



## Conseil économique et social

Distr. générale  
5 février 1998  
Français  
Original: anglais

### Comité des sources d'énergie nouvelles et renouvelables et de l'énergie pour le développement

Troisième session

New York, 23 mars-3 avril 1998

Point 4 a) de l'ordre du jour provisoire\*

**Énergie et développement durable**

### Sources d'énergie fossiles : technologies écologiquement rationnelles et de bon rendement

**Rapport du Secrétaire général\*\***

#### Table des matières

	<i>Paragraphes</i>	<i>Page</i>
I. Introduction .....	1-8	3
II. Énergie fossile et environnement .....	9-15	4
A. Santé et accidents .....	10-11	4
B. Impact sur l'environnement local, régional et mondial .....	12-15	4
III. L'approvisionnement en énergie fossile .....	16-17	5
IV. La conversion et la distribution de l'énergie .....	18-29	5
A. Les techniques de conversion des combustibles fossiles moins polluantes ...	22-23	6
B. Étude comparative des techniques d'utilisation des combustibles fossiles moins polluantes .....	24-29	8
V. Structure de l'utilisation finale de l'énergie .....	30-31	9

\* E/C.13/1998/1.

\*\* Des informations plus détaillées peuvent être obtenues à la Division du développement durable (Département des affaires économiques et sociales).

VI.	Politiques technologiques et socioéconomiques .....	32–36	10
A.	Progrès technique et apprentissage .....	32–33	10
B.	Autres mesures et politiques portant sur les énergies fossiles .....	34–36	10
VII.	Améliorations futures des techniques d'utilisation des sources d'énergie fossiles .	37–39	11
A.	Possibilité d'améliorer la valorisation des sources d'énergie fossiles .....	37	11
B.	Les combustibles fossiles et l'environnement .....	38–39	11
VIII.	Mesures supplémentaires suggérées .....	40	11

## I. Introduction

1. De nos jours, ce sont les combustibles fossiles qui permettent de satisfaire l'essentiel des besoins énergétiques à l'échelle mondiale. Mais les pratiques actuelles en matière de production et de distribution d'énergie et l'ampleur de l'utilisation des ressources menacent la capacité d'absorption de l'environnement aux niveaux local, régional et mondial. Il faut donc améliorer le rendement de l'énergie d'origine fossile, rendre plus écophiles les techniques d'exploitation des combustibles fossiles et exploiter ceux d'entre eux dont l'impact sur l'environnement est plus faible, tels que le gaz naturel.

2. L'approvisionnement du monde en combustibles fossiles est assuré pour plus de 100 ans. Par conséquent, si l'on fait le nécessaire pour améliorer le rendement – et les possibilités sont importantes – et encourager le passage à des technologies de pointe pour l'exploitation de ces combustibles ainsi qu'au gaz naturel, nombre de problèmes écologiques se trouveraient atténués. On ne cherche pas à évaluer l'impact éventuel de ces modes d'action sur les émissions de gaz carbonique à l'échelle mondiale : l'adoption généralisée des technologies perfectionnées exposées ci-après pourrait en effet en freiner l'augmentation, mais il faudra des politiques énergétiques beaucoup plus ambitieuses pour régler le problème.

3. Pendant près de deux siècles, la consommation mondiale d'énergie primaire a augmenté en moyenne d'environ 2 % par an, doublant à peu près tous les 30 ans : récemment, entre 1990 et 1996, elle a augmenté à un taux annuel moyen d'environ 1 % (Nakićenović (coll.), 1996; British Petroleum, 1997)<sup>1</sup>. La consommation a été multipliée par 34 depuis 1860, passant d'environ 260 millions de tonnes équivalents pétrole (mtep) à 9 gigatonnes (9 milliards de tonnes) équivalents pétrole (gtep) en 1990, dont 1,1 gtep pour les sources d'énergie traditionnelles telles que la biomasse, les déjections animales et les déchets.

4. Cette augmentation sans précédent de la consommation mondiale d'énergie primaire a été enregistrée essentiellement dans les pays développés, entraînant de grandes disparités de consommation au niveau mondial. Alors qu'ils ne représentent que 25 % de la population mondiale, ces pays consomment presque 80 % de l'énergie mondiale. Selon les estimations, il y a environ 2 milliards de personnes dans le monde qui n'ont pas accès à des ressources énergétiques modernes. Environ 85 % de l'énergie utilisée à ce jour a été consommée par moins de 20 % de la population mondiale cumulée, essentiellement dans les pays industrialisés depuis 1860.

5. En 1990, 9 gtep d'énergie primaire ont produit 6,4 gtep d'énergie finale livrée aux consommateurs, soit un volume d'énergie utile, après conversion dans les appareils ou dispositifs finals, estimée à 3,3 gtep. La production de ces 3,3 gtep d'énergie utile a donné lieu à 5,7 gtep d'énergie rejetée (Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués et Conseil mondial de l'énergie, 1995; Nakićenović (coll.), 1996; Gilli (coll.), 1995). La majeure partie en est rejetée dans l'environnement sous forme de chaleur (de faible température), à l'exception des pertes et des résidus provenant notamment de la combustion incomplète de combustibles. Ainsi, le rendement mondial de conversion de l'énergie primaire en énergie finale est d'environ 71 % dans le secteur de l'électricité, tandis que les taux de rendement thermodynamique vont de 32 % à 34 % pour les procédés à cycle unique et de 40 % à 42 % pour les procédés combinés et que le coefficient de rendement de l'énergie finale par rapport à l'énergie utile est estimé à 52 %. Il en résulte un taux de rendement énergétique mondial de 37 % lorsque l'énergie primaire est convertie en énergie utile.

6. De nombreux facteurs sont à l'origine des variations de rendement énergétique entre régions : sources d'énergie utilisées, ressources endogènes, tarification, niveau de développement économique, etc. Les combustibles fossiles présentent des taux de conversion d'énergie finale en applications relativement faibles et des taux de conversion d'énergie primaire en énergie finale relativement élevés. En revanche, dans le cas de l'électricité, c'est l'inverse : le taux de rendement est relativement faible pour ce qui est de la conversion de l'énergie primaire en énergie finale et très élevé au stade des applications finales. Les pays en développement enregistrent les rendements énergétiques les plus élevés (environ 80 %) et les pays en transition les plus faibles (69 %). Par région, le rendement de conversion de l'énergie finale en énergie utile va de 30 % (pays en transition) à 53 % (pays à économie de marché). Ainsi, même les technologies énergétiques au rendement le plus élevé ne suffiraient peut-être pas à compenser les modes de vie à forte intensité d'énergie que pratiquent les pays très riches à économie de marché (Nakićenović, 1993)<sup>2</sup>.

7. De manière générale, l'intensité énergétique (unité physique d'énergie utilisée par unité de produit intérieur brut) est plus forte dans les pays à faible activité économique par habitant, mesurée aux taux de change du marché que dans les pays où l'activité économique par habitant est plus forte. En outre, dans les pays à très forte croissance économique, l'amélioration de l'intensité énergétique est généralement très rapide, alors que les pays à croissance économique faible ou négative voient cette intensité stagner ou augmenter<sup>3</sup>. Par ailleurs, la part des énergies traditionnelles dans la consom-

mation énergétique totale est relativement élevée dans les pays en développement. Si l'on ne considère dans ces calculs que l'énergie commerciale, on réduit encore les intensités énergétiques apparentes des pays en développement, mais, cette mesure peut indiquer un accroissement des intensités énergétiques pour certains. Même en tenant compte de ces ajustements, il est indubitable que dans l'ensemble des pays en développement, les besoins énergétiques par unité d'activité économique ont tendance à baisser à mesure que le PIB par habitant augmente.

8. Les hypothèses concernant les rendements futurs des sources d'énergie et leur impact sur l'environnement sont au centre des scénarios et des projections énergétiques et économiques. Morita et Lee (1997) ont mis au point, à partir de toutes les études disponibles, une base de données unique sur les scénarios et les projections énergétiques, qui groupe environ 400 analyses différentes de l'évolution future dans les domaines énergétique et économique. Selon les scénarios qui prévoient un accroissement élevé des besoins énergétiques futurs, en 2050 comme en 2100, le taux de croissance annuel serait d'environ 2 %, ce qui correspond à l'évolution historique (Makarova (coll.), 1997)<sup>4</sup>. En outre, de nombreux scénarios supposent une croissance continue de la demande d'énergie fossile, quoiqu'à un rythme plus lent que la demande d'énergie totale.

## II. Énergie fossile et environnement

9. La quasi-totalité des cycles combustibles ont un impact négatif sur l'environnement. La combustion de combustibles fossiles est la plus grande source de pollution atmosphérique, car outre du gaz carbonique, elle libère des oxydes de soufre et d'azote, des hydrocarbures non brûlés, des particules et du monoxyde de carbone, toutes substances qui ont un effet direct sur la santé. Toutes les étapes des cycles d'exploitation des combustibles fossiles sont sources de pollution, depuis l'extraction des ressources jusqu'aux utilisations finales, notamment dans les automobiles et les systèmes de chauffage. Parmi les effets nuisibles, on peut citer les problèmes de santé, les accidents, la pollution et le changement climatiques à l'échelle mondiale<sup>5</sup>.

### A. Santé et accidents

10. La pauvreté est souvent associée aux causes profondes des effets nuisibles qu'exerce sur la santé et l'environnement l'énergie provenant de combustibles fossiles. La pollution intérieure accroît les risques pour la santé des ménages

urbains comme ruraux, surtout dans les pays en développement. La principale source en est la combustion de la biomasse et du charbon pour la cuisine et le chauffage, qui entraînent des risques particulièrement élevés pour les femmes et les enfants (Conseil mondial de l'énergie, 1995a). Or on peut atténuer le problème, dans une large mesure, en améliorant le rendement énergétique des cuisinières et des radiateurs. Les avantages seraient multiples : on pourrait réduire à la fois la pollution, les besoins énergétiques et la déforestation. Cependant, le recours à des cuisinières de haut rendement énergétique est coûteux et se heurte parfois à des obstacles liés à la culture et au mode de vie, de sorte qu'en fait, seuls des changements sociaux plus fondamentaux et surtout le développement peuvent réellement apporter un début de solution à ce problème (Conseil mondial de l'énergie, 1995a). À un autre stade, l'extraction du charbon fait également peser des risques sur la santé des mineurs.

11. Outre qu'elle est cause de pollution atmosphérique et a ainsi un impact sur la santé, l'énergie fossile entraîne des risques professionnels et publics de mortalité à tous les stades du cycle du combustible. On estime que les risques professionnels immédiats et différés liés au cycle du charbon combustible sont nettement plus élevés que pour le pétrole ou le gaz naturel. Ils sont beaucoup plus faibles dans les mines superficielles que dans les mines souterraines. En général, les risques publics immédiats sont liés surtout aux accidents de transport et aux effets nocifs de la pollution atmosphérique sur la santé. Pour le transport de l'énergie, on constate donc que les équipements spécialement destinés à cet usage (pipelines, par exemple) permettent d'exposer beaucoup moins les populations aux risques liés au cycle des combustibles fossiles.

### B. Impact sur l'environnement local, régional et mondial

12. S'il est vrai que la recherche de solutions à la pollution atmosphérique causée en milieu urbain et rural par l'utilisation de combustibles fossiles exige toute une gamme de mesures novatrices, il existe un certain nombre de tendances générales, d'ordre structurel pour la plupart, qui pourraient permettre à l'avenir de réduire davantage la pollution atmosphérique<sup>6</sup>. L'hypothèse de départ est que grâce au développement, la pollution atmosphérique proviendra plus de grands systèmes de conversion de l'énergie que d'utilisations finales très dispersées, très diverses et de faible ampleur. Avec ces grands systèmes de conversion, tels que les centrales électriques, les mesures antipollution seraient moins coûteuses et probablement plus faciles aussi à mettre en place (Institut

international pour l'analyse des systèmes appliqués et Conseil mondial de l'énergie, 1995).

13. Or, l'expérience montre en effet que cette hypothèse est fondée. Malheureusement, l'effet a été de remplacer la pollution atmosphérique intérieure et locale par des problèmes écologiques à l'échelle régionale et mondiale. Les émissions de soufre et d'oxyde d'azote, en particulier de grandes sources telles que les centrales électriques, ont eu un impact à l'échelle régionale, notamment l'acidification des sols et de l'eau, problème écologique régional extrêmement préoccupant. Facteur aggravant, l'une des stratégies de dépollution souvent utilisées pour lutter contre la pollution atmosphérique locale a consisté à imposer des cheminées surélevées aux centrales électriques à combustibles fossiles. Les émissions de gaz carbonique, elles, contribuent au changement climatique à l'échelle mondiale.

14. À une certaine époque, l'acidification était généralement perçue comme un problème qui concernait essentiellement les pays industrialisés (Conseil mondial de l'énergie, 1995a). Mais à l'heure actuelle, les émissions atteignent des niveaux graves dans de nombreux pays en développement, entraînant des dégâts dus à l'acidification, en particulier dans certaines régions d'Asie et d'Amérique du Sud. Si les tendances actuelles se poursuivent, les émissions de dioxyde de soufre en Asie du Sud et de l'Est dépasseront dans 20 ans les émissions combinées d'Amérique du Nord et d'Europe. Si rien n'est fait, on verra se généraliser en Asie des problèmes d'acidification tels que la réduction des rendements agricoles se produira à brève échéance, certaines régions de Chine manifestant déjà de graves problèmes causés par les pluies acides (Conseil mondial de l'énergie, 1995a). Heureusement, on assiste à une prise de conscience accrue des problèmes d'environnement et de santé liés aux émissions de soufre et de particules dans le monde.

15. Il existe des moyens efficaces de réduire les émissions de soufre et d'azote des centrales électriques. Le problème principal tient aux investissements que nécessitent ces mesures antipollution. Un autre moyen de réduire les émissions de soufre et d'azote, ainsi que de gaz carbonique, est le passage du charbon au gaz naturel.

### III. L'approvisionnement en énergie fossile

16. De nos jours, les combustibles fossiles représentent environ 75 % de toute l'énergie primaire consommée dans le monde. Le combustible dominant est le pétrole brut, qui représente environ 33 % du total, suivi du charbon (24 %) et

du gaz naturel (18 %). Le potentiel géologique des ressources en combustibles fossiles est vaste, sans être illimité. La disponibilité de ces ressources est, dans une grande mesure, fonction des techniques d'extraction.

17. Les gisements de pétrole et de gaz naturel valorisables sont importants, et les réserves prouvées devraient augmenter parallèlement à l'accroissement de la production de pétrole et de gaz (Rogner, 1997; Adelman et Lynch, 1997)<sup>7</sup>. L'on sait que le charbon est encore plus abondant, et l'extraction est donc davantage fonction de considérations économiques, écologiques et autres que de l'existence de gisements exploitables. Par comparaison, les réserves de pétrole classique sont limitées. La plupart des abondantes sources d'hydrocarbures sont des sources de charbon et de pétrole et de gaz non classiques. L'extraction et l'exploitation de toutes les sources de combustibles fossiles sont associées à des effets écologiques néfastes. Une plus grande efficacité et la compatibilité environnementale des techniques d'exploitation de l'énergie fossile sont donc d'importantes conditions préalables à l'utilisation de ces combustibles. Ceci revêt une importance particulière pour les pays en développement riches en ressources houillères.

### IV. La conversion et la distribution de l'énergie

18. Pour la plus grande partie, l'énergie fossile n'est pas utilisée directement mais est d'abord convertie et transformée en électricité et en combustibles comme l'essence, le kérosène, le fioul domestique et le gaz naturel livrés aux utilisateurs finaux. La conversion et la livraison à l'utilisateur final requièrent plus d'un tiers de l'énergie primaire de source fossile, la plus grande partie pour la production d'électricité. En moyenne, l'efficacité globale de cette production est actuellement d'environ 30 %, et celle des raffineries de pétrole d'environ 90 %. D'autres formes finales d'énergie livrée aux ménages (charbon et gaz naturel par exemple) nécessitent relativement peu de traitement comparées à l'électricité et aux produits pétroliers, et l'efficacité de la conversion est donc comparativement plus élevée, allant de 60 à près de 90 %. Par conséquent, du moins du point de vue de l'efficacité, les procédés de conversion d'énergie les plus importants sont le raffinage du pétrole et la production d'électricité. Une plus grande efficacité dans ces domaines permettrait de réduire considérablement les besoins mondiaux d'énergie, les émissions, et éventuellement aussi les coûts.

19. Améliorer l'efficacité de la conversion est une mesure importante si l'on veut réduire les besoins en énergie primaire par unité de service énergétique, et aussi réduire les quantités

de combustibles nécessaire de même que les impacts écologiques à tous les niveaux. L'évolution technologique, alliée à une bonne maintenance et à des pratiques d'exploitation avisées, sont les éléments essentiels pour rendre la conversion plus efficace. Le raffinage du pétrole brut, par exemple, est un procédé à haute intensité d'énergie qui utilise comme source d'énergie à la fois des sous-produits du raffinage et des formes d'énergie achetées comme l'électricité et le gaz naturel. Comme on l'a noté plus haut, l'efficacité moyenne du raffinage du pétrole est d'environ 90 % dans les pays de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), mais l'efficacité peut varier considérablement d'une raffinerie à l'autre selon le type de pétrole brut traité et la conception de l'usine : l'efficacité peut tomber jusqu'à 80 à 85 % dans certains pays en développement. L'efficacité du raffinage s'est toutefois nettement améliorée au cours des dernières décennies, au rythme d'environ 1 % par an en Amérique du Nord et d'environ 1,5 % par an dans les pays en développement. Le potentiel d'amélioration est considérable; on l'estime à 20 % d'ici à 2010 et à plus de 30 % d'ici à 2020 [Conseil mondial de l'énergie, 1995 b)]. Cela dit, les frais d'équipement élevés des technologies très efficaces utilisées dans les raffineries complexes représentent un obstacle. D'après le rapport 1995 b) du Conseil mondial de l'énergie, les coûts d'exploitation des raffineries super-perfectionnées se situent aux environs de 70 000 à 90 000 dollars la tonne. Dans une industrie où le temps de retour d'un investissement est approximativement de cinq ans, investir dans l'efficacité peut ne pas toujours se révéler concurrentiel par rapport à d'autres solutions.

20. L'efficacité de la conversion de combustibles fossiles en électricité a connu des progrès spectaculaires. De nos jours, les centrales utilisant des combustibles fossiles produisent de l'électricité par turbines à vapeur ou à gaz, ou une combinaison des deux en cycle combiné, et peuvent obtenir une efficacité nette de près de 40 %, tandis que les meilleures centrales à cycle combiné utilisant du gaz naturel obtiennent une efficacité de plus de 50 %. Les progrès techniques rendant la conversion plus efficace, le passage du charbon au gaz naturel, et le passage des moteurs à vapeur aux turbines et aux systèmes à cycle combiné ont apporté des gains d'efficacité, dont les économies d'échelle sont une autre source. L'efficacité de la conversion a augmenté d'un facteur de 10 en quelque 90 ans, soit un taux d'amélioration d'environ 2,5 % par an.

21. Parmi les mesures technologiques prises actuellement pour rendre la conversion plus efficace, on peut citer l'introduction de centrales à cycle combiné fonctionnant au gaz ou des centrales à charbon à cycles de vapeur supercritiques. Dans le même temps, pour des raisons écologiques, il

faut souvent ajouter des systèmes de nettoyage des gaz de combustion pour éliminer les polluants comme les oxydes de soufre et d'azote, et dans l'avenir peut-être aussi des épurateurs de carbone. Récemment, des conceptions et intégrations novatrices ont permis à la fois d'augmenter l'efficacité et de réduire les émissions (outre celles directement liées au facteur efficacité). Par exemple, les techniques du cycle combiné avec gazéification intégrée (IGCC), de combustion en lit fluidisé (CLF) et les piles à combustible permettent toutes de réduire considérablement la plupart des émissions, ce qui élimine ou réduit la nécessité d'ajouter des dispositifs antipollution.

## **A. Les techniques de conversion des combustibles fossiles moins polluantes**

### **1. Le gaz naturel et les cycles combinés**

22. De nos jours, les centrales à combustibles fossiles les plus économiques et les plus écologiquement rationnelles sont les centrales à cycle combiné utilisant le gaz naturel. Les unités les plus efficaces qui se trouvent actuellement sur le marché ont des taux de conversion de 95 % et des taux d'efficacité nette de 52 %. On s'attend à améliorer ces taux de quelques points de pourcentage dans les quelques prochaines années. La technologie du cycle combiné représente une défense contre l'incertitude des priorités en matière de politique environnementale à venir, de même qu'une stratégie d'investissement rentable présentant peu d'inconvénients. Cela étant, l'économie de la technologie du cycle combiné est affectée par trois facteurs : a) la disponibilité de gaz naturel ou de fioul à faible coût; b) des politiques environnementales exigeant une réduction des émissions; et c) des frais d'équipement relativement bas.

### **2. Les techniques d'utilisation du charbon moins polluantes et plus efficaces**

23. Utiliser du charbon en conjonction avec la technologie du cycle combiné représente un autre moyen d'obtenir un bon taux d'efficacité de la conversion tout en réduisant les émissions. Fondamentalement, la plupart des technologies houillères propres tendent à combiner les turbines à gaz avec du charbon ou des combustibles à base de charbon (Bajura et Webb, 1991). Les technologies houillères propres se répartissent en plusieurs catégories : les procédés de combustion propres, comme les techniques de combustion en lit fluidisé; la gazéification du charbon et la combustion du gaz synthétique dans une turbine à gaz à cycle combiné; les turbines à gaz à combustion directe et indirecte; les turbines à gaz à fioul et à oxygène pur; les générateurs magnéto-hydrodynamiques

(MHD); les piles à combustible carbonifères; et la séparation de l'hydrogène du charbon (procédé hydrocarb). Les techniques CLF et les systèmes intégrés comme les techniques IGCC sont déjà opérationnels,

soit pourront bientôt être mis sur le marché. Les systèmes à combustion directe du charbon en sont au stade de développement de prototype. Il en est de même des piles à combustible, tandis que la mise au point du générateur MHD et du procédé hydrocarb en sont au stade de la mise à l'épreuve du concept.

### Caractéristiques des techniques moins polluantes de production d'électricité à partir de combustibles fossiles

(Coûts estimatifs en dollars des États-Unis de 1990)

<i>Système</i>	<i>Unités<sup>a</sup></i>	<i>Charbon, système classique</i>	<i>Charbon, système CLF</i>	<i>Charbon, système IGCC</i>	<i>Charbon, système DCFT</i>	<i>Charbon, système ICFT</i>	<i>Gaz naturel, cycle combiné</i>
Puissance	MW	400	400	1 250	200	200	400
Frais d'exploitation	\$/kW	1 300	1 750	1 350	2 100	1 430	650
Coût E&M fixe	\$/kW/an	36,4	56	37,8	71,4	30	16,3
Coût E&M variable	\$/kW/an <sub>e</sub>	42,9	26,3	27,2	30,7	25,4	5,9
Efficacité	%	38,8	45	44,3	43,2	51,7	52,6
Utilisation de carburant	BTU/kWh <sub>e</sub>	8 800	7 600	7 700	7 900	6 600	6 490
Coût du carburant	\$/GJ	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,4
Durée de vie	années	35	30	35	30	35	35
Coefficient de charge	%/an	80	80	80	70	75	80
Coût (carburant non compris)	\$/	0,0229	0,0291	0,0218	0,04	0,0196	0,0094
Coût total de la production d'électricité	\$/kWh <sub>e</sub>	0,0468	0,0486	0,0415	0,0608	0,0368	0,0265
Émissions de carbone	kgC/kWh <sub>e</sub>	0,0232	0,2	0,203	0,208	0,174	0,109

Système	Unités <sup>a</sup>	Charbon, système MHD	Charbon, système MCFC	Gaz naturel, système MCFC	Charbon, système SOFC	Gaz naturel, système SOFC
Puissance	MW	150	650	200	165	165
Frais d'exploitation	\$/kW	2 600	1 650	1 150	1 240	860
Coût E&M fixe	\$/kW/an	78	16,5	15	12,4	11,2
Coût E&M variable	\$/kW/an <sub>e</sub>	87,6	92	87,6	78,8	74,5
Efficacité	%	55	50,5	52,9	49,7	54,2
Utilisation de carburant	BTU/kWh <sub>e</sub>	6 200	6 750	6 450	6 860	6 300
Coût du carburant	\$/GJ	2,05	2,05	2,4	2,05	2,4
Durée de vie	années	30	30	30	30	30
Coefficient de charge	%/an	70	75	75	75	75
Coût (carburant non compris)	\$/	0,0535	0,0313	0,025	0,0246	0,0197
Coût total de la production d'électricité	\$/kWh <sub>e</sub>	0,0769	0,0564	0,0153	0,0484	0,0442
Émissions de carbone	kgC/kWh <sub>e</sub>	0,163	0,178	0,108	0,181	0,106

Note :

DCFT : turbines à charbon à combustion directe  
 ICFT : turbines à charbon à combustion indirecte  
 IGCC : cycle combiné avec gazéification intégrée  
 CLF : combustion en lit fluidisé  
 MCFC : pile à combustible à carbonate fondu  
 MHD : magnétohydrodynamique  
 SOFC : pile à combustible à oxyde solide

<sup>a</sup> MW : mégawatt; kw/h : kilowattheure; BTU : unité thermique britannique; GJ : gigajoule; kgC : kilogrammes de carbone; <sub>e</sub> : effectif.

## B. Étude comparative des techniques d'utilisation des combustibles fossiles moins polluantes

24. Le tableau donne un aperçu général des principales caractéristiques des technologies d'exploitation non polluantes des combustibles fossiles susceptibles de rendre la conversion d'énergie plus efficace au cours des décennies à venir et de réduire l'impact sur l'environnement à tous les niveaux, ainsi que des chiffres estimatifs représentatifs des caractéristiques économiques et techniques de ces technologies. Il existe malheureusement fort peu de sources de données réellement comparables dans les ouvrages sur la question.

25. Les caractéristiques des centrales à cycle combiné utilisant le gaz naturel et des centrales à charbon classiques varient bien évidemment d'un endroit à l'autre en raison d'un certain nombre de facteurs, et les chiffres du tableau concernant les coûts et la performance de ces centrales sont indicatifs. La situation est entièrement différente pour les technologies encore en cours de mise au point. On ne connaît pas avec certitude les caractéristiques probables des installations utilisant ces technologies, et les données sur les coûts sont particulièrement spéculatives. On ne les cite ici que pour donner un ordre de grandeur, et ils peuvent manifestement

changer radicalement jusqu'à ce qu'on puisse acheter de telles centrales sur le marché.

26. Le tableau donne les coûts estimatifs d'exploitation, ainsi que les coûts fixes et variables des technologies d'exploitation des combustibles fossiles non polluantes, dont nombre en sont encore au stade de la mise au point, et qui donnent une fourchette de coût de production d'électricité allant d'environ 3 à plus de 6 cents le kilowatt/heure. Les coûts les plus bas sont ceux de l'électricité produite par les centrales à cycle combiné utilisant le gaz naturel. Les coûts de production d'électricité sont indiqués avec et sans le coût des combustibles. Ces derniers sont fondés sur un prix d'acquisition de 50 dollars la tonne de charbon (54 dollars le kilowatt/heure) et 2,5 dollars le million de BTU (75 dollars le kilowatt/heure) de gaz naturel (y compris les frais de transport), ce qui montre encore une fois l'incertitude inhérente associée à ces estimations. En fait, certaines des grandes différences en frais d'exploitation des technologies fossiles non polluantes sont compensées par des différences dans le coût des combustibles (Agence internationale de l'énergie atomique, 1991). Les technologies à frais d'exploitation élevés tendent à avoir des frais de combustible moins élevés. Les faibles frais d'exploitation de la technologie du cycle combiné donnent davantage de souplesse financière aux entreprises de services publics qui doivent trouver des

capitaux en concurrence avec d'autres possibilités d'investissement. Ceci montre également certains des avantages économiques de la technologie du cycle combiné dans les conditions de marché actuelles.

27. L'efficacité thermique des centrales à combustibles fossiles de pointe dépasse 40 %, et passe la ligne des 55 % pour les piles à combustible (ces piles pourraient à l'avenir avoir une efficacité de plus de 60 % (AIEA, 1991), ce qui en fait doublerait l'efficacité moyenne actuelle de la production d'électricité). L'efficacité moyenne actuelle des centrales à charbon dans les pays de l'OCDE est de près de 39 %, ce qui se rapproche de la performance des centrales modernes de traitement classique du charbon. Par contre, l'efficacité moyenne globale des centrales à charbon est d'environ 33 %, soit près de 20 % de moins que la centrale classique de référence. Les centrales modernes ayant une part de plus en plus grande du marché, leur potentiel d'amélioration de l'efficacité moyenne est très élevé.

28. Certaines des conceptions des centrales à charbon super-perfectionnées approchent de la maturité commerciale. Comparées à l'efficacité globale moyenne actuelle des centrales à charbon, ces systèmes de pointe devraient avoir un potentiel d'amélioration de l'efficacité de près de 40 %, réduire spectaculairement les émissions de particules, d'oxydes de soufre et d'azote, et réduire de près de 40 % les émissions de dioxyde de carbone. Obtenir une plus grande efficacité est aussi un moyen très efficace de réduire l'effet sur l'environnement de l'utilisation de l'énergie à tous les niveaux, y compris les émissions de dioxyde de soufre, d'oxyde d'azote et de dioxyde de carbone, sans nécessairement faire monter le coût de l'électricité.

29. Cette étude comparative des technologies perfectionnées de production d'électricité à partir de combustibles fossiles laisse à penser que de nos jours, sur toute une gamme de conditions locales et régionales, les centrales à gaz naturel à cycle combiné sont le choix le plus rationnel. Cette situation se maintiendra pendant un certain temps. La plupart des autres technologies perfectionnées sont censées avoir des frais d'exploitation plus élevés, mais dans certains cas ces frais peuvent décroître en fonction de l'échelle. Toutefois, le gaz naturel est la source d'énergie préférée, surtout avec la technologie du cycle combiné, lorsque l'on dispose de gaz naturel. Sur une grande échelle, soit plus de 500 mégawatts, un système combiné de technologies IGCC et MHD pourrait se révéler une option viable. Qui plus est, de toutes les sources d'énergie fossile, le gaz naturel a les effets les moins marqués sur l'environnement : les émissions de dioxyde de soufre sont minimales, les émissions d'oxyde d'azote peuvent être contrôlées et les émissions de dioxyde de carbone sont les plus faibles de tous les combustibles fossiles. Le plus gros

problème est la fuite de méthane, qui est un puissant gaz à effet de serre. Heureusement, les fuites dans les oléoducs sont réduites au minimum, ne serait-ce que pour des raisons de sécurité, et il est possible de contrôler efficacement les autres sources de méthane. Il est évident que l'existence de sources de gaz naturel est un problème dans maintes parties du monde, soit parce que ce n'est pas une source d'énergie abondante ou mise en valeur dans le pays, soit parce qu'il n'y a pas de possibilité acceptable d'importation, ou que le pays ne dispose pas de l'infrastructure voulue de transport et de distribution.

## V. Structure de l'utilisation finale de l'énergie

30. La structure de l'utilisation finale de l'énergie influe de façon déterminante sur le rendement global de la conversion de l'énergie fossile, depuis la source jusqu'au point d'utilisation. La conversion de l'énergie primaire en énergie finale a pour but l'obtention de meilleurs rendements et d'une plus grande commodité, ainsi que de réduire l'impact de la consommation d'énergie sur l'environnement. En fait, le rendement de l'utilisation finale de l'énergie peut avoir plus d'importance, pour le rendement global du cycle du combustible, que le rendement des diverses opérations ayant lieu en amont. Manifestement, les diverses techniques qui font une utilisation finale de l'énergie, par exemple dans les véhicules à moteur, sont étroitement associées à des combustibles particuliers. Le plus souvent, ces techniques n'offrent que peu de possibilités de substitution entre les différentes sources d'énergie primaire et de combustibles fossiles. La question est donc de savoir quelle combinaison de techniques d'utilisation finale de l'énergie et de cycles associés de combustibles fossiles permettrait d'offrir toute la gamme des services énergétiques qui seront demandés à l'avenir, avec les rendements globaux les plus élevés, de façon économique et avec un faible impact sur l'environnement. En se fondant sur une analyse des rendements, du coût total et des émissions de dioxyde de carbone provenant d'un certain nombre d'utilisations finales et des cycles du combustible fossile associés, il est évident que l'électricité est l'énergie finale de choix pour une combinaison de différents combustibles fossiles et de différentes techniques d'utilisation finale (stationnaires)<sup>8</sup>.

31. Comme c'est la demande de services énergétiques qui détermine le cycle du combustible, il importe de réfléchir au moyen d'améliorer le fonctionnement des différents procédés d'utilisation finale de l'énergie. Ainsi, la gestion de la demande et diverses autres mesures propres à améliorer le rendement et à réduire les coûts de l'utilisation finale de

l'énergie sont au moins aussi importantes que les améliorations qui pourraient être apportées en amont. L'existence de vastes possibilités de gestion de la demande et d'amélioration des rendements de l'utilisation finale de l'énergie amène à se demander pourquoi ces possibilités n'ont pratiquement pas été explorées. Manifestement, certains obstacles, en particulier dans les pays en développement, ont trait à diverses formes d'échec de l'affectation des ressources par le marché, aux politiques de tarification, à diverses pesanteurs institutionnelles, aux choix des consommateurs, à la structure des moyens incitatifs, à l'accès au crédit et diverses contraintes infrastructurelles. Les démarches actuellement suivies ne permettent pas d'aborder comme il convient toutes ces questions.

## VI. Politiques technologiques et socioéconomiques

### A. Progrès technique et apprentissage

32. Il est indispensable de maintenir un rythme rapide d'innovation dans le secteur énergétique si l'on veut satisfaire les conditions assez ambitieuses à réunir pour accroître la quantité et améliorer la qualité des services énergétiques fournis, tout en réduisant notablement les coûts et les répercussions des nombreuses options techniques concevables. Cependant, au cours des 10 dernières années, l'aide publique à la recherche énergétique appliquée a diminué d'un tiers dans les pays de l'OCDE, soit l'équivalent d'un demi-point de pourcentage du PIB (Watson *et al.*, 1996). Heureusement, les travaux de recherche appliquée («recherche-développement-démonstration») portant sur les technologies énergétiques appellent des investissements relativement modestes. Certaines techniques de pointe de conversion des combustibles fossiles ne nécessitent pas un équipement lourd et peuvent se prêter à de petites applications modulaires; cela donne à penser que moyennant des investissements assez réduits, l'apprentissage sera rapide.

33. Les programmes de «recherche-développement-démonstration» sont une condition nécessaire mais non suffisante de la diffusion de nouvelles technologies sur le marché. Il est également nécessaire de mener à bien des projets et des programmes destinés à montrer l'intérêt commercial des technologies nouvelles dans une situation économique et organisationnelle donnée. Ces travaux de recherche appliquée et de démonstration de l'intérêt commercial, puis la diffusion de la technique dans un créneau donné du marché, nécessitent une coordination des initiatives privées et publiques et

supposent un ensemble de mesures à la fois économiques et réglementaires.

### B. Autres mesures et politiques portant sur les énergies fossiles

34. La diffusion de technologies de pointe, propres, efficaces, utilisant les sources d'énergie fossile – au-delà des améliorations des performances technologiques qui accompagnent le remplacement ordinaire du stock de capital une fois celui-ci amorti – n'aura sans doute pas lieu si une politique allant dans ce sens n'est pas activement mise en oeuvre.

35. La rareté du capital, en particulier dans les pays en développement et dans certains pays en transition économique, sera sans doute un obstacle majeur à l'adoption de techniques de pointe dans le secteur énergétique. En outre, la mise en oeuvre des techniques de production de l'énergie se heurtera à la concurrence d'autres besoins de développement pour l'obtention d'un capital nécessairement limité. Cependant, plusieurs options pourraient comporter la production d'énergie à partir de techniques d'origine endogène, et donc impliquer la création locale d'équipements et d'emplois. Même dans les pays industrialisés, le capital utilisé pour financer la production d'énergie risque d'avoir un rendement moins élevé que d'autres possibilités d'investissement. Les mesures qui rendraient plus attrayantes, pour le marché, les techniques de production et de conversion de l'énergie aideraient à résoudre certaines des difficultés de financement en réduisant les risques, l'incertitude et les besoins de capitaux pour l'investissement initial. Des dispositions relatives à l'accélération de l'amortissement, à l'obtention de prêts de lancement et à l'octroi de subventions seraient également utiles.

36. Pour intéresser le secteur privé à l'application de techniques de pointe, il est souvent indispensable d'éliminer divers obstacles institutionnels. La réforme de la réglementation ou la déréglementation (démantèlement des monopoles de production, libéralisation des réseaux de transmission et de distribution) ont permis à des petits producteurs d'énergie indépendants d'avoir accès aux réseaux de distribution d'électricité et ont amélioré leur compétitivité. La normalisation de l'équipement faciliterait le raccordement aux réseaux et donc l'adoption de certaines technologies.

## VII. Améliorations futures des techniques d'utilisation des sources d'énergie fossiles

## A. Possibilité d'améliorer la valorisation des sources d'énergie fossiles

37. De nombreuses études montrent qu'au cours des deux ou trois prochaines décennies, des améliorations des rendements énergétiques, de 10 à 30 % par rapport aux rendements actuels sont possibles à un coût net faible ou nul dans beaucoup de régions du monde, moyennant des améliorations techniques et de meilleures pratiques de gestion (Watson *et al.*, 1996a). Si l'on remplaçait instantanément l'ensemble du système actuel d'équipements énergétiques par les meilleurs équipements disponibles actuellement, on obtiendrait une amélioration globale du rendement de l'ordre de 60 % même sans tenir compte des techniques de pointe qui ne sont pas encore commercialement disponibles. En supposant un rythme séculaire d'amélioration de 1 % par an, la réalisation de ce potentiel prendrait environ 70 ans. Cependant, sur une période de 50 à 100 ans, l'équipement de production d'énergie aura été remplacé au moins deux fois dans sa totalité. Ainsi, il est techniquement possible de réaliser des améliorations substantielles des rendements des équipements énergétiques en suivant le rythme normal des investissements destinés à remplacer les équipements et les infrastructures à mesure que ceux-ci s'usent ou deviennent obsolètes. Moyennant des politiques bien conçues, il serait sans aucun doute possible d'accélérer cette amélioration des rendements et donc d'accélérer la mutation technologique des systèmes énergétiques fondés sur les combustibles fossiles.

## B. Les combustibles fossiles et l'environnement

38. Les possibilités de réduction des émissions de polluants sont à peu près proportionnelles aux possibilités d'améliorer les rendements. Le potentiel de réduction des émissions est plus grand encore quand on envisage une lutte contre les émissions. Avec un même combustible fossile, si les équipements sont améliorés, les gains de rendement se traduisent par un abaissement de la consommation qui, souvent, compense des dépenses en capital un peu plus élevées. Ces améliorations des technologies utilisées peuvent se traduire par d'importants avantages secondaires tels que la réduction des émissions d'autres polluants (par exemple le dioxyde de soufre, les oxydes d'azote et les matières en suspension dans l'air). Par exemple, les émissions ont diminué de 24 % environ entre 1990 et 1994 en Europe occidentale, grâce à la récession économique ou à la mise en oeuvre de politiques de réduction des émissions de soufre, et dans les pays à

économie en transition, grâce à une diminution de la consommation de charbon (Grübler, 1997). Réciproquement, les émissions ont augmenté en Asie de façon très sensible au cours de la même période : de 22 % environ en Chine (Grübler, 1997).

39. Les scénarios d'évolution du volume des émissions du dioxyde de soufre prévoient un quintuplement, dans le pire des cas, mais, dans le cas le plus favorable, une réduction d'un tiers par rapport au niveau actuel. Globalement, durant le prochain siècle, on peut prévoir sur la base de ces scénarios une forte «désulfuration» du secteur énergétique, grâce en partie à une modification de la structure du système énergétique, les charbons riches en soufre perdant donc de leur importance relative, mais grâce aussi à une amélioration d'ensemble des rendements énergétiques. Les projections du volume des émissions de dioxyde de carbone à l'échelle du monde peuvent également être déduites d'un ensemble de scénarios présentés dans la base de données mise au point par Morita et Lee (1997). L'intervalle des scénarios possibles varie d'un décuplement des émissions à leur élimination complète, ce qui placerait le montant total des émissions dans un intervalle allant de 0 à 40 GEC en 2100, soit une médiane de 15 GEC. On s'attend également à une diminution des émissions de soufre et de carbone par unité de produit économique et d'énergie produite.

## VIII. Mesures supplémentaires suggérées

40. Il serait utile d'élaborer des mesures susceptibles d'encourager la recherche-développement-démonstration et qui seraient complétées par diverses mesures de promotion de sources d'énergie efficaces et propres; ces mesures devraient tenir compte des caractéristiques extrêmement dissemblables des divers pays et régions sur le plan institutionnel, social, économique et technique, et sur celui des ressources naturelles. Ces politiques devraient utiliser des instruments proprement économiques tels que les subventions et les taxes sur l'énergie ou sur les émissions, et des instruments réglementaires tels que les normes et codes relatifs aux émissions et à la qualité des combustibles, à quoi il faut ajouter des accords auxquels l'industrie souscrirait volontairement.

### Bibliographie

Adelman, M. A. et M. C. Lynch (1997). Fixed view of resources limits creates undue pessimism. *Oil and Gas Journal* (7 avril), p. 56 à 60.

Bajura, R. A., et H. A. Webb (1991). The marriage of gas turbines and coal. *Mechanical Engineering Journal* (Septembre), p. 58 et 59.

British Petroleum (1997). *BP Statistical Review of World Energy 1997*. Londres.

Conseil mondial de l'énergie (1995a). Local and regional energy related environmental issues. Londres.

Conseil mondial de l'énergie (1995b). Energy efficiency improvement utilizing high technology: an assessment of energy use in industry and buildings. Londres.

Gilli, P.-V., N. Nakićenović et R. Kurz (1995). First and second law efficiencies of the global and regional energy systems. *Proceedings of the World Energy Council, Sixteenth Congress*, Tokyo, (8-13 octobre), p. 229 à 248.

Grübler, A. (1997). Sulfur emissions in IPCC scenarios. Paper presented at a workshop on climate change impacts and integrated assessment (4-15 août), Snowmass (États-Unis d'Amérique).

Hall, D. O. (1991). Biomass energy. *Energy Policy*, vol. 19, No 8, p. 711 à 737.

AIEA (1991). Key issues papers. Senior expert symposium on electricity and the environment, Helsinki (13-17 mai).

Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués et Conseil mondial de l'énergie (1995). Global energy perspectives to 2050 and beyond. Londres.

MacGregor, P. R., C. E. Maslak et H. G. Stoll (1991). *The Market Outlook for Integrated Gasification Combined Cycle Technology*. Schenectady (États-Unis d'Amérique) : General Electric Company.

Makarova, N., N. Nakienovic et A. Johnson (1997). *Review of Global Emissions Scenarios* (à paraître).

Morita, T. et H.-C. Lee (1997). Development of an emissions scenario database for simulations conducted since 1994 and a preliminary analysis using the database. Paper presented at a workshop on climate change impacts and integrated assessment (4-15 août), Snowmass (États-Unis d'Amérique).

Nakićenović, N., éd. (1993). Long-term strategies for mitigating global warming. *The International Journal*, special issue on energy, vol. 18, No 5.

\_\_\_\_\_, A. Grübler, H. Ishitani, T. Johansson, G. Marland, J. R. Moreira et H.-H. Rogner (1996). Energy primer. Dans R. Watson, M. C. Zinyowera et R. H. Moss, éd., *Climate Change 1995, Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analysis*. Cambridge University Press.

Rogner, H.-H. (1997). An assessment of world hydrocarbon resources. *Annual Review of Energy and the Environment*, No 22, p. 217 à 262.

Watson R. (coll.) (1996a). *Climate Change 1995, Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analysis*. Cambridge University Press.

\_\_\_\_\_, (1996b). *Technologies, Policies and Measures for Mitigating Climate Change*.

Intergovernmental Panel on Climate Change Technical Paper, No 1, Genève.

#### Notes

<sup>1</sup> Dans les années 90, la transition économique dans les républiques de l'ex-URSS et dans les pays d'Europe orientale a entraîné une baisse considérable de leur consommation d'énergie.

<sup>2</sup> Le gaz naturel et l'électricité permettent les rendements d'utilisation finale les plus élevés, alors que leur taux de conversion de l'énergie primaire en énergie finale est faible; les rendements d'utilisation finale les plus faibles sont ceux de la biomasse : 17 % au niveau mondial et 12 % seulement dans les pays en transition et les pays en développement.

<sup>3</sup> Les intensités énergétiques sont différentes si les estimations du PIB sont basées sur les taux de change du marché plutôt que sur la parité du pouvoir d'achat. Les intensités énergétiques des pays en développement sont nettement plus faibles lorsque les activités économiques sont mesurées par la parité du pouvoir d'achat, ce qui en accroît la valeur, les prix y étant relativement plus bas, de sorte que les intensités énergétiques ainsi mesurées sont moins élevées.

<sup>4</sup> En chiffres absolus, on estime que les besoins en énergie primaire devraient se situer en 2100 entre un plancher de 7 gtep (soit une baisse par rapport au niveau de 1990 qui était de 9 gtep) et un plafond atteignant presque 80 gtep. Selon la plupart des scénarios, les niveaux de consommation se situeraient entre 14 et 32 gtep, soit environ 1,5 à 3,5 fois les niveaux de 1990.

<sup>5</sup> Les cycles des combustibles fossiles constituent la principale source de pollution atmosphérique en général. Les causes des effets nocifs de l'énergie sur la santé et l'environnement peuvent se répartir en deux principales catégories (Conseil mondial de l'énergie, 1995a; Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués et Conseil mondial de l'énergie, 1995). La première, qu'on

pourrait dénommer «pollution due à la pauvreté», comprend plusieurs types de risques pour la santé tels que les hauts niveaux de pollution intérieure, la déforestation et la forte concentration atmosphérique de particules dans les zones urbaines. La deuxième, qu'on pourrait dénommer «pollution moderne», provient de la densité de la circulation automobile et de la production d'électricité à partir de charbon à faible teneur énergétique, et a pour conséquence une pollution atmosphérique très concentrée en zone urbaine.

<sup>6</sup> Premièrement, il importe d'améliorer le rendement de conversion des dispositifs d'utilisation finale afin d'économiser les rares sources d'énergie traditionnelles (bois de chauffage) tout en réduisant la pollution atmosphérique. Deuxièmement, ce qui est tout aussi important, il faut passer des modes et des formes traditionnelles d'utilisation de l'énergie à des technologies de conversion modernes plus efficaces et à des ressources énergétiques plus propres. Troisièmement, et à plus long terme, il faudra passer à un approvisionnement énergétique par combustibles propres, distribués en réseaux.

<sup>7</sup> Les réserves mondiales de sources d'énergie fossiles actuellement identifiées sont estimées à plus de 1 000 Gtep. Théoriquement, cette quantité devrait pouvoir durer au moins 130 ans au niveau actuel de consommation mondiale d'énergie (9 Gtep en 1990), soit cinq fois la consommation mondiale totale d'énergie depuis 1860 (Nakićenović et autres auteurs, 1996). Le charbon représente plus de la moitié de toutes les réserves de combustibles fossiles. Les estimations actuelles de ressources et les éventuels gisements additionnels sont bien supérieurs aux réserves, mais plus incertains. La base mondiale de ressources est de près de 4 000 Gtep, avec la présence de gisements additionnels de plus de 20 000 Gtep, la plupart sous forme d'hydrates de gaz. Ainsi, l'énergie fossile existe en abondance dans le monde et les gisements connus permettront de s'approvisionner pendant plus d'un siècle, et avec les progrès scientifiques et techniques on pourra continuer l'extraction de carburants fossiles aux fins de l'approvisionnement énergétique pendant encore plusieurs siècles.

<sup>8</sup> On trouvera dans la version complète du rapport des exemples de rendement, de coût total et de volume d'émission de dioxyde de carbone pour un certain nombre de procédés d'utilisation finale de l'énergie qui sont représentatifs et les différents cycles de combustible fossile qui leur correspondent. Le chauffage des locaux et de l'eau, la production mixte d'énergie thermique, les moteurs électriques, la chaîne du froid, l'éclairage, les automobiles, les avions de ligne et les chemins de fer sont pris en exemple.