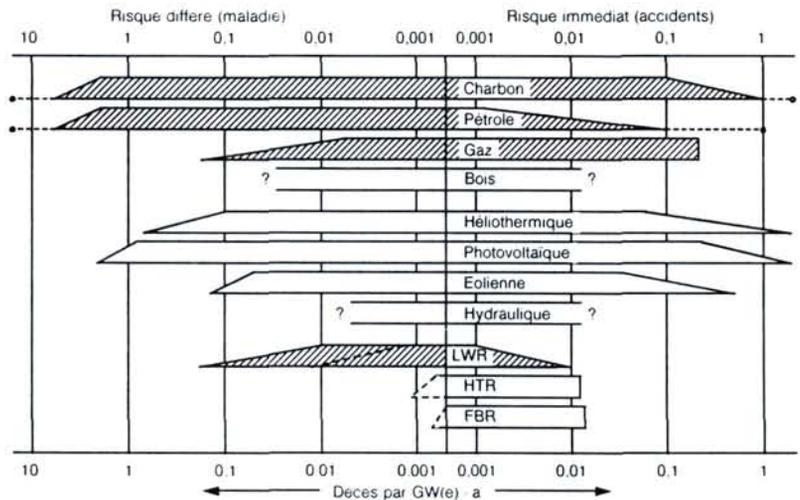
- **Risques professionnels différés.** Les décès différés sont généralement associés à l'extraction du charbon et de l'uranium et ils sont du même ordre dans les deux cas. S'il s'agit de mines souterraines, l'extraction du charbon est néanmoins plus meurtrière, semble-t-il, que celle de l'uranium, par unité normalisée d'électricité produite.

- **Risques immédiats pour le public.** Ces risques sont, pour la plupart, dus aux accidents de transport et sont fonction, dans une large mesure, des distances parcourues et du mode de transport utilisé. Le risque à ce titre de l'option nucléaire est entre 10 et 100 fois moindre que le risque inhérent aux autres options, surtout parce que les quantités de matières à transporter, par unité d'électricité produite, sont relativement faibles. Vu sous cet angle, le cycle

Risque de mortalité dû à la production d'électricité
Risque de mortalité professionnelle



Risque de mortalité pour le public



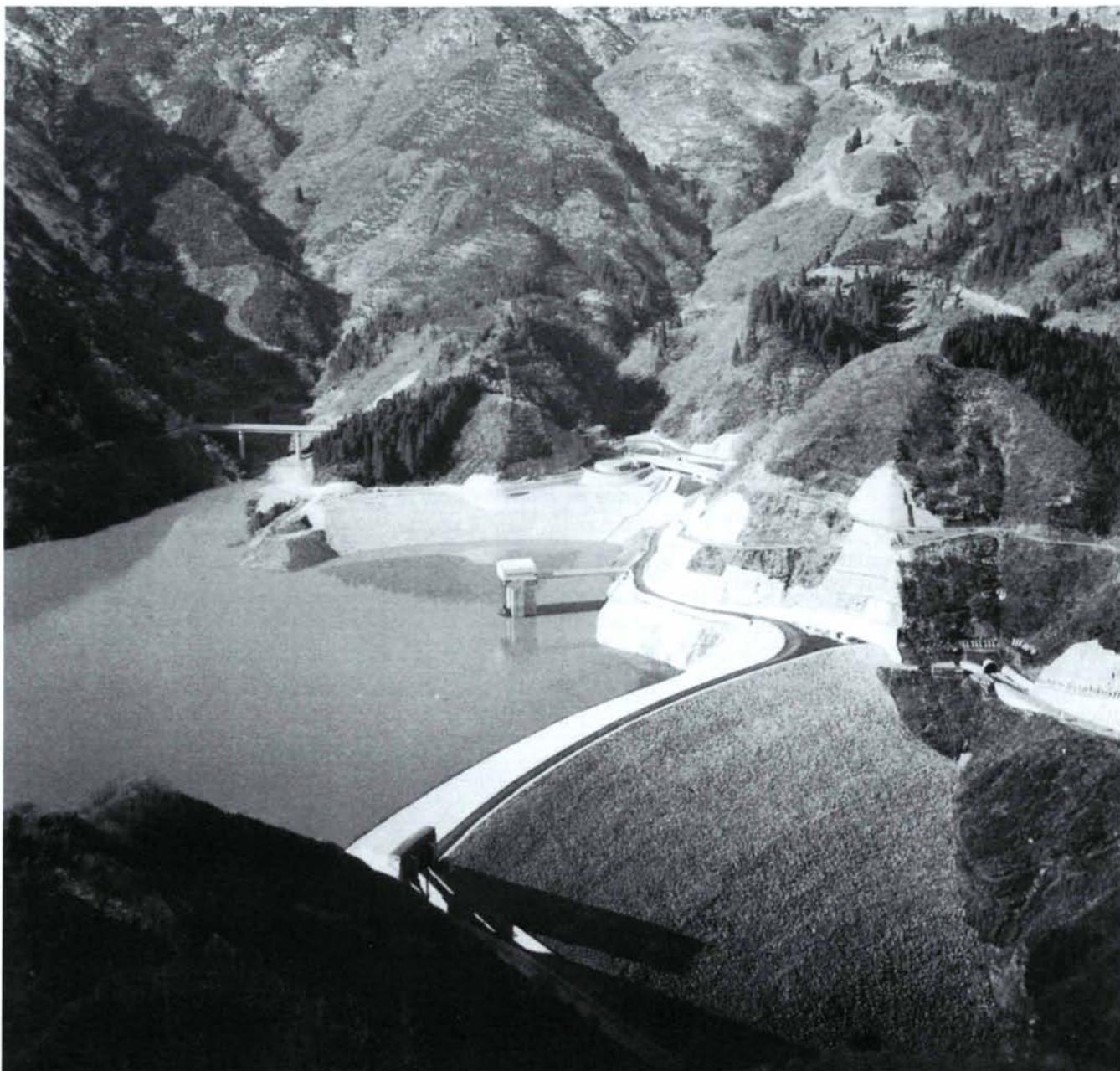
Notes: Les évaluations tiennent compte de tous les stades du cycle du combustible, mais excluent les accidents graves. LWR = réacteur à eau légère; HTR = réacteur à haute température; FBR = réacteur surgénérateur rapide.

Source: D'après A.F. Fritzsche, «The Health Risks of Energy Production», Risk Analysis 9, n° 4 (1989).

au charbon présente plus de risques immédiats pour le public à cause des volumes considérables qu'il faut transporter.

- **Risques différés pour le public.** Les estimations de cette catégorie de risques pour toutes les sources d'énergie sont très sujettes à caution. Il convient donc d'interpréter les résultats avec la plus grande prudence. On constate néanmoins que les risques différés pour le public pour le nucléaire et le gaz naturel sont du même ordre de grandeur, et au moins 10 fois moindres que les risques associés au charbon et au pétrole. Notons par ailleurs que ces risques différés sont relativement importants en ce qui concerne certaines sources d'énergie renouvelables, mais on s'attend que l'évolution de la technique permettra de les réduire très sensiblement.

Ces graphiques rendent compte des différences dues à la variété des sources de données, des installations, des opérations et des fréquences d'accidents: les barres hachurées correspondent à des données bien fondées, les barres en blanc à des données sujettes à caution et les biseaux indiquent l'étalement des données.



Au Japon, l'énergie nucléaire et l'énergie hydraulique sont les deux principales sources utilisées pour la production d'électricité.

Sur notre photo, la centrale hydroélectrique de Tedorigawa Daiichi. (Photo: JAERI)

Evaluation comparative des risques pour l'environnement

Les effets sur l'environnement des différents cycles ne peuvent se prêter au même traitement comparatif que les effets sur la santé. La multitude des organismes cibles, le fait que les unités à considérer sont des écosystèmes déterminés et non des individus, des populations ou des espèces spécifiques, ainsi que la nécessité de distinguer entre les effets des différentes substances sur les fonctions et la structure des écosystèmes font que les comparaisons numériques directes sont pratiquement impossibles. Jusqu'à présent, on ne s'est mis d'accord sur aucune caractéristique fonctionnelle ou structurelle qui, si elle était modifiée, donnerait lieu

à des variations quantitatives utilisables aux fins de comparaisons significatives. C'est pourquoi d'autres moyens de comparaison sont proposés.

● *Evaluation hiérarchisée.* Cette méthode permet de faire des comparaisons générales. Il ne s'agit pas de donner une mesure globale des effets, mais plutôt de présenter qualitativement sous forme de matrice les impacts environnementaux des différentes perturbations causées par les différentes étapes des cycles du combustible. Dans une certaine mesure, c'est là une caractéristique intéressante de ce genre de représentation, car les différences qui seraient dissimulées par un chiffre unique apparaissent au contraire clairement.

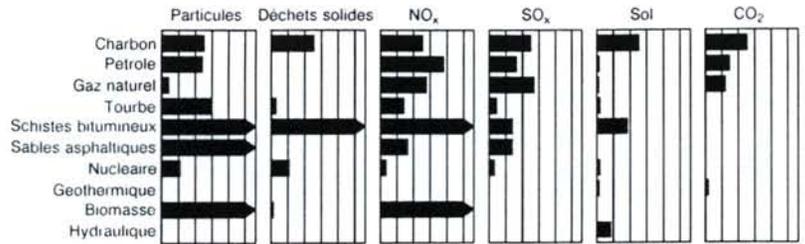
● **Quantités émises et indices de la qualité du milieu ambiant.** On peut utiliser les quantités émises et les effluents pour évaluer les impacts potentiels de divers combustibles et technologies (voir les graphiques). Ce regroupement met en évidence certaines observations intéressantes, comme le fait que les émissions atmosphériques exprimées en masse totale par unité d'énergie sont presque identiques quel que soit le combustible fossile (charbon, pétrole et gaz), ou le fait que les émissions de SO_x sont relativement élevées dans le cas du cycle du gaz naturel (elles ont lieu principalement au stade de l'extraction) par rapport à celles des autres sources d'énergie, à l'exception du charbon (où elles ont lieu principalement au stade de la conversion). Les émissions totales de CO_2 par GWe/an pour la totalité du cycle des combustibles fossiles sont environ 100 fois supérieures à celles qui proviennent de n'importe quel autre cycle. Dans le groupe des combustibles fossiles, les émissions totales de CO_2 par GWe/an (pour l'ensemble du cycle) sont environ deux fois plus élevées pour les cycles au charbon que pour les cycles du pétrole ou du gaz.

● **L'approche de la charge cible ou critique.** Cette approche consiste à comparer les charges (ou teneurs) cibles ou critiques, affectées à certains secteurs d'une région, aux dépôts (ou concentrations) réels. Le dépassement de la quantité cible (ou critique) par dépôt, par exemple, peut être considéré comme mesure quantitative de l'impact. Cette approche peut encore être affinée. Le résultat de diverses stratégies de réduction (par exemple, l'application de toutes les technologies possibles à une centrale) peut être comparé en termes de dépassement (et la réduction globale ainsi que le coût total peuvent être précisés). On peut alors comparer le résultat avec des cartes de dépassement obtenues par simulation d'autres stratégies (ou sans stratégie) (voir le tableau).

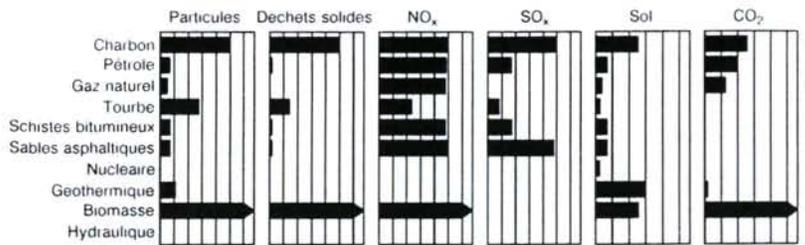
● **Comparaisons intégrées des effets sur l'environnement.** L'absence de méthodologies éprouvées pour comparer les effets sur l'environnement des cycles des divers combustibles ne signifie pas qu'il est impossible de faire des comparaisons utiles. Il est d'ailleurs probable qu'une méthodologie fiable se développera à mesure que les données se multiplieront. Les progrès des évaluations du dépassement de la quantité critique et l'étude des relations dose-réponse pour ces dépassements permettront d'avancer sur la voie des comparaisons quantitatives.

Pour le moment, on peut faire des comparaisons qualitatives avec les quantités émises ou l'indice combiné de ces quantités. Les différences entre les émissions dans l'atmosphère dues à l'utilisation de combustibles fossiles ou à l'exploitation de l'énergie solaire ou autres sources sont évidentes. Les différences entre combustibles d'une même catégorie le sont tout autant. Les valeurs de dépassement permettent à leur tour de hiérarchiser les impacts et, à grande échelle, cet exercice fait de même

Comparaison des quantités émises et des effluents Emissions et résidus de différentes sources



Emissions au stade de la conversion



Notes: Ces graphiques ne sont pas strictement à l'échelle. Les émissions d'anhydride carbonique pour la tourbe, le schiste bitumineux et les sables asphaltiques n'ont pas été évaluées. En termes de masse, les déchets solides du cycle de conversion nucléaire sont de trois à quatre ordres de grandeur inférieurs à ceux du cycle au charbon.

Source: D'après «The environmental Impacts of Production and Use of Energy», Partie IV, Programme des Nations Unies pour l'environnement, Rapport ERS-14-85, Nairobi (1985).

clairement apparaître les principaux impacts des diverses technologies. Par exemple, les émissions de CO_2 révèlent très nettement les effets potentiels à l'échelle mondiale de l'utilisation des combustibles fossiles par rapport à d'autres technologies, ainsi que les impacts potentiels pour l'atmosphère au niveau régional. Cela permet aux planificateurs de se concentrer sur les aspects les plus préoccupants.

Le risque d'accidents graves

Tous les systèmes énergétiques, à tous les stades de leur cycle du combustible, comportent un risque d'accident grave (généralement défini comme présentant un risque important hors du site pour les personnes, les biens et l'environnement). Les accidents peuvent être dus à des défaillances structurelles ou mécaniques, au dérèglement d'une opération, aux erreurs humaines ou à des événements extérieurs tels que les phénomènes naturels (séismes et cyclones).

Si on se reporte aux chiffres normalisés par unité d'électricité produite, il apparaît que l'option hydroélectrique a causé plus de décès immédiats, dans le cadre d'accidents graves, que toute autre source d'énergie. Si l'on veut comparer les accidents graves associés aux différents systèmes énergétiques, il faut tenir compte de certaines considérations précises:

Ces graphiques comparent les émissions des diverses sources d'énergie. Les données sont fondées sur les résultats d'une étude écologique comparative réalisée par le PNUÉ (Programme des Nations Unies pour l'environnement).

**Emissions de soufre en Europe en l'an 2000 avec application
des mesures de réduction maximale des émissions par le secteur de l'électricité**

Pays	Sans réduction	Soufre éliminé	%	Coût
Albanie	200	64	32	23
Allemagne, Rép. féd. d' *	1 499	799	53	1 214
Autriche	186	68	37	90
Belgique	282	90	32	137
Bulgarie	1 151	630	55	256
Danemark	193	121	63	192
Espagne	2 126	1 556	73	600
Finlande	203	36	18	119
France	697	130	19	354
Grèce	523	396	76	255
Hongrie	805	479	60	189
Irlande	100	55	55	74
Italie	1 311	612	47	939
Luxembourg	18	0	0	0
Norvège	71	1	1	3
Pays-Bas	210	65	31	117
Pologne	2 182	1 006	46	618
Portugal	205	66	32	84
Rép. dém. allemande *	3 224	2 166	67	668
Roumanie	1 322	725	55	325
Royaume-Uni	1 765	974	55	1 474
Suède	219	29	13	111
Suisse	54	7	13	16
Tchécoslovaquie	1 303	723	55	301
Turquie	1 755	700	40	301
URSS	10 890	6 241	57	2 075
Yougoslavie	1 891	1 209	64	536
Total	34 385	18 948	55	11 068

Notes: Les émissions sont exprimées en milliers de tonnes et les coûts en millions de dollars des Etats-Unis (1985).

Source: M.J. Chadwick, Stockholm Environment Institute (1990).

* Estimations établies avant l'unification de l'Allemagne en octobre 1990.

- Deux importantes considérations méthodologiques s'imposent: premièrement, il convient de présenter et comparer les risques indépendamment des risques résultant des opérations normales; deuxièmement, il faut éviter de comparer directement les données fondées sur les informations historiques (effectives) avec les données fondées sur des prévisions probabilistes d'événements vraisemblables dans le futur.

- La comparaison ne peut être faite uniquement sur la base des conséquences des accidents pris isolément. La probabilité de survenue doit également être prise en compte; par conséquent, il est pertinent d'estimer la fréquence des accidents. A cette fin, il faut disposer de renseignements fiables sur les accidents similaires passés et sur leurs effets

et/ou sur l'application de méthodes probabilistes prévoyant la probabilité de leur survenue future.

- Il est difficile d'évaluer et de comparer la fréquence et les dommages pour l'environnement et la santé des accidents graves, car il n'y a pas de collecte systématique et centralisée de ces données au niveau national ou international. Cela est vrai en particulier des systèmes énergétiques non nucléaires. Les données sur les incidents et les accidents pour le cycle du combustible nucléaire sont plus facilement et plus systématiquement disponibles que pour les autres systèmes énergétiques.

- Il n'y a pratiquement pas de données sur les effets sanitaires différés des accidents graves imputables aux systèmes énergétiques non nucléaires en particulier. Les données dispo-

nibles concernent toujours les décès immédiats et parfois les blessures immédiates. Cela rend une comparaison complète difficile, puisqu'il peut y avoir sous-estimation de l'impact total.

● Les effets ultimes à long terme sur l'environnement, en particulier ceux qui résultent d'accidents graves, sont difficiles à préciser. L'exposition des écosystèmes à des émissions accidentelles se produisant une seule fois ou étant peu fréquente, il peut être difficile de déterminer si l'effet est irréversible ou si une récupération est possible.

Conclusions générales

Les évaluations comparatives des risques inhérents aux différents systèmes énergétiques utilisés pour la production d'électricité montrent que, dans les conditions normales d'exploitation, les systèmes exploitant l'énergie nucléaire ou les sources d'énergie renouve-

lables se situent plutôt vers le bas de l'échelle des risques sanitaires, tandis que les systèmes énergétiques au charbon ou au pétrole apparaissent à l'autre extrémité. La gravité du risque peut varier pratiquement de un à dix. Cela dit, lorsque tous les cycles du combustible sont dotés des derniers perfectionnements techniques, ils peuvent produire l'électricité moyennant des risques sanitaires et environnementaux relativement faibles. Le CO₂ émis par les combustibles fossiles fait exception. Aussi vient-il en tête des préoccupations écologiques.

L'évaluation comparative des risques est appelée à jouer un rôle de plus en plus important dans la planification énergétique, car elle apporte aux décideurs une information d'importance critique quant au choix et au dosage des modes de production d'électricité. Il va falloir, sans plus attendre, établir une base de données exhaustive et coordonnée au niveau international sur les effets sanitaires et environnementaux des diverses sources d'énergie.

Taux de mortalité normalisé pour les accidents graves (1969-1986)

Option énergétique	Nombre d'événements	Décès/ Événement	Total des décès	Energie produite (GW·a)	Décès/ Energie produite (Décès/GW·a)
<i>Charbon</i>					
Catastrophe minière	62	10-434	3 600	10 000	0,34
<i>Pétrole</i>					
Chavirement	6	6-123	ND	21 000	—
Incendie de raffinerie	15	5-145	450		0,02
Pendant le transport	42	5-500	1 620		0,08
<i>Gaz naturel</i>					
Incendie/Explosion	24	6-452	1 440	8 600	0,17
<i>Hydroélectricité</i>	8	11-2 500	3 839	2 700	1,41
<i>Nucléaire</i>	1	31	31	1 100	0,03

ND = Non disponible.

Notes: L'estimation de la quantité totale d'énergie produite à partir de combustibles fossiles a été multipliée par 0,35, ce qui donne son équivalent en énergie électrique produite et permet, par conséquent, de faire la comparaison avec l'électricité d'origine hydraulique et nucléaire.

Les décès signalés sont les décès immédiats; les décès différés, notamment pour l'accident de Tchernobyl, ne sont pas inclus.

Source: D'après A.F. Fritzsche, «The Health Risks of Energy Production», *Risk Analysis* 9, n° 4 (1989).

Les évaluations approximatives indiqueraient que le risque sanitaire pour l'être humain associé aux accidents graves dans les systèmes utilisant l'énergie nucléaire, le pétrole et le gaz naturel est du même ordre de grandeur, et inférieur de deux ordres de grandeur au risque inhérent à l'option hydroélectrique. Avant de conclure, il faut néanmoins tenir compte de plusieurs facteurs importants: les accidents non signalés survenus dans les cycles des combustibles fossiles et la rareté relative des accidents de centrales nucléaires font que les résultats sont peu significatifs du point de vue statistique. Les récents décès dus au cancer après l'accident de Tchernobyl et les effets tardifs des accidents non nucléaires n'ont pas été considérés.