

# Énergie ET Sécurité

NO. 5 1998

UNE PUBLICATION D'IEER

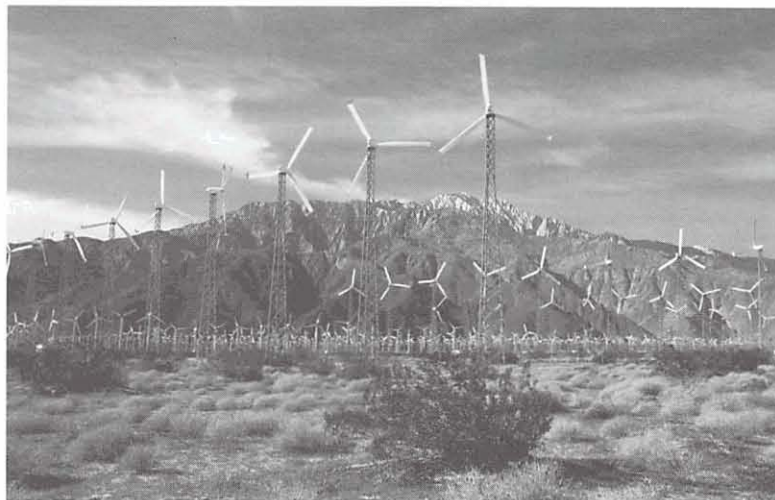
## L'énergie nucléaire n'est pas la solution aux changements climatiques de la planète

ARJUN MAKHIJANI

Les récents débats sur les changements climatiques reprennent la même antienne: l'énergie nucléaire doit jouer un rôle important dans toute stratégie visant à la réduction des gaz à effet de serre (GES). Les partisans de cette solution affirment que, puisque l'énergie nucléaire est une technologie sans émissions de carbone, elle doit jouer un rôle important dans la réduction des émissions de gaz carbonique tout en répondant à des besoins énergétiques croissants. Cette affirmation ne résiste pas à un examen minutieux, technique et économique. L'énergie nucléaire et la consommation massive de combustibles fossiles créent chacun leurs propres problèmes. Cet article examine les questions en rapport avec l'énergie nucléaire tandis que les autres textes, consacrés au réchauffement de la planète (p. 3) et à la mise en place d'un approvisionnement énergétique (p. 5) durable abordent certaines questions relatives aux combustibles fossiles.

### La sûreté des réacteurs

Il n'y a pas de solution réalisable en pratique, ou raisonnable, qui éliminerait les risques pour la sûreté et la prolifération, résultant de l'énergie nucléaire civile. Tous les types de réacteurs qui ont été développés ou conçus posent un certain risque d'accident catastrophique d'une ampleur comparable à celui de Tchernobyl, bien que les mécanismes particuliers d'un tel accident et ses probabilités d'occurrence dépendent du type de réacteur.<sup>1</sup> Ceci est en partie dû à ce que l'énergie nucléaire civile a été développée comme un auxiliaire de



Systèmes d'énergie éolienne—une des parties constituantes d'une énergie future durable

## Le lien entre énergie et sécurité

Beaucoup de problèmes fondamentaux, écologiques, économiques ou de sécurité internationale qui affecteront la survie et le bien-être de l'humanité dans les siècles à venir sont centrés sur un seul mot: *l'énergie*. Le vingt et unième siècle verra-t-il une renaissance de l'énergie nucléaire pour contrecarrer l'accumulation des gaz à effet de serre (GES) qui menacent de changer radicalement le climat de la planète? Est-ce que le plutonium fera son entrée sur le marché comme source d'énergie utilisée à grande échelle, augmentant ainsi les menaces de prolifération? Est-ce que le robinet du pétrole du golfe Persique (le "lien vital" de l'Occident qui curieusement et problématiquement, se trouve en dehors de l'Occident), sera perturbé par des conflits ayant trait aux armes nucléaires et aux armes de destruction de masse?

Ces questions ne sont pas totalement nouvelles. Par exemple, pendant la Guerre froide, certains scénarios de guerre nucléaire du Pentagone commençaient par une crise dans la région golfe Persique et du Proche-Orient pour ensuite s'étendre à l'Europe. Pendant la Seconde Guerre mondiale, une grande partie de la stratégie était axée sur le contrôle des ressources pétrolières, l'élément vital de la machine de guerre de tous les protagonistes. En effet,

### DANS CE NUMERO

Le Réchauffement de la Planète et l'effet de serre .....	3
La création d'un approvisionnement énergétique durable .....	5
Le Protocole de Kyoto .....	8

LIRE LA SUITE, PAGE 13.  
VOIR LA PAGE 16 POUR LES ANNOTATIONS

LIRE LA SUITE, PAGE 2



la crise américano-japonaise qui a explosé avec le bombardement de Pearl Harbor était centrée sur les ressources de pétrole de l'Indonésie alors colonisée par la Hollande.<sup>1</sup> Une partie de la stratégie des Alliés durant la deuxième guerre mondiale a été d'empêcher les Allemands d'accéder aux ressources d'uranium du Congo, alors colonisé par la Belgique.<sup>2</sup>

Les effets sur l'environnement ont aussi été manifestes dans le passé. Le fréquent recours au charbon dans les zones urbaines a donné naissance à de terribles épisodes de pollution de l'air, par exemple à Londres (et maintenant dans certaines villes de Chine). Les conséquences dévastatrices de la dissémination de produits de la fission tels que l'iode 131 et le césium 137, à la suite d'accidents graves dans des centrales nucléaires, font partie des inquiétudes principales causées par l'énergie nucléaire. L'exploitation du charbon et de l'uranium a causé une pollution grave dans de nombreuses régions du monde. Le plutonium 239, généré en grandes quantités dans les centrales nucléaires, a été une source d'inquiétude majeure vis-à-vis de l'énergie nucléaire, non seulement à cause de son utilité pour la fabrication des armes atomiques, mais aussi parce qu'il a une longue demi-vie (24 000 années) et est très radioactif.

*Ces problématiques sont maintenant réunies dans une même conjoncture politique, militaire et écologique sans précédent. En voici quelques caractéristiques:*

- L'accumulation des GES (notamment le gaz carbonique, le méthane, l'oxyde nitreux, et les halocarbones) a atteint un tel niveau qu'il est probable qu'elle soit en train de changer le climat global. L'expansion de l'utilisation de l'énergie nucléaire pour éviter un changement climatique catastrophique, a maintenant, non seulement le soutien de l'industrie nucléaire mais aussi celui de nombreux gouvernements, parmi lesquels, certains des plus riches et des plus puissants.
- L'écroulement de l'Union soviétique, et la crise économique qui l'a suivi dans la région, ont renforcé la peur que des têtes nucléaires ou des matières utilisables pour les armes nucléaires (d'origine militaire ou civile) puissent atterrir sur le marché noir.
- Les Etats-Unis, la Russie, et d'autres Etats nucléaires proposent l'utilisation du surplus de plutonium des programmes militaires comme combustible dans les centrales nucléaires commerciales. De plus, malgré les piètres caractéristiques économiques, écologiques et de non prolifération du plutonium, de puissantes bureaucraties dans plusieurs pays (comme la France, l'Angleterre, la Russie, le Japon et l'Inde) soutiennent la continuation du retraitement du combustible usé. Dans le même temps, aux Etats-Unis, la séparation du plutonium à partir du combustible usé civil a

retrouvé un intérêt aux yeux de défenseurs puissants financièrement et politiquement.

- Depuis la révolution iranienne de 1979, la région du golfe Persique connaît des crises militaires intenses et à long terme, parmi lesquelles, la guerre entre l'Iran et l'Iraq des années quatre-vingts, l'invasion de 1990 du Koweït par l'Iraq, la guerre du Golfe de 1991, les programmes irakiens de développement d'armes de destruction de masse, et les sanctions des Nations Unies contre l'Iraq.
- Une importante partie des ressources mondiales de gaz naturel, qui pourraient être utilisées pour soulager la crise des GES, se trouve dans les régions de l'Asie centrale et du golfe Persique, et dans des régions, sur terre et offshore, qui appartiennent à des pays comme l'Azerbaïdjan, le Kazakhstan, l'Iran, l'Arabie saoudite, l'Iraq et le Katar. Ces mêmes pays possèdent également les plus grandes réserves de pétrole du monde. Dès lors, la sécurité du transport du gaz naturel, qui pourrait être vitale pour l'approvisionnement

LIRE LA SUITE, PAGE 20

## Énergie & Sécurité

*Énergie et Sécurité* est un bulletin sur la non-prolifération, le désarmement et les énergies durables. Il est publié quatre fois par an par:

**L'Institut pour la Recherche sur l'Énergie et l'Environnement (IEER)**

IEER fournit au public et aux décideurs politiques des études techniques claires et scientifiquement solides dans un grand nombre de domaines. L'objectif de l'IEER est d'apporter une analyse scientifique d'excellente qualité aux questions politiques touchant le public tout en favorisant la démocratisation de la science et un environnement plus sain.

### Crédits pour ce numéro

*Traduction:* Annie Makhijani

*avec la collaboration de:* Jean Luc Thierry

*Mise en page:* Cutting Edge Graphics, Washington D.C.

*Énergie et Sécurité* est gratuit pour tous.

Rédactrice en chef: Anita Seth

Le cinquième numéro de la version française a été publié en juillet 1998.

### Merci à ceux qui nous soutiennent

Nous remercions sincèrement les institutions dont le généreux soutien financier a rendu possible notre projet mondial sur "les dangers des matières nucléaires."

• W. Alton Jones Foundation • John D. And Catherine T. MacArthur Foundation • C.S. Fund • HKH Foundation • New Land Foundation •

Nous remercions également les institutions qui financent notre projet d'aide technique pour les organisations militantes. Nous nous inspirons beaucoup de ce projet pour notre projet mondial.

• Public Welfare Foundation • John Merck Fund • Ploughshares Fund • Unitarian Universalist Veatch Program at Shelter Rock • Rockefeller Financial Services • Stewart R. Mott Charitable Trust • Town Creek Foundation • Beldon II Fund • DJB Foundation •



# Le réchauffement de la planète et l'effet de serre

KEVIN GURNEY

Les gaz qui constituent l'atmosphère, et la façon dont l'énergie les traverse ou est absorbée par ceux-ci, jouent un rôle crucial dans la régulation de la température de la planète. L'atmosphère, principalement composée de molécules d'azote (78 pour cent) et d'oxygène (21 pour cent), contient de petites quantités de gaz appelés **gaz radiatifs actifs**. Les plus importants d'entre eux sont la vapeur d'eau ( $H_2O$ ), et le gaz carbonique ( $CO_2$ ). Tous les deux existent en quantités relativement minimes. Ces gaz laissent passer presque toute la lumière, principalement le rayonnement visible, à travers l'atmosphère jusqu'à la surface de la planète où 70 pour cent de l'énergie est absorbée, augmentant la température de la planète. Ensuite, la terre émet le rayonnement thermique (infrarouge) vers l'espace, ce qui maintient un équilibre énergétique: la quantité qui entre dans le système terre/atmosphère est la même que celle qui le quitte. En chemin, quittant l'atmosphère, ce rayonnement thermique est intercepté par les gaz radiatifs actifs. Ils absorbent le rayonnement sortant, ce qui augmente leur température. Cette interaction entre l'émission du rayonnement thermique et l'absorption par l'atmosphère élève la température globale de la planète et du système atmosphérique au delà de ce qu'elle serait si l'atmosphère n'était pas présente. En fait, sans la présence de ces gaz dans l'atmosphère, la température de la terre ne serait que de  $-17^\circ C$ . Au lieu de cela, grâce à l'énergie absorbée par l'atmosphère, la température globale moyenne est d'un confortable  $15^\circ C$ . Cette capacité isolante est connue sous le nom "d'effet de serre" parce que ce mécanisme ressemble beaucoup à celui d'une serre, où la lumière visible passe à travers le verre du plafond, mais où la chaleur est retenue à l'intérieur à cause de l'absorption par le verre du rayonnement infrarouge.

Malheureusement, les activités humaines, telles que la combustion des combustibles fossiles, l'utilisation des engrais à grande échelle, l'élevage de bovins, et le déboisement ont commencé à augmenter directement la teneur en "gaz à effet de serre" (GES) de l'atmosphère au delà des niveaux naturels. On s'attend à ce que l'augmentation de la concentration des GES accroisse la température globale moyenne de la planète à des niveaux qui risquent de perturber les systèmes atmosphérique, océanique, écologique et finalement le bien être humain. L'accentuation de cet effet de serre naturel constitue ce que l'on appelle le "réchauffement de la planète."

Les principaux GES, par ordre de leur contribution estimée au réchauffement planétaire sont: le gaz

carbonique, le méthane, les halocarbures, et l'oxyde nitreux. Les mesures faites dans des régions isolées autour du globe révèlent irréfutablement l'accroissement de la concentration atmosphérique de ces gaz. Certains, comme le gaz carbonique, sont produits à la fois naturellement et par l'homme. D'autres comme les halocarbures sont uniquement fabriqués par l'homme.

## Les principaux gaz à effet de serre

**Le gaz carbonique ( $CO_2$ ):** il est de loin le facteur le plus important du changement climatique. Il contribue environ 64 pour cent du réchauffement actuel estimé. Les sources principales d'émission de  $CO_2$  dans l'atmosphère sont la production, le transport, le raffinage et la consommation des combustibles fossiles (86 pour cent), le déboisement tropical et le brûlage d'autres biomasses (12 pour cent), et d'autres sources diverses (2 pour cent), comme par exemple, la fabrication du ciment et l'oxydation du monoxyde de carbone en gaz carbonique. Une fois émise, une molécule de  $CO_2$  circule dans la biosphère avant d'être définitivement mise hors de circulation par les processus océaniques ou par l'accroissement, pour une période prolongée, du stockage par les plantes. Le temps nécessaire pour qu'environ 63 pour cent des émissions d'un gaz soient éliminées de l'atmosphère est appelé le **temps de séjour effectif**. Ce paramètre, de première importance pour calculer les effets climatiques d'un GES, souffre d'une grande incertitude. Quand le taux d'émission d'un GES est supérieur au taux d'élimination, le résultat est un accroissement de sa concentration atmosphérique. L'augmentation du  $CO_2$ , quant à elle, dure depuis le siècle dernier, au moins. La fourchette du temps de séjour effectif du  $CO_2$  se situe entre 50 et 200 ans, selon les estimations.

**Le méthane ( $CH_4$ ):** il est à la fois naturel et produit par l'homme. Les sources anthropiques sont principalement, la production de combustibles, la fermentation entérique (des bovins, par exemple), la culture du riz, les émissions des décharges d'ordures, et le déboisement (principalement la destruction par le feu de la biomasse et le pourrissement de l'excès de matière organique). Les émissions de méthane, qui contribuent à environ 20 pour cent du réchauffement global estimé, sont une source importante de GES. Molécule pour molécule, le  $CH_4$  est 21 fois plus efficace que le  $CO_2$ . Le principal mode d'élimination du  $CH_4$  de l'atmosphère est sa réaction avec le radical hydroxyl (OH).<sup>1</sup> Du fait que de nombreux hydrocarbures et halocarbures (y compris beaucoup de substances destructrices d'ozone) sont aussi éliminés de l'atmosphère à la suite de réactions avec OH, une concentration plus élevée de  $CH_4$  peut

LIRE LA SUITE, PAGE 4.  
VOIR LA PAGE 13 POUR LES ANNOTATIONS

avoir des effets importants sur la capacité de l'atmosphère d'éliminer les gaz à effet de serre. Il semblerait que le CH<sub>4</sub> et d'autres polluants soient responsables de la diminution de la concentration de OH. Environ 30 pour cent de l'accroissement de la concentration du CH<sub>4</sub> dans l'atmosphère est due à la capacité réduite de l'atmosphère de l'absorber.

**Les halocarbures:** c'est une classe de composés chimiques, à la fois anthropiques et naturels qui contiennent du carbone et un ou plusieurs atomes appartenant à famille des halogènes, comme le fluor et le chlore.<sup>2</sup> Les plus importants de ces halocarbures, pour ce qui est de leur participation au réchauffement de la planète, sont les chlorofluorocarbures (CFC aussi

connus sous leur nom de marque de Fréon); en particulier, CFC-11 et CFC-12. Bien qu'ils existent seulement à l'état de trace dans l'atmosphère, ces composés chimiques possèdent une puissante capacité à retenir la chaleur en plus de leur propriété bien connue de réduction de la couche d'ozone. Les halocarbures comptent pour environ 10 pour cent dans le réchauffement actuel, mais leur concentration atmosphérique a commencé à chuter à la suite d'une interdiction internationale de production et de consommation. Des mesures effectuées sur des produits chimiques semblables utilisés en remplacement des CFC—les hydrochlorofluorocarbures (HCFC) et les hydrofluorocarbures (HFC)—indiquent une augmentation de concentration.

LIRE LA SUITE, PAGE 11

**TABLEAU I. LES CARACTERISTIQUES DES PRINCIPAUX GES**

GES	sources principales	concentration atmosphérique actuelle (ppmv)	% annuel de l'accroissement	accroissement atmosphérique*	temps de séjour effectif	puits et réservoirs*
oxyde de carbone	production commerciale d'énergie; déboisement; combustion d'autres biomasses	360	0,4 %	~7,1 milliards de tonnes/an <sup>3</sup>	50-200 ans	réservoir atmosphérique; absorption par les océans; incorporation par la croissance des forêts de l'hémisphère du nord. (sur quelques années.) Transfert aux sols et aux profondeurs de l'océan (sur plusieurs siècles)
méthane	production et transport du gaz naturel; fermentation entérique (par exemple le bétail); la culture du riz, les émissions des décharges, le déboisement	1,7	0,5 %	~37 millions de tonnes/an	12,5 années	le mécanisme principal d'élimination: le radical hydroxyl (OH) <sup>4</sup> ; également: stratosphère; sols
halocarbures**	d'origine anthropique seulement; utilisés dans les procédés industriels et la climatisation et les réfrigérateurs (comme caloporteurs et isolateurs)	CFC-11 = 0,027 CFC-12 = 0,500	en baisse grâce au bannissement de leurs usages. Les produits de substitution (HCFC et HFC) sont en hausse.	CFCs: pour le moment ~0, devraient diminuer lentement grâce au Protocole de Montréal; HCFC, HFC: depuis peu en hausse	entre quelques années et plusieurs milliers d'années	réservoir atmosphérique; éliminés principalement par la photolyse (la décomposition par la lumière) dans l'atmosphère
oxyde nitreux	principalement de l'utilisation des engrais et de la combustion des combustibles fossiles	0,315	0,25 %	3-8 millions de tonnes/an	120 années	éliminé principalement par la décomposition par la lumière (photolyse) dans la stratosphère

\* Les chiffres pour "l'accroissement atmosphérique" et les "puits et réservoirs" proviennent du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, *Climate Change 1995* (Cambridge University Press, 1996), pp. 15-19.

\*\*Les plus importants sont les CFC-11 et CFC-12.

CFC = chlorofluorocarbures

HCFC = hydrochlorofluorocarbures

HFC = hydrofluorocarbures

ppmv = partie par million en volume



# La réduction des gaz à effet de serre et la création d'un approvisionnement énergétique durable

ARJUN MAKHIJANI

Le système énergétique mondial fait peser de graves menaces—quoique de différentes façons—sur un bien-être mondial qui découle à la fois de l'utilisation à grande échelle des combustibles fossiles et de l'énergie nucléaire. La dépendance de l'homme par rapport aux combustibles fossiles et à d'autres ressources qui produisent des gaz à effet de serre (GES) pourrait aboutir à un changement de climat catastrophique. A l'heure actuelle, la capacité d'absorption de la biosphère en gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) est nettement inférieure aux niveaux actuels d'émission.<sup>1</sup> Il en résulte un accroissement de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Comme le CO<sub>2</sub> est le principal GES (voir l'article en page 3), la continuation de l'utilisation de combustible fossile, à des niveaux aussi proches que ceux en cours et avec la technologie actuelle, pose de sérieux risques de changement climatique planétaire.

Les tenants de l'énergie nucléaire mettent en avant que, puisque les centrales nucléaires n'émettent pas de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, la solution du problème des GES réside dans l'énergie nucléaire. Cependant, les coûts élevés et les nombreux dangers qui accompagnent l'énergie nucléaire rendent son utilisation aussi problématique que celle de l'utilisation à grande échelle des combustibles fossiles (voir l'article en page 1).

Du fait que les gouvernements et les compagnies ont mis presque toutes leurs ressources et leur effort de développement dans les combustibles fossiles et l'énergie nucléaire, la transformation de l'économie mondiale en un système énergétique sûr, durable et respectueux de la santé, ne sera pas facile. Cet article examine les aspects techniques de certaines options destinées à réduire les émissions des GES liées à l'alimentation en énergie—notamment au combustible utilisé pour la production d'électricité—et présente des critères de base pour la création d'un système énergétique durable.

## Critères pour un système énergétique durable

Pour être viable et durable, un système énergétique mondial doit pouvoir respecter simultanément les critères de base suivants:

1. Il doit être fiable.
2. Son coût doit être raisonnable.
3. Il ne devrait pas produire une pollution grave en fonctionnement normal.
4. Il devrait être possible de limiter presque entièrement les coûts sur la sécurité et l'environnement du

système énergétique aux générations qui en bénéficient. Autrement dit le système devrait pouvoir absorber ces coûts.

5. Il devrait pouvoir maintenir des niveaux acceptables de services en énergie<sup>2</sup> pour une population de 8 à 10 milliards (la prévision de la population mondiale au siècle prochain).
6. Ses fonctions principales ne devraient pas être ébranlées par des chocs économiques ou liés à l'approvisionnement, au transport ou à la transmission de l'énergie.

L'utilisation de l'énergie nucléaire ne peut pas remplir ces critères en grande partie à cause (i) des risques de dommages persistants et étendus occasionnés par des accidents du type de Tchernobyl et (ii) des risques inhérents à la production de grandes quantités de matériaux utilisables pour les armes atomiques. L'utilisation du combustible fossile, de la façon et à l'échelle présentes, ne peut pas remplir ces critères principalement à cause du risque catastrophique de changement climatique. Il existe aussi d'autres problèmes.

Une stratégie solide aurait comme objectif une amélioration des performances dans les décennies à venir, et un mélange de sources d'énergies renouvelables suppléées par une modeste quantité de combustibles fossiles. Il n'est pas nécessaire d'éliminer complètement les combustibles fossiles pour atténuer le réchauffement de la planète, puisque la nature a la capacité d'absorber partiellement le CO<sub>2</sub> émis par l'homme (en plus de la circulation naturelle du CO<sub>2</sub> entre l'atmosphère, l'eau, le sol, et les plantes). L'objectif à long terme serait de maintenir ces émissions anthropiques de carbone bien en dessous de ce niveau d'absorption naturel d'environ trois milliards de tonnes. Cependant il faut noter que l'absorption de ces émissions par les océans, les plantes et le sol se fait par des mécanismes qui ne sont pas encore bien compris.

Il serait possible d'utiliser les combustibles fossiles à des niveaux d'émission de carbone supérieurs à la capacité d'absorption de l'atmosphère, si l'on trouvait des moyens pour empêcher le dégagement de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Les stratégies pour piéger le CO<sub>2</sub> que l'on désigne par le terme générique de "piégeage" sont variées, y compris le stockage du CO<sub>2</sub> dans des réservoirs souterrains et au fond des océans. Les coûts de tels projets sont élevés et leurs incertitudes écologiques sont considérables. Etant donné que les émissions de

LIRE LA SUITE, PAGE 6.  
VOIR LA PAGE 20 POUR LES ANNOTATIONS



CO<sub>2</sub> doivent être considérablement réduites dans les décennies prochaines tout en étant compatibles avec l'augmentation des services en énergie, des investissements dans des énergies performantes qui accompliraient simultanément ces deux objectifs, et ceci plus économiquement, sont plus désirables que le piégeage. Les stratégies que nous discutons ici ne dépendent pas, par conséquent, du recours au piégeage comme mesure de réduction des dégagements de CO<sub>2</sub>.

### Quelques options durables pour la réduction des gaz à effet de serre

Il existe toute une variété de technologies pouvant aider à obtenir des réductions globales importantes des émissions des GES tout en favorisant le bien-être économique. L'énergie éolienne, la co-génération, les piles photovoltaïques, les centrales solaires thermiques assistées par gaz naturel, et le remplacement des centrales à charbon non performantes par des centrales au gaz naturel ou par des énergies renouvelables sont au nombre des options techniques capables de maintenir l'accroissement de la capacité de la puissance électrique tout en réduisant les émissions de GES. Investir dans des combinaisons de ces technologies réduirait considérablement les émissions de CO<sub>2</sub>, au lieu de seulement les empêcher, comme cela serait le cas avec la construction de nouvelles centrales nucléaires. En fait, les

dépenses pour le nucléaire auraient comme conséquence de supplanter des investissements dans des technologies plus adéquates pour atteindre l'objectif de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>.

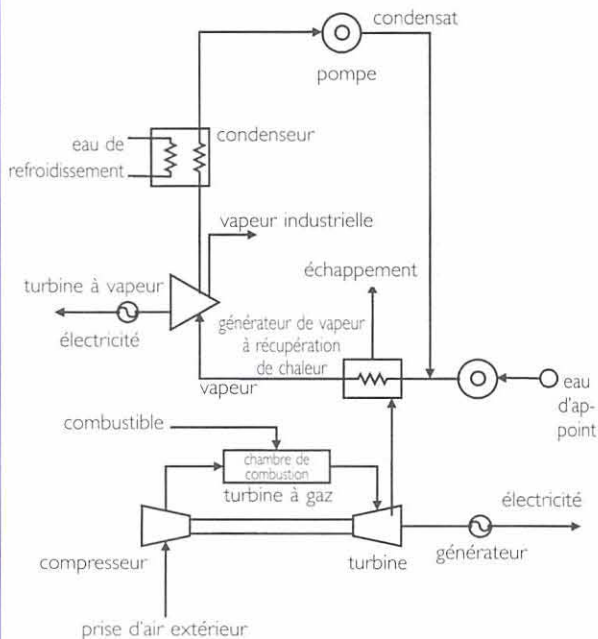
Le tableau 1 montre que les centrales à cycle combiné au gaz naturel sont, quel que soit le cas, plus économiques que les centrales nucléaires. Les centrales à cycle combiné utilisent un combustible tel que le gaz naturel dans un système de production d'électricité en deux étapes. Dans un premier temps, le gaz naturel fait fonctionner une turbine et un générateur. Ensuite les gaz chauds d'échappement de la turbine sont utilisés pour produire de la vapeur qui fait marcher une turbine à vapeur (voir le schéma ci dessous). Le rendement d'un système de ce type, actuellement au stade commercial, est d'environ 50 pour cent.

Il faut noter que la Chine, le principal client éventuel de nouvelles centrales nucléaires, n'aura probablement pas les coûts les plus élevés de centrales à cycle combiné parce qu'elle utiliserait du gaz de pipeline (en provenance de ses propres gisements à terre et offshore aussi bien que de ceux de l'Asie centrale) et non pas du gaz naturel liquéfié (sur lequel les trois coûts sont basés). Cette comparaison exclut les scénarios pessimistes pour les coûts des centrales nucléaires, qui seraient considérablement plus élevés que ceux les plus élevés présentés dans le tableau.<sup>3</sup>

La différence de coût de 6 centimes par kWh se traduit par des coûts annuels supplémentaires d'environ 396 millions de francs pour les centrales nucléaires (de 1 000 MW). Cela se traduit, sur une période de 30 ans, par une valeur actuelle (à un taux d'escompte annuel de 4 pour cent) de 6.9 milliards de francs pour 6 centimes par kWh de différence dans les coûts de l'électricité. (Les coûts futurs sont escomptés, parce qu'un dollar économisé dans le futur vaut moins qu'un dollar disponible aujourd'hui.) A l'aide de ces chiffres, on peut comparer deux stratégies, l'une utilisant les centrales nucléaires pour remplacer les centrales à charbon, l'autre utilisant les centrales à cycle combiné. Nous avons comparé les différents scénarios de cycle combiné avec le nucléaire: les coûts faibles avec les coûts faibles, les moyens avec les moyens, et les plus élevés avec les plus élevés. Pour un scénario type, la construction de centrales à cycle combiné aboutirait à une réduction de CO<sub>2</sub> d'environ 40 pour-cent supérieure à celle qui serait obtenue avec le nucléaire (comparaison du scénario 2 du cycle combiné avec le nucléaire correspondant). On peut s'attendre à ce que ce gain augmente puisque le rendement des cycles combinés lui-même est en augmentation.

Les économies réalisées grâce à la construction de centrales à cycle combiné au lieu de centrales nucléaires pourraient être utilisées pour développer et promouvoir les technologies solaires et éoliennes et augmenter

### CENTRALE À CYCLE COMBINÉ



Imprimé avec la permission de *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*, édité par Thomas B. Johansson, Henry Kelly, Amulya K. N. Reddy et Robert H. Williams, © 1993 Island Press. Publié par Island Press, Washington DC et Covelo, CA. Pour plus d'informations contactez Island Press directement au 1-800-828-1302, info@islandpress.org (E-mail) ou www.islandpress.org (website).



**TABLEAU I. ESTIMATION DES COÛTS:  
LE CYCLE COMBINÉ COMPARE AUX CENTRALES NUCLEAIRES**

Réseau électrique	Coûts d'investissement FF/kW	Int + dep cF/kWhe <sup>1</sup>	Prix du gaz naturel FF/million BTU <sup>2</sup>	Prix du combustible cF/kWhe	Coûts de service et de maintenance cF/kWhe <sup>3</sup>	Coût total cF/kWhe	Réduction totale de CO <sub>2</sub> après 30 ans kg C <sup>4</sup>	Rapport de réduction du carbone, Gaz/nuc
<b>Cycle combiné(CC)<sup>5</sup></b>								
Scénario 1 CC	3 000	4,6	900	6,1	2,9	13,6	9,97x10 <sup>10</sup>	1,37 Scénario 1
Scénario 2 CC	3 000	4,6	1 500	10,3	2,9	17,7	1,02x10 <sup>11</sup>	1,40 Scénario 2
Scénario 3 CC	3 000	4,6	2 400	16,4	2,9	23,8	1,09x10 <sup>11</sup>	1,50 Scénario 3
<b>Nucléaire<sup>6</sup></b>								
Scénario 1 Nuc	9 000	13,7		3,6	10,2	27,5	7,29x10 <sup>10</sup>	
Scénario 2 Nuc	15 000	22,9		3,6	10,2	36,7	7,29x10 <sup>10</sup>	
Scénario 3 Nuc <sup>7</sup>	24 000	36,5		4,2	12,0	52,7	7,29x10 <sup>10</sup>	

Ce tableau est basé sur les sources suivantes: Pour les coûts des centrales nucléaires (scénarios 2 et 3): Steven M. Cohn, *Too Cheap to Meter: An Economic and Philosophical Analysis of the Nuclear Dream*, State University of New York Press, Albany, 1997, pp. 106 et 155; U.S. Nuclear Regulatory Commission, *Information Digest 1997*, Washington, DC, 1997, tableaux 6 et 7. Pour les coûts du gaz: page web de l'US Energy Information Administration: [www.eia.gov/oiaf/ieo97/gas.html](http://www.eia.gov/oiaf/ieo97/gas.html). Pour le coût des centrales à cycle combiné: D.M. Todd et H. Stoll "Integrated Gasification Combined-cycle—The Preferred Power Technology for a Variety of Applications," GE Power Systems Schenectady, Paper presented at the Power Gen Europe 97 Conference, Madrid, June 1997 and C. Komanoff, R. Brailove, et J. Wallach, *Good Money After Bad: An Economic Analysis of the Early Retirement of the Salem Nuclear Generating Station*, Pace University School of the Law Center for Environmental Legal Studies, White Plains, NY, Septembre 1997, page 39.

**NOTES**

- On suppose des intérêts et une dépréciation de 10 pour cent dans tous les cas. On suppose un facteur de capacité de 75 pour-cent dans tous les cas.
- Btu signifie British thermal unit. 1 Btu = environ 1055 joules. Un kWhe (kilowatt-heure électrique) = 3,6 million de joules = 3,413 Btu.
- Pour les coûts nucléaires ne se rapportant pas au combustible 1,2 centimes par kWhe sont inclus pour l'évacuation des déchets et le démantèlement, à l'exception du scénario le plus défavorable où ce coût est 3 centimes du kWhe. Voir Cohn, p.155.
- Les émissions de CO<sub>2</sub> évitées sont calculées en supposant que les deux types de centrales remplaceraient les centrales à charbon en fonctionnement qui émettent 0,37 kilos (de carbone) du kWhe. En première approximation, pour le nucléaire, les émissions évitées seraient donc de 0,37 kg. Pour un cycle combiné avec un rendement de 50 pour cent, le chiffre est d'environ 0,25 kg par kWhe (les émissions d'une centrale à charbon moins les émissions d'une usine à cycle combiné). Les chiffres pour les émissions évitées de CO<sub>2</sub> grâce aux usines à cycle combiné seront probablement plus élevés pour les usines qui seront construites d'ici quelques années parce que la performance de ces usines progresse.
- Nous avons choisi un rendement de 50 pour cent pour le cycle combiné. On s'attend à des rendements plus élevés de presque 60 pour cent dans les prochaines années. Nous avons choisi 1 000 Btu par pied cube (cubic feet) soit 1 000 Btu par 0,03 m<sup>3</sup>. (Le rendement thermique des centrales nucléaires est d'environ 33 pour cent. Le chiffre exact n'affecte pas grandement les coûts puisque le combustible ne représente qu'une petite fraction du coût total.)
- Les coûts du retraitement et de la gestion du plutonium ne sont pas compris dans les coûts du nucléaire.
- Le scénario le plus défavorable pour les coûts d'investissement du nucléaire (scénario 3) était typique pour les coûts des usines entrant en service après 1983, mais avec des capacités plus grandes que celles des années 80 aux US. Le scénario le plus favorable (scénario 1) est celui rapporté dans les médias sur les ventes des réacteurs VVER-1000 russes à la Chine.

SUITE DE LA PAGE 6

l'efficacité énergétique. Dans ces conditions, les rejets évités de CO<sub>2</sub> varieraient en fonction des sites des centrales ou des technologies spécifiques choisies pour accroître l'efficacité énergétique. Si les centrales à cycle combiné étaient choisies pour remplacer la moitié des centrales à charbon du monde, une réduction globale annuelle d'environ 15 pour-cent des rejets de CO<sub>2</sub> pourrait être réalisée.

Durant les années 70, on craignait que le gaz naturel soit une ressource très peu abondante, mais cette crainte s'est avérée fautive. Le gaz naturel est une ressource abondante et ne présente pas, contrairement à l'énergie nucléaire, de risques de prolifération. Notre proposition ne part pas du principe d'utiliser du gaz naturel

indéfiniment, mais seulement de son utilisation pour des applications de haut rendement pendant les quelques décennies prochaines. L'utilisation du gaz naturel comme combustible de transition est une stratégie justifiée économiquement et écologiquement. Nous escomptons que pendant ce temps, grâce à un comportement approprié des gouvernements, des sociétés et des consommateurs, les sources d'énergies renouvelables assureront la majeure partie de l'approvisionnement énergétique dans le cadre d'une économie plus performante.

Les réserves mondiales de gaz naturel n'ont cessé d'augmenter régulièrement et équivalent maintenant à 75 ans de consommation aux niveaux de 1995 (corres-

LIRE LA SUITE, PAGE 17



# Le Protocole de Kyoto

**D**u 1<sup>er</sup> au 11 décembre 1997 la Troisième Conférence des parties ("CdP-3") de la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique s'est tenue à Kyoto, au Japon. Plus de 10 000 participants appartenant aux gouvernements, aux organisations intergouvernementales, aux ONG et à la presse y ont participé. Dans le protocole de Kyoto, adopté par 171 pays, à la conférence, des structures ont été mises en place en vue de réduire les émissions de six importants gaz à effet de serre (GES): le gaz carbonique (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>), l'oxyde nitreux

(N<sub>2</sub>O), les hydrofluorocarbones (HFC), les perfluorocarbones (PFC) et l'hexafluorure sulfuré (SF<sub>6</sub>). Le Protocole doit être encore ratifié par les corps législatifs des pays signataires. Les dispositions principales du Protocole de Kyoto sont décrites ci-dessous.

Note: "Les parties de l'Annexe I" sont les pays inclus dans l'Annexe I de la Convention Cadre des Etats Unis sur le Changement Climatique, adoptée à New York le 9 mai 1992. "Les parties de l'Annexe B" sont les pays inclus dans l'Annexe B du protocole de Kyoto. Voir le tableau.

## LES DISPOSITIONS PRINCIPALES DU PROTOCOLE DE KYOTO

- 1. La réduction des émissions de gaz à effet de serre de 5 pour cent en dessous des niveaux de 1990:** l'Article 3 du Protocole reflète les engagements des parties de réduire la totalité des émissions des (GES) de 5 pour cent par rapport aux niveaux de 1990, au cours de la période 2008-2012. La cible de 5 pour cent n'est pas un objectif mondial, mais s'applique comme objectif d'ensemble pour une liste de pays de l'Annexe B du protocole. Quelques pays, parmi lesquels les Etats-Unis, le Canada, les pays de l'Union européenne et le Japon devront réduire leurs émissions d'un niveau allant jusqu'à 8 pour cent. Certains pays de cette liste, comme l'Australie et l'Islande pourront augmenter leurs émissions de façons variables allant jusqu'à 10 pour cent. Il n'y a pas de limite pour les pays "en voie de développement" parmi lesquels la Chine, l'Inde, le Brésil, le Mexique, l'Indonésie, le Niger, etc., dont la consommation par personne de combustibles fossiles est encore relativement basse.
- 2. La commercialisation des droits d'émissions:** l'Article 16 bis proclame que, "Les Parties incluses dans l'Annexe B peuvent prendre part aux échanges de droits d'émissions aux fins d'honorer leurs engagements liés à l'Article 3 de ce Protocole. Ces échanges doivent être complémentaires aux mesures intérieures visant à réaliser les engagements quantitatifs de réduction et de limitation des émissions pris dans le cadre de cet Article." L'Article 16 bis est un additif tardif au Protocole de Kyoto, et un sujet litigieux. Il autorise le principe d'échange d'émissions, mais les règles spécifiques seront établies à la Quatrième Conférence des Parties (CdP-4), qui se tiendra du 2 au 13 Novembre 1998 à Buenos Aires, en Argentine.
- 3. "Mécanismes pour le développement propre"** L'Article 12 définit les mécanismes pour le développement propre. Son objectif est d'aider les pays en voie de développement à réaliser un "développement durable". Les Parties visées à l'Annexe I peuvent utiliser les réductions obtenues de cette manière en décompte de leurs propres objectifs.
- 4. Mise en oeuvre conjointe:** l'Article 6 déclare que, "pour la réalisation des engagements liés à l'Article 3, les pays visés à l'Annexe I peuvent transférer et acquérir entre eux des unités de réduction d'émissions, découlant des projets conçus aux fins de réduire les émissions anthropiques par sources ou d'améliorer les suppressions des puits absorbants des gaz à effets de serre dans tout secteur de l'économie." Bien que similaire au "mécanismes pour le développement propre," la mise en oeuvre conjointe se rapporte à l'échange des unités de réduction des émissions *parmi* les parties visées à l'Annexe I (généralement les pays industrialisés), alors que les mécanismes pour un développement propre permettent aux parties visées à l'Annexe I d'en bénéficier (c'est-à-dire acquérir des unités de réduction d'émissions) par le biais de projets de réduction des émissions effectués par les compagnies de pays n'appartenant pas à l'Annexe I.



## LA MISE EN OEUVRE CONJOINTE N'EST PAS UNE PANACEE

La mise en oeuvre conjointe, un point essentiel des dispositions du Protocole de Kyoto, implique la commercialisation des droits d'émission entre deux parties. Elle part du principe que, si une partie peut réduire ses émissions à moindre frais qu'une autre, ou si elle est déjà en dessous des limites autorisées, alors la partie pour laquelle cela serait plus coûteux pourrait simplement acheter des unités de réduction d'émissions. Cela évite des dépenses supplémentaires encourues quand tous les pollueurs doivent réduire leur propres émissions. Ainsi, en théorie, en s'appuyant sur les "principes du marché", la société pourrait atteindre les objectifs de réduction des émissions à un moindre coût.

Cette théorie a été mise en pratique aux Etats-Unis pour la réduction des émissions de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) provenant de sources industrielles où elle a obtenu des résultats positifs. Ces sources, comme par exemple de nombreuses centrales à charbon, sont d'importantes émettrices de SO<sub>2</sub> et leurs émissions sont relativement bien connues. Cela a permis à des industries, qui autrement auraient dû fermer, de prolonger leur temps alloué pour se mettre en conformité.

Les conditions suivantes semblent être nécessaires pour que l'échange des émissions soit un succès:

- Le prix implicite d'une unité de pollution devrait être assez cher pour inciter tous les pollueurs à réduire leurs émissions.
- Il devrait y avoir un resserrement progressif des objectifs vers les niveaux désirés, pour que les réductions puissent être réalisées dans un temps raisonnable.
- Les sources d'émissions devraient être bien établies, pour que les progrès en matière de réductions d'émissions puissent être mesurés de manière fiable. C'est une condition essentielle, puisque, sans elle, la mise en oeuvre serait impossible et des procédés malhonnêtes prospéreraient.
- La négociation des prix devrait se faire entre des parties ayant des économies comparables, pour que l'échange puisse être équitable.

Ces conditions ont été toutes remplies pour les échanges de SO<sub>2</sub> aux Etats-Unis, et sont généralement valables pour les émissions d'industries importantes à l'intérieur d'un même pays. Elles peuvent être aussi remplies, en gros, quand des

grandes industries de pays différents négocient à travers les frontières, bien que des facteurs comme les différences de convertibilité des monnaies et les taux d'échanges inéquitables doivent être pris en compte.

Dans le cas des émissions de CO<sub>2</sub> réglementées par le Protocole de Kyoto, l'échange se fait entre les pays eux-mêmes, pour que le commerce interne ne soit pas remis en question. (Chaque pays peut, bien sûr, choisir d'avoir des autorisations d'échanges à l'intérieur de ses frontières pour réaliser l'objectif du Protocole de Kyoto, mais ceci tombe sous la juridiction du pays et non pas sous celle du Protocole.) L'échange des émissions entre de grandes industries, comme les centrales, situées dans les parties visées à l'Annexe I (ou Annexe B) peut être justifié, à condition que les accords sur les prix soient résolus. Cependant, puisqu'il y a des pays économiquement faibles avec des monnaies faibles qui font partie de l'Annexe I (comme, par exemple, l'ex-Union soviétique et des pays de l'Europe de l'est), les échanges peuvent devenir inéquitables. De plus, les relevés des émissions d'avant 1990 pour les grandes usines dans l'ex-Union soviétique et en Europe de l'Est sont probablement médiocres et incomplets dans beaucoup de cas. Finalement, la valeur de ces relevés pour la prochaine décennie est très douteuse, vu les énormes changements qui se sont produits depuis 1990.

Si l'échange entre les pays de l'Annexe I, pour la mise en oeuvre conjointe devient problématique, il le sera encore plus entre des pays de l'Annexe I et des pays en voie de développement. Mises à part les questions de mesures et d'application, la question d'équité est particulièrement sérieuse. Le problème du CO<sub>2</sub> a été causé principalement par les émissions des pays industrialisés. Mais les droits d'émettre ont été alloués sur la base des niveaux de 1990. La part du lion sur la valeur des crédits d'émissions qui peuvent être échangés revient ainsi à ceux qui ont créé le problème. Les pays dont la consommation de combustibles fossiles est la plus faible auraient droit aux crédits d'émissions les plus bas et en tireraient donc les moindres bénéfices, bien qu'ils aient contribué le moins au problème.

C'est une des raisons centrales pour laquelle ces pays ont refusé leurs propres limites d'émission dans le Protocole Kyoto. La question du niveau de la commercialisation des droits d'émissions pour les

LIRE LA SUITE, PAGE 10



SUITE DE LA PAGE 9

pays en voie de développement est reportée à une date ultérieure (vraisemblablement à la conférence en Argentine en novembre 1998).

Si les droits d'émissions étaient fixés en fonction du nombre d'habitants, comme beaucoup le demandent dans les pays en voie de développement, la faisabilité de la mise en oeuvre conjointe serait alors considérablement élargie ainsi que les bénéfices économiques qui en résulteraient.

Des propositions pour la mise en oeuvre conjointe concernant des secteurs autres que l'industrie posent des problèmes supplémentaires. Ce sont, par exemple, la plantation de forêts dans les pays en voie de développement et l'utilisation des résidus agricoles dans les centrales pour contrebalancer les émissions de CO<sub>2</sub> dans les pays industrialisés. Ces propositions conviennent toutes mal à la mise en oeuvre conjointe puisqu'elles ne remplissent pas plusieurs des conditions énumérées plus haut. D'abord, l'inégalité des parties négociant est évidente dans ce genre d'arrangements, et est exacerbée par le fait que les classes riches, dans des sociétés où les divisions de classe sont prononcées, négocient au nom des fermiers et des pauvres.

Les problèmes techniques sont tout aussi décourageants. Dans le cas le plus simple, un arbre contribuerait à la réduction de CO<sub>2</sub> seulement pendant la période de croissance. Après cela, suivant les circonstances, il pourrait y avoir une augmentation ou une réduction nette de CO<sub>2</sub>. De plus, les émissions de gaz à effet de serre tels que l'oxyde nitreux et le méthane devraient être aussi prises en considération. Faudrait-il reboiser? Comment tenir compte des changements naturels dans les régions boisées au fil du temps? On ne voit pas bien comment des processus si complexes pourraient être intégrés pour rendre compte des gaz à effet de serre.

Il y a aussi la question des terres. La plupart des pays en voie de développement n'ont pas beaucoup de terres non cultivées. Les terres en commun et partiellement boisées sont souvent utilisées par les personnes pauvres comme pâturage pour les animaux de trait, comme source de bois de chauffage et de cuisine ainsi que pour d'autres usages.

Attribuer une valeur monétaire à ces terres en les rattachant aux projets de mise en oeuvre conjointe pourrait priver des millions de gens pauvres de l'accès à des ressources de base, bien qu'ils n'aient pas créé le problème des gaz à effet de serre.

Même beaucoup de projets, qui ont l'air intéressants à première vue, ne résistent pas à un examen minutieux. Par exemple, un projet qui utiliserait la bagasse (la matière organique qui reste après le pressage de la canne à sucre) pour générer de l'électricité en Inde pourrait avoir des conséquences désastreuses pour un grand nombre de personnes. La bagasse est déjà utilisée pour une variété d'usages, y compris la production d'électricité. La pression pour obtenir plus de bagasse pour ce type d'usines pourrait conduire à augmenter la culture de la canne à sucre au détriment des cultures vivrières. De plus, dans beaucoup de régions de l'Inde, la bagasse est transformée dans les fours traditionnels en sucre brun non raffiné, appelé "gurdh". La mise en oeuvre conjointe pourrait mettre fin à des industries artisanales de ce genre qui emploient un grand nombre de personnes et créerait encore plus de chômage dans des régions rurales déjà en difficulté. En résumé, le nombre de projets de cette mise en oeuvre conjointe, qui pourraient être exécutés avec certains bénéfices économiques pour la communauté mondiale, sont limités. Cependant, il faudra y penser sérieusement d'une façon jamais faite précédemment pour s'assurer que ces projets sont équitables, que leurs résultats sont quantifiables, et que les populations les plus pauvres du monde n'en souffrent pas.

ARJUN MAKHIJANI

## LES PARTIES DES ANNEXES I ET B

(toutes les parties appartenant aux Annexes I et B, sauf indication contraire)

### Limite des émissions du Protocole de Kyoto en tant que pourcentage par rapport à 1990, année de référence.

Allemagne	92
Australie	108
Autriche	92
Belgique	92
Biélorussie (Annexe I, seulement)	-
Bulgarie	92
Canada	94
Communauté européenne	92
Croatie (Annexe B, seulement)	95
Danemark	92
Espagne	92
Estonie	92
Etats Unis d'Amérique	93
Fédération Russe	100
Finlande	92
France	92
Grèce	92
Hongrie	94
Irlande	92
Islande	110
Italie	92
Japon	94
Lettonie	92
Liechtenstein	92
Lituanie	92
Luxembourg	92
Monaco (Annexe B, seulement)	92
Norvège	101
Nouvelle Zélande	100
Pays-Bas	92
Pologne	94
Portugal	92
République tchèque	92
Roumanie	92
Royaume uni de Grande Bretagne et de l'Irlande du nord	92
Slovaquie	92
Slovénie (Annexe B, seulement)	92
Suède	92
Suisse	92
Turquie (Annexe I, seulement)	-
Ukraine	100



**DUREE DE VIE, CONCENTRATION, ET POTENTIEL DE RECHAUFFEMENT MONDIAL DES PRINCIPAUX GAZ A EFFET DE SERRE REGLEMENTES PAR LE PROTOCOLE DE KYOTO<sup>1</sup>**

GES	Formule chimique*	Durée de vie atmosphérique* (années)	Concentration préindustrielle	Concentration en 1994	Taux de changement de concentration <sup>2</sup>	Potentiel de réchauffement mondial <sup>3</sup>		
						20 ans	100 ans	500 ans
monoxide de carbone	CO <sub>2</sub>	50-200 <sup>4</sup>	280 ppmv	358 ppmv	1,5 ppmv/an (0,4%/an)	1	1	1
méthane <sup>5</sup>	CH <sub>4</sub>	12±3 <sup>6</sup>	~700 ppbv	1720 ppbv	10 ppbv/an (0,6%/an)	56	21	6,5
oxyde nitreux	N <sub>2</sub> O	120	275 ppbv	312 ppbv <sup>7</sup>	0,8 ppbv/an (0,25%/an)	280	310	170
l'hexafluoride sulfuré	SF <sub>6</sub>	3 200	0	3,2 pptv	0,2 pptv/an (6,3%/an)	16 300	23 900	34 900
HFC-32	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	5,6	0	0 (1989 estimation)	0	2 100	650	200
HFC-125	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> F	32,6	0	0 (1989 estimation)	0	4 600	2 800	920
HFC-134a	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>	14,6	0	0 (1989 estimation)	0	3 400	1 300	420
HFC-143a	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> F <sub>3</sub>	48,3	0	0 (1989 estimation)	0	5 000	3 800	1 400
HFC-152a	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> F <sub>2</sub>	1,5	0	0 (1989 estimation)	0	460	140	42

Sources: Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat, *Climate Change 1995* (Cambridge University Press, 1996), pp.15, 22; A. Makhijani and K.Gurney, *Mending the Ozone Hole*, (Cambridge, MIT Press 1995), pp.93, 106; M.Maiss, et al., "Sulfur Hexafluoride — a powerful new atmospheric tracer," *Atmospheric Environment*, Vol. 30, No. 10/11, (1996), pp. 1621-1629.

\* Les formules chimiques et les estimations des durées de vie atmosphérique peuvent varier. Elles viennent du GIEC, 1996.

ppmv = partie par million de million en volume  
ppmv = partie par million et volume

ppbv = partie par milliard en volume  
CFC = chlorofluorocarbone

HFC = hydrofluorocarbone

1. Ce tableau ne contient pas les CFCs, HCFCs et les autres halocarbones non réglementés par le Protocole de Montréal.
2. Moyennes des taux de croissance de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O pour la décennie débutant en 1984.
3. Les potentiels de réchauffement mondial dépendent d'un certain nombres d'hypothèses relatives au cycle du carbone et aux concentrations de CO<sub>2</sub>. Les chiffres affichés sont calculés sur la base du modèle de Bern du cycle du carbone et des concentrations actuelles de CO<sub>2</sub>.
4. Un chiffre unique pour la durée de vie du CO<sub>2</sub> ne peut pas être choisi à cause des variations des taux d'incorporation des processus de piégeage des différents puits.
5. Il est tenu compte, dans le potentiel de réchauffement mondial, des effets indirects de la production d'ozone dans troposphère et de la production de vapeur d'eau stratosphérique.
6. Ce chiffre est défini comme un ajustement qui tient compte des effets indirects du méthane sur sa propre durée de vie. Autrement dit, le méthane peut influencer la capacité de l'atmosphère à se débarrasser des polluants, le méthane y compris. Voir *Mending the Ozone Hole*, pp. 262-63 et IPPC, 1995 pp.18-19.
7. Estimée à partir des données de 1992-93.

SUITE DE LA PAGE 4

Si la concentration de ces produits de remplacement continue d'augmenter, ils pourraient contribuer de façon importante au réchauffement.

**L'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O):** comme le CO<sub>2</sub>, le N<sub>2</sub>O est présent naturellement dans l'atmosphère. Cependant, la majorité des émissions anthropiques de N<sub>2</sub>O proviennent de l'utilisation à grande échelle des engrais azotés artificiels et de l'usage des combustibles fossiles. Les

niveaux de N<sub>2</sub>O comptent pour environ 6 pour cent du réchauffement actuel.

**Les mesures et la modélisation du réchauffement de la planète**

Les données sur les températures faites ces cent dernières années révèlent une élévation statistiquement significative de la température moyenne du globe de 0,3

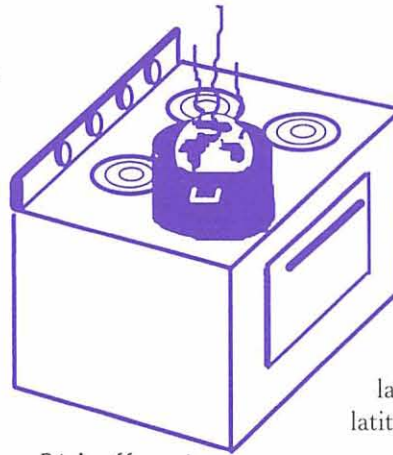
LIRE LA SUITE, PAGE 12



et 0,6° C depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. Bien qu'il y ait certaines incertitudes sur la part attribuable à l'augmentation des GES, les hausses de températures enregistrées jusqu'à présent correspondent de façon générale à la théorie du réchauffement global. Ces éléments mis en évidence, accompagnés de la fréquence accrue de manifestations extrêmes de climats, a amené le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat à conclure que "l'ensemble des éléments mis en évidence suggère que l'influence humaine sur le changement du climat est discernable."<sup>5</sup>

Pour estimer quels changements climatiques futurs pourraient se produire en réponse à l'accroissement des GES, des modèles climatiques ont été développés, contenant diverses hypothèses sur les mécanismes physiques du climat. Bien qu'il y ait des incertitudes dans les prévisions, (principalement sur le rôle de la hausse de l'évaporation et de la formation des nuages dans la redistribution de l'énergie thermique et radiative), il y a un consensus presque unanime pour estimer que la température moyenne du globe augmenterait de 1 à 3,5° C avec un doublement en équivalent de gaz par rapport à l'époque pré-industrielle. Au rythme actuel, on s'attend à ce que cela se manifeste aux environs de l'an 2100. Suivant les régions, les températures pourraient augmenter de 10° C (régions polaires) ou peut-être pas du tout (équateur).

Un réchauffement supérieur à cette estimation est possible, vu les nouvelles augmentations des concentrations des GES. Beaucoup de chercheurs ont suggéré la possibilité d'une augmentation subite et catastrophique du méthane et peut-être aussi du gaz carbonique. L'augmentation des températures pourrait provoquer une fonte suffisante du pergélisol et des couches de sol gelé dans les régions polaires. Des quantités énormes de méthane et de gaz carbonique qui y sont actuellement emprisonnées seraient alors libérées. Les quantités de GES émises pourraient potentiellement être si importantes et leurs effets sur la chimie et la composition atmosphériques si imprévisibles, qu'il n'existe aucun modèle capable d'apporter l'amorce d'une estimation des effets avec une précision passable. Les connaissances ne sont pas assez avancées pour calculer même la probabilité d'un tel événement catastrophique. On sait seulement que c'est possible et que les changements qui en résulteraient pourraient être dévastateurs bien au delà des prévisions des modèles actuels. Mis à part les changements de la température moyenne du globe, de nombreux autres paramètres climatiques pourraient changer du fait de l'augmentation de l'absorption de la radiation sortante et de l'augmentation de la tempé-



Réchauffement de la planète

ture qui s'ensuivrait. Bien qu'il y ait des incertitudes considérables quant aux détails, les changements possibles les plus importants sont:

- une augmentation des précipitations globales, en particulier en hiver dans les régions de moyenne et haute latitudes
- une diminution de l'humidité de la terre, l'été, dans les régions de latitude moyenne
- une diminution à l'échelle mondiale de la glace des mers et de la couverture de neige
- une augmentation de l'intensité des tempêtes tropicales
- une hausse mondiale du niveau de la mer de 50 cm dès 2100

Une multitude de changements dans les systèmes écologique, biochimique, humain, et animal pourraient se produire, à la suite des perturbations des systèmes climatiques et hydrauliques. Ils pourraient traduire l'ampleur brute du changement climatique ou de la rapidité avec laquelle les changements prévus se manifestent. En fait, il y a des chercheurs qui pensent que la rapidité du changement de température et celle des autres changements sera probablement la cause principale du désordre écologique et économique qui s'ensuivra puisque ni les écosystèmes ni les populations n'auront assez de temps pour s'y adapter.<sup>6</sup>

### Quelles sont les options?

Avec les progrès de la science et la diminution des incertitudes, d'autres options sont apparues pour pallier au réchauffement climatique. Etant donné que les émissions de CO<sub>2</sub> provenant de l'utilisation des combustibles fossiles sont la source la plus importante des GES, les changements dans la production et la consommation actuelle d'énergie sont examinés avec soin. Dans la mesure où le charbon produit plus de CO<sub>2</sub> par unité d'énergie produite que le gaz naturel, beaucoup de projets intègrent un passage au gaz naturel pour la production d'électricité (voir ci-dessous). Des réductions supplémentaires d'émissions de CO<sub>2</sub> peuvent être obtenues grâce à des mesures d'efficacité énergétique telles qu'une amélioration de l'éclairage, des procédés industriels plus performants, la co-génération de l'électricité et de la chaleur (voir p. 18), une meilleure isolation des bâtiments, et des voitures et des camions plus économes. Une dépendance accrue par rapport au nucléaire a aussi été suggérée, mais cette alternative n'est pas viable des points de vue économique et



écologique (voir l'article principal).

Vu la tendance actuelle de consommation d'énergie et de l'augmentation de l'utilisation de l'électricité dans de nombreuses régions du monde, il paraît nécessaire, à long terme, de s'éloigner d'une énergie basée sur les combustibles fossiles pour contrecarrer l'augmentation prévue du CO<sub>2</sub> au niveau que beaucoup jugent nécessaire. A cette fin, on envisage des énergies renouvelables comme les cellules photovoltaïques, la biomasse, et l'énergie éolienne. Le gaz naturel pourrait être une bonne source d'énergie pendant la période de transition vers ces énergies. Cependant, il faut noter que la production de gaz naturel, son transport, et son utilisation ont pour conséquence l'émission de petites quantités de méthane dont l'effet de serre est fortement accru puisque le méthane est un GES plus destructeur que le CO<sub>2</sub>. L'augmentation de l'utilisation du gaz naturel devra donc être accompagnée de mesures de réduction des émissions anthropiques de méthane. Cela peut être fait de plusieurs façons, comme par exemple, le captage et l'utilisation du méthane se dégageant des décharges (ces émissions sont le produit de la décomposition anaérobie de la matière organique, comme les déchets de nourriture), la réduction des pertes pendant le transport, et la transformation des déjections animales par le biais de la digestion anaérobie en méthane utilisable.

Il existe aussi la possibilité d'éliminer directement le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère par le biais de la croissance de plantes et d'arbres, un palliatif aussi appelée piégeage du carbone. Grâce au reboisement de régions qui, dans le passé avaient été converties en terres agricoles ( la Nouvelle Angleterre, par exemple) une partie de l'augmentation du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère peut être emmagasinée de manière permanente dans les sols et les tissus vivants. On a aussi proposé d'autres scénarios de piégeage comme, par exemple, le pompage de CO<sub>2</sub> dans des réservoirs sous marins et souterrains.

Limiter les émissions d'autres GES comme les halocarbures, le N<sub>2</sub>O, et le CH<sub>4</sub> peuvent aussi aider à lutter contre le réchauffement. Comme on l'a vu plus haut, des gains ont été obtenus grâce à la réglementation des fameux CFC, mais des composés comme les hydrofluorocarbures et les hydrochlorofluorocarbures soit ne sont pas réglementés, soit leur élimination progressive n'est prévue que dans quelques décennies.

L'accumulation des GES due aux activités humaines au cours du siècle qui vient de s'écouler est un fait irréfutable. Les caractéristiques radiatives de ces gaz sont aussi bien connues. Ces faits, accompagnés de beaucoup d'autres expériences de laboratoire, de relevés de la température planétaire, et des caractéristiques biochimiques, ont amené à la conclusion générale, acceptée de la plupart des scientifiques dans ce domaine que l'augmentation des GES a déjà un effet sur le

climat et cet effet augmentera probablement beaucoup plus si des efforts ne sont pas fait pour les freiner. Les moyens pour les freiner sont bien connus—les incertitudes les plus grandes concernent non pas les aspects techniques, mais les coûts.



1. Il y a quatre mécanismes principaux d'élimination, ou "puits" dans l'atmosphère qui aident à éliminer les composés destructeurs d'ozone: le changement chimique à la suite d'une réaction avec un autre composé; le changement chimique résultant de l'interaction avec le rayonnement solaire; la dissolution dans l'eau de pluie ou l'eau de mer; et l'absorption sur des surfaces. C'est grâce à leur réaction avec le radical hydroxyl que beaucoup de composés destructeurs d'ozone sont éliminés. Ceci se passe principalement dans la troposphère où ce radical est le plus abondant. Voir *Mending the Ozone Hole*, pp. 257–264 pour plus de détails.
2. Les halocarbures proviennent d'une classe plus vaste de produits chimiques, les hydrocarbures, qui sont des composés qui contiennent à la fois du carbone et de l'hydrogène. Un carbure halogéné est un hydrocarbure dans lequel un ou plusieurs atomes d'hydrogène ont été remplacés par un ou plusieurs atomes d'halogène.
3. En comparaison, les émissions de 1994 ont été de 6,1 Gt de carbone/an.
4. Des concentrations plus importantes de méthane dans l'atmosphère réduisent la concentration du radical hydroxyl, qui à son tour peut réduire la vitesse à laquelle le méthane est éliminé.
5. Extrait de World Meteorological Organization/United Nations Environmental Program, (WMO/UNEP), *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*, (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1996), p. 5. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat à été établi conjointement par l'Organisation météorologique mondiale et le Programme des Nations Unies pour l'environnement.
6. WMO/UNEP, *Climate Change 1995: Impacts, Adaptation, and Mitigation of Climate Change*, (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1996), pp. 3–12.

## SUIVE DE LA PAGE 1

la course aux armements nucléaires et comme outil de propagande de la Guerre froide.<sup>2</sup> Dans sa hâte de construire de nouveaux réacteurs, l'industrie nucléaire, dès ses débuts, a consciemment relégué la sécurité du public, la santé et la protection de l'environnement et même les questions économiques, au deuxième plan, derrière le développement des armes et la propagande.

La Commission à l'énergie atomique américaine savait dès le début du développement des réacteurs que des accidents catastrophiques étaient possibles. En 1957, le Brookhaven National Laboratory a publié une évaluation, intitulée WASH-740, qui dressait le bilan des dégâts potentiels qui pouvaient résulter d'un accident grave. Plusieurs mois après la publication de ce rapport, le Congrès votait le Price-Anderson Act, limitant les responsabilités des compagnies d'électricité à 500 millions de dollars—juste dix pour cent du coût des dégâts immobiliers estimés dans le WASH-740.<sup>3</sup> Cette somme a été portée à 7 milliards de dollars en 1988, encore très nettement en dessous des dégâts qui pourraient être occasionnés par un tel accident.

L'industrie nucléaire continue de minimiser la probabilité d'accidents catastrophiques de réacteurs,

LIRE LA SUIVE, PAGE 14



malgré l'évidence apportée par le désastre de Tchernobyl en 1986. Les retombées radioactives de l'explosion et de l'incendie de Tchernobyl se sont déposées sur tous les pays de l'hémisphère Nord et ont obligé à évacuer plus de 100 000 personnes dans un rayon de 30 kilomètres autour du réacteur et à abandonner entre 100 000 à 150 000 hectares de terre cultivables. Mais l'industrie nucléaire aussi bien que l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), en citant les fallacieux chiffres officiels soviétiques et en passant sous silence le manque de données exactes sur les effets sur la santé, ont eu tendance à minimiser l'importance de l'accident. Les estimations officielles portant sur la radioactivité émise durant les dix premiers jours sont de 80 millions de curies. Mais dans une évaluation indépendante, le scientifique soviétique Jaurés Medvedev a estimé que les rejets d'iode et de césium radioactifs étaient environ trois fois plus élevés que ceux indiqués par les autorités.<sup>4</sup> Il est difficile de calculer la totalité des coûts imputables à Tchernobyl, mais même les estimations officielles de 10 à 15 milliards de dollars dépassent la limite des 7 milliards de dollars de dommages et intérêts du Price-Anderson Act.

La leçon la plus importante et tragique à tirer de Tchernobyl est que le plus grave accident envisageable dans l'énergie nucléaire peut effectivement se produire. De plus, les problèmes créés par ce genre d'accident grave persisteront durant plusieurs générations. De grandes déclarations ont été faites en faveur d'une nouvelle génération de "réacteurs intrinsèquement sûrs," mais elles sont exagérées et très trompeuses.<sup>5</sup> Il faudrait plusieurs décennies pour tester différents modèles et savoir si la création d'un réacteur réalisable en pratique, bon marché et invulnérable aux accidents catastrophiques est tout bonnement possible.<sup>6</sup> Dès lors, l'énergie nucléaire ne peut pas aider le monde à réduire, sans risque, les émissions d'oxyde de carbone—un besoin urgent dont il faut s'occuper avec des principes en place dans les toutes prochaines années.

### L'aspect économique

Le tableau de la page 7 montre que l'énergie nucléaire est une façon beaucoup plus chère et risquée de produire de l'électricité que les centrales à cycle combiné au gaz naturel à haut rendement. Même en France, (qui dépend très largement de l'énergie nucléaire), les autorités ont admis que les centrales électriques à cycle combiné qui utilisent du gaz naturel sont plus économiques que les centrales nucléaires.<sup>7</sup> On peut s'attendre à ce que chaque centrale nucléaire coûte typiquement entre 6 milliards et plusieurs dizaines de milliards de francs de coûts d'exploitation excédentaires sur la durée de vie de l'installation.<sup>8</sup> Pour réduire substantiellement les émissions d'oxyde de carbone, les

centrales nucléaires devraient non seulement fournir une bonne partie de l'électricité mondiale pour répondre à l'accroissement de la demande d'électricité, mais aussi remplacer beaucoup de centrales au charbon au fur et à mesure qu'elles sont retirées du service. Cela nécessiterait la construction d'environ 2 000 centrales nucléaires de 1 000 mégawatts chacune dans les prochaines décennies. Le coût total du choix nucléaire se solderait à plusieurs dizaines de milliers de milliards de francs. Cette énorme somme d'argent devra provenir de subventions des gouvernements et/ou des consommateurs (prix plus élevés). Cette somme serait mieux utilisée à des investissements dans l'efficacité énergétique, le développement de la co-génération et des énergies renouvelables, des centrales à cycle combiné, des piles à combustible, etc. Les investissements dans l'énergie nucléaire auront donc comme effet de porter atteinte aux efforts de réduction des émissions de gaz carbonique en prenant la place d'investissements qui auraient été plus appropriés.

### La non-prolifération et le désarmement<sup>9</sup>

Les difficultés suscitées par les questions de non-prolifération et de désarmement sont encore plus décourageantes que les questions économiques et de sûreté, parce qu'elles sont non seulement techniques, mais aussi de nature militaire, politique et institutionnelle.

Tous les réacteurs civils produisent du plutonium.<sup>10</sup> Une fois séparé par retraitement, le plutonium provenant de ce combustible irradié peut être utilisé pour fabriquer des armes nucléaires. Les stocks de plutonium civil ont augmenté très rapidement depuis le début des années 80 et on s'attend à ce qu'ils dépassent les stocks militaires d'ici quelques années. Il y a maintenant cinq pays qui ont une politique de retraitement commercial (civil): la France, la Russie, l'Angleterre, le Japon et l'Inde. Six autres pays possèdent également du plutonium séparé: l'Allemagne, les Pays-Bas, la Belgique, la Suisse, l'Espagne et les États-Unis (ces derniers à partir d'une usine commerciale de retraitement qui a fonctionné de 1966 à 1972).<sup>11</sup>

Si l'énergie nucléaire était utilisée comme moyen de diminuer les émissions des GES, les inventaires de plutonium augmenteraient dramatiquement. Si 2 000 réacteurs nucléaires sont construits dans les prochaines décennies (en plus du remplacement des 350 000 MW de capacité nucléaire actuelle), l'inventaire mondial de plutonium civil atteindra environ 20 000 tonnes vers le milieu du siècle prochain, éclipsant les stocks actuels. Cet inventaire, la pression sur les ressources d'uranium, et l'opposition du public à l'enfouissement des déchets nucléaires intensifieraient grandement la demande pour la séparation du plutonium civil et son utilisation dans les centrales nucléaires. Cela exacerberait encore plus



les problèmes économiques, écologique, et de prolifération associés à l'énergie nucléaire.

Pendant des décennies, la technologie nucléaire a été parée de tous les atours d'une "technologie supérieure" et sa promotion fait partie du Traité de non-prolifération nucléaire.<sup>12</sup> La propagande occidentale remonte au moins au discours du mois de décembre 1953 "Atomes pour la Paix" dans lequel le président Eisenhower liait la renonciation aux armes nucléaires à la promotion de l'énergie nucléaire. Le résultat de cette politique de la Guerre froide a été la mise en place de compagnies privées subventionnées ou étatiques dans des pays stratégiquement importants, ayant des intérêts dans l'économie du plutonium. Ces bureaucraties continuent d'être politiquement et financièrement puissantes malgré les échecs, en matière d'écologie, de non-prolifération et d'économie, de technologies importantes telles que les surgénérateurs et le retraitement.<sup>13</sup>

### L'utilité de la technologie nucléaire

L'énergie nucléaire n'est d'aucune utilité pour les besoins de la grande majorité des pays du monde, puisque les centrales nucléaires sont trop grandes et trop chères pour être raccordées à leurs réseaux. Dans les pays pour lesquels il pourrait être concevable d'utiliser cette technologie, comme par exemple l'Inde et la Chine, les arguments technologiques et économiques favorisent de loin d'autres technologies comme les centrales à gaz naturel à cycle combiné ainsi qu'une grande amélioration du rendement du réseau électrique et des centrales à charbon. Les investissements dans ces technologies peuvent produire beaucoup plus d'électricité que les investissements pour les centrales nucléaires. Quatre décennies après le début de son développement, l'électricité d'origine nucléaire ne représente que 3 pour-cent de la capacité électrique de l'Inde.

Seuls quelques pays dépendent de manière importante des centrales nucléaires, et ces pays sont déjà très industrialisés. Dans ces pays, comme dans les autres, le potentiel pour accroître le rendement est grand. Cela est particulièrement vrai pour les Etats-Unis qui possèdent le plus grand nombre de centrales nucléaires autorisées à fonctionner (106 au dernier décompte). De plus, certains de ces pays sont en train de réduire leur dépendance vis à vis de l'énergie nucléaire, au lieu de l'accroître. Même en France et au Japon, l'engagement considérable en faveur du nucléaire est en train de devenir de plus en plus surveillé par le gouvernement et le public.

### Les déchets radioactifs

Comme nous l'avons vu, pour que le nucléaire puisse contribuer de manière significative à la réduction des GES, il faudrait des milliers de nouvelles centrales. Cela créerait des milliers de tonnes de combustible

irradié qui s'ajouteraient aux déchets déjà en existence. Il n'existe pas, à l'heure actuelle, de politique viable pour la gestion des déchets nucléaires. Les partisans de l'énergie nucléaire voient la "solution" de l'enfouissement en couche géologique profonde comme un élément essentiel pour le renouveau du nucléaire, aux Etats-Unis au moins. Ceci a provoqué l'opposition à l'enfouissement, tant que la question de la gestion à long terme n'est pas considérée séparément de la promotion du nucléaire. Des projets de gestion des déchets par la transmutation (la transformation des radionucléides de longue durée de vie en radionucléides de courte durée de vie), ne sont pas viables pour plusieurs raisons. Non seulement des réacteurs, d'un type ou d'un autre, seront nécessaires pour la transmutation, mais il faudra aussi avoir recours à des technologies de retraitement qui pourraient être modifiées pour produire des matières fissiles utilisables pour les armes. La transmutation et les technologies de retraitement créeront également leurs propres problèmes de gestion des déchets en générant de grands volumes de déchets radioactifs supplémentaires. Donc, ce qui au premier abord semblait être une solution aux problèmes de prolifération et de gestion des déchets, risque d'exacerber les problèmes de prolifération sans apporter une solution à la gestion des déchets. Outre qu'elles n'éliminent pas la nécessité de l'enfouissement ou d'autres stratégies d'évacuation, ces technologies demeurent très chères, et augmenteraient grandement les coûts du nucléaire qui sont déjà non compétitifs.<sup>14</sup>

### La sortie progressive du nucléaire

Outre les inconvénients du point de vue de la sûreté, de la prolifération et des coûts cités ci-dessus, il y a de nombreuses raisons qui expliquent pourquoi une sortie progressive du nucléaire est nécessaire pour accéder à un futur énergétique durable qui ne présente pas de danger pour la paix et la santé:

- La présence d'importants stocks de plutonium séparé ainsi que de plutonium contenu dans le combustible irradié peut rendre plus probable le retour aux armes nucléaires en cas de tension ou de guerre.
- Les bureaucraties qui sont les plus empressées à favoriser le nucléaire sont aussi celles qui ont tendance à encourager les armes nucléaires dans de nombreux pays, y compris dans ceux qui possèdent déjà des armes nucléaires. Ces bureaucraties nucléaires continuent de nourrir le désir d'une économie du plutonium malgré les échecs techniques, écologiques et les désavantages économiques. Contrairement aux discours officiels, il s'agit d'une incitation à la continuation de la prolifération.
- Les centrales nucléaires peuvent devenir des cibles en



cas de guerre conventionnelle. Les conséquences sur la santé et l'environnement seraient catastrophiques.

- L'encouragement au développement de l'énergie nucléaire aggrave les conflits, les instabilités et les incertitudes dans les régions de l'Asie du centre et de l'ouest (y compris le golfe Persique). Le conflit entre les Etats-Unis d'un côté et la France, la Communauté européenne, la Russie, la Malaisie et l'Iran de l'autre, à propos des investissements français, malaysiens, et de Gazprom pour le gaz iranien en constitue un exemple important.

A moins que l'Occident, qui a été le premier à idéaliser l'énergie nucléaire, n'y renonce et commence à en sortir progressivement, il est peu probable que les autres pays l'abandonnent. L'Occident n'aura pas non plus de raison de refuser aux autres l'acquisition de cette technologie. Par exemple, bien que l'Iran soit en conformité avec les inspections et le système de garantie de l'AIEA, les Etats-Unis ont manifesté beaucoup d'inquiétude quant aux conséquences possibles de son achat de réacteurs russes du point de vue de la prolifération. En effet les Etats-Unis soupçonnent l'Iran d'avoir un programme secret de fabrication d'armes nucléaires. Il est à la fois ironique et instructif que les Etats-Unis aient été les premiers à encourager les ambitions nucléaires iraniennes dans les années 70, avant la révolution de 1979. Bien que la sortie progressive du nucléaire de l'Occident ne garantisse aucun progrès dans d'autres domaines, pas plus qu'une sortie progressive dans tous les autres pays, elle est néanmoins une condition essentielle pour rendre moins difficiles à gérer les problèmes associés au pétrole, au gaz naturel et aux GES. Comme on l'a vu plus haut, le problème de la gestion à long terme du combustible irradié ne peut aussi être pris en compte d'une façon satisfaisante sans une sortie progressive du nucléaire.

L'énergie nucléaire ne peut pas être éliminée immédiatement ou sans une planification prudente. En effet, dans certains pays, si les centrales nucléaires étaient arrêtées toutes en même temps, cela aurait comme conséquence une désorganisation grave ou même un arrêt complet des réseaux électriques, en partie, ou dans leur totalité. La France, l'Allemagne, le Japon, certains endroits de l'ex-Union soviétique et de l'Europe de l'Est et des régions des Etats-Unis sont dans ce cas. Il faudra, tout en préconisant une sortie progressive du nucléaire, proposer et mettre en oeuvre une politique énergétique claire qui prenne en compte le problème des émissions des GES et les besoins d'énergie de la majorité des habitants de la planète. Plusieurs politiques, technologies et suggestions viables ont été proposées (l'article de la page 5 donne un exemple détaillé).



1. Rapportez vous au tableau des accidents des réacteurs dans le rapport de l'IEER de 1996, *The Nuclear Power Deception* de Arjun Makhijani et Scott Saleska, p.121. Ce tableau se trouve également sur la page web de l'IEER, [www.ieer.org/reports/accident/npd.html](http://www.ieer.org/reports/accident/npd.html).
2. Ceci est discuté en détail dans *Nuclear Power Deception*. Les passages, en anglais, les plus importants de ce rapport sont disponibles sur le web à [www.ieer.org/reports/accident/npd.html](http://www.ieer.org/reports/accident/npd.html).
3. Atomic Energy Commission, *Theoretical Possibilities and Consequences of Major Accidents in Large Nuclear Power Plants: A Study of Possible Consequences if Certain Assumed Accidents, Theoretically Possible but Highly Improbable Were to Occur in Large Nuclear Power Plants*. WASF-740, U.S. Atomic Energy Commission, Washington D.C., Mars 1957.
4. Zhores A. Medvedev, *The Legacy of Chernobyl*, (New York; W.W. Norton, 1990 ), p. 78. (Le Docteur Medvedev a aussi été le premier scientifique soviétique à rendre compte ouvertement de l'explosion d'une cuve de déchets de haute activité à Tcheljabinsk-65 en 1957.) Il est important de noter que les estimations officielles (soviétiques) des rejets de Tchernobyl sont ajustées, elles ne tiennent pas compte des 10 premiers jours après l'accident. C'est une des raisons de la sous-estimation.
5. *Nuclear Power Deception*, pp. 118-120.
6. *Nuclear Power Deception*, Chapitres 3 et 4.
7. Edouard Launet, "EDF trouve l'addition du plutonium trop salée," *Libération*, 17 Avril 1997.
8. C'est un coût en dessous de sa valeur, c'est-à-dire que c'est la valeur actuelle des futurs coûts supplémentaires d'électricité encourus si une centrale électrique est construite au lieu d'une usine à cycle combiné. Ce coût tient compte des coûts plus élevés du combustible pour une usine à cycle combiné et du fait que ces coûts sont encourus durant l'exploitation de l'usine. La valeur présente d'un coût ou d'une recette future, est obtenue en la rabaisant, parce que l'argent futur vaut moins que le liquide dont on dispose immédiatement.
9. On peut trouver des informations supplémentaires sur les conséquences de l'énergie nucléaire dans *Energie et Sécurité*, (le bulletin international d'IEER), numéros 1 à 3. Une copie papier peut être obtenue auprès de l'IEER. Ces numéros se trouvent également sur notre page web: [www.ieer.org/enssec/frnmain.html](http://www.ieer.org/enssec/frnmain.html).
10. Beaucoup de réacteurs à propulsion nucléaire des sous marins ne fabriquent pas de quantités importantes de plutonium parce qu'ils utilisent de l'uranium hautement enrichi comme combustible, mais, cet uranium hautement enrichi peut être aussi utilisé pour fabriquer des armes nucléaires. Il a été proposé des réacteurs qui utiliseraient de l'uranium 233 comme combustible et ainsi ne produiraient pas de plutonium. L'uranium 233 ne se trouve pas dans la nature et doit être fabriqué à partir de thorium 232. Il n'existe aucun réacteur commercial de ce type. Un combustible comprenant de l'uranium 235 et du thorium 232, qui produirait de l'uranium 233 a été proposé pour les réacteurs à eau ordinaire déjà en service. (Voir: Alex Galperin, Paul Reichert, et Alvin Radkowsky, "Thorium Fuel for Light Water Reactors—Reducing Potential Proliferation from Nuclear Power Fuel Cycle." *Science & Global Security* Vol. 6 (1996) pp. 267-292). Cependant, l'affirmation selon laquelle ce genre de combustible peut éliminer presque entièrement les inquiétudes au sujet de la prolifération, ne résiste pas à un examen minutieux puisque l'uranium-233, comme le plutonium-239, pourrait être utilisé pour les armes.
11. Pour des chiffres sur les stocks de plutonium civil, reportez-vous à David Albright, Frans Berkhout and, William Walker, *Plutonium and Highly Enriched Uranium 1996: World Inventories Capabilities and Policies*, (Oxford: Oxford University Press, 1997), p.230. Les stocks mondiaux augmentent d'environ 20 tonnes par an. Voir aussi, *Energie et Sécurité* No.1.
12. L'article du TNP déclare que "Toutes les Parties au Traité s'engagent à faciliter un échange aussi large que possible d'équipement, de matières et de renseignements scientifiques et technologiques en vue des utilisations de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques, et ont le droit d'y participer. Les Parties du Traité en mesure de le faire devront aussi coopérer en contribuant au développement plus poussé des applications de l'énergie nucléaire à des fins pacifiques "



13. EDF considère le plutonium comme gratuit depuis 1992. Néanmoins, la valeur du plutonium commercial a une valeur négative puisqu'il coûte en gros FF 600 000 par kilo (de plutonium) pour l'extraire du combustible irradié.
14. Natural Research Council, *Nuclear Wastes: Technologies for Separation and Transmutation*, (Washington DC: National Academy Press, 1996).

## SUIVE DE LA PAGE 7

pondant à des réserves d'environ  $5,2 \times 10^{21}$  joules, et à une utilisation annuelle d'environ  $7 \times 10^{19}$  joules). Les réserves mondiales de gaz ont continué d'augmenter régulièrement, malgré l'accroissement de la consommation.<sup>4</sup>

Les centrales à charbon se trouvent dans beaucoup d'endroits dans le monde, en particulier en Europe de l'ouest, aux Etats-Unis, en ex Union soviétique, en Chine, en Inde, et en Europe de l'Est. Bien qu'il soit économiquement impossible de remplacer immédiatement les centrales à charbon par des centrales à cycle combiné, il est néanmoins possible de les remplacer sur une période échelonnée. Dans certaines régions la capacité éolienne fournirait aussi un contreponds efficace et économique aux émissions de  $\text{CO}_2$ .

Un des désavantages de l'accroissement de l'utilisation du gaz naturel vient de ce que les pipelines de gaz naturel ont des petites fuites de méthane. On estime que ces fuites dans le cas d'utilisation pour les centrales est de 0,8 pour-cent. Puisque le méthane est un GES beaucoup plus efficace que le  $\text{CO}_2$ , il est nécessaire de contrebalancer ces émissions pour maximaliser les réductions de GES obtenues de l'utilisation du gaz naturel. Ces compensations peuvent être réalisées par des mesures relativement simples comme, par exemple, la construction d'usines utilisant la bouse de vache pour produire du méthane, et le captage du méthane qui se dégage des décharges (qui est devenu un polluant important dans certains endroits) pour son utilisation comme combustible. Le gaz des décharges est utilisé dans beaucoup d'endroits, d'une façon limitée, pour produire de l'électricité ou comme combustible pour le chauffage. Par exemple, le gaz de la décharge de Fresh Kills, où les déchets municipaux de la ville de New York sont déchargés, fournit du combustible pour le chauffage de 14 000 habitations.<sup>5</sup>

### L'efficacité énergétique et les sources d'énergies renouvelables

Comment faire la transition à un système d'énergie qui répond aux besoins en énergie tout en étant durable et respectueux de l'environnement? Il n'est pas difficile d'imaginer un avenir lointain où des sources d'énergies renouvelables répondant aux besoins de base en énergie pourront être bon marché. Mais comment y arriver, surtout quand les énergies solaire et éolienne, après

plusieurs décennies d'efforts, n'ont pas encore contribué pour une part significative au bilan énergétique mondial, et quand les progrès en matière d'efficacité énergétique ont été discontinus et bien en dessous du potentiel?

La première chose à noter est que, l'efficacité énergétique et les sources d'énergies renouvelables n'ont bénéficié nulle part d'un même effort de recherche et développement et d'investissement que les combustibles fossiles ou l'énergie nucléaire. L'échec technologique du surgénérateur, un volet seulement du programme de fission nucléaire, a à lui seul bénéficié de bien plus de ressources que les énergies solaire et éolienne réunies.

Deuxièmement, les problèmes fondamentaux de l'efficacité énergétique ne sont même pas reconnus par les décideurs, encore bien moins font-ils l'objet d'efforts importants de recherche et de développement. Par exemple, le développement d'échangeurs de chaleur à très haut rendement, compacts et bon marché, pour des sources de chaleur à basse température, ouvrirait la porte à de nombreuses possibilités nouvelles en matière d'efficacité énergétique. Mais les fonds gouvernementaux nécessaires à la recherche de base sont maigres et la recherche du secteur privé est centrée sur des technologies rentables à court terme.

Troisièmement, les statistiques sur l'énergie sont très insuffisantes. Par exemple, de vastes sources d'énergie, notamment la biomasse destinée aux animaux de trait qui fournissent l'énergie pour l'agriculture dans beaucoup de régions du monde, ne sont pas inventoriées. Les grandes quantités de gaz naturel, considérées comme un sous produit inutile de l'extraction du pétrole, et qui sont brûlées ou évacuées, ne sont pas comptées non plus. Par exemple, la compagnie pétrolière Shell, brûle la plus grande partie du gaz naturel provenant de sa production pétrolière du Niger.<sup>6</sup>

La transformation du système énergétique de la planète sera une tâche énorme et difficile. Une grande partie du problème vient de ce que les grandes compagnies, pour qui le profit est l'objectif principal et qui ont investi des sommes énormes dans les combustibles fossiles et l'énergie nucléaire, contrôlent la plus grande partie de la production d'énergie, de sa conversion et de sa distribution. Comme dans le cas du protocole de Montréal qui a instauré des actions pour la protection de la couche d'ozone, les gouvernements devront s'appuyer sur le protocole de Kyoto pour créer le cadre réglementaire ainsi que les sanctions et avantages financiers de manière à faire émerger du marché les réductions des émissions de GES recherchées. Une action ferme aux niveaux locaux, régionaux, nationaux, et planétaire est essentielle et urgente pour réaliser la transition du système énergétique actuel, plein de dangers, à un système écologiquement viable.

VOIR LA PAGE 20 POUR LES ANNOTATIONS



## La deuxième loi de la thermodynamique

L'application de la deuxième loi de la thermodynamique explique les diverses façons dont les moteurs transforment la chaleur en travail mécanique, comme par exemple dans le moteur à essence d'une voiture ou dans une turbine à vapeur.

Les mesures de rendement basées sur la deuxième loi de la thermodynamique prennent en compte la *qualité* de l'énergie - contrairement au rendement basé sur la première loi de la thermodynamique qui tient seulement compte de la *quantité* d'énergie. La première loi de la thermodynamique indique que l'énergie est conservée même quand elle change de forme, comme par exemple, d'énergie mécanique en chaleur. Au contraire, la deuxième loi de la thermodynamique nous permet de savoir comment un système énergétique fonctionne en ce qui concerne la qualité de l'énergie. En 1842, un physicien français, Nicholas Léonard Sade Carnot, a décrit le moteur (idéal) le plus efficace pour transformer la chaleur en travail mécanique. Ce rendement théorique maximal, appelé le **rendement de Carnot** permet de comparer comment, dans la pratique, un système quelconque utilisant de l'énergie fonctionne par rapport à son rendement théorique maximum. La température à laquelle l'énergie est disponible est une bonne mesure de sa qualité—plus la température de l'énergie est élevée plus, théoriquement de travail mécanique peut en être extrait. Par exemple, un kilo de vapeur à 1 000° C produira plus d'énergie mécanique que de la vapeur à 500 °C dans les mêmes conditions (comme de pression). De l'énergie à 20° C crée un environnement confortable, mais est pratiquement inutile pour produire du travail mécanique dans des situations de tous les jours.

Prenons le cas d'un système de chauffage au gaz naturel qui fournit de l'air chaud pour chauffer un immeuble. (Cet exemple pourrait aussi s'appliquer à des systèmes qui fournissent de l'eau chaude pour le chauffage. Un système typique de chauffage au gaz naturel dégrade la chaleur depuis des températures dépassant les 1 000° C jusqu'à environ 50° C. Ainsi, alors que la presque totalité de la quantité d'énergie contenue dans le gaz naturel a été transférée à l'air pour chauffer le bâtiment, la capacité du gaz naturel à fournir du travail a été presque entièrement gaspillée. Donc, une chaudière typique au gaz naturel pour le chauffage domestique a un haut rendement selon la première loi de la thermodynamique, souvent autour de 85, 90 pour cent, mais un piètre rendement selon deuxième loi de la thermodynamique, de seulement quelques pour cent (en fonction de la température extérieure). L'évaluation de ce système, selon la seconde loi de la thermodynamique, nous permet de voir que la

contribution initiale du gaz naturel pourrait être utilisée plus efficacement et pour un bénéfice plus grand si sa chaleur n'était pas gaspillée. Par exemple, le gaz naturel pourrait être utilisé comme source d'hydrogène pour des piles à combustible pour générer de l'électricité avec un rendement de 60 pour cent (deuxième loi). L'électricité pourrait être alors utilisée pour "pomper" la chaleur de l'air froid du dehors pour l'amener à la température ambiante désirée. (Une pompe à chaleur utilise l'énergie électrique pour pomper l'énergie présente dans l'air ou le sol du dehors pour l'amener à la température ambiante et la transférer au bâtiment.)<sup>1</sup> On peut aussi se représenter ce système comme une climatisation inversée qui souffle l'air chaud dans un bâtiment plutôt que le l'évacuer. Dans les climats modérés le rendement de l'utilisation du gaz naturel pourrait être quadruplé au minimum. Dans les climats froids, la chaleur du sol (celui ci étant plus chaud que l'air) pourrait être amené à la température ambiante, grâce à des améliorations semblables du rendement. L'utilisation des moteurs à gaz pour produire de l'électricité et la chaleur perdue du chauffage et du refroidissement (la cogénération) peuvent fournir des hausses de rendement similaires. De meilleurs rendements pourraient être obtenus grâce à des échangeurs de chaleur (des systèmes qui utilisent l'énergie d'un milieu plus chaud pour réchauffer un milieu plus froid, tel une chaudière qui transfère l'énergie d'un gaz chaud à l'eau froide) plus performants que ceux trouvés actuellement dans le commerce. Théoriquement, le rendement de l'utilisation du combustible pour le chauffage des bâtiments pourrait augmenter de dix à quinze fois par rapport à un système typique en usage aujourd'hui aux Etats-Unis.

Il y a, bien sur, des problèmes pratiques associés à l'utilisation de la cogénération, si bien que son utilisation n'est pas toujours rentable. Par exemple, les applications pratiques dépendraient de facteurs tels que la quantité de chaleur, d'eau chaude, de climatisation et d'électricité nécessaires, suivant que le système de production d'électricité peut être rattaché à un réseau, et le coût de générateurs de petite taille. Néanmoins, depuis les deux dernières décennies, de nouvelles technologies ont évolué pouvant permettre le déploiement d'une utilisation de la cogénération beaucoup plus rentable que celle actuellement en existence.

Les affirmations selon lesquelles l'augmentation de l'utilisation de l'énergie—c'est-à-dire l'utilisation des combustibles primaires—serait le seul moyen d'augmenter les services que l'énergie fournit ne sont pas basées sur un examen détaillé du vaste potentiel

LIRE LA SUITE, PAGE 20



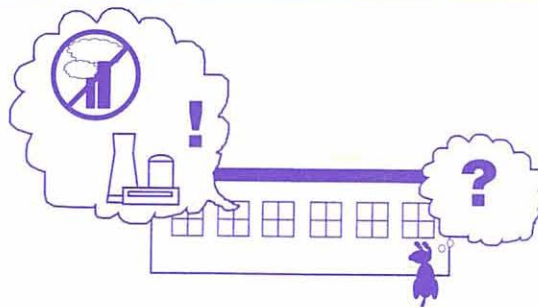
## Le coin des maths avec le problème du professeur Raymond X

**F**aites la connaissance de Gamma le chien fidèle du professeur Raymond X. La mission de Gamma est d'aider le professeur Raymond X à résoudre les problèmes posés par le nucléaire.

Gamma, a récemment surpris un groupe haut placé de planificateurs de l'énergie en train de discuter comment réduire les émissions atmosphériques de carbone, tout en couvrant les besoins en énergie. Après un certain temps de délibération, les planificateurs se sont mis d'accord pour conclure que l'énergie nucléaire, malgré son coût économique supérieur, est la meilleure solution pour répondre aux inquiétudes sur le changement climatique puisque c'est une technologie qui ne rejette pas de carbone. Mais Gamma voyait les choses autrement et fit irruption dans la salle pour s'adresser au groupe étonné. Malheureusement, comme Gamma n'a pas pu écrire ses idées sur le tableau, il vous demande si vous pouvez finir les calculs pour lui et les envoyer par la poste au professeur Raymond X (voir détails ci-dessous). Voici ce qu'il aurait dit au groupe:

1. Supposez une centrale typique au charbon de 1 000 mégawatts de puissance électrique (1 000 MWe). Si elle fonctionne 6 600 heures par an, elle produit \_\_\_\_\_ mégawatt-heures d'énergie électrique (MWe) par an.
2. Si cette centrale émet 0,37 tonne de carbone par mégawatt-heure, la totalité des émissions est de \_\_\_\_\_ tonnes.
3. Une usine typique au gaz naturel à cycle combiné qui fonctionne à la même capacité pour le même nombre d'heures émet 0,12 tonne par an de carbone par mégawatt-heure, soit un total de \_\_\_\_\_ tonnes d'émissions annuelles de carbone.
4. En supposant que deux centrales au gaz naturel puissent être construites pour le même prix qu'une centrale nucléaire\*, combien de tonnes d'émissions de carbone sont évitées dans chaque scénario?
  - a) Une centrale nucléaire remplace une centrale à charbon et permet une réduction totale d'émissions de carbone de \_\_\_\_\_ tonnes par an.

\*Note de Gamma: le nombre réel de centrales au gaz naturel à cycle combiné qui pourraient être construites pour le même prix qu'une centrale nucléaire dépend à la fois du prix du gaz naturel et des coûts d'investissements pour les centrales nucléaires. Puisque ces deux facteurs peuvent beaucoup varier, le niveau réel des réductions des émissions de carbone peut lui aussi fluctuer. Voir tableau 1, p.7.



- b) Deux centrales au gaz naturel, émettant \_\_\_\_\_ tonnes de carbone par an, remplacent deux centrales au charbon émettant \_\_\_\_\_ tonnes par an.
- c) Pour chaque scénario, la réduction annuelle nette pour chaque scénario est de:
  - i. (scénario nucléaire) \_\_\_\_\_ tonnes de carbone par an
  - ii. (scénario gaz naturel) \_\_\_\_\_ tonnes de carbone par an

Les réductions de carbone pour le scénario \_\_\_\_\_ sont plus grandes que celles du scénario \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ %.

NOTE: Pour ces calculs, Gamma a ignoré les émissions de carbone autres que celles de la centrale elle-même. Il a aussi ignoré l'impact du léger accroissement des émissions de méthane provenant de l'utilisation du gaz naturel qu'il faudrait compenser par des investissements relativement minimes (voir p.7)

### A l'attention des lecteurs d'*Energie et Sécurité*

Solution du problème du numéro 4 d'*Energie et Sécurité*: un travailleur à la mine d'uranium de Deep Canyon recevrait une dose de 0,59 rad sur une période d'un mois, et de 7,072 rad sur une année.

**E**nvoyez nous vos réponses par fax (301-270-3029), e-mail (ieer@ieer.org, ou par courrier (IEER 6935 Laurel Ave, Suite 204, Takoma Park, MD 20912).



ment en énergie ainsi que pour la réduction des GES, s'ajoute aux nombreuses autres situations de crises pour la sécurité de la région.

Ces problèmes sont tellement imbriqués que des décisions majeures prises par de puissants gouvernements ou compagnies, quelle que soit la région, risquent d'avoir des effets profonds et de longue durée sur toutes les autres. Notre examen de la situation mondiale nous amène à conclure qu'il ne nous est pas possible de fournir des informations et une analyse solides sur les conséquences du développement nucléaire en matière de sécurité, de santé et d'environnement, si nous ne prenons pas en compte en même temps les problèmes de l'énergie en général.

L'équipe de l'IEER a une expertise solide sur les problèmes de changement de climat (y compris la protection de la couche d'ozone), bien que cet aspect de notre travail soit moins familier pour beaucoup que notre travail sur les armes atomiques. La plus grande partie de mon travail dans les années soixante-dix et dans une large mesure mon travail dans les années quatre-vingts et quatre-vingt dix a été consacrée à ces sujets. L'IEER a écrit plusieurs rapports sur la protection de la couche d'ozone en commençant par *Saving Our Skins*, une analyse de base sur la chimie de la destruction de l'ozone préparée en 1987, pour finir par *Mending the Ozone Hole*, publié en 1995 par MIT Press. Dans le courant de cette année, l'IEER intégrera une plus grande partie de ce travail avec les problèmes d'environnement et de santé liés aux armes nucléaires qui ont constitué auparavant le thème central de nos publications et rapports.



ARJUN MAKHIJANI

1. Daniel Yergin, *The Prize*, New York: Simon and Schuster, 1991, pp.314-6.
2. Leslie R. Groves, *Now It Can Be Told: The Story of the Manhattan Project*, (New York: Harper & Brothers: 1962), pp.33-35 et pp.218-220.

**The Institute for Energy and  
Environmental Research**

6935 Laurel Avenue, Takoma Park, MD 20912,  
USA

Phone: (301) 270-5500

FAX: (301) 270-3029

Adresse Internet: [ieer@ieer.org](mailto:ieer@ieer.org)

Page Web: <http://www.ieer.org>



d'amélioration du rendement de l'énergie, même dans les pays industrialisés soi-disant "avancés". D'après le critère de la deuxième loi de la thermodynamique, le système énergétique mondial est très inefficace. Donc, de grands accroissements dans les services que l'énergie fournit, comme le chauffage, la climatisation, ou l'éclairage, sont possibles même avec une utilisation finale constante ou même réduite.



1. En pratique, tous les matériaux contiennent une certaine quantité d'énergie thermique. Même l'air frigidé ou la glace ont une quantité considérable d'énergie. L'énergie thermique zéro—c'est-à-dire quand les atomes et les molécules ne possèdent plus de motion aléatoire—est seulement obtenue à une température connue sous le nom de zéro absolu est égale à environ -273 0C. Il n'existe aucun mécanisme pratique qui permette d'atteindre cette température.

1. quantité de carbone excédentaire qui peut être absorbée annuellement par la biosphère est de 3 gigatonnes (3,3 milliards de tonnes), d'après la plupart des estimations, alors que les émissions représentent sept à huit gigatonnes par an. Les émissions annuelles résultant de la combustion des combustibles fossiles sont d'environ 5,5 gigatonnes. Tous les chiffres sont exprimés sur la base du poids de carbone présent dans le gaz carbonique. Source: International Panel on Climate Change (Groupe d'experts intergouvernemental pour l'étude du changement climatique). *Climate Change 1995*, (Cambridge: Cambridge University Press, 1996), p.17.
2. Nous utilisons le terme de service en énergie plutôt que celui d'utilisation d'énergie ou alimentation en l'énergie parce que les gens n'ont pas besoin du combustible comme tel mais des services que son utilisation fournit comme l'éclairage, le chauffage et le transport. Comme la discussion sur la seconde loi de la thermodynamique le démontre (voir p. 18), l'alimentation en énergie nécessaire à un certain niveau de services d'énergie peut beaucoup varier.
3. Voir Steven M. Cohn, *Too Cheap to Meter: An Economic and Philosophical Analysis of the Nuclear Dream*, State University of New York Press, Albany, 1997, p. 155, "pessimist projection."
4. US Energy Information Administration page Web: [www.eia.doe.gov/oiaf/ieo97/gas.html](http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo97/gas.html)
5. Vivian Toy, "Sealing Mount Garbage: Closing Staten Island's Fresh Kills Dump is an Operation of Staggering Complexity," *The New York Times*, 21 décembre 1997.
6. Le gaspillage du gaz naturel prendra fin en 2008. Entretien téléphonique avec Don Cannon, Directeur général, affaires externes/relations financières, Compagnie pétrolière Shell, bureau de New York, 19 février, 1998