

Les diverses sources d'énergie – leur coût pour la santé et pour l'économie

par L.D. Hamilton et A.S. Manne

Plusieurs questions d'actualité telles que les risques écologiques, les incidences sur la santé et les conséquences économiques directes des différentes options énergétiques en présence doivent être résolues avant que les Etats-Unis d'Amérique ne puissent arrêter une politique nationale cohérente en la matière. Nulle stratégie ne s'impose à l'évidence comme la seule correcte ou la seule valable sur le plan déontologique. Chacune d'entre elles a ses inconvénients; chacune d'entre elles peut se heurter à une quelconque coalition de groupes d'intérêts. Le public est médiocrement informé par les media. Ceux-ci font infiniment plus de battage autour d'un grave accident de la mine, fût-il le seul, que pour une longue série d'accidents isolés provoqués par des convois de charbon sur des passages à niveau, lesquels font pourtant bien plus de victimes chaque année. Il en va de même pour les problèmes d'énergie nucléaire où le débat porte surtout sur des événements peu probables mais lourds de conséquences. Tout se passe comme si la politique nationale en la matière était définie par un joueur dont la devise serait "miser gros, même à chances minimes".

Les deux auteurs du présent article, bien qu'appartenant à des disciplines différentes, n'en croient pas moins l'un et l'autre qu'il faut tenir compte des chances. Il est indispensable de bien informer le public des risques pour la santé et des conséquences économiques qu'entraînerait pour les Etats-Unis un moratoire sur les applications civiles de l'énergie nucléaire. Selon nous, un tel moratoire serait préjudiciable et à la santé et à l'économie. Ses répercussions, pour minimes qu'elles puissent être par rapport au taux de mortalité ou au produit national brut considérés globalement, ne sont pas négligeables dans l'absolu. Les méfaits d'un moratoire sont beaucoup plus réels et l'emportent indubitablement sur les conséquences d'un accident, toujours possible, lié à l'exploitation de réacteurs de puissance.

Dans un domaine aussi nouveau et sujet à la polémique, nous ne prétendons pas que nos estimations soient des plus précises. Depuis des années déjà, on étudie les effets préjudiciables que les centrales thermiques à combustibles fossiles peuvent avoir pour la santé, et malgré tout, il reste des sceptiques qui se refusent à l'évidence (Références 1–3). Cette situation rappelle étrangement la polémique sur les dangers du tabagisme. S'il est pratiquement établi que la fumée de cigarette est très fréquemment à l'origine de cancers et de maladies de cœur, nous ne connaissons pas encore la vraie nature chimique des carcinogènes actifs ou des facteurs de lésions cardiovasculaires. Là encore, pour les centrales thermiques à combustible fossile ou pour les centrales nucléaires, il faut raisonner par induction. Les modèles utilisés en épidémiologie, en météorologie et en chimie atmosphérique ne sont pas aussi probants que les expériences de laboratoire, et pourtant ils constituent aujourd'hui le seul moyen de comparer les risques propres aux diverses sources d'énergie en présence.

M. Hamilton fait partie de la "Biomedical and Environmental Assessment Division" (Division d'évaluation biomédicale et écologique) (BEAD), "National Center for Analysis of Energy Systems" (Centre national d'analyse des systèmes énergétiques), Brookhaven National Laboratory (Laboratoire national de Brookhaven); M. Manne fait partie du "Department of Operations Research" (Département de la recherche opérationnelle), Stanford University, Etats-Unis.

Nous n'aborderons pas dans le détail les cas de l'énergie solaire et de l'énergie de fusion thermonucléaire. La première n'est pas encore compétitive et la seconde n'a pas encore techniquement fait ses preuves. Il est peu probable que ces sources d'énergie ne prennent quelque importance avant le 21ème siècle.

LE MODELE "BEAD" D'EVALUATION DES INCIDENCES SUR LA SANTE

Une politique nationale de l'énergie implique que l'on fasse honnêtement le total des coûts des diverses sources d'énergie en présence: coûts de l'homme et coûts écologiques, à brève ou à longue échéance, mais aussi coûts économiques aisément quantifiables. C'est ce que se propose la Biomedical and Environmental Assessment Division (BEAD) de Brookhaven. Elle évalue toutes les formes d'énergie, et notamment celles qui procèdent de nouvelles techniques. Après un inventaire des facteurs résiduels du système énergétique (ressources consommées et polluants), on recherche les différentes voies de contamination de l'homme, et on en évalue les effets sur la santé. Le programme fait la synthèse des renseignements obtenus au cours des recherches sur les effluents, les techniques anti-pollution, le transport des polluants, la météorologie, l'écologie, et sur divers programmes de laboratoire consacrés à des problèmes biologiques et médicaux. (Cette évaluation d'ensemble s'insère dans une large gamme d'études de différents modèles et politiques énergétiques, dont sont actuellement chargés plusieurs groupes d'études sur les aspects techniques et économiques de l'énergie au Centre national d'analyse des systèmes énergétiques de Brookhaven).

La BEAD a mis au point des méthodes pour analyser les effets du système énergétique [4]. Chaque phase du cycle du combustible correspondant à la production d'énergie électrique, que ce soit à partir du charbon, du pétrole, du gaz naturel ou de la houille blanche ou matière nucléaire, a été caractérisée par une série de modules effets-conséquences. Ainsi, l'exploitation de charbon à ciel ouvert s'accompagne a) dans l'air: de particules et de bruit et, b) dans l'eau: d'acides et de solides dissous, etc. La conversion du charbon en énergie électrique entraîne le rejet dans l'atmosphère de particules, de SO_2 , NO_2 -HC, etc. Les modules d'effets rendent compte des répercussions qu'une émission polluante ou l'utilisation d'une ressource naturelle peut avoir sur l'eau, l'air, le sol, les substances et les biomes. Les modules peuvent donc s'appliquer à différentes étapes du même cycle du combustible ou encore être communs à différents cycles du combustible. Aux fins d'analyse, les modules sont composés de vecteurs définissant une chaîne d'effets provoqués par une émission polluante initiale ou de l'utilisation d'une ressource naturelle. Chaque module décrit une contrainte écologique imposée par un élément du cycle du combustible ou par un autre élément du module de ce cycle. Pour bien faire, chaque vecteur constituant un module doit être affecté d'une valeur.

Si, pour notre part, nous nous efforçons de faire la somme des effets sur la santé en utilisant différentes méthodes et des bases de données convergentes, les responsables politiques, eux, ont besoin de savoir *immédiatement*: surseoir peut coûter très cher et, dans bien des cas, la décision ne saurait attendre. C'est sans tarder que nous devons faire connaître notre avis sur les effets que les techniques énergétiques actuelles et envisagées pourraient avoir sur la santé. Et c'est pourquoi nous avons évalué par une méthode simplifiée les répercussions des centrales électriques sur la santé. Nous avons eu recours à des évaluations de sources diverses, déjà publiées ou sur le point de l'être, et avons établi une corrélation simplifiée entre la pollution atmosphérique et les effets sur la santé.

Pour calculer les effets que la pollution atmosphérique provoquée par les centrales thermiques à combustible fossile peut avoir sur la santé, il faut déterminer les polluants qui sont cause de morbidité et de mortalité. Au nombre de ces polluants, on peut citer l'anhydride sulfureux (SO_2), la quantité totale de particules en suspension, les hydrocarbures polycycliques et autres composés organiques, les oxydes d'azote, l'ozone et autres produits

secondaires. Nous n'en savons pas assez pour déterminer en quoi chacun d'eux influe sur la santé. On mesure les effets de ces polluants à l'aide d'études sur les animaux, les organismes et les plantes, d'études sur l'homme, d'études sur des populations que leur profession expose à des doses élevées de polluants divers, et d'études épidémiologiques des populations en général, qui sont pareillement exposées (encore qu'à un degré moindre le plus souvent). Mais avant de pouvoir mesurer avec exactitude les risques, il faudra déterminer avec précision comment est causé le dommage. Dans l'immédiat, on doit s'en remettre, pour mesurer les effets sur la santé, à des études épidémiologiques générales faites jusqu'alors. Pour ces études, on a généralement pris l'un ou l'autre des polluants comme indice d'exposition à la pollution atmosphérique globale. Les évaluations fondées sur ces études sont donc inévitablement entachées d'incertitudes supplémentaires, le mélange de polluants variant d'un lieu à l'autre; autrement dit, le polluant unique retenu comme indice de dommage en un lieu donné peut ne pas convenir pleinement pour un autre lieu. Cette remarque vaut particulièrement lorsque l'indice lui-même représente un polluant dont la composition peut varier, comme par exemple la quantité totale de particules en suspension.

La plupart des études épidémiologiques montrent qu'il existe une bonne corrélation entre les particules en suspension et les effets sur la santé de l'homme. La corrélation entre SO_2 et les effets sur la santé est moins accusée et il est difficile de dégager des rapports entre les accidents de santé et les oxydes ou oxydants azotés. Des études de laboratoire ont toutefois prouvé que les oxydes et oxydants azotés provoquaient des dommages biologiques qu'il était possible de mesurer [5].

Alors que des expériences, au cours desquelles des animaux ont été exposés à l'anhydride sulfureux (SO_2), n'ont pas clairement corroboré les conclusions épidémiologiques [6], des études épidémiologiques et des essais sur des animaux ont prouvé que les sulfates des particules et les agents chimiques de transformation du SO_2 étaient une cause importante de maladies [7]. La pollution atmosphérique par les particules que rejettent de grandes centrales thermiques modernes fonctionnant au charbon ou au pétrole est essentiellement constituée de ces agents de transformation très actifs. L'emploi très répandu de matériel très efficace pour éliminer les particules provenant de centrales thermiques à combustible fossile a pour effet que la pollution à laquelle la population est surtout exposée est due à la formation secondaire de particules de sulfates. La proportion de sulfates contenus dans les particules en suspension dans le panache de fumée des centrales thermiques peut atteindre 98%, ce qui nous conduit à prendre essentiellement les particules et les sulfates comme *indice* de la pollution atmosphérique.

Si l'on évalue les effets que la pollution causée par les centrales thermiques entraîne pour la santé à partir des données relatives aux particules, ces données ayant été recueillies au sein de populations exposées à la pollution dans des zones urbaines où les sulfates ne constituent qu'environ 15% des particules en suspension, on sous-estime gravement ces effets. En fait, si l'on admet que les agents pathogènes des particules sont les sulfates, il faut appliquer un coefficient correcteur à la fonction dose-réaction établie pour les effets des particules dans les zones urbaines.

La centrale type de 1000 MW de la BEAD est située dans une plaine et le débit d'émission d'agents de pollution atmosphérique est déterminé à partir d'hypothèses relatives à la centrale, aux caractéristiques du combustible et aux dispositifs anti-pollution. On trouvera dans d'autres ouvrages [8–10] des détails sur les éléments qui entrent dans l'établissement du modèle de pollution atmosphérique. On utilise un modèle météorologique de rose des vents ainsi qu'un modèle chimique de composition de l'air fondé sur un taux de conversion linéaire de SO_2 en SO_4 pour déterminer le taux d'exposition au niveau du sol dans un rayon de 80 km autour de la centrale thermique.

Tableau 1. Surmortalité causée par l'exposition à la pollution atmosphérique provenant d'une centrale thermique à combustible fossile de 1000 MWe dans un rayon de 80 km
(Hauteur de la cheminée: 305 mètres; taux de charge de 75%)

	Nombre de décès supplémentaires par an				
	Lave ^a			Winkelstein ^a	
	Décile inférieur	Médiane	Décile supérieur	Linéaire	Non linéaire
Charbon de l'Est à forte teneur en soufre: ($2,9 \times 10^7$ J/kg de charbon, 3% de soufre) ($1,25 \times 10^4$ Btu/livre) ^b					
<i>Aucune élimination du soufre</i>					
3 X 10 ⁶ personnes dans un rayon de 80 km	0	20	100	130	450
0,7 X 10 ⁶ personnes dans un rayon de 80 km	0	4,6	23	31	105
<i>Élimination du soufre à 90%</i>					
3 X 10 ⁶ personnes	0	2	10	13	45
0,7 X 10 ⁶ personnes	0	0,5	2,3	3,1	11
Charbon de l'Est à faible teneur en soufre: ($2,9 \times 10^7$ J/kg, 0,4% de soufre) ($1,2 \times 10^4$ Btu/livre)					
<i>Aucune élimination du soufre</i>					
3 X 10 ⁶ personnes	0	2,7	13	18	60
0,7 X 10 ⁶ personnes	0	0,6	3,1	4,1	14
Charbon du Montana: ($2,1 \times 10^7$ J/kg, 0,8% de soufre) ($8,6 \times 10^3$ Btu/livre)					
<i>Aucune élimination du soufre</i>					
3 X 10 ⁶ personnes	0	7,3	37	49	170
0,7 X 10 ⁶ personnes	0	1,7	8,6	11	39
Pétrole à forte teneur en soufre: ($4,6 \times 10^7$ J/kg, 2,5% de soufre) (2×10^4 Btu/livre)					
<i>Aucune élimination du soufre</i>					
3 X 10 ⁶ personnes	0	10,4	52	70	236
0,7 X 10 ⁷ personnes	0	2,4	12,2	16	55
Pétrole à faible teneur en soufre: ($4,6 \times 10^7$ J/kg, 0,2% de soufre) (2×10^4 Btu/livre)					
<i>Aucune élimination du soufre</i>					
3 X 10 ⁶ personnes	0	0,8	4,2	5,6	19
0,7 X 10 ⁷ personnes	0	0,2	1,0	1,3	4,4

^a Modifié d'après les données de Lave and Winkelstein. Pour plus de détails techniques, voir Référence [9].

^b 1 Btu = $1,054 \times 10^3$ J.

Tableau 2. Estimation des effets sur la santé de la production d'énergie électrique en 1975

Com-bustible	1975 (kW/heure × 10 ⁹) ^a	Nombre équivalent de centrales de 1000 MWe	Estimation du nombre de décès	Estimation du nombre de cas d'invalidité
Charbon	844	128	1900–15 000	25 000–39 000
Pétrole	292	44	88–4400	4000–7900
Gaz	297	45	6	600
Énergie nucléaire	168	26	18–42	130–470
Total	1601	243	2000–19 000	29 000–48 000

^a Estimation préliminaire. Voir référence [15].

L'utilisation d'un taux de conversion linéaire de SO₂ en SO₄ est le seul élément de chimie atmosphérique qui entre dans l'analyse pour le moment. Le recours à un seul indice de pollution, à savoir les sulfates, est sans aucun doute une manière trop simpliste de répertorier les risques que la pollution atmosphérique présente pour la santé. Enfin, faute de connaître la fonction exposition-réaction, surtout pour un faible niveau de pollution atmosphérique, nous avons posé en principe qu'il existait un rapport dose-effet linéaire, ce qui est courant pour estimer les risques des rayonnements.

Etant donné que nous envisageons les effets que de faibles augmentations peuvent avoir sur des niveaux de pollution atmosphérique ambiante déjà proches de doses entraînant des effets cliniquement décelables, il est probable que l'erreur admise dans cette hypothèse est inférieure à celle qu'entraînerait une extrapolation à de faibles doses de données relatives à des doses de rayonnement élevées. Même si la fonction exposition-réaction n'est pas linéaire, il est probable que les niveaux que nous étudions ne s'écartent pas tellement de la partie linéaire de la courbe.

L'augmentation du taux de mortalité total est ce que nous avons retenu dans la présente étude comme "effets sur la santé". Deux études, portant l'une sur plusieurs villes (Lave), l'autre sur une seule ville (Winkelstein), donnent fortement à penser qu'il existe un rapport entre les niveaux annuels moyens de pollution atmosphérique et l'augmentation du taux de mortalité [11, 12]. D'autres études font le même rapprochement mais ne permettent pas d'établir des fonctions quantitatives dose-réaction [13, 14]. C'est pourquoi nous sommes partis des données fournies par Lave et Winkelstein.

Le tableau 1 montre, pour diverses variantes technologiques et démographiques, l'accroissement de mortalité à prévoir par la suite de la pollution atmosphérique que provoquerait une centrale thermique à combustible fossile de 1000 MWe dans un rayon de 80 km.

On a combiné les données du tableau 1 aux estimations de la morbidité et de la mortalité correspondant aux cycles du combustible nécessaires au fonctionnement d'une centrale thermique de 1000 MWe pendant un an pour calculer les effets sur la santé de l'énergie électrique produite aux Etats-Unis en 1975. Ces données sont résumées dans le tableau 2. A partir de ce tableau, on estime les effets correspondant à un modèle de cycle total du combustible nécessaire à la production de 10¹⁰ kWh d'électricité en 1975:

Pour le charbon: 10 à 200 décès,
300 à 500 cas d'invalidité;

Pour le mazout: 3 à 150 décès,
150 à 300 cas d'invalidité;
Pour le gaz: 0,2 décès,
20 cas d'invalidité;
Pour l'énergie
nucléaire: 1 à 3 décès,
8 à 30 cas d'invalidité.

D'après les calculs actuariels, les accidents de réacteurs ne causent que 0,02 décès par GWe-année. Il s'agit là d'accidents lourds de conséquences mais peu probables.

Pour mieux situer le problème, rappelons que le nombre total des décès, aux Etats-Unis, est de l'ordre de 2×10^6 par an, le pourcentage de décès imputables à la production d'électricité se situant aux alentours de 0,1 à 1. Le nombre approximatif de décès pour le groupe d'âge de 1 à 74 ans est, aux USA, de $1,1 \times 10^6$, le pourcentage de décès imputables à la production d'électricité se situant entre 0,2 et 1,9. La pollution atmosphérique causée par des combustibles fossiles est de loin le principal facteur de mortalité. A titre de comparaison, on peut citer d'autres causes connues de décès aux USA: 17% de décès chez les fumeurs; 5% des décès dus à des accidents de voiture (dont la moitié causés par des conducteurs en état d'ivresse); et 5% dus à un traitement iatrogénique mortel.

LE MODELE D'EVALUATION ECONOMIQUE ET TECHNOLOGIQUE ETA-MACRO

Pour avoir une vue d'ensemble, il faut associer les effets sur la santé à un grand nombre d'autres facteurs. Il faut ensuite tenir compte de considérations économiques et technologiques. A cette fin, le modèle ETA-MACRO, qui représente une synthèse du modèle ETA (analyse d'évaluation de la technologie énergétique) et d'un modèle de croissance macro-économique prévoyant des substitutions entre apports de capital, de main-d'œuvre et d'énergie, s'est montré très utile [16, 17].

Le modèle ETA-MACRO permet de combiner des projections à long terme de l'offre et de la demande. Il sert à comparer les options raisonnables qui s'offrent aux Etats-Unis à mesure qu'ils tendent à devenir moins tributaires qu'ils ne le sont à l'heure actuelle des ressources en pétrole et en gaz et qu'ils diversifient davantage leur économie énergétique.

Le modèle tient compte de ce que les combustibles actuellement utilisés finiront par s'épuiser et donne des prévisions pour un horizon temporel particulièrement éloigné qui se situe au milieu du 21ème siècle. Pour éviter un foisonnement de détails encombrants, l'accent est mis sur les tendances nationales plutôt que sur les tendances intéressant les différentes régions. C'est la période postérieure à 1990, date à laquelle nous commencerons probablement à amorcer une importante transition et à exploiter de nouvelles sources d'énergie, qui retient l'attention. De toute évidence, une perspective à long terme ne peut que multiplier les incertitudes et les conjectures qu'implique toute évaluation technologique. Néanmoins, cette perspective à long terme semble indispensable si l'on veut prendre, *dès aujourd'hui*, des décisions judicieuses à propos de techniques dont la mise au point exige de dix à vingt ans et qui ne serviront que pendant une trentaine d'années. Le modèle ETA-MACRO tient compte explicitement des facteurs suivants:

- a) Interactions de l'énergie et de l'économie: le coût de plus en plus élevé de l'énergie et les difficultés d'approvisionnement en énergie empêcheront l'économie d'atteindre pleinement le taux de croissance potentiel du produit national brut et, partant, ralentiront l'accumulation future de capital.
- b) Maintien du rapport coût-efficacité; la hausse des prix ramènera la demande d'énergie au-dessous de la quantité prévue à partir des tendances observées.

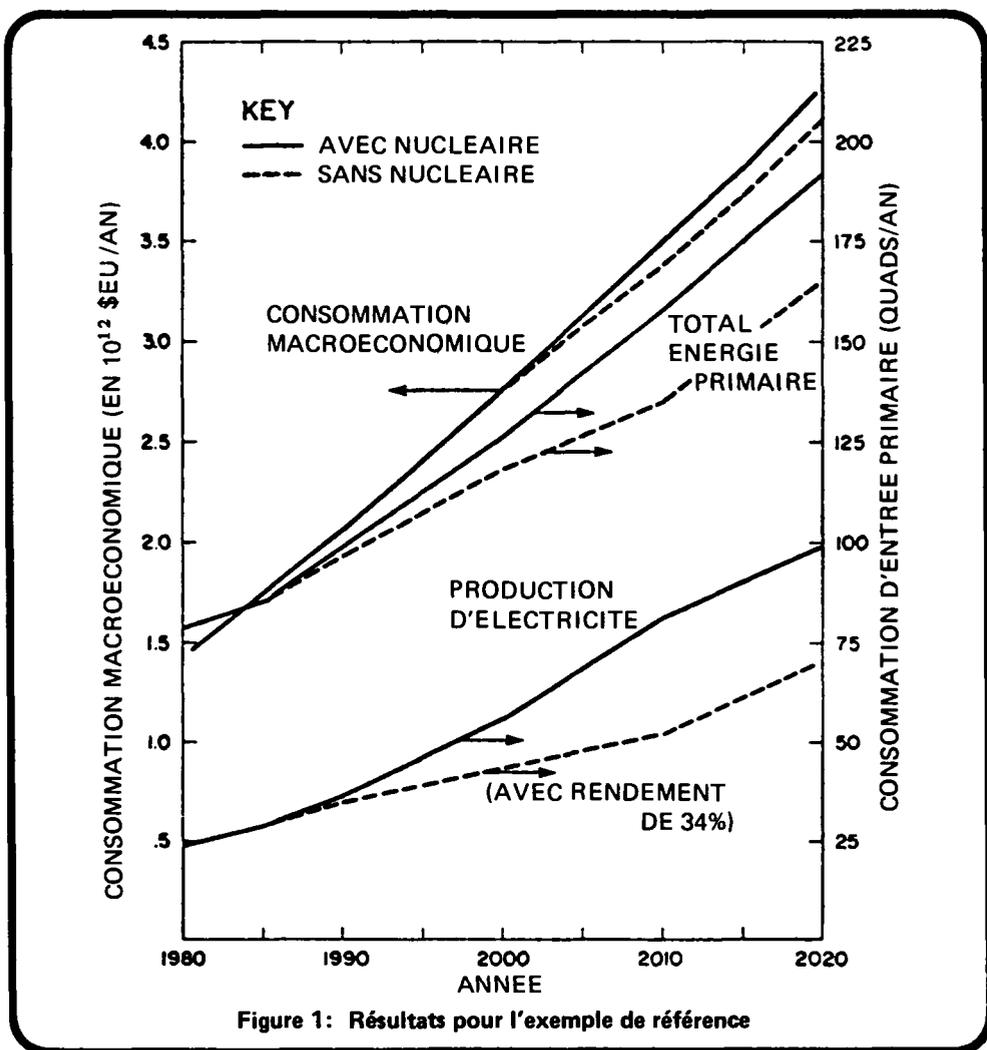


Figure 1: Résultats pour l'exemple de référence

- c) Remplacement d'un combustible par un autre: l'évolution de la situation incitera les consommateurs à remplacer le pétrole et le gaz par l'électricité, c'est-à-dire les chaudières à mazout par des pompes à chaleur.
- d) Nouvelles techniques d'approvisionnement en énergie: combustibles synthétiques, énergie nucléaire et énergie solaire, chacune de ces techniques présentant ses propres difficultés et impliquant des incertitudes quant à la date et au rythme d'application.

Le modèle simule une économie de marché dans le temps – en supposant que producteurs et consommateurs voient suffisamment loin pour prévoir les pénuries futures. On fait correspondre l'offre, la demande et les prix à l'aide d'un modèle de programmation dynamique *non* linéaire. Plus les prix montent, plus la quantité d'énergie qui semble devoir être disponible augmente et plus les consommateurs auront de raisons de ne pas gaspiller l'énergie.

Tous les coûts et bénéfices sont exprimés en dollars EU constants dont la valeur correspond au pouvoir d'achat de 1975. Toute hausse de prix due à l'inflation générale n'influe donc pas

sur l'analyse. Les hypothèses numériques sont pour la plupart celles qui ont été adoptées par le "Modelling Resource Group, Committee on Nuclear and Alternative Energy Systems, National Academy of Sciences – CONAES MRG" (Groupe d'établissement de modèles de ressources, Comité de systèmes d'énergie nucléaire et d'énergie non nucléaire, Académie nationale des sciences). D'après ces principes fondamentaux, le taux d'accroissement de la demande d'énergie est nettement inférieur au taux indiqué dans les rapports antérieurs sur le modèle ETA. Cependant, même avec les hypothèses retenues par le CONAES MRG, des dépenses considérables pourraient résulter pour l'économie des Etats-Unis si ces derniers décidaient de renoncer à l'énergie d'origine nucléaire.

Le coût d'une telle politique dépend en grande partie des hypothèses que l'on retient pour le charbon, qui représente la solution la plus immédiate de substitution à l'énergie nucléaire aux Etats-Unis. Pour tenir compte des conséquences que pourrait entraîner une exploitation extensive du charbon sur le plan de la santé publique, de l'environnement et de la climatologie mondiale, le MRG a défini une limite supérieure en fonction du taux annuel de consommation de ce combustible pour l'ensemble des usages: électricité provenant de centrales thermiques au charbon, utilisations directes et combustibles synthétiques. On a admis que cette limite supérieure prendrait la forme d'une courbe "logistique" en S, définie par trois points: la valeur réelle de 1970 représentant 13 quads*; une limite projetée équivalant à 40 quads pour l'an 2000 et une asymptote à long terme de 50 quads. De toute évidence, c'est là un domaine sujet à de grandes incertitudes et qui offre maintes possibilités de collaboration aux écologistes, spécialistes de la santé publique, économétriciens et ingénieurs. Nous espérons que nos calculs stimuleront d'autres chercheurs à poursuivre dans cette voie.

Conformément aux hypothèses retenues pour l'exemple de référence, il apparaît que le charbon ne constituerait pas une contrainte irrévocable avant l'an 2000 et que l'économie ne serait donc pas touchée par une politique de renoncement à l'énergie d'origine nucléaire jusqu'à cette date (voir figure 1). Après l'an 2000, les règles fondamentales du MRG prévoient que l'électricité d'origine solaire sera disponible en tant que technologie d'appui, mais que le coût uniformisé sera de 20 mills/kWh plus élevé que pour le charbon ou l'énergie d'origine nucléaire (voir tableaux 3, 4 et 5). Si l'on calcule l'ensemble des conséquences directes et indirectes de l'énergie d'origine solaire de coût élevé et d'autres systèmes énergétiques de rechange, il apparaît que les réductions totales de consommation globale s'élèvent à 109 dollars $\times 10^9$, soit 3,1% de la consommation totale en l'an 2010 (voir colonne du milieu du tableau 6). Si l'on fait la somme pour toutes les années de 1975 jusqu'en l'an 2050, la valeur actuelle de ces réductions est de 77 dollars $\times 10^9$ ou de 595 dollars $\times 10^9$, selon que les décisions officielles se basent sur un taux d'actualisation de 10% ou de 5%. Il faut noter que des réductions macro-économiques sont faibles au début et qu'elles augmentent rapidement après l'an 2000. C'est pourquoi un taux d'actualisation de 5% implique que la valeur actuelle de ces réductions serait de loin supérieure à deux fois la valeur qui résulterait d'un taux de 10%.

Les précédents résultats ont été fondés sur la valeur de 0,25 qui est notre meilleure estimation de σ , qui représente l'élasticité de substitution. Ce paramètre permet de mesurer s'il est facile ou difficile de substituer d'autres facteurs de production économiques à l'énergie. Si $\sigma = 0,25$, il s'ensuit qu'une augmentation de 10% du prix relatif de l'énergie entraînera une baisse de 2,5% de la consommation optimale d'énergie par rapport à d'autres facteurs de production économique, tels que le capital et le travail. Il y a une importante marge d'incertitude dans toute estimation économétrique de σ . Avec une élasticité de substitution plus élevée, les répercussions macro-économiques d'une politique de renonce-

*' 1 quad = 10^{14} Btu

Tableau 3. Hypothèses de coûts aux fins de comparaison économique de centrales de base exploitées à 65% de leur capacité (niveau général des prix de 1975)

Type de centrale électrique	Alimentée au charbon	Réacteur à eau ordinaire	Surgénérateur	Energie solaire
Dépenses d'équipement (dollars EU/kW)	520	650	810	1730
Coût par unité (mills/kWh)				
Exploitation et entretien	3,0	2,0	2,0	2,0
Coût du combustible	7,1	4,9	2,1	0
Dépenses d'équipement uniformisées ^a	12,2	15,2	19,0	40,5
Total	22,3	22,1	23,1	42,5

^a Coefficient de récupération du capital calculé pour un taux d'escompte de 13% par an, un facteur de charge de 65% et une durée de vie de 30 ans. D'où: $(0,1334/a) \{ \text{cap}_i \rightarrow 0,65\% (8,76 \cdot 10^3 \text{ h/a}) \} = 0,0234 \text{ cap}_i$

Tableau 4. Hypothèses de coûts aux fins de comparaison économique d'autres sources d'énergie non électrique (niveau général des prix de 1975)

Coûts par unité de l'équivalent du pétrole et du gaz naturel (PETG)	PETG	Combustibles synthétiques dérivés du charbon	Autres systèmes d'énergie non électrique
\$ EU/mm de Btu ^a	2,0 (2720 quads de ressources, y compris les importations)	3,7	5,0

^a 1 Btu = $1054 \times 10^3 \text{ J}$.

ment à l'énergie d'origine nucléaire seraient plus faibles que celles qui sont indiquées pour l'exemple de référence. Si par exemple on pose que $\sigma = 0,50$, les répercussions macro-économiques sont à peine perceptibles jusqu'en l'an 2000. Dans ce cas, la demande d'énergie augmenterait plus lentement, les ressources en pétrole et en gaz seraient moins rapidement épuisées et l'on aurait davantage de temps pour trouver une transition vers d'autres sources d'énergie de coût élevé. Protéger les ressources par une action sur les prix résoudrait nos problèmes d'énergie pour les 50 années à venir, s'il s'avère que σ est égal ou supérieur à 0,50.

Avec une élasticité de substitution suffisamment faible, l'approvisionnement trop juste en énergie pourrait toutefois entraîner d'importantes répercussions sur le plan économique.

Tableau 5: Exemple de référence ETA-MARCO

	1985	1990	2000	2010	2020	2030
1. PRODUCTION NATIONALE D'ENERGIE, PAR SOURCE, NETTE OU EXPORTATIONS (QUADS)	66,6	78,1	105,1	142,3	185,6	229,5
1.1. CHARBON TOTAL:	17,9	21,2	28,7	45,0	47,7	49,0
A. PRODUCTION D'ELECTRICITE	12,4	15,1	21,3	24,5	18,5	9,4
B. COMBUSTIBLES SYNTHETIQUES	--	0,0	0,0	11,5	18,2	26,2
C. UTILISATIONS DIRECTES ET AUTRES	5,5	6,1	7,4	9,0	11,0	13,4
1.2. GAZ NATUREL, PETROLE ET CONCENTRES DE GAZ NATUREL	36,5	39,8	42,1	31,6	13,4	5,0
1.3. ENERGIE NUCLEAIRE, TOTAL:	8,3	12,7	27,1	48,1	70,1	95,3
REACTEURS A EAU ORDINAIRE	8,3	12,7	27,1	46,5	47,7	33,3
SURGENERATEURS	--	--	0,0	1,6	22,3	62,0
1.4. ELECTRICITE D'ORIGINE SOLAIRE	--	--	0,0	0,0	0,0	0,0
1.5. HUILE DE SCHISTE	--	--	1,5	5,6	9,6	11,5
1.6. ENERGIE HYDROELECTRIQUE, GEOTHERMIQUE, ETC.	3,9	4,4	5,7	7,2	9,3	11,9
1.7. AUTRES SYSTEMES ENERGETIQUES NON ELECTRIQUES	0,0	0,0	0,0	4,9	35,6	56,8
2. IMPORTATIONS DE PETROLE ET DE GAZ (QUADS)	18,2	19,9	21,1	15,8	6,7	2,5
3. CONSOMMATION TOTALE D'ENERGIE (QUADS)	84,9	98,0	126,2	158,1	192,3	232,0
4. PRODUCTION D'ELECTRICITE (10 ¹² kWh)	2,9	3,6	5,6	8,1	9,9	11,7
4.1. POURCENTAGE DE PETROLE ET DE GAZ	14,7	9,0	1,9	0,0	0,0	0,0
4.2. POURCENTAGE DE CHARBON	43,6	43,5	39,7	31,8	19,7	8,4
4.3. POURCENTAGE D'ENERGIE NUCLEAIRE	28,4	35,3	48,3	59,3	70,9	81,4
4.4. POURCENTAGE D'AUTRES SOURCES D'ENERGIE	13,3	12,2	10,1	8,9	9,4	10,2
5. CONSOMMATION D'URANIUM (MILLIONS DE TONNES DE U ₃ O ₈ , A PARTIR DE 1975)	0,2	0,4	1,0	2,1	3,5	3,7
6. PRIX DANS LE PAYS:						
6.1. CHARBON (\$/mm BTU)	0,7	0,7	0,7	1,5	1,5	1,5
6.2. PETROLE ET GAZ (\$/mm BTU)	2,2	2,4	3,3	5,0	5,0	5,0
6.3. ELECTRICITE (MILLS/kWh)	21,7	22,0	22,1	24,2	24,6	25,8
6.4. URANIUM (\$/LB, U ₃ O ₈)	30,7	31,3	34,4	44,5	75,7	141,2

Tableau 6: Résultats économiques du modèle MACRO – trois autres formes d'élasticité de substitution

Elasticité de substitution		0,50	0,25	0,15
Contrainte en matière d'approvisionnement		(même valeur que pour l'exemple de référence)	(exemple de référence)	(avec contraintes supplémentaires en matière d'approvisionnement)
Consommation globale en l'an 2010 (\$EU × 10 ⁹ en prix de 1975)	Avec énergie nucléaire	3566	3496	3245
	Sans énergie nucléaire	3552	3387	2799
Réduction de la consommation en l'an 2010	(\$EU × 10 ⁹) (en pourcentage)	14 0,4%	109 3,1%	446 13,7%
Taux d'actualisation officiel	Valeur actuelle de la réduction de consommation, 1975–2050 (\$EU × 10 ⁹)			
5%		293	595	3089
10%		36	77	456

Pour illustrer cette éventualité, nous avons calculé une série de cas où $\sigma = 0,15$ (au lieu de la valeur de 0,25 qui est celle de l'exemple de référence). En outre, nous avons effectué les réductions suivantes (qui se traduisent par une augmentation des prix) en ce qui concerne l'approvisionnement en énergie d'origine non nucléaire:

- La limite supérieure de consommation de charbon est réduite à 25quads (au lieu de 40) en l'an 2000 et l'asymptote est ramenée à 40 quads (au lieu de 50);
- Les ressources en huile de schiste ne sont pas exploitées en raison des contraintes qu'impose le maintien de la qualité de l'air et de l'eau;
- La date à laquelle on introduira l'électricité produite à grande échelle directement à partir de l'énergie solaire est retardée et prévue pour l'année 2020 au lieu de l'an 2000, et
- Le coût AES (système énergétique de recharge) équivaut au coût du pétrole et du gaz, c'est-à-dire à 8 dollars au lieu de 5 dollars par million de Btu¹.

¹ Le principe de l'AES (système énergétique de recharge) a été admis par le CONAES MRG comme une technologie d'appui possible pour produire de l'énergie non électrique non polluante. Le chauffage et le refroidissement par énergie solaire en seraient un exemple. Au nombre des autres possibilités, on pourrait citer la distillation de l'huile de schiste in situ, la transformation de la biomasse, la production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire et l'exploitation des ressources pétrolières non classiques. Dans le cadre des hypothèses retenues dans l'exemple de référence, le système énergétique de recharge ne devient pas une source importante d'énergie jusque vers l'an 2010 (voir tableau 5). Pour l'an 2010 et les années ultérieures, le rythme d'introduction d'autres systèmes énergétiques paraît assez élevé. Ces taux sont probablement plus optimistes que ceux qui ont été adoptés par le MRG pour des techniques mieux comprises telles que les combustibles synthétiques et les surgénérateurs.

Même dans ces conditions défavorables, l'activité économique globale ne serait que modérément touchée si elle disposait d'énergie d'origine nucléaire. En l'an 2000, par exemple, il n'y aurait pratiquement aucune différence en ce qui concerne la consommation totale. Avec une politique de renoncement à l'énergie nucléaire, les pertes économiques seraient toutefois considérables. Elles s'élèveraient à 132 dollars $\times 10^9$ en l'an 2000 et passeraient à 446 dollars $\times 10^9$ en l'an 2010 (voir la dernière colonne du tableau 6), ce qui correspondrait à une réduction de 13,7% de la consommation pour la dernière année. Avec un taux d'actualisation de 5%, la valeur actuelle de la réduction de la consommation serait de 3089 dollars $\times 10^9$ au cours de la période 1975–2050. Il faudrait un concours de circonstances peu probable pour aboutir à ces résultats, mais une telle situation semble toutefois de loin plus probable que certaines catastrophes lourdes de conséquences mais de probabilité faible, qui ont été examinées à propos de l'énergie nucléaire.

CONSEQUENCES D'UN MORATOIRE NUCLEAIRE

Dans cette conclusion, nous indiquerons comment employer conjointement les modèles BEAD et ETA-MACRO pour analyser des questions telles que les conséquences d'un moratoire nucléaire. Chaque modèle est calculé de manière différente. Le modèle BEAD est décomposé par régions et permet ainsi d'estimer les effets sur la santé, alors que le modèle ETA-MACRO s'applique au pays tout entier. Nous verrons que ces deux modèles se complètent mutuellement. Chacun d'eux permet de mieux connaître les résultats obtenus grâce à l'autre modèle.

Nous commençons par résumer les résultats du modèle ETA-MACRO pour un point donné dans le temps: l'an 2000. Notons que, dans le tableau 7, il existe une différence notable dans la consommation totale de charbon à compter de cette date: 28,7 quads si l'on dispose d'énergie nucléaire et 40 quads si l'on n'installe aucune centrale nucléaire après 1975.

Parmi les options qui s'offrent en matière d'approvisionnement en énergie et de conservation des ressources, le modèle ETA-MACRO choisit automatiquement la solution la moins coûteuse. Si l'on dispose d'énergie nucléaire, le mieux est d'exploiter à un rythme plus lent les ressources en pétrole et en gaz, même si la quantité totale d'énergie consommée en l'an 2000 est plus importante (126,2 quads contre 118 quads). Il convient de remarquer que la production d'énergie hydroélectrique, géothermique et la production d'huile de schiste et de combustibles synthétiques à base de charbon ne s'en trouvent pas touchées et que les principales différences apparaissent dans les sources de production d'électricité. La réduction d'énergie électrique d'origine nucléaire (450 GWe) n'est compensée que par une augmentation de 200 GWe dans des centrales thermiques alimentées au charbon.

Nous utilisons maintenant le modèle BEAD pour examiner, à l'échelle régionale, les répercussions qu'entraîne pour la santé la production de ces 200 GWe supplémentaires dans des centrales thermiques au charbon. Pour appliquer ce modèle à ces problèmes, nous commençons par étudier les effets sur la santé particuliers à chaque région (indiqués dans le tableau 9) pour chacune des 200 centrales supplémentaires alimentées au charbon, qui seraient nécessaires si l'on renonçait temporairement à l'énergie d'origine nucléaire. Ces centrales ont été réparties dans les neuf régions géographiques en fonction de l'accroissement démographique escompté entre 1970 et l'an 2000 (Projections de la population résidente de OBERS). On a admis que le charbon supplémentaire serait uniquement du charbon à faible teneur en soufre provenant des mines à ciel ouvert de l'ouest et que le traitement de précombustion du charbon à faible teneur en soufre ajouté à la désulfuration de gaz de fumée provoquerait des émissions de soufre qui correspondraient à celles qui résultent d'un charbon contenant 0,5% de soufre et d'une valeur calorifique de 12 500 Btu par livre. Le

Tableau 7: Offre et demande d'énergie en l'an 2000*(Unités: 10¹⁵ Btu d'énergie primaire^a – équivalent de combustible fossile)*

	Exemple de référence avec énergie nucléaire		Aucune installation de centrale nucléaire après 1975	
	Electricité ^b	Energie non- électrique	Electricité ^b	Energie non- électrique
Pétrole et gaz naturel		63,2		69,3
Huile de schiste		1,5		1,5
Energie hydro- électrique, géo- thermique, éolienne, pro- duite à partir de déchets, etc.	5,7		5,7	
Réacteurs à eau ordinaire	27,1 (=475 GWe)		1,5 (=25 GWe)	
Charbon	21,3 (=375 GWe)	7,4	32,6 (=575 GWe)	7,4
Total	54,1	72,1	39,8	78,2

^a 1 Btu = 1,054 × 10⁹ J.

^b Fondé sur un rendement thermique de 34% et un facteur de charge de 65%, d'où
10¹⁵ Btu/a = 17,6 GWe.

nombre de décès imputables aux transports, c'est-à-dire à la suite d'accidents survenant surtout à des passages à niveau est calculé d'après le nombre de tonnes transportées par mile, en retenant la distance qui sépare chaque région des gisements de charbon de l'ouest.

Pour l'ensemble du pays, le modèle BEAD indique que l'exploitation de ces 200 centrales entraînerait de 1500 à 18 000 décès supplémentaires en l'an 2000, surtout par suite de la pollution atmosphérique qui en résulterait (voir tableau 8). Ces décès seraient consignés statistiquement, mais ne seraient pas mentionnés individuellement. Dans l'ensemble, cet effet est du même ordre de grandeur que celui qui a été estimé par Rasmussen pour un seul accident de réacteur. La seule différence est que c'est une question de chance. Les décès résultant de l'exploitation des 200 centrales alimentées au charbon se produiraient à longueur d'année. Les décès causés par un accident, rare, de fusion du cœur du réacteur, auraient une chance sur 1 million de survenir.

Le tableau 8 montre les fonctions dose-réaction calculées à partir des données de Lave et Winkelstein, par centrale, pour chaque région.

Le tableau 9 reporte les résultats aux 200 centrales nécessaires pour remplacer l'électricité d'origine nucléaire dans le cas où l'on renoncerait temporairement à cette forme d'énergie.

Tableau 8: Répercussions des centrales thermiques par région – 1970
en milliers de MWe, 0,5% de soufre, $2,9 \times 10^7$ joule par kg (12 500 Btu par livre)

Région***	Population de 1970* X 10 ⁶	Surmortalité annuelle due à la pollution atmosphérique**					Décès dans les mines à ciel ouvert	Décès dus aux chemins de fer	Surmortalité annuelle totale**				
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
NE	5,23	0	5,8	29	39	131	0,1	3,1	3,2	9	32	42	134
MA	7,07	0	7,8	39	52	177	0,1	2,6	2,7	11	42	55	180
ENC	2,88	0	3,2	16	21	72	0,1	2,0	2,1	5,3	18	23	74
WNC	0,08	0	0,09	0,4	0,6	2	0,1	0	0,1	0,2	0,5	0,7	2,1
SA	2,50	0	2,8	14	19	63	0,1	2,6	2,7	5,5	17	22	66
ESC	0,77	0	0,8	4,3	5,7	19	0,1	1,7	1,8	2,6	6,1	7,5	21
WSC	0,74	0	0,8	4,1	5,5	19	0,1	3,6	3,7	4,5	7,8	9,2	23
MT	0,14	0	0,2	0,8	1,0	3,5	0,1	0	0,1	0,3	0,9	1,1	3,6
PAC	0,50	0	0,6	2,8	3,7	13	0,1	4,0	4,1	4,7	6,9	7,8	17

* Chiffre moyen de la population vivant dans un rayon de 80 km autour des centrales prévues dans la base de données de Morgan et Morris qui porte sur 100 centrales, sauf pour les régions WSC et PAC, pour lesquelles la base de données ne mentionne aucun site de centrale. On a trouvé pour les sept autres régions un rapport moyen entre la population vivant dans un rayon de 80 km du site de la centrale et la densité moyenne de la population obtenue lors du recensement. Pour les régions WSC et PAC, on a donc estimé la population vivant dans un rayon de 80 km d'une centrale en appliquant ce taux à la densité de la population de la région.

** Les estimations sont les suivantes:

- 1) Estimations proportionnelles obtenues à partir des données de Lave (10^{ème} percentile).
- 2) Estimations médianes obtenues à partir des données de Lave.
- 3) Estimations proportionnelles (90^{ème} percentile) obtenues à partir des données de Lave.
- 4) Estimations linéaires obtenues à partir des données de Winkelstein.
- 5) Estimations non linéaires provenant des données de Winkelstein transformées en estimations linéaires. En prenant comme hypothèse $78,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de quantité totale de particules, des sulfates trois fois plus efficaces que les particules en suspension, et un revenu familial annuel de 6000 dollars.

*** Voir tableau 9 pour trouver les explications sur les sigles représentant les régions.

Tableau 9. 200 centrales réparties par région en fonction de l'accroissement démographique relatif

Région	Accroissement démographique de 1970 à 2000		Nombre de centrales prévues	An 2000				
	10 ⁶	%		(1)	(2)	Surmortalité annuelle totale*		
					(3)	(4)	(5)	
New England	3,116	26	11,2	45	127	451	592	1889
Middle Atlantic	8,505	23	30,6	102	414	1582	2072	6781
East North Central	9,88	24	35,5	93	233	793	1013	3258
West North Central	2,169	13	7,8	0,9	1,8	4,4	6,3	18
South Atlantic	13,618	43	49,0	189	386	1191	1541	4624
East South Central	3,483	26	12,5	28	41	96	118	331
West South Central	4,197	21	15,1	68	83	143	168	421
Mountain	2,539	29	9,1	1,2	3,6	11	13	43
Pacific	8,089	30	29,1	155	178	261	296	643
TOTAL	55,596		200	682	1467	4532	5819	18008

- * Voir le tableau 8 pour trouver des explications sur la façon dont on est parvenu à chaque estimation.
On suppose que l'accroissement de la population exposée est proportionnelle à l'accroissement de la population de la région recensée dans son ensemble.

Les deux premières colonnes donnent les accroissements démographiques dans chaque région de 1970 à l'an 2000. La troisième colonne donne la répartition par région des 200 centrales en fonction de l'accroissement démographique, et les cinq dernières colonnes donnent la surmortalité annuelle totale résultant de ces centrales supplémentaires, calculée à partir des cinq estimations figurant dans le tableau 8. Comme on l'a déjà fait remarquer, la surmortalité totale peut varier de 700 décès par an, si l'on prend comme hypothèse peu vraisemblable que les effets de la pollution atmosphérique équivalent à zéro, au chiffre plus vraisemblable de 1500 à 18 000. D'après les prévisions, le chiffre total de la population des Etats-Unis en l'an 2000 sera de 263×10^6 , le nombre total approximatif de décès s'élevant à $2,6 \times 10^6$ par an. La limite supérieure de la surmortalité annuelle correspondrait donc à 1% du taux annuel de mortalité. Etant donné que le modèle météorologique utilisé dans ces estimations se limite à un rayon de 80 kilomètres autour de la centrale électrique (alors qu'en réalité les sulfates vont bien plus loin), l'estimation du nombre de décès dus à la pollution atmosphérique qui figure dans les tableaux 8 et 9 est probablement faible. Si l'on tient compte des effets que la circulation de sulfates sur de longues distances a sur la santé, ce nombre peut être de trois [18] à dix [19] fois supérieur. En outre, les chiffres indiqués incluent seulement la mortalité et non pas la morbidité. On estime que les cas de morbidité dus à la pollution atmosphérique sont environ cinq fois supérieurs au nombre de décès.

Comme on l'a déjà mentionné, on s'intéresse beaucoup aux risques lourds de conséquences mais peu probables résultant de rejets d'effluents radioactifs provenant d'un éventuel accident de réacteur nucléaire qui provoquerait la fusion du cœur du réacteur. Mais, si ces conséquences d'une importance considérable sont multipliées par un très faible coefficient de probabilité, le nombre escompté de décès provoqués par le pire accident possible ne changerait en rien les 76 à 190 décès excédentaires résultant chaque année du cycle total du combustible nécessaire pour alimenter les 450 centrales nucléaires (en l'an 2000). Nous n'avons pas tenu compte des risques de détournement de matières nucléaires ni des risques de sabotage d'installations nucléaires, mais il est difficile de croire que ces questions soient insolubles ou qu'elles comptent plus sur le plan de la santé que 18 000 décès supplémentaires chaque année.

POSTFACE

La place dont nous disposons ne nous permet pas d'aborder en détail le rapport Ford-Mitre, "Nuclear Power Issues and Choices" (Questions d'énergie d'origine nucléaire et choix) qui a paru à un moment où notre manuscrit original était déjà rédigé. Nous sommes en grande partie d'accord avec le rapport Ford-Mitre sur les avantages d'ordre écologique, sanitaire et économique qu'offrent les réacteurs à eau ordinaire. Nous sommes également d'accord avec les conclusions qu'ils ont formulées sur les centrales de retraitement du plutonium, qui sont exploitées par différents pays non dotés d'armes nucléaires. Ces centrales constituent une "nuisance séduisante" et contribuent peu à ralentir la course aux armes nucléaires.

Mais, pour ce qui est de la question recherche-développement en matière de surgénérateurs, nous croyons que le raisonnement de Ford et Mitre est defectueux. Ils partent du principe que les ressources en charbon et en uranium sont abondantes dans le monde, *en dehors des Etats-Unis d'Amérique*. Or, si ces ressources sont limitées, le fait que nous ne réussissions pas à mettre au point le surgénérateur stimulera probablement d'autres pays à faire des efforts de développement encore plus grands. Les Etats-Unis ne peuvent pas participer efficacement à des programmes internationaux de garanties s'ils renoncent au surgénérateur. Et sur le plan pratique, force est de reconnaître que les pays qui souhaitent acquérir des armes nucléaires peuvent le faire, à moindre frais et en moins de temps, par d'autres moyens que par l'intermédiaire de programmes d'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire.

Références

- [1] COMAR, C.L., SAGAN, L.A., Health effects of energy production and conversion, *Annual Review of Energy* 1 (1976) 581. Reviews Inc. (1976) 581.
- [2] SAGAN, L.A., Health costs associated with the mining, transport and combustion of coal in the steam electric industry, *Nature* 250 (1974) 107.
- [3] HAMILTON, L.D., MORRIS, S.C., "Health effects of fossil fuel power plants", Proc. Symp. Population Exposures, Knoxville, 1974, CONF-741018 (1974) 317.
- [4] (HAMILTON, L.D., Ed.) "The health and environmental effects of electricity generation — a preliminary report", Biomedical and Environmental Assessment Group, Upton, New York, BEAG-HE/EE 12/74, BNL Rep. No. 20582 (1974).
- [5] COORDINATING COMMITTEE ON AIR QUALITY STUDIES, National Academy of Sciences and National Academy of Engineering. Air Quality and Automobile Emission Control, prepared for the US Senate Committee on Public Works, Washington, DC (1974).
- [6] ALAIRE, Y., et al., Long-term continuous exposures to sulfur dioxide in cynomolgus monkeys, *Arch. Environ. Health* 24 (1972) 115.

- [7] McJILTON, C., FRANK, R., CHARLSON, R., Role of relative humidity in the synergistic effect of a sulphur dioxide-aerosol mixture on the lung, *Science* **182** (1973) 503.
- [8] US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, Monitoring and Air Quality Trends Report 1972, Research Triangle Park, Carolina, (1973).
- [9] HAMILTON, L.D., MORRIS, S.C., Health Costs of Substituting Coal-Electric as Alternative to Nuclear Power in a Nuclear Moratorium, Brookhaven Natl. Lab. Rep. BNL No. 22464 (Rev. 1977).
- [10] MORGAN, M.G., et al., A probabilistic methodology for estimating air pollution health effects for coal-fired steam electric plants, *Energy Systems and Policy* (in press).
- [11] WINKELSTEIN, W., et al., The relationship of air pollution and economic status to total mortality and selected respiratory system mortality in men, *Arch. Environ. Health* **14** (1967) 162.
- [12] LAVE, L.B., SESKIN, E.P., An analysis of the association between US mortality and air pollution, *J. Am. Stat. Assoc.* **68** (1973) 284.
- [13] HEWITT, D., Mortality in the London borough, 1950-52, with special reference to respiratory disease, *Br. J. Prev. Soc. Med.* **10** (1956) 45.
- [14] PAŠIĆ, H., ČERKEZ, F., "The effect of air pollution on mortality in Sarajevo", *Proc. Int. Conf. Sulleldorf*, 1973.
- [15] *Electrical World* **185** (1976) 54.
- [16] MANNE, A.S., ETA: A model for energy technology assessment, *Bell J. Econ. Manage. Sci.* (Autumn 1976).
- [17] MANNE, A.S., ETA-MACRO: A model of Energy-Economy Interactions, Dept. of Operations Research, Stanford Univ. Rep. (Rev. 1977).
- [18] HAMILTON, L.D., et al., A Perspective on the Energy Future of the Northeast: Health and Environmental Impacts of Alternative Energy Futures for the Northeast, Brookhaven Natl. Lab. Summary, BNL Rep. No. 21 611 and draft (1976).
- [19] HAMILTON, L.D., "US electricity through the year 2000: coal or nuclear? Alternative sources and health", in *CRC Forum on Energy, Session II: US Electricity Through the Year 2000: Coal or Nuclear?* (BUDNITZ, R.T., Ed.), CRC Press Inc., Cleveland (1977).

Cette communication a été présentée à la Conférence internationale sur l'énergie d'origine nucléaire et son cycle du combustible, qui s'est tenue à Salzbourg (Autriche) du 2 au 13 mai 1977.