



## 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

23 mars-3 avril 1998

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

Énergie et développement durable

### Sources d'énergie renouvelables, en particulier l'énergie éolienne

#### Rapport du Secrétaire général\*\*

#### Table des matières

	<i>Paragraphes</i>	<i>Page</i>
I. Introduction .....	1	3
II. Potentiel en matière d'énergie éolienne .....	2-9	3
III. Technologie : situation et tendances .....	10-19	5
IV. Économie de l'énergie éolienne .....	20-32	6
V. Considérations environnementales et sociales .....	33-37	9
VI. Systèmes d'incitation visant à promouvoir l'exploitation de l'énergie éolienne ...	38-46	11
VII. Recommandations .....	47-55	12

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

\*\* Des renseignements plus détaillés sont disponibles à la Division du développement durable, Département des affaires sociales.

*Tableaux*

1.	Puissance installée des éoliennes connectées au réseau à l'échelle mondiale (en MW) . . . . .	3
2.	Puissance installée des turbines éoliennes et production d'électricité d'origine éolienne suivant les scénarios du Conseil mondial de l'énergie . . . . .	4
3.	Valeur des effets externes de l'exploitation d'électricité de provenance éolienne sur l'environnement . . . . .	10

*Figures*

I.	Dépenses d'investissement pour les turbines éoliennes (départ usine) et autres dépenses . . . . .	7
II.	Coût total par unité d'électricité produite, calculée sur une hauteur de l'axe de l'hélice de 50 mètres par rapport au sol . . . . .	7
III.	Économies réalisées pour l'énergie classique excluant la marge excédentaire, par rapport aux coûts de production de l'énergie provenant de source éolienne . . . . .	9
IV.	Estimation des effets externes sur l'environnement, par source d'énergie . . . . .	10

## I. Introduction

1. Le présent rapport récapitule les progrès accomplis jusqu'ici dans le domaine de l'énergie éolienne, traite des divers aspects (ressources, technologie, économie, environnement, sociologie) de cette forme d'énergie dans le monde d'aujourd'hui et fait le point des moyens d'action qui pourraient en favoriser l'adoption. Une version plus longue du rapport contient des monographies succinctes des cinq pays qui fournissent 85 % de la puissance installée délivrée par les éoliennes dans le monde en 1996. Le présent rapport offre également des recommandations concernant les principales possibilités d'action<sup>1</sup>.

## II. Potentiel en matière d'énergie éolienne

2. *Potentiel à l'échelle mondiale.* L'Agence internationale de l'énergie (AIE) a estimé la demande mondiale d'électricité à 12 500 TWh en 1993 et 20 907 TWh d'ici 2010, demande que les sources d'énergie éolienne dans le monde suffiraient largement à satisfaire, comme en témoignent les quelques études détaillées effectuées dans ce domaine. Toutefois, la capacité de production d'énergie éolienne est inégalement répartie, variant d'une zone et d'une région géographique à l'autre. Il n'en demeure pas moins que le potentiel à l'échelle mondiale est considérable si l'on tient compte des possibilités offertes par les sites en mer, les zones isolées et peu peuplées et les régions accidentées et l'exploitation conjointe des terres.

3. *Puissance installée à l'échelle mondiale.* Depuis 1980, des turbines éoliennes modernes raccordées au réseau de distribution ont été installées dans plus de 50 pays. Comme le fait apparaître le tableau 1, la plupart des premières implantations ont été effectuées dans des pays industrialisés. Ces dernières années, l'activité dans ce secteur s'est nettement intensifiée dans des pays en développement tels que l'Inde et la Chine. L'Égypte et le Cap-Vert, qui n'apparaissent pas sur le tableau 1, sont d'autres pays où l'énergie éolienne a récemment connu un essor notable.

Tableau 1  
Puissance installée des éoliennes connectées au réseau à l'échelle mondiale (en MW)

	1991	1992	1993	1994	1995	1996
<b>Europe</b>						
Danemark	418	470	490	540	630	785
Allemagne	110	183	280	643	1 137	1 576
Grèce	5	26	26	27	28	28
Italie	5	6	10	22	23	70
Pays-Bas	82	105	132	153	255	305
Espagne	15	45	58	72	126	216
Suède	8	12	24	40	67	105
Royaume-Uni	10	30	120	147	193	264
Autres pays d'Europe	9	9	18	32	35	35
<b>Amérique du Nord</b>						
Canada	3	4	11	23	21	23
États-Unis d'Amérique	1 575	1 584	1 590	1 725	1 770	1 794
Autres pays d'Amérique du Nord	–	–	–	2	12	22
<b>Asie</b>						
Chine	–	–	13	25	36	57
Inde	39	51	80	120	550	820
Japon	2	4	5	5	10	14
<b>Divers</b>	6	10	19	18	26	62
<b>Total à la fin de l'année</b>	<b>2 287</b>	<b>2 539</b>	<b>2 876</b>	<b>3 594</b>	<b>4 905</b>	<b>6 172</b>
<b>Croissance annuelle</b>	<b>285</b>	<b>252</b>	<b>337</b>	<b>718</b>	<b>1 311</b>	<b>1 267</b>

Source : Étude des progrès accomplis dans l'exploitation de l'énergie éolienne par les pays membres de l'AIE, AIE/OCDE, Paris, juillet 1997.

### Scénarios d'exploitation de l'énergie éolienne

4. Dans «Nouvelles sources d'énergie renouvelables – un guide pour l'avenir» (1994), le Conseil mondial de l'énergie a établi deux scénarios mondiaux relatifs à l'utilisation de l'énergie éolienne jusqu'en 2020 : i) le scénario «Politiques en vigueur», qui part du principe que les grandes tendances économiques et technologiques actuelles se poursuivront; et ii) le scénario «écologique», fondé sur les hypothèses suivantes : accroissement du rendement des turbines éoliennes, adoption d'un impôt élevé sur les émissions carboniques émanant de combustibles fossiles, baisse du coût de l'exploitation de l'énergie éolienne. Les résultats des deux scénarios figurent au tableau 2.

Tableau 2  
Puissance installée des turbines éoliennes et production d'électricité d'origine éolienne suivant les scénarios du Conseil mondial de l'énergie

Scénario	Puissance prévue à l'échelle mondiale en 2005	Puissance et production d'électricité d'origine éolienne prévues à l'échelle mondial en 2020	Part de la demande mondiale d'électricité en 2020 en kWh	
	GW	GW		TWh
«Politiques en vigueur»	62	180	376	1,5
«Écologique»	83	474	967	4,8

Source : «Nouvelles sources d'énergie renouvelables – un guide pour l'avenir», Conseil mondial de l'énergie, 1994.

5. Les chiffres de deux scénarios sont très différents. Dans le scénario «écologique», la production d'électricité d'origine éolienne prévue pour 2020 est presque deux fois et demi supérieure à celle du scénario «Politiques en vigueur». L'une des raisons pour lesquelles l'énergie éolienne permet de répondre à une part relativement plus importante de la demande mondiale d'énergie dans le scénario «écologique» est le fait que celui-ci prévoit une baisse de la consommation d'électricité à l'échelle mondiale. Le développement de l'utilisation de l'énergie éolienne devrait intervenir lorsque le coût marginal à long terme de l'exploitation des sources d'énergie classiques dépassera celui du recours à l'énergie éolienne. Cela dit, il est admis que cette forme d'énergie n'est pas utilisée à grande échelle principalement en raison de son coût et de la limitation des capacités actuelles de fabrication de turbines éoliennes.

6. La société BTM Consult a récemment évalué l'augmentation à court terme et à moyen terme de la puissance des éoliennes couplées au réseau à l'échelle mondiale à l'échelle mondiale. Elle prévoit que cette puissance, qui était de 6,1 GW en 1996, passera à 17,5 GW en 2001 (un taux d'accroissement annuel de près de 25 %), puis à 33,5 GW en 2005, ce qui correspond aux prévisions que le Conseil mondial de l'énergie a établies pour 2010 dans le scénario «Politiques en vigueur». À court terme, on ne prévoit pas de limitations en ce qui concerne la capacité de fabrication de turbines éoliennes, mais une concurrence acharnée entre les fabricants. D'après l'étude effectuée par BTM Consult, la puissance globale des éoliennes en service dans le monde pourrait atteindre environ 375 GW en 2020 (chiffre intermédiaire par rapport aux estimations des deux scénarios établis par le Conseil mondial de l'énergie).

7. Les études susmentionnées portent essentiellement sur les turbines installées à terre. Mais les turbines en mer sont de plus en plus nombreuses (une aux Pays-Bas et deux au Danemark). Dans «Énergie 21», le dernier en date de ses plans relatifs au secteur énergétique, le Danemark prévoit que les turbines en mer délivreront une puissance installée de plus de 4 000 MW sur le plan national avant 2030.

8. Les systèmes centralisés raccordés au réseau et les systèmes décentralisés hors réseau pour les communautés isolées représentent des marchés distincts. Aujourd'hui, le plus vaste marché est celui des applications centralisées classiques connectées au réseau. Les systèmes décentralisés hors réseau ne sont pas aussi répandus car les collectivités qu'ils doivent desservir sont souvent isolées, pauvres et établies dans des pays en développement et, par conséquent, représentent des marchés peu intéressants d'un point de vue commercial. Les petits systèmes décentralisés utilisant l'énergie éolienne pourraient se révéler plus rentables que les extensions du réseau de distribution centralisé.

### Évaluation des sources d'énergie éolienne et choix des sites

9. L'évaluation des sources d'énergie éolienne consiste généralement à calculer la vitesse moyenne du vent sur un site spécifique ou dans une zone donnée sur une période de 10 à 20 ans. Le calcul précis de la moyenne quotidienne, mensuelle et annuelle de la vitesse du vent est d'une importance capitale pour le choix des sites sur lesquels seront implantés les projets d'exploitation de l'énergie éolienne. Il est une règle empirique selon laquelle la puissance délivrée des turbines éoliennes est proportionnelle au cube de la vitesse du vent, ce qui signifie que le coût de l'énergie éolienne baisse considérablement avec l'augmentation de la vitesse du vent. Les méthodes appliquées actuellement permettent d'évaluer de manière précise les sources d'énergie éolienne, mais cela n'est pas le cas sur tous les sites. C'est pourquoi les usagers doivent être informés du bon usage des modèles et de leurs limites; des recherches plus approfondies sont parfois nécessaires. Il faudrait également effectuer des études portant sur des sites particuliers pour valider les résultats obtenus à partir de modèles.

## III. Technologie : situation et tendances

### A. Turbines éoliennes modernes

10. Les turbines éoliennes modernes peuvent être réparties en trois grandes catégories : les grandes turbines raccordées au réseau, les turbines de puissance moyenne utilisées dans des systèmes hybrides et les petites turbines autonomes. Les grandes turbines éoliennes couplées au réseau (150 à 2 000 kW) sont de loin celles qui ont la plus grande valeur marchande, et les technologies sur lesquelles elles s'appuient ont fait leurs preuves. Au début des années 80, la puissance des turbines raccordées au réseau qui étaient disponibles sur le marché était de 50 kW; elle se situe aujourd'hui entre 500 et

800 kW. Les nouvelles machines de 1 000 à 1 500 kW qui seront fabriquées industriellement sont utilisées comme prototypes depuis 1995 et ont été mises sur le marché en 1997. Aujourd'hui, les turbines connectées au réseau sont souvent installées dans des fermes éoliennes autonomes produisant entre 10 et 100 MW.

11. Les turbines éoliennes de puissance moyenne (25-150 kW) peuvent être utilisées dans des systèmes hybrides, associées à d'autres sources d'énergie (photovoltaïque, hydroélectricité, diesel ou accumulation). Ces systèmes sont particulièrement bien adaptés aux petits réseaux éloignés où l'usage des combustibles fossiles est limité par divers facteurs (transport, environnement, coût, etc.), ainsi qu'à des utilisations spécifiques telles que le pompage de l'eau, le rechargement d'accumulateurs et le dessalement.

12. Les petites turbines éoliennes «autonomes» (moins de 25 kW) sont utilisées pour pomper l'eau, recharger des accumulateurs et chauffer des locaux. Parmi les petites éoliennes employées pour recharger des accumulateurs, celles dont la puissance est comprise entre 25 et 150 watts (largeur des rotors : 0,5 à 1,5 m) sont de loin les plus vendues. Quelque 200 000 unités sont probablement en service actuellement dans des stations de télécommunication éloignées. Les principaux fabricants de petits rechargeurs d'accumulateurs se trouvent au Royaume-Uni (pour les loisirs en mer et le caravanage) et en Chine (pour les éleveurs de bétail semi-nomades vivant dans la région mongole).

13. Toutefois, de tous les systèmes d'exploitation du vent qui sont utilisés aujourd'hui, les pompes mécaniques demeurent les plus répandues. Entre 1 et 2 millions d'unités sont en service à l'échelle mondiale, et plus de 50 fabricants les produisent. Ces pompes servent principalement à approvisionner les zones rurales en eau potable, et on en installe actuellement entre 5 000 et 10 000 par an.

## B. Évolution technologique récente

14. Il existe deux grandes catégories de turbines éoliennes qui doivent leur nom à la direction de leur axe de rotation : les turbines à axe horizontal et les turbines à axe vertical. Ces dernières ont donné des résultats décevants et elles ne représentent aujourd'hui qu'un très faible pourcentage des éoliennes en service. Le présent rapport ne porte donc que sur les turbines éoliennes à axe horizontal.

15. La puissance moyenne des turbines a considérablement augmenté au cours des 15 dernières années, et seuls quelques obstacles techniques empêchent cette tendance de se poursuivre, notamment le transport des grandes grues et leur

disponibilité à proximité des sites. Le fait que les tours sont plus hautes, les rotors plus larges et la forme plus aérodynamique entraîne une amélioration rapide du rendement énergétique, d'où un accroissement de la production annuelle d'énergie par mètre carré de terrain occupé, aspect important dans les régions où la superficie des terres disponibles est limitée.

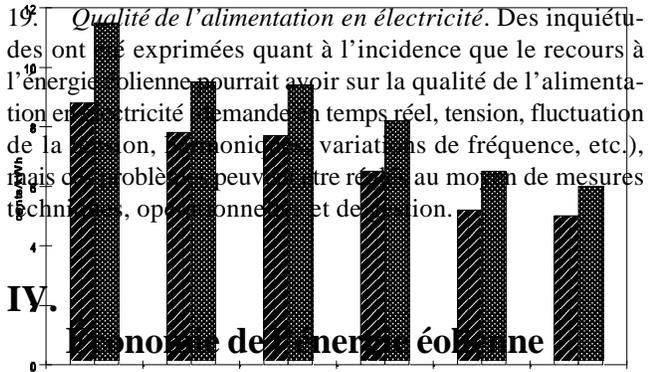
16. Le principal objectif de la recherche-développement relative aux turbines éoliennes est la réduction des coûts. Le coût des éoliennes et, partant, de la production d'électricité baisse régulièrement depuis le début des années 80. L'efficacité relative des turbines éoliennes (baisse des coûts correspondant à un doublement de la production d'électricité cumulée) est de l'ordre de 15 %. Cette tendance se poursuivra vraisemblablement, mais peut-être à un rythme moins soutenu. Le niveau sonore a également été réduit grâce à une meilleure conception des pales, à l'amélioration de la qualité des parties mécaniques et à l'utilisation de matériaux amortissant le bruit.

## C. Incidences des turbines éoliennes sur le réseau de distribution d'électricité

17. *Marge excédentaire.* La marge excédentaire de l'énergie éolienne peut être calculée au moyen de la «probabilité de perte de charge», une mesure de l'énergie disponible qui est couramment utilisée par les compagnies d'électricité pour planifier le renforcement de leur capacité de production. Lorsque les niveaux d'utilisation de l'énergie éolienne sont faibles (jusqu'à 10 % de la production totale exprimée en kilowattheure), la marge excédentaire d'un grand nombre de turbines éoliennes très dispersées appartenant à un vaste réseau est du même ordre que le coefficient d'utilisation de la capacité des turbines, qui varie généralement entre 20 et 40 %. Même lorsque les niveaux d'utilisation sont plus élevés, la marge excédentaire de l'énergie éolienne peut être considérable. Au Cap-Vert, elle représente 75 % du coefficient d'utilisation de la capacité des turbines quand le niveau d'utilisation de l'énergie éolienne est compris entre 25 et 50 %.

18. *Prévisions à court terme.* À partir de modèles de prévision météorologique de base et de données relatives à la vitesse du vent dans une région ou sur un site donné, on peut calculer avec précision la production d'électricité des éoliennes situées dans une zone gérée par une compagnie d'électricité. À l'aide de modèles de ce type et d'un programme informatique, la compagnie d'électricité peut prévoir la production de turbines au cours des 36 heures à venir et réduire ainsi au minimum les difficultés liées au transport

d'électricité. Ces outils peuvent également aider à déterminer les possibilités de gestion de la charge de pointe dans un réseau de distribution en prévoyant l'énergie éolienne qui sera disponible pendant les périodes de charge maximale.



20. La section ci-après porte uniquement sur l'économie des turbines éoliennes connectées au réseau, car elles représentent la majeure partie de la valeur marchande des turbines installées. Les principaux paramètres régissant l'économie de l'énergie éolienne sont les suivants : i) dépenses d'investissement, y compris les coûts annexes pour la fondation, le raccordement au réseau, etc.; ii) coûts d'exploitation et d'entretien; iii) production d'électricité/ vitesse moyenne du vent; iv) durée de vie de la turbine; et v) taux d'actualisation. Les paramètres les plus importants sont la production d'électricité et les dépenses d'investissement. Comme la production d'électricité dépend pour une très large part du régime des vents, le choix d'un site d'implantation approprié joue un rôle déterminant dans la performance économique.

#### A. Dépenses d'équipement et tendances en matière de rendement

21. Deux tendances ont généralement dominé le développement des turbines éoliennes connectées au réseau : i) la capacité moyenne des turbines vendues sur le marché a considérablement augmenté; et ii) le rendement s'est constamment accru. La puissance moyenne des turbines vendues sur le marché d'exportation danois est passée d'environ 50 kilowatts en 1985 à plus de 500 kilowatts en 1996. À l'heure actuelle, les turbines qui se vendent le mieux ont une puissance nominale de 600 kilowatts; mais certaines sont maintenant vendues avec une puissance pouvant atteindre 1 500 kilowatts. En outre, le rendement, mesuré en tant que production d'énergie annuelle par aire balayée par le rotor (kWh/m<sup>2</sup>) a augmenté de plus de 5 % par an au cours des 15 dernières années.

22. Les dépenses d'équipement pour les projets d'exploitation de l'énergie éolienne sont dominées par le coût de la

turbine elle-même (départ-usine). Ainsi, pour une turbine type de 600 kilowatts au Danemark, la part de la turbine dans le coût total est d'environ 80 %, tandis que la connexion au réseau représente environ 9 % et la fondation environ 4 %. Les autres éléments, comme les systèmes de commande et le terrain, ne représentent qu'une part très faible du montant total des dépenses.

23. Comme indiqué à la figure I, il y a eu une diminution sensible des coûts par kW, des dépenses relatives à la turbine (4 % par an) et des coûts annexes. Ainsi, le montant des dépenses d'investissement par kW a baissé de plus de 5 % par an entre 1989 et 1996. La combinaison de l'amélioration du rendement et de la baisse des dépenses d'investissement par unité de puissance signifie que le rapport investissement/production annuelle s'est amélioré de plus de 45 % depuis 1989, soit plus de 8 % par an en termes réels, comme indiqué également à la figure I (ordonnée de droite).

24. Comme l'a indiqué l'AIE, le montant des dépenses d'investissement relatives aux projets d'exploitation de l'énergie éolienne fait apparaître des variations importantes entre les pays, résultant de facteurs comme les structures du marché, les caractéristiques des sites et les réglementations en matière de planification : les dépenses d'investissement pour ce type de projet varient entre environ 900 dollars/kW et 1 600 dollars/kW suivant les pays.

Figure I  
Dépenses d'investissement pour les turbines éoliennes (départ usine) et autres dépenses

(dollars/kW, dollars constants, de 1996)

Source : Privateje Vinjømøllers Økonomi (L'économie des turbines éoliennes privées) (Agence danoise de l'énergie, 1994), et P. Nielsen (Données sur l'énergie et l'environnement, 1997 et l'environnement, 1997).

## B. Coûts d'exploitation et d'entretien

25. Les coûts d'exploitation et d'entretien représentent une part importante du montant total des dépenses annuelles en ce qui concerne la turbine. Il n'existe qu'un nombre limité de turbines en service depuis 20 ans (durée de vie prévue). Pour cette raison, les prévisions de dépenses dans ce domaine sont très incertaines, en particulier pour les dernières années. Les coûts d'exploitation et d'entretien sont principalement influencés par l'âge de la turbine, étant peu élevés au début de sa durée de vie et augmentant avec les années. Pour une turbine d'une puissance de 150 kW, on estime que ces dépenses représentent environ 1,2 % des dépenses annuelles d'investissement au cours des deux premières années, passant à 7 % par an pour les 16e à 20e années. Pour une turbine de 600 kW, les dépenses correspondantes se chiffrent à environ 1 % par an pour les deux premières années et passent à 4,5 % par an pour les 16e à 20e années.

## C. Rapport coût-efficacité

26. Le coût total par kWh produit (coût unitaire) est calculé en normalisant les dépenses d'investissement et les frais d'exploitation et d'entretien sur toute la durée de vie de la turbine, et en divisant le chiffre obtenu par la production annuelle d'électricité. Le coût unitaire de production est ainsi calculé en tant que coût moyen. En réalité, les coûts réels sont inférieurs à la moyenne calculée au début de la durée de vie de la turbine (en raison du faible niveau des coûts d'exploitation et d'entretien) et augmentent au cours de la période d'utilisation. La figure II indique le coût unitaire calculé pour des turbines de différentes puissances, sur la base des dépenses d'investissement et des frais d'exploitation et d'entretien susmentionnés, d'une durée de vie de 20 ans et d'un taux d'actualisation de 5 % par an (en termes réels). La production d'électricité par les turbines est estimée pour les classes de rugosité 1 et 2 correspondant à une vitesse moyenne du vent d'environ 6,9 m/s et 6,3 m/s respectivement, à une altitude de 50 mètres au-dessus du niveau du sol. La figure II illustre la tendance vers une utilisation de turbines de plus forte puissance et une amélioration du rapport coût-efficacité. Pour un site de classe 1 (6,9 m/s) par exemple, le coût moyen, en dollars de 1996, a diminué, passant d'environ 8,8 cents/kWh pour une turbine de 95 kW à environ 5 cents/kWh pour une nouvelle machine de 600 kW, soit une amélioration de près de 45 % sur une période de neuf à 10 ans.

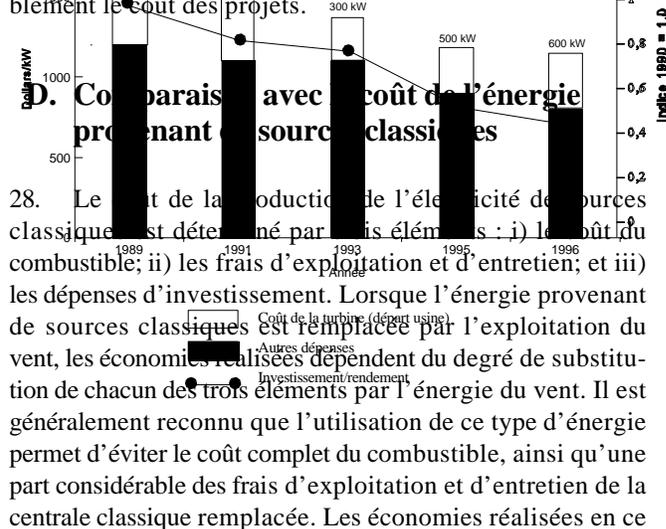
Figure II

## Coût total par unité d'électricité produite, calculé sur une hauteur de l'axe de l'hélice de 50 mètres par rapport au sol

(cents des États-Unis/kWh, en prix constants de 1996)

Source : R. Redlinger et al., Risø National Laboratory (Danemark).

27. Le taux d'actualisation a une influence importante sur les coûts de production et, partant, sur la viabilité financière des projets éoliens. Pour une turbine de 600 kW, le passage de ce taux de 5 à 10 % par an (en termes réels) augmente le coût de production d'un peu plus de 30 %, lequel passe de 5 cents/kWh à 6,7 cents/kWh. Dans les projets d'exploitation de l'énergie éolienne aux États-Unis d'Amérique, par exemple, les taux d'actualisation nominaux pour les projets financés par la conversion de créances en participations (50/50) dépassaient 12 % par an, augmentant ainsi considérablement le coût des projets.



28. Le coût de la production de l'électricité de sources classiques est déterminé par trois éléments : i) le coût du combustible; ii) les frais d'exploitation et d'entretien; et iii) les dépenses d'investissement. Lorsque l'énergie provenant de sources classiques est remplacée par l'exploitation du vent, les économies réalisées dépendent du degré de substitution de chacun des trois éléments par l'énergie du vent. Il est généralement reconnu que l'utilisation de ce type d'énergie permet d'éviter le coût complet du combustible, ainsi qu'une part considérable des frais d'exploitation et d'entretien de la centrale classique remplacée. Les économies réalisées en ce

qui concerne les dépenses d'investissement dépendent de la mesure dans laquelle la capacité de production d'énergie éolienne peut remplacer les investissements dans les nouvelles centrales classiques et sont ainsi directement liées à la marge excédentaire des centrales éoliennes. Cette marge dépend de divers facteurs, parmi lesquels le niveau de pénétration de l'énergie éolienne et la manière dont cette énergie est utilisée dans le système énergétique global. En général, pour les niveaux marginaux de pénétration, la marge excédentaire pour les turbines éoliennes est proche du coefficient d'utilisation annuel moyen. Ainsi, 25 % sont considérés comme une marge raisonnable pour l'énergie éolienne, lorsque la part de l'électricité de source éolienne est inférieure à 25 % de la production totale. Cette marge diminue à mesure que la part de l'énergie éolienne dans le système classique s'accroît, mais même à ces niveaux de pénétration élevés, on peut encore obtenir une marge excédentaire notable, comme il est indiqué à la section III.

29. Les économies qui peuvent être réalisées grâce à l'utilisation d'électricité de source éolienne sont indiquées à la figure III, en partant de l'hypothèse que l'on fait l'économie de toutes les dépenses de combustible et de tous les coûts d'exploitation et d'entretien et que la marge excédentaire assignée à l'énergie éolienne fait l'objet d'une estimation très prudente (0 %). Par exemple, en Allemagne, pour chaque kWh d'électricité produite par l'énergie éolienne, qui remplace un kWh d'énergie provenant du charbon, on économise environ 7 cents/kWh (coût du charbon et coûts d'exploitation et d'entretien), même s'il n'est pas tenu compte de la marge excédentaire de la centrale éolienne pour le remplacement des dépenses d'investissement liées à une centrale au charbon. Les coûts estimatifs pour une turbine de 600 kWh, installée à terre sur des sites moyens au Danemark et au Royaume-Uni, sont également indiqués (5 cents et 4,5 cents/kWh respectivement). Si une turbine éolienne peut être installée en Allemagne pour un coût moyen de 5 cents/kWh et ainsi remplacer l'électricité provenant du charbon, d'un coût de 7 cents/kWh, on peut donc économiser un montant net de 2 cents/kWh sur chaque kWh d'électricité produite par le vent.

30. Une turbine d'une puissance de 600 kW est donc généralement compétitive, en termes de coûts directs dans un certain nombre de pays, par rapport notamment aux technologies liées au charbon et au gaz. Ces comparaisons sont prudentes, ne prenant en compte aucune marge excédentaire pour l'énergie éolienne, ce qui affecte la compétitivité de ce type d'énergie. L'hypothèse d'une marge excédentaire plus réaliste, de 25 % par exemple, augmenterait les économies réalisées, améliorant de ce fait la compétitivité de l'énergie éolienne, notamment par rapport à l'énergie nucléaire, dont

les coûts sont dominés par les dépenses d'équipement. De plus, les avantages de l'énergie éolienne pour l'environnement, par exemple en ce qui concerne l'acidification et le réchauffement de la planète, ne sont pas pris en compte.

31. La figure III serait très différente si on utilisait une marge excédentaire plus élevée pour l'énergie éolienne. Par exemple pour les États-Unis d'Amérique, elle fait apparaître des économies d'un montant de 2,41, 3,04 et 4,62 cents/kWh pour l'énergie nucléaire, le charbon et le gaz respectivement, avec une marge excédentaire de zéro pour l'énergie éolienne. Si cette marge était portée à 25 %, les économies réalisées passeraient à 3,00, 2,52 et 4,76 cents/kWh; si elle était portée à 50 %, elles passeraient à 3,59, 4,00 et 4,89 cents/kWh. Cela souligne l'importance de la fiabilité et de l'exploitabilité de la capacité mais cette importance peut varier à l'avenir si les marchés libres et les options financières élaborent des systèmes d'électricité compétitifs pour mieux contrôler la variabilité énergétique.

Figure 3

### Économies réalisées pour l'énergie classique excluant la marge excédentaire, par rapport aux coûts de production de l'énergie provenant de source éolienne

(en cents/kWh de 1996)

Source : Données extraites de «Prévisions des coûts de production de l'électricité» (Paris, AIE/OCDE, 1993).

## E. Économie du pompage d'irrigation à petite échelle

32. Les utilisations à grande échelle de l'énergie électrique, qui ont vu les progrès les plus notables réalisés dans le domaine de l'énergie éolienne au cours des dernières années, sont examinées dans le présent rapport. Néanmoins, le type le plus courant d'utilisation de l'énergie du vent, en ce qui

concerne le nombre d'unités installées, demeure la pompe mécanique à petite échelle pour le pompage d'eau d'irrigation. Ce type de pompe est couramment utilisé, aussi bien dans les pays développés que dans les pays en développement, et peut présenter un intérêt particulier lorsque l'accès au réseau de distribution d'électricité est difficile. Dans une étude qui compare les pompes actionnées par l'énergie éolienne aux pompes à kérosène, à diesel aux systèmes de conversion photovoltaïque de l'énergie solaire ou aux systèmes de pompage Rankine dans les différents pays, les pompes éoliennes se sont révélées être beaucoup plus rentables que les systèmes collecteurs d'énergie solaire et, le plus souvent, elles étaient également moins coûteuses que les pompes à kérosène et à diesel. Le rapport coût-efficacité est fortement influencé par les subventions qui sont souvent accordées pour le kérosène et le diesel; du fait du montant élevé des dépenses d'investissement pour les systèmes éoliens, par rapport aux dispositifs à kérosène ou à diesel, le bilan financier est également affecté par les taux d'intérêt en vigueur.

## V. Considérations environnementales et sociales

### A. Incidences sur l'environnement

33. L'étude effectuée par la Commission européenne en 1995, intitulée «Externalities of Energy» (ExternE) représente l'un des efforts les plus exhaustifs entrepris jusqu'à présent pour quantifier la valeur monétaire des contraintes exercées sur l'environnement par une vaste gamme d'activités liées à l'exploitation des sources d'énergie : charbon, nucléaire, pétrole, gaz, hydroélectricité et énergie éolienne. L'étude caractérise le cycle d'exploitation de l'énergie éolienne comme comprenant les impacts suivants sur l'environnement : nuisance acoustique, conséquences visuelles, réchauffement de la planète, acidification, accidents parmi la population, accidents du travail, occupation des sols, mortalité des oiseaux et perturbations radioélectriques. La construction et l'installation de turbines éoliennes impliquent une utilisation de l'énergie qui influe sur les émissions dans l'atmosphère, bien que cela dépende de la nature des ressources énergétiques utilisées lors de la construction. Examinant deux fermes éoliennes au Royaume-Uni, l'étude a quantifié les nuisances causées par l'énergie du vent, telles qu'indiquées au tableau 3.

Tableau 3

### Valeur des effets externes de l'exploitation d'électricité de provenance éolienne sur l'environnement

Catégorie		Coûts externes (mECU/kWh) <sup>a</sup>
Nuisance acoustique		0,07 - 1,1
Conséquences visuelles	Non qua	ntifiés
Réchauffement de la planète		0,15
Acidification		0,7
Accidents parmi la population		0,09
Accidents du travail		0,26

Source : ExternE, «Externalities of Energy», (Commission européenne, 1995).

<sup>a</sup> En millièmes d'unité monétaire européenne, par kilowattheure.

34. Les valeurs indiquées pour le bruit font apparaître des variations importantes suivant la densité de la population aux alentours du site. L'étude n'a pas donné de valeur précise aux conséquences visuelles mais elle a estimé que cette valeur était très faible en dehors de certaines zones pittoresques à vocation touristique, et se situait très probablement nettement au-dessous de 1,9 mECU/kWh. Si l'on prend un indicateur de bruyance moyen de 0,6 mECU/kWh et une valeur de 1,0 mECU/kWh pour les conséquences visuelles, on obtient, en additionnant les valeurs identifiées au tableau 3, une valeur totale des effets externes de l'énergie éolienne sur l'environnement de 3 mECU/kWh (0,0038 dollar/kWh). Les impacts sur la mortalité des oiseaux ont été considérés comme négligeables au Royaume-Uni (bien qu'ils soient sans doute plus importants qu'ailleurs, y compris aux États-Unis), de même que ceux concernant l'occupation des sols, en raison de la très faible surface utilisée par les turbines elles-mêmes et de leur compatibilité avec l'activité agricole et la vie animale. Si la valeur totale des effets externes de l'énergie éolienne n'est pas insignifiante, elle est nettement inférieure au coût de la production d'électricité, du fait notamment que les impacts en matière de réchauffement de la planète et d'acidification sont des impacts secondaires résultant de la prise en compte de l'utilisation d'énergie primaire provenant de combustibles fossiles pour la fabrication de turbines. L'exclusion de ces émissions secondaires (lesquelles ont été exclues par l'étude ExternE pour les autres sources d'énergie) réduirait la valeur des effets externes de l'énergie éolienne à environ 2 mECU/kWh (0,0025 dollar/kWh).

35. Il est difficile d'établir des comparaisons avec les autres combustibles en raison des différences d'hypothèses et de méthodologies. Toutefois, se fondant sur des études ExternE

portant sur d'autres ressources énergétiques, la figure IV présente des estimations approximatives des effets externes de l'exploitation de ces ressources par rapport à l'énergie éolienne (en dollars des États-Unis). Ces valeurs peuvent varier considérablement et tous les chiffres doivent être utilisés avec la plus grande prudence. Néanmoins, les impacts de l'énergie éolienne sur l'environnement ne semblent pas être supérieurs à ceux des autres sources d'énergie et sont considérablement inférieurs à ceux des combustibles fossiles. En outre, ces impacts sont locaux, relativement prévisibles et ont un caractère essentiellement esthétique.

Figure IV  
**Estimation des effets externes sur l'environnement, par source d'énergie**

sonnes au niveau mondial, délivrant une nouvelle puissance installée de 1 200 MW par an. Dans les pays en développement, les incidences des turbines éoliennes modernes à haute technologie sur l'emploi et la balance des paiements sont moins claires, car ces installations continueront de nécessiter l'importation de matériels et sans doute de main-d'œuvre spécialisée.

## 1. Systèmes d'incitation visant à promouvoir l'exploitation de l'énergie éolienne

Différentes mesures d'incitation ont été conçues pour promouvoir la mise en œuvre de projets relatifs à l'exploitation de l'énergie éolienne, qui ont conduit à l'implantation de nombreuses installations modernes dans divers pays membres de l'OCDE et dans quelques pays en développement. Certaines de ces mesures sont décrites ci-après.

39. *Contrats relatifs à la fourniture d'énergie* : La condition déterminant le succès d'un projet relatif à l'énergie éolienne est sans doute l'existence d'un marché fiable pour la vente de l'électricité produite. Dans un système monopolistique à intégration verticale, une société de services publics qui décide de construire des centrales éoliennes disposera naturellement d'un marché assuré. Toutefois, l'énergie du vent est exploitée en grande partie par des firmes indépendantes, sans affiliation avec aucun service d'intérêt public. Il est donc nécessaire, dans ce cas, de mettre en place un mécanisme permettant à l'exploitant de vendre l'énergie qu'il produit à l'entreprise de service public. La création de marchés stables est par conséquent un objectif primordial en ce qui concerne l'élaboration de contrats de fourniture d'énergie.

40. *Subventions à la production* : Lorsque l'électricité produite par le vent est plus coûteuse que celle provenant de sources classiques, l'énergie éolienne présente peu d'intérêt sur le plan économique, aux taux pratiqués. Dans ce cas, une subvention à la production, versée par kWh d'électricité produite, peut réduire le coût de l'énergie éolienne et assurer la viabilité économique des projets. La subvention est habituellement versée par le gouvernement par prélèvement sur la base d'imposition générale ou par les clients de la société assurant des services publics, au moyen d'une surtaxe indiquée sur leur facture. Ces subventions ont un caractère temporaire et doivent diminuer progressivement, à mesure que les innovations technologiques rendent l'énergie éolienne pleinement compétitive sur les marchés.

Source : Étude ExternE, «Externalities of Energy» (Commission européenne, 1995).

## B. Considérations d'ordre social

36. Comme indiqué ci-dessus, les atteintes à l'esthétique et la nuisance acoustique sont considérées comme les conséquences les plus négatives de l'énergie éolienne. Comme ces impacts ont un caractère purement local, ils peuvent susciter de vives préoccupations en matière de planification et d'implantation. On notera toutefois que le bruit causé par une ferme éolienne à une distance de 350 mètres est de l'ordre de 45 db (chiffre équivalant à celui d'un véhicule roulant à environ 60 kilomètres à l'heure à une distance de 100 mètres) et, en tant que tel, ce niveau sonore est inférieur au bruit de fond entendu dans les zones rurales pendant la journée et seulement légèrement supérieur aux niveaux enregistrés la nuit.

37. La création d'emplois est une autre considération sociale présentant un grand intérêt. L'industrie de l'énergie éolienne emploie actuellement environ 30 000 à 35 000 per-

41. *Crédits d'impôt* : Des crédits d'impôt peuvent être accordés en fonction du montant des dépenses d'investissement du projet ou sur la base des kWh qu'il produit. Les investisseurs préfèrent les crédits d'impôt établis sur la base des dépenses d'équipement car ils peuvent en bénéficier, quels que soient les résultats de leur projet en matière de production d'électricité. Pour les projets à haut risque, les investisseurs ne sont parfois prêts à fournir des capitaux que dans des conditions aussi généreuses. Mais ce système d'abattement peut être utilisé de manière abusive, car les investisseurs ne recherchant qu'un abri fiscal n'ont pratiquement aucune raison de veiller à ce que leurs projets produisent effectivement de l'électricité. Les crédits d'impôt accordés sur la base du kWh d'électricité produite réduisent les possibilités d'abus en subordonnant les versements à l'exécution des projets, ce qui augmente ainsi les risques pour les investisseurs.

42. *Part réservée à l'énergie provenant de sources renouvelables* : Dans ce cas, un certain pourcentage du volume total de l'électricité produite doit provenir de sources renouvelables. Ce pourcentage peut être à nouveau subdivisé en allocations distinctes pour les différentes technologies, comme l'énergie éolienne, l'énergie solaire, la biomasse, etc. Cette mesure garantit un marché pour l'électricité provenant des sources d'énergie renouvelables qui, sinon, ne serait sans doute pas compétitive dans les conditions actuelles du marché.

43. *Taxe écologique* : Comme les planificateurs ont généralement négligé les effets de la production d'électricité provenant de sources classiques sur l'environnement, certains organismes réglementaires se sont efforcés de remédier à ce problème en augmentant le coût hypothétique des centrales classiques par l'introduction d'une taxe écologique au stade de la planification. Celle-ci, en augmentant le coût apparent des technologies conventionnelles, peut promouvoir la construction de centrales éoliennes. En général, cette taxe n'est intégrée qu'au stade de la planification pour la sélection des ressources; elle n'est pas perçue au stade des opérations, n'affectant pas, de ce fait, l'exploitation de la centrale après la mise en oeuvre du projet.

44. *Impôt sur les émissions carboniques* : Comme la taxe écologique, cet impôt augmente le coût de l'énergie provenant de combustibles fossiles en imposant une taxe par kWh, calculée en fonction de la teneur en carbone des combustibles et de leur impact probable sur les changements climatiques au niveau mondial. Cette taxe peut augmenter considérablement la compétitivité des sources d'énergie ne produisant pas d'émissions carboniques, comme l'énergie éolienne, par rapport aux combustibles fossiles. Contrairement à la taxe écologique, toutefois, l'impôt sur les émissions carboniques

prévoit le versement effectif d'une somme d'argent et ne constitue donc pas simplement une taxe hypothétique, utilisée uniquement à des fins de planification.

45. *Les crédits accordés à des conditions préférentielles* comprennent les prêts concessionnels accordés à des taux inférieurs à ceux du marché, le cofinancement public afin d'attirer les organismes de crédit et les garanties de prêts.

46. *Subventions des activités de recherche-développement et démonstration* : Plusieurs gouvernements subventionnent les activités de recherche-développement et démonstration (R-D et D) portant sur les turbines éoliennes, de même que sur l'évaluation des ressources, les considérations environnementales et d'autres domaines connexes. D'après l'Agence internationale de l'énergie, les États-Unis d'Amérique étaient en tête, en 1996, pour les activités de R-D menées sur l'énergie éolienne, suivis du Japon, des Pays-Bas, du Danemark et de l'Italie. Cette année-là, le montant total des crédits alloués par les pays membres de l'OCDE à ces activités s'est chiffré à environ 70 millions de dollars. Mais il faut faire preuve de prudence dans les comparaisons entre pays en raison des différences existant dans les systèmes de comptabilité. En outre, l'importance des dépenses en matière de R-D et D ne garantit pas, à elle seule, le succès des projets éoliens. Entre 1973 et 1988, les États-Unis et l'Allemagne ont alloué, respectivement, environ 380 millions de dollars et 79 millions de dollars aux activités de R-D et D sur l'énergie éolienne, mais le Danemark, qui domine maintenant le marché mondial de la fabrication de turbines, n'a consacré que 15 millions de dollars à la R-D et D au cours de la même période. Pour être efficaces, les dépenses engagées dans ce domaine doivent être soigneusement intégrées à des marchés à long terme fiables pour l'électricité de source éolienne.

## VII. Recommandations

47. Pour l'élaboration de politiques appropriées, les pays en développement peuvent tirer parti de l'expérience acquise dans l'application des mesures d'incitation mentionnées à la section VI. L'application pratique de ces mesures exigera toutefois un renforcement des capacités institutionnelles des organes de décision et de contrôle. Cet aspect revêt une importance particulière pour les pays qui ont entrepris de privatiser les services d'utilité publique. Les principaux éléments d'une stratégie visant à promouvoir les sources d'énergie renouvelables, pourraient porter sur les aspects suivants.

48. *Adoption d'une tarification rationnelle et élaboration de mesures d'incitation bien conçues.* De nombreux pays devront peut-être modifier les tarifs pratiqués dans le secteur de l'électricité provenant de sources classiques. L'octroi de subventions excessives à ce secteur constituerait en effet un obstacle important à l'exploitation des sources d'énergie renouvelables. De plus, les mesures d'incitation, comme celles décrites plus haut, doivent être adaptées aux conditions particulières des pays en développement.

49. *Assurer des marchés stables pour l'électricité d'origine éolienne.* L'existence de marchés fiables pour ce type d'électricité est le principal facteur d'encouragement pour la poursuite de l'exploitation de l'énergie éolienne. La conclusion de contrats d'achat stables constitue un élément clef de la politique énergétique de tous les pays qui ont obtenu des succès dans l'exploitation de l'énergie du vent. Il n'existe pas encore de compétitivité réelle et un appui supplémentaire demeurera nécessaire pour les prochaines années.

50. *Assurer des marchés stables pour les turbines éoliennes.* Les pays devraient également encourager la stabilité des marchés pour les nouvelles turbines éoliennes, afin d'assurer la viabilité de l'industrie et de stimuler les innovations technologiques. La dimension de ces marchés est beaucoup moins importante que leur fiabilité.

51. *Correspondance entre la rentabilité financière des projets et les objectifs de la société en matière d'environnement.* Il faudrait s'efforcer plus activement de mettre en place des mécanismes appropriés permettant d'établir une meilleure correspondance entre les résultats financiers des projets et les objectifs environnementaux de la société.

52. *Renforcement de la participation de la communauté à la planification des projets et avantages qu'elle doit en retirer.* Les conséquences visuelles et l'impact du bruit, quoique faibles, sont néanmoins réels et doivent être examinés dans le cadre d'un processus de planification ouvert et direct. L'opposition à un projet est aussi considérablement réduite lorsque les résidents locaux sont bien informés et peuvent tirer des avantages financiers de projets éoliens exécutés dans leur communauté.

53. *Promotion de projets décentralisés dans les communautés isolées.* L'exploitation de l'énergie éolienne peut être très rentable dans les communautés isolées qui ne sont pas desservies par un réseau de transport central. Toutefois, comme celles-ci sont souvent pauvres et résident dans des pays en développement, peu de ces marchés n'ont guère suscité d'intérêt et l'énergie éolienne a été exploitée en majeure partie dans le cadre d'une production centralisée utilisant le réseau. Des efforts supplémentaires devraient être faits afin d'offrir des possibilités de financement et d'encoura-

ger la mise en oeuvre de projets éoliens non connectés au réseau dans les communautés éloignées, notamment dans le contexte de programmes d'électrification rurale exécutés dans des pays en développement.

54. *Élimination des obstacles institutionnels à l'exploitation de l'énergie éolienne.* Il faudrait favoriser l'émergence de communautés professionnelles stables informées des questions liées à l'énergie éolienne et pouvant faciliter son exploitation à long terme dans leur pays. La mise en place de capacités institutionnelles comprend également la diffusion d'informations, la mise au point de processus de planification appropriés, l'élaboration de procédures de certification adéquates pour les turbines et, probablement, la mise en oeuvre de programmes de démonstration concernant l'énergie éolienne, lorsqu'il n'existe pas de projets dans ce domaine.

55. *Promotion des activités de recherche-développement, notamment pour l'évaluation des ressources éoliennes.* Le secteur privé a déjà mis au point des technologies perfectionnées et l'allocation de fonds publics importants ne sera peut-être pas nécessaire dans ce domaine. Toutefois, une aide publique serait requise pour l'établissement de cartes des vents précises permettant d'identifier les sites appropriés pour la production d'électricité d'origine éolienne. Dans les pays en développement, en particulier dans les pays les moins avancés, la diffusion de ces technologies exigera néanmoins une coopération internationale de grande ampleur.

#### Note

<sup>1</sup> Le présent rapport a été établi pour le compte du Département des affaires économiques et sociales du secrétariat de l'ONU par Robert Y. Redlinger, du Centre de coopération sur l'énergie et l'environnement du PNUE; Per Dannemand Andersen, du Département de l'énergie éolienne et de la physique de l'atmosphère; et Poul Erik Morthorst, du Département de l'analyse des systèmes; toutes ces entités sont situées au laboratoire national de Risø (Danemark). Le rapport s'inspire d'une étude approfondie effectuée par les mêmes auteurs pour le Secrétariat. Cette étude a été financée par le Ministère danois des affaires étrangères qui est ici chaleureusement remercié.