



« Une expertise en énergie au service de l'avenir »

**LES NOUVELLES FILIÈRES
D'ÉNERGIE RENOUVELABLE**

(rapport n° 3)

Philippe DUNSKY

Centre Hélios

pour la
**Commission de l'économie et du travail
de l'Assemblée nationale du Québec**

dans le cadre de son
Mandat de surveillance d'Hydro-Québec

le 6 mars 1997

CITATION SUGGÉRÉE

Philippe DUNSKY (Centre Hélios), *Les nouvelles filières d'énergie renouvelable (rapport n° 3)*, pour la Commission de l'économie et du travail de l'Assemblée nationale du Québec, mars 1997, 44 pages.

RÉDACTION

CENTRE HÉLIOS

« *Une expertise en énergie au service de l'avenir.* »

326, boul. Saint-Joseph, bureau 100
Montréal (Québec)
Canada H2T 1J2

Téléphone : 514.849.7900

Télécopieur : 514.849.6357

Courriel : sec@centrehelios.org

DÉPÔT LÉGAL

Bibliothèque nationale du Canada
Bibliothèque nationale du Québec
ISBN : 1-894195-05-1

CITATIONS

Avec mention avec la source

© 1997, Centre Hélios



Le Centre Hélios est une société indépendante vouée à la recherche et l'expertise-conseil en matière d'énergie.

L'expertise-conseil offerte par le Centre Hélios est axée sur la conception et l'analyse de stratégies, politiques, mécanismes réglementaires et outils économiques.

Le Centre Hélios a une clientèle diversifiée, qui compte notamment les gouvernements, les organismes réglementaires, les organisations sans but lucratif, le secteur privé, les peuples autochtones et les entreprises énergétiques.



TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
---------------------	----------

PARTIE 1	
SURVOL DES NOUVELLES FILIÈRES D'ÉNERGIE RENOUVELABLE	2

I. INTRODUCTION	3
------------------------	----------

II. SURVOL DES FILIÈRES	3
--------------------------------	----------

A. Solaire photovoltaïque	3
----------------------------------	----------

B. Solaire (hélio-) thermique	3
--------------------------------------	----------

C. Éolienne	4
--------------------	----------

D. Géothermique	4
------------------------	----------

E. Énergie des océans	5
------------------------------	----------

F. Micro-hydraulique	5
-----------------------------	----------

G. Biomasse	6
--------------------	----------

H. Les piles à combustible	6
-----------------------------------	----------

PARTIE 2

L'ÉNERGIE ÉOLIENNE 8

I. LA TECHNOLOGIE ET LES MARCHÉS	9
A. Historique	9
B. État actuel	10
1. Gains technologiques	10
<i>a. Fiabilité et poids</i>	10
<i>b. Taille</i>	10
2. Gains économiques	12
C. Marchés mondiaux	12
1. États-Unis : occasions créées par la restructuration	13
<i>a. La Californie</i>	13
<i>b. Le Congrès fédéral</i>	13
<i>c. Le Département d'énergie</i>	14
<i>d. Les organismes d'intérêt public</i>	14
2. Europe	14
3. Pays industrialisés	14
4. En général	15
D. Prévisions pour l'avenir	15
1. Gains technologiques	15
2. Gains économiques	16
3. Marché mondial	17
II. LE QUÉBEC	18
A. Le potentiel du Québec	18
B. Retombées économiques potentielles au Québec	29
C. Politique d'Hydro-Québec	20
1. Engagements d'Hydro-Québec	20
2. Analyse de la stratégie d'Hydro-Québec	21
<i>a. Prudence</i>	21
<i>b. Possibilités économiques</i>	21
D. Mieux positionner le Québec	22
1. Intégration des externalités	22
2. Quotes-parts	22
3. Marché de permis échangeables	23
4. Tarification déterminative (« verte »)	24
5. Facturation inverse	24
6. Crédits fiscaux	25
III. CONCLUSION	26

Partie 3

L'énergie solaire-photovoltaïque 27

I. LA TECHNOLOGIE ET LES MARCHÉS	28
A. Historique	28
B. État actuel	29
1. Définition	29
2. Gains technologiques	29
3. Gains économiques	30
C. Marché	30
1. Pénétration systématique des marchés	30
2. Projets précis (quelques exemples)	31
<i>a. Engagements en Arizona</i>	<i>31</i>
<i>b. Centrales en Inde</i>	<i>31</i>
<i>c. Financement en Californie</i>	<i>31</i>
<i>d. Maisons solaires au Japon</i>	<i>32</i>
<i>e. Zone d'entreprises solaires au Nevada</i>	<i>32</i>
<i>f. La Banque mondiale en Afrique</i>	<i>32</i>
<i>g. Centrale électrique à Hawaï</i>	<i>33</i>
<i>h. Centrales électriques en Italie</i>	<i>33</i>
<i>i. Mille toits allemands</i>	<i>33</i>
D. Prévisions pour l'avenir	33
1. Gains technologiques	34
2. Gains économiques	34
3. Politiques nationales et régionales	34
4. Croissance des besoins des pays non industrialisés	35
5. Prévisions	36
II. LE QUÉBEC	38
A. Le potentiel du Québec	38
1. Gisement solaire du Québec	38
2. Bénéfices du froid	39
3. Espace occupé	39
4. Potentiel économique	40
B. Politique d'Hydro-Québec	40
C. Mieux positionner le Québec	41
1. Recherche-développement-démonstration	41
2. Facturation inverse	41
3. Location des équipements	41
4. Crédits fiscaux	41
5. Autres	42

RÉFÉRENCES 43

INTRODUCTION

Alors que la production électrique au passé fut caractérisé par la construction de grands projets hydroélectriques, thermiques, ou nucléaires, l'avenir est vraisemblablement réservé à de nouvelles technologies, dont la majorité utiliseront des sources renouvelables et « durables »¹.

En effet, depuis quinze ans les progrès dans le domaine des nouvelles filières renouvelables se multiplient, alors que les coûts diminuent, souvent de façon dramatique, et que les technologies deviennent de plus en plus perfectionnées et matures.

De l'ensemble des nouvelles technologies renouvelables accessibles et connues, les plus reconnues produisent l'électricité à partir soit de l'énergie du soleil (photovoltaïque ou héliothermique), soit de l'énergie du vent (éolienne). À ces deux options s'ajoutent des technologies qui permettent de convertir en électricité l'énergie stockée dans la terre (géothermique), dans les océans (notamment l'énergie marémotrice, mais aussi l'énergie des vagues, des échanges de chaleur et des gradients de salinité), dans les rivières (micro hydraulique), ou dans les plantes et les arbres (biomasse).

Enfin, une dernière technologie qui risque d'avoir des répercussions majeures sur les marchés de l'électricité à l'avenir, mais qui n'est pas à proprement parler une « source » d'énergie renouvelable, est la pile à combustible.

Chacune de ces technologies est prometteuse, mais pour différentes raisons et pour diverses régions du globe. Après un survol rapide de l'ensemble de ces options, le présent rapport portera essentiellement sur deux filières particulières, soit l'énergie éolienne et l'énergie solaire-photovoltaïque.

Dans le premier cas, il s'agit clairement de l'option la plus intéressante pour le Québec à court terme, à la fois quant au coût de la technologie et au potentiel éolien du Québec, qu'aux possibilités de développement économique et industriel associés aux marchés d'exportations en pleine croissance. Dans le deuxième cas, il s'agit plutôt de l'option la plus intéressante à long terme, notamment en raison de son énorme potentiel et de sa capacité, étant un mode de production entièrement décentralisé, de révolutionner le système énergétique au complet.

¹ Plusieurs expressions (« durables et renouvelables », « nouvelles et renouvelables », « redécouvertes », etc.) peuvent être employées pour signifier la même chose : des façons de produire de l'électricité avec un strict minimum d'impacts environnementaux. Ces termes excluent certaines options, dont la fission nucléaire, les centrales au mazout, au charbon et au gaz naturel, la cogénération au gaz naturel, ainsi que certaines options de combustion de la biomasse ou de déchets et la plupart des options hydroélectriques. Ils incluent des options telles que l'éolien, le solaire, la géothermique à circuit fermé et certaines autres filières.

PARTIE I

SURVOL DES NOUVELLES FILIÈRES D'ÉNERGIE RENOUVELABLE

I. INTRODUCTION

Le texte qui suit décrit quelques-unes des nouvelles technologies renouvelables les plus prometteuses pour le monde entier, et souligne l'intérêt particulier de chacune pour le Québec. Ce faisant, le texte explique aussi le choix de traiter plus en profondeur deux de ces options, soit l'énergie éolienne et l'énergie solaire-photovoltaïque.²

II. SURVOL DES FILIÈRES

A. Solaire photovoltaïque

Différents techniques et matériaux peuvent être utilisés pour convertir l'énergie du soleil directement en électricité. Qu'il s'agisse de procédés à base de silicium, de cadmium, de sélénium, d'indium ou de tellure, les modules photovoltaïques ont généralement une efficacité de conversion qui se situe entre 10 % et 35 %. Les coûts de cette technologie, quoique élevés, ont baissé d'un facteur de vingt depuis 1971 (Worldwatch 1997a), alors que la production totale a grimpé durant la même période de 0,1 MW à quelque 600 MW (Ibid.). De plus, soulignons que la quantité d'électricité produite par le PV dépend non de la chaleur, mais de la lumière, ce qui a des conséquences importantes et positives pour le Québec. À long terme, le solaire-PV est probablement la seule option capable de répondre adéquatement à la grande partie des besoins croissants d'électricité à l'échelle de la planète.

Le solaire-photovoltaïque représente probablement l'option la plus intéressante à long terme, pour ce qui est du potentiel économique et technique au Québec, et ce en raison du rayonnement solaire global du Québec, des progrès techniques qui se font présentement, des sommes allouées pour la recherche, le développement et la commercialisation, ainsi que des projets majeurs qui se multiplient présentement.

B. Solaire (hélio-) thermique

Les technologies d'énergie héliothermique utilisent la chaleur du soleil pour chauffer un liquide qui est transporté vers une turbine à partir de laquelle la vapeur produit de l'électricité. Comme pour le solaire-PV, le solaire thermique réussit à convertir entre 10 % et 30 % de l'énergie du soleil en électricité (De Laquil III et al. 1993). Alors que le coût de l'héliothermique est descendu de 30¢ à moins de 10¢ (U.S.)

² Le mandat accordé par la Commission de l'économie et du travail précise par ailleurs que suivant « un survol rapide des nouvelles technologies renouvelables », la documentation et le travail devront être concentrés sur les options éolienne et solaire en particulier.

par kWh (NREL 1993, 28-29 et Worldwatch 1997a), des projets dans différents pays du monde produisent aujourd'hui plusieurs centaines de MW à partir de ce groupe de technologies (De Laquil III et al. 1993), et la Californie a récemment inauguré un nouveau projet (« Solar Two ») qui risque d'améliorer encore la performance de cette option énergétique (AELN 1996).

Contrairement au solaire-PV, la technologie héliothermique repose principalement sur la chaleur plutôt que sur le rayonnement solaire. Ainsi, et malgré des coûts relativement faibles de certains projets californiens et israéliens, cette option demeurera probablement trop dispendieuse pour le Québec.

C. Éolienne

L'énergie éolienne utilise le mouvement du vent pour faire tourner une turbine et produire directement de l'électricité. L'éolien est probablement la grande réussite la plus connue parmi les nouvelles technologies renouvelables, puisque ses coûts sont aujourd'hui relativement compétitifs avec d'autres filières traditionnelles, ayant baissé de quelque 80¢ le kWh il y a 15 ans à seulement 4¢ à 7¢ le kWh aujourd'hui (Dunsky 1995 et Gouvernement du Québec 1996a, p.16). Grâce aux améliorations technologiques qui ont permis ces réductions de coûts, cette filière occupe une part de plus en plus importante dans le bilan énergétique de nombreux pays, et elle représente aujourd'hui une production de quelque 6 000 MW mondialement (Worldwatch 1997b). À court terme, c'est l'option éolienne qui offre le plus important potentiel d'énergie renouvelable et durable, notamment dans des régions comme le Québec, où les vents sont particulièrement puissants. Pour la communauté énergétique, l'éolien représente le pont entre un passé de grands projets non durables et un avenir d'énergie décentralisée et durable, dont le solaire-PV occupera la grande part du marché.

L'éolien représente l'option la plus intéressante à court terme, pour ce qui est du potentiel économique et technique au Québec, et ce en raison notamment de ses coûts relativement faibles et du régime québécois des vents. Aussi, son marché d'exportation est en pleine croissance.

D. Géothermique

L'option géothermique en circuit fermé utilise la chaleur stockée à quelque 2 à 5 km sous la terre, pour chauffer un liquide descendu par un tuyau, qui remonte à la surface et fait finalement tourner une turbine. En 1995, les coûts de cette filière se situaient entre 3¢ et 12¢ (U.S.) le kWh, alors que des projets géothermiques produisaient mondialement plus de 9000 MW (Palmerini 1993), la plupart venant cependant de projets classiques, c'est-à-dire sans circuit fermé et ne figurant donc pas dans la liste des nouvelles filières renouvelables.

L'option géothermique en circuit fermé a un très grand potentiel, même aux endroits comme le Québec où la chaleur souterraine n'est pas parmi les meilleures. Toutefois, le Canada dans son ensemble est absent de la liste des 22 pays qui utilisent présentement cette technologie prometteuse (Ibid).

E. Énergie des océans

L'énergie stockée dans les océans peut être exploitée de plusieurs façons, notamment par le biais des marées et des vagues, mais également de l'échange de chaleur et des gradients de salinité. L'énergie marémotrice est la plus reconnue et la seule filière commercialement disponible. Cette option énergétique utilise la force des marées pour faire tourner des turbines, et a l'avantage d'être très prévisible.

La Gaspésie et la Basse Côte-Nord semblent être deux des vingt sites identifiés comme les meilleurs sites pour l'énergie marémotrice au monde, selon une carte élaborée pour les Nations Unies, mais les coûts de cette option sont élevés (environ 7¢ à 21¢ le kWh) et la technologie relativement mature (Cavanagh et al. 1993). En ce qui a trait à la conversion de l'énergie des vagues en électricité, celle-ci demeure techniquement très difficile, et aucun projet commercial n'a à ce jour réussi. Soulignons toutefois qu'une carte mondiale des vagues identifie la région du sud du Québec, des maritimes et du nord-est des États-Unis comme ayant le meilleur potentiel pour cette source, parmi les onze meilleures régions du monde (Ibid).

L'énergie marémotrice offre un potentiel intéressant au Québec, qui abrite deux des meilleurs sites identifiés au monde. Toutefois, la technologie ne sera pas répandue avant au moins deux décennies, et en ce qui concerne les possibilités même à long terme, ne peut rivaliser avec le solaire-PV. Quant à l'énergie des vagues, cette technologie, quoique théoriquement intéressante pour le Québec, a connu plus d'échecs que de succès au cours des dernières années, et rien ne mène à croire que la situation s'inversera dans un proche avenir.

F. Micro-hydraulique

Les centrales micro-hydrauliques sont des centrales hydroélectriques au fil de l'eau ne produisant qu'une petite quantité d'énergie (de 20 à 100 kW) et ne nécessitant que des modifications très mineures à la rivière. La micro-hydraulique a des applications pour des régions isolées du Nord (chalets et camps d'été, etc.), ou encore pour de nombreux villages des pays du Sud, où les infrastructures de transport électrique n'existent toujours pas et où les besoins en électricité peuvent être aussi minimes que deux ampoules pour faciliter la lecture et donc les études la nuit. Suivant la disponibilité des rivières et la possibilité de recourir à d'autres solutions, les micro-centrales peuvent être très économiques. Toutefois, leur dépendance sur l'existence d'une rivière et leur petite taille en font des options intéressantes pour des besoins particuliers,

mais sans potentiel réel pour répondre à une partie importante des besoins en électricité. Aussi, n'utilisant pas de réservoirs, l'énergie produite ne peut être stockée, ce qui les rend plus appropriées pour des pays du Sud que pour les régions du Nord comme le Québec, où le débit d'eau est inversement proportionnel aux besoins en électricité, du moins à court et moyen terme.

En somme, la microhydraulique est une technologie qui risque d'offrir des percées importantes pour certaines compagnies québécoises, mais dont le potentiel se situe principalement en dehors du Québec, par exemple dans les pays d'Amérique latine, d'Afrique, l'Inde et la Chine.

G. Biomasse

L'énergie stockée dans la biomasse peut être convertie en électricité par la combustion. Les déchets d'usines de pâtes et papiers, par exemple, peuvent servir de carburant pour une centrale électrique, et ce de façon relativement abordable. Par ailleurs, une telle centrale existe déjà au Québec, et le Groupe Boralex en construira vraisemblablement une deuxième dans un avenir rapproché (Les Affaires\$ 1997, p.84). D'autres types de biomasse peuvent également être utilisés (déchets résiduels de coupes, produits agricoles, déchets domestiques), mais plusieurs engendreraient des impacts environnementaux importants et ne sont donc pas considérés comme des filières « durables » ou même « renouvelables ». Malgré le rôle important que joue le secteur des pâtes et papiers dans l'économie québécoise, le potentiel d'électricité provenant de la biomasse est très limité, ne dépassant pas les 200 MW, selon Hydro-Québec (1997a).

La biomasse est certes une option que le Québec pourrait privilégier, moyennant certaines considérations particulières, mais son potentiel d'exploitation pour la production d'électricité demeure relativement minime comparativement à l'éolien, par exemple.

H. Les piles à combustible

Les piles à combustible, une mauvaise traduction de l'anglais « fuel cells », ne sont pas tant des piles que de véritables centrales électriques à petite échelle. Ces centrales, qui peuvent être aussi petites qu'un pied cube pour répondre à tous les besoins en électricité de trois ménages moyens au Québec (Ballard 1996, p.15), transforment des carburants (hydrogène, gaz naturel, méthane) en électricité par un procédé électrochimique, et donc sans combustion. Des gains notables depuis sept ou huit ans ont propulsé cette technologie à l'avant-scène des discussions dans le monde énergétique, et on peut aujourd'hui envisager une forte pénétration de cette technologie d'ici 10 à 15 ans.

Soulignons que les piles à combustible pourraient littéralement révolutionner le secteur de l'électricité, puisqu'elles peuvent être modulées selon les besoins précis d'un individu, d'un commerce ou d'une petite ou grande industrie. Ainsi, les consommateurs alimentés de cette filière pourraient délaisser le réseau principal, ce qui aurait des conséquences de premier ordre pour les compagnies d'électricité, plusieurs d'entre elles ayant déjà commencé à songer sérieusement à ces possibilités.

Les piles à combustible ne sont pas tant une nouvelle filière d'énergie renouvelable qu'une nouvelle technologie dont les répercussions potentielles ne peuvent être minimisées. À moyen et long terme, les piles à combustible pourront révolutionner le secteur de l'énergie stationnaire, bouleversant tant les sources thermiques et renouvelables que le système de l'électricité en son entier, y compris notamment les réseaux de transport et de distribution

PARTIE 2

L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

Photo : une éolienne aux Pays-Bas — son moyeu est à 40 mètres d'hauteur

I. LA TECHNOLOGIE ET LES MARCHÉS

A. Historique

L'idée d'exploiter l'énergie du vent n'est pas nouvelle. En effet, les Anciens en Égypte l'utilisaient déjà pour remonter le Nil à contre-courant, ce qui lança l'utilisation répandue de cette ressource pour le transport par bateau. En 1180 en Normandie, les moulins à vent firent leur première apparition et au cours des siècles qui suivirent, cette « technologie » se répandit à travers l'Europe, de la France jusqu'en Pologne, en passant par l'Angleterre, les Flandres, l'Allemagne et le Danemark. Dès le XIX^e siècle, les historiens nous apprennent que quelque 500 000 moulins à vent tournaient sur le continent européen, alors qu'environ le même nombre étaient installés un peu partout en Chine.

L'intensification vers la fin du XIX^e siècle de la révolution industrielle a eu des répercussions majeures sur cette source d'énergie mécanique et de transport, comme d'autres sources que l'on essaie aujourd'hui d'exploiter de nouveau³. Devant la montée de la combustion du charbon, l'éolien a en pratique disparu de la carte.

Mais aux prises avec une première crise mondiale de l'énergie au début des années 1970, le monde occidental se mit une fois de plus à investir dans la ressource éolienne, cette fois-ci dans le but de produire de l'électricité. Les budgets de recherche-développement accordés à cette énergie « redécouverte »⁴ ont littéralement explosé dans certains pays, atteignant 25 millions de \$ par an en Allemagne et 65 millions \$ (US) aux États-Unis vers le début des années 1980 (Gipe 1995).

Et, ce qui est plus important encore, en 1979, dans la foulée d'une deuxième crise de l'énergie et un an après l'arrivée de crédits d'impôts californiens, les États-Unis adoptèrent la loi PURPA, ou *Public Utilities Regulatory Policy Act*, qui obligeait les monopoles énergétiques à acheter l'électricité de nouvelles sources renouvelables des producteurs privés aux coûts évités, ces derniers étant à ce moment particulièrement élevés. Les mesures incitatives figurant dans la PURPA étaient assez fortes pour faire naître une véritable industrie de l'énergie éolienne, dont les effectifs étaient concentrés surtout en Californie. Depuis, la Californie s'est dotée de plus de 17 000 éoliennes, pour une puissance annuelle de 1700 MW et une production annuelle de 3,7 milliards de kWh (ACÉÉ 1994).

En 1971, la valeur en puissance de l'ensemble des moulins à vent et des bateaux à voile utilisés à travers le monde s'élevait à environ 19 MW. Aujourd'hui, l'électricité produite par cette filière dépasse les 6 000

³ Les énergies solaire et marémotrice figurent en tête de liste, tout comme les piles à combustible et l'auto électrique dans le cas des besoins de transport.

MW, et certaines estimations prévoient que ce chiffre approchera les 20 000 MW d'ici l'an 2005 (AWEA 1996b). L'industrie de l'énergie éolienne a vraisemblablement pris son envol, et les gains technologiques continus la situent aujourd'hui parmi les réussites les plus importantes de l'histoire moderne de l'énergie.

B. État actuel

1. Gains technologiques

a. Fiabilité et poids

L'évolution technique et économique de l'énergie éolienne s'est faite sur une période de temps relativement courte, contrairement par exemple au solaire-photovoltaïque (voir prochain chapitre). D'une filière « alternative » peu fiable (20% de fiabilité en 1982), les progrès technologiques ont permis aux nouvelles générations d'éoliennes d'atteindre, dès 1985, des taux de fiabilité variant de 97 % à 99,8 % (PG&E 1993)⁵.

En fait, ce sont les résultats d'années de recherches dans le domaine de l'aéronautique qui ont permis de révolutionner le rendement de la technologie éolienne. Ces recherches se sont traduites par des designs plus aérodynamiques, des contrôles mécaniques et informatiques avancés et surtout l'utilisation de matériaux ultra légers, à l'origine développés par l'industrie militaire américaine, et qui ont permis de réduire le poids des nacelles et des pales.

Tableau 1. Diminutions de la masse des pales avec le temps (*adapté de Gipe 1995, p.202*)

	Technologie	Masse/surface (kg/m ²)	Changement cumulatif	Matériaux
<i>début des années 80</i>	À fibre de verre	2,0 à 3,0	---	polyester renforcé de fibre de verre
<i>fin des années 80</i>	À fibre de verre	1,5 à 2,0	- 30 %	polyester renforcé de fibre de verre
<i>début des années 90</i>	À fibre de verre	1,0 à 1,5	- 50 %	polyester renforcé de fibre de verre
<i>milieu des années 90</i>	À composite de bois	0,7 à 0,9	- 68 %	bois
<i>après 1995</i>	Haute performance	0,5 à 0,7	- 76 %	époxyde renforcé de fibre de verre et de fibre de carbone

⁴ « Énergies redécouvertes », c'est ainsi qu'Hydro-Québec nommait les filières de l'éolien et du solaire, entre autres, dans son plan pour la décennie 1980 (Hydro-Québec 1980).

⁵ La fiabilité fait référence ici à la disponibilité des turbines. Dans sa dernière analyse des coûts de l'éolien, datant de mars 1995, Hydro-Québec utilise 97% comme hypothèse pour la disponibilité des turbines (Hydro-Québec 1995a et 1997b).

b. Taille

Avec ces améliorations importantes de la technologie éolienne, la taille des machines a grandi. Si l'imaginaire de plusieurs demeure fixé sur les moulins hollandais ou les « batteurs à œufs » géants tels que celui de Cap-Chat, les nouvelles machines sont à la fois impressionnantes et relativement esthétiques.

Figure 1. Comparaison illustrative de la taille des éoliennes

[version papier seulement]

Gipe 1995, p.156

Au début des années 80, les machines mesuraient 12,5 mètres de diamètre et offraient une puissance de 50 kW; celles-ci ont vu leur taille et, par conséquent, leur puissance installée grimper au cours de la décennie qui a suivi. Aujourd'hui, les quelque 150 machines qui risquent d'être installées en Gaspésie auront un diamètre d'environ 55 mètres, et une puissance installée de 600 kW à 750 kW chacune.

(À titre indicatif, les moyeux de ces machines sont d'environ 50 mètres de haut, soit l'équivalent d'un édifice de 15 étages, alors que chaque pale mesure environ 27,5 mètres, soit un édifice de huit étages par pale. Elles se vendent par ailleurs pour plus d'un million de \$ par éolienne, et individuellement elles produisent en moyenne assez d'électricité pour répondre, année après année, aux besoins de 130 ménages québécois⁶).

⁶ Basé sur une éolienne de 700 kW, ayant un facteur d'utilisation de 35% et répondant aux besoins de ménages québécois consommant 18 000 kWh/an.

Tableau 2. Augmentations de la taille des éoliennes (Gipe 1995, 154-155, et Legault 1996)

	Diamètre du rotor (mètres)	Surface balayée (m ²)	Puissance installée par machine (kW)
<i>début des années 80</i>	12,5	125	50
<i>milieu des années 80</i>	18	250	100
<i>fin des années 80</i>	25	500	200
<i>début des années 90</i>	35	1000	400
<i>milieu des années 90</i>	40	1250	500
<i>présentement</i>	55	2375	600-750

2. Gains économiques

Les gains technologiques se sont traduits, bien sûr, en gains économiques. La technologie qui coûtait quelque 70¢/kWh en 1982 coûte aujourd'hui entre 4¢ et 7¢ par kWh, une baisse de prix de 90 % à 94 % en moins de 15 ans.

La vitesse avec laquelle les coûts de l'éolien ont diminué est surprenante, et fut difficile à prévoir. Dans son suivi du Plan de développement 1990-92, qui visait un horizon de 1999, Hydro-Québec (1992a) n'a même pas tenu à faire mention de cette filière, tant ses coûts demeuraient élevés.

Plus tard dans la même année, à la suite d'une consultation du public qui a mis en évidence l'importance de cette filière, la société d'État a, pour la première fois depuis 1980, tenu à faire le point sur l'énergie éolienne dans son plan de développement (Hydro-Québec 1992b). De nouveau, la société d'État a exclu cette filière de ses plans pour la période 1992-2001, en se fondant sur une évaluation qui fixait ses coûts à 8,5¢/kWh (Idem, p.48).

En 1994, Hydro-Québec a annoncé qu'un producteur privé d'énergie éolienne avait répondu avec succès à son appel d'offres restreint. Même si le coût évité utilisé était d'environ 5,5¢/kWh, Hydro-Québec continuait à insister sur le fait que la filière éolienne était trop dispendieuse, et au mois d'avril 1995, dans un document publié en marge du Débat public sur l'énergie, elle a réévalué son coût global à 6,2¢/kWh (Hydro-Québec 1995b). Fait intéressant, l'analyse interne fournie par Hydro-Québec à la Commission de l'économie et du travail, datée du même mois de 1995, évalue à 5,7¢ à 5,9¢ du kWh le coût d'un parc éolien en Gaspésie⁷.

⁷ L'estimation de 6,2¢/kWh est présentée en dollars de 1995, alors que les estimations de 5,7¢/kWh et 5,9¢/kWh le sont en dollars de 1994. Toutefois, l'année de différence ne suffit pas à expliquer la différence entre des chiffres publiés le même mois de la même année par la même entreprise. Nous revenons plus loin sur l'analyse des coûts effectuée par Hydro-Québec.

C. Marchés mondiaux

Pendant qu'Hydro-Québec réévaluait les coûts d'un parc éolien, et que les Américains révisaient les fondements mêmes de la structure de l'industrie de l'électricité, les Européens et certains pays en voie de développement ont commencé à développer cette filière de façon intensive.

Aujourd'hui, plus de 6000 MW de puissance éolienne est installée dans le monde. Le taux de croissance mondiale de cette filière est d'environ 20% à 25%, soit le taux de croissance le plus élevé de toutes les filières énergétiques sur le marché.

	Total (MW) 1994	Ajouts (MW) 1995	Ajouts (MW) 1996	Total (MW) 1996	Taux de croissance 1994-1996
Inde	176	383	264	820	+ 368 %
Espagne	72	73	116	261	+ 263 %
Allemagne	638	498	439	1575	+ 147 %
Chine	29	7	21	57	+ 97 %
Pays-Bas	153	106	36	295	+ 93 %
Gr.-Bretagne	147	46	71	264	+ 80 %
Danemark	539	75	190	804	+ 49 %

Quoique la filière éolienne soit de plus en plus compétitive, son avenir repose encore aujourd'hui en partie sur la volonté politique d'assurer sa promotion, d'accélérer sa pénétration du marché et de poursuivre les progrès technologiques.

1. États-Unis : occasions créées par la restructuration

La restructuration des marchés de l'électricité aux États-Unis a suscité d'importantes incertitudes (en plus de délais dans la mise en chantier de projets énergétiques de tous ordres, l'éolien n'étant pas une exception). Toutefois, et alors que les détails de la restructuration se concrétisent, la place qu'occupera la filière éolienne dans le bilan énergétique des États-Unis semble aujourd'hui plus prometteuse que jamais.

a. La Californie

En effet, la restructuration des marchés de l'électricité aux États-Unis donnera vraisemblablement lieu à des mesures concrètes visant la promotion de cette filière, comme d'autres filières nouvelles et renouvelables. La Californie, par exemple, le premier État à avoir restructuré son marché de l'électricité,

a adopté en août 1996 une loi créant des prélèvements pour financer les biens publics (« Public Goods Charge »). Cette loi et les décisions qui l'ont suivie stipulent notamment que la somme de 540 millions de \$ US, prélevée sur une période de 3 ans et 9 mois, sera consacrée aux nouvelles filières renouvelables, afin d'assurer leur pénétration accrue dans le bilan énergétique de cet état.

b. Le Congrès fédéral

Peut-être plus important que la décision californienne, un projet de loi fédéral soumis en février 1997 au Congrès américain, et proposé par le républicain Dan Schaeffer, stipulerait que d'ici l'an 2010, 4% de toute la production d'électricité du pays devra être de source nouvelle et renouvelable, ce qui représente un marché d'environ 32 milliards de kWh par an, ou d'environ 12 000 MW⁸. Celle de M. Schaeffer fut la première de quatre propositions à avoir été déposées, jusqu'à présent, devant le Congrès.

c. Le Département d'énergie

Le Département d'énergie du gouvernement fédéral américain travaille également à la préparation d'un projet de loi sur la déréglementation, qui sera soumis sous peu au Congrès. Une version préliminaire de ce projet de loi, datée de novembre 1996, hausserait la barre à 5%, ou l'équivalent d'environ 15 000 MW réservés aux nouvelles filières renouvelables (CEMM 1997a).

d. Les organismes d'intérêt public

Enfin, une dernière proposition sérieuse à apparaître récemment vient d'un regroupement de 28 des organismes de protection des consommateurs et de l'environnement les plus importants aux É.-U. (Alliance for Affordable Energy et al. 1997), et vise, entre autres, à ce que 10% de la production totale vienne de nouvelles sources renouvelables d'ici 2010 (2,5% d'ici 2000 et 5% d'ici 2005). Cette proposition résulterait en quelque 30 000 MW, soit l'équivalent de près de 400 projets Sainte-Marguerite-3, réservés aux nouvelles filières, dont l'éolien⁹.

2. Europe

Pour ce qui est des marchés européens, les indications sont semblables même si le contexte est différent. De toute évidence, les Länder allemands, surtout du nord du pays, continuent résolument sur la voie de politiques, d'incitations fiscales et d'objectifs précis pour l'énergie éolienne, tout comme le font les pays tels l'Espagne, les Pays-Bas, l'Angleterre, la Suède et le Danemark. Dans ce dernier cas par exemple, le gouvernement s'est donné l'objectif d'installer 1 500 MW, soit 10% de sa consommation totale, à

⁸ Basé sur une consommation totale de 800 TWh par an et un facteur d'utilisation éolien de 30 %.

⁹ Dans tous les cas, le terme « new renewables » exclut explicitement les projets hydroélectriques.

l'intérieur du pays d'ici huit ans, et ajoute à cet objectif un minimum¹⁰ de 200 MW additionnels qui seront installés en mer (Miljø & Energi Ministeriet 1996). La politique énergétique danoise stipule également, parmi d'autres objectifs impressionnants, que la planification de la ressource éolienne sera dorénavant insérée systématiquement au sein des processus de planification municipaux et régionaux.

3. Pays non industrialisés

Des pays non industrialisés, l'Inde et la Chine représentent pour l'instant les potentiels de développement éolien les plus intéressants. En Chine, l'objectif officiel d'installer 1 000 MW de puissance éolienne d'ici l'an 2000 n'est pas en voie d'être réalisé, ce pays n'ayant installé que 57 MW (AWEA 1997a). Toutefois, une analyse de la croissance dans cinq pays, incluant la Chine, prévoit l'installation chez ce dernier de 1 300 MW d'ici l'an 2005.

Contrairement à la Chine, l'Inde a déjà largement dépassé ses propres objectifs. Ainsi, l'objectif initial de 500 MW installés avant mars 1997 s'est plutôt traduit par l'installation de 730 MW (AWEA 1997c). Le succès du programme éolien de l'Inde pousse maintenant ce pays à accélérer davantage la pénétration de cette technologie. Déjà, le programme de mesure des vents le plus étendu au monde est en train d'être implanté, et de nouvelles éoliennes sont en construction ou en assemblage par quelque 25 fabricants. On prévoit l'atteinte, d'ici 2005, de quelque 2 500 MW.

4. En général

Outre les données chiffrées, certains événements symbolisent encore plus la montée extraordinaire de cette filière. Le plus important d'entre eux s'est produit en janvier 1997, alors que le premier producteur privé d'énergie au monde, Enron Corp., a acheté la compagnie éolienne Zond (AWEA, 1997b)^{11,12}. Cette annonce a été suivie de plusieurs événements et décisions clés de la part d'Enron, notamment le lancement d'une filiale « Enron Renewable Energy Corp. » et la signature d'une entente majeure avec des groupes environnementaux du Nord-Ouest américain¹³.

¹⁰ On parle également de la possibilité d'atteindre jusqu'à 7 000 MW en mer (Danish Energy Agency 1996)

¹¹ Notons que Zond avait récemment surpris le monde énergétique en remportant, à la suite d'un appel d'offres compétitif, un contrat de fourniture d'énergie à long terme avec la compagnie Northern States Power, au prix de seulement 3¢(US) du kWh (Windletter 1995).

¹² Soulignons aussi que Enron a récemment annoncé son intention de percer les marchés québécois et ontarien dès que ces derniers seront ouverts à la concurrence au détail (*The Gazette* 1997).

¹³ Cette entente avait pour but de concrétiser l'engagement d'Enron à exploiter de plus en plus les nouvelles filières renouvelables, en contrepartie de l'appui des groupes à l'achat par Enron de Portland General Electric, une compagnie de 3,2 MM\$ de l'État de l'Oregon.

Ces annonces et événements viennent s'ajouter à plusieurs autres pour signaler l'arrivée en force de la filière éolienne sur les marchés énergétiques.

D. Prévisions pour l'avenir

La taille et la nature du marché qu'occupera l'éolien à l'avenir dépendra en grande partie des gains technologiques et économiques continus, et des politiques d'appui des principaux pays et régions du monde.

1. Gains technologiques

De toute évidence, les gains technologiques continueront au cours des prochaines années. De nouveaux matériaux ultra légers pourraient être introduits sur le marché, alors que la taille des machines est censée augmenter de nouveau. Sans délaissier les machines de 500kW à 750kW, le marché accueillera de nouvelles machines de 1 000 kW et 1 500 kW, qui pourront faire baisser davantage les coûts unitaires dans des régions telles que le Québec, où les vents méritent de telles installations (Dunsky 1995).

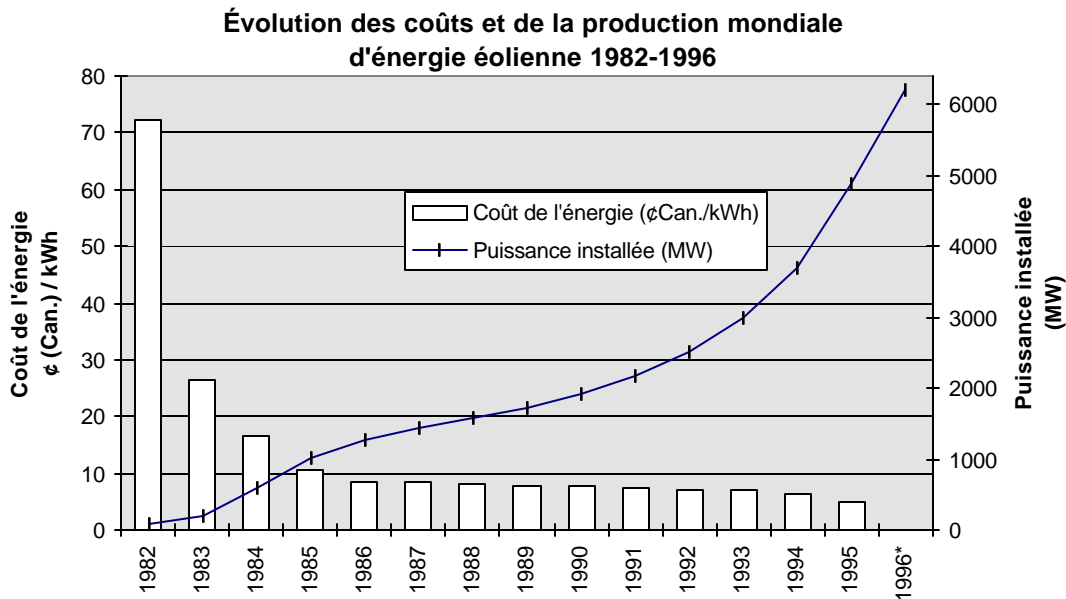
2. Gains économiques

En ce qui concerne les coûts, l'évaluation effectuée en avril 1995 par Hydro-Québec arrivait à 5,7¢/kWh pour un projet de 100MW en Gaspésie, ce chiffre s'élevant à 5,9¢ pour 500 MW (Hydro-Québec 1995a). Avec une correction pour l'hypothèse des vents¹⁴, ce chiffre ressemble à l'analyse que l'auteur du présent document a effectuée la même année (Dunsky 1995).

Toutefois, plusieurs facteurs rendent maintenant surannée cette évaluation, notamment les gains technologiques importants qui ont eu lieu depuis deux ans. Pour cette raison, Hydro-Québec réévaluera prochainement son analyse des coûts.

¹⁴ Cette analyse fut basée sur des vents de 8 m/s. Pourtant, les vents moyens de l'aéroport de Montjoli, site choisi entre autres pour la *faiblesse relative* de ses vents, semblent dépasser les 8,7 m/s à 50 mètres de hauteur, soit l'endroit de l'emplacement du moyeu des machines modernes. Cette différence est importante, et pourrait s'expliquer si au moment de l'analyse, Hydro-Québec pensait utiliser des machines de seulement 25 à 30 mètres de hauteur, ce qui ne serait plus le cas aujourd'hui.

Figure 2.



* Aucune estimation n'existe pour les coûts des projets en 1996.

Données¹⁵ compilées de PG&E 1993, AWEA 1996a, Gipe et Nies 1995, AWEA 1997a, Worldwatch 1997

En tenant compte des progrès prévisibles, l'analyse effectuée par l'auteur du présent rapport a prévu des coûts énergétiques de l'ordre de 4,3¢/kWh en 1998 et 4¢/kWh en 2001 (Dunsky 1996, p.287), soit des coûts très compétitifs avec les meilleures options hydroélectriques ou thermiques disponibles. Des prévisions d'autres auteurs et analystes laissent envisager des réductions de coûts par rapport aux coûts de 1995 de l'ordre de 20% à 35% (Dunsky 1995, p.16).

3. Marché mondial

Selon une analyse effectuée par l'Association américaine d'énergie éolienne, le marché d'énergie éolienne continua de croître, atteignant les 18 500 MW d'ici l'an 2005, pour une valeur de 24,5 milliards de \$ (\$CAN) (AWEA 1996b).

L'énergie éolienne aujourd'hui connaît le plus fort taux de croissance de toutes les filières énergétiques au monde (Worldwatch 1996, p.56). De toute évidence, les impératifs environnementaux et les politiques de promotion des nouvelles filières renouvelables s'accroîtront au cours des prochaines années. Le mélange de ces politiques et des gains technologiques continus placent la filière éolienne dans une position

¹⁵ Coût unitaire pour 1995 basé sur un contrat signé récemment pour un parc de 100 MW au Minnesota (3¢US/kWh majoré de 0,6¢/kWh pour tenir compte du crédit fiscal offert par le gouvernement fédéral). Soulignons que les vents au site de ce projet sont équivalents aux vents à Montjoli, soit 7m/s à 10m de hauteur.

particulièrement prometteuse, à l'égard d'un marché énergétique mondial de plus de mille milliards de dollars par an.

II. LE QUÉBEC

A. Le potentiel du Québec

Le Québec possède un des plus importants potentiels d'énergie éolienne au monde.

Selon une étude réalisée par le ministère fédéral de l'Énergie, des Mines et des Ressources (CANMET 1992), pleinement 50% du potentiel technique au Canada se retrouve au Québec. D'autres études confirment le statut particulier du Québec en cette matière, notamment des travaux réalisés par Grubb et Meyer (1993), Gipe (1995) et l'Association canadienne de l'énergie éolienne (1993, 1994, 1995), cette dernière étude le situant plutôt entre 60% et 80% du potentiel canadien. L'auteur du présent document a également publié lui-même une comparaison des vents de différents sites américains et danois avec des sites québécois, qui confirme à nouveau la nature particulière des vents du Québec (Dunsky 1996).

L'effet de la puissance des vents sur les coûts de l'énergie éolienne ne peut être sous-estimé. De plus, l'éolien et l'hydraulique se complètent de façon extraordinaire. À l'opposé de l'hydraulicité, les vents du Québec augmentent et diminuent proportionnellement avec le froid et, ainsi, la demande. Toutefois, les projets hydroélectriques au

Québec ont l'avantage de pouvoir stocker leur énergie dans d'immenses réservoirs. Le couplage de l'éolien au réseau hydroélectrique permet ainsi de « stocker » le vent dans les réservoirs, assurant ainsi une gestion optimale des deux ressources.

Répartition du potentiel éolien (technique) du Canada

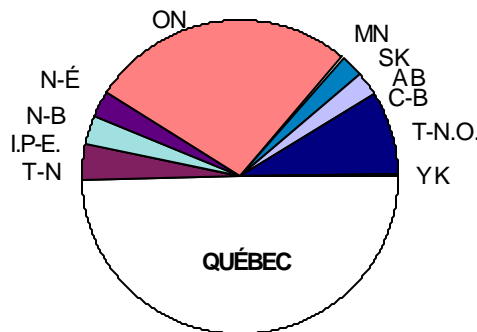
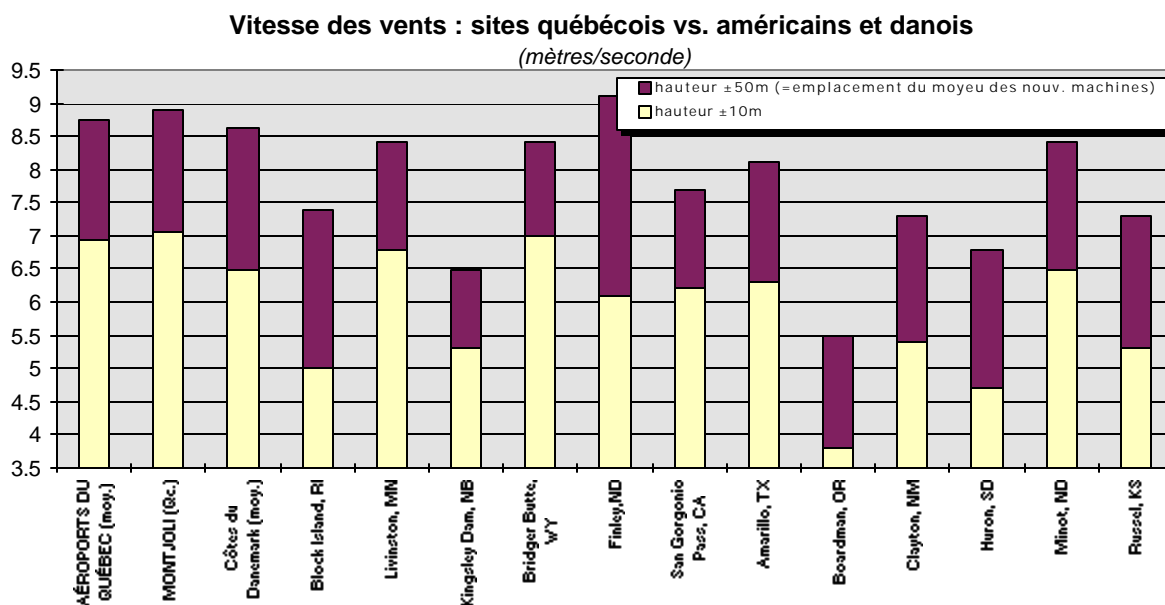


Figure 3.

CANMET 1992

Figure 4.



Données¹⁶ de CANMET 1992, Whamsley et Morris 1994, Gipe 1995

B. Retombées économiques potentielles au Québec

Le Québec est sans doute une région particulièrement apte à devenir un lieu stratégique pour la commercialisation et la fabrication des turbines et composants éoliennes. Une étude de l'INRS-Urbanisation souligne qu'une stratégie de développement accru de la filière éolienne au Québec permettrait d'attirer des usines de fabrication et d'assemblage, augmentant ainsi le contenu québécois de 40% à 77%. En outre, la croissance exceptionnelle que connaît l'énergie éolienne au niveau mondial offre un marché d'exportation des plus intéressants.

En fait, une stratégie de développement de la filière éolienne au Québec devra être axée sur trois types de possibilités :

- **Vente d'énergie au Québec.** Les emplois associés à la fabrication, l'assemblage, la construction, l'exploitation et l'entretien des parcs associés aux besoins du Québec ;
- **Vente d'énergie aux É.-U.** Les emplois associés à la fabrication, l'assemblage, la construction, l'exploitation et l'entretien des parcs situés au Québec, mais associés aux besoins

¹⁶ Données pour sites québécois à 50 mètres extrapolés des mesures à 10 mètres, selon la règle de puissance 1/7. Sites américains choisis pour considération par le Département américain d'énergie pour un programme d'installation d'éoliennes.

des É.-U. (pénétration des marchés américains réservés aux nouvelles filières renouvelables) ;
et

- **Vente de turbines et composantes éoliennes dans le monde.** Les emplois associés à la fabrication de pièces vendues sur le marché mondial, qui s'accroît au rythme de 20% à 25% par an (peut aussi inclure la construction, l'exploitation et/ou l'entretien, selon diverses formules commerciales)

À titre indicatif, l'étude de l'INRS-Urbanisation souligne que l'installation au Québec d'une industrie éolienne pourrait générer, pour les seules fins de l'exportation de turbines et composantes éoliennes, quelque 3 600 emplois/an au Québec.

Enfin, soulignons le cas du Danemark, où une stratégie ambitieuse de développement éolien a été mise sur pied dès 1979. Aujourd'hui, l'économie danoise bénéficie d'une industrie éolienne qui génère **plus de 9 000 emplois permanents** (Miljø & Energi Ministeriet 1996, p.42). Bien en route vers l'atteinte de l'objectif officiel que 10% de sa production électrique vienne de l'éolien d'ici l'an 2005, ce petit pays scandinave occupe déjà le premier rang du palmarès éolien. Ainsi, les fabricants danois d'éoliennes partagent entre eux 60% du marché mondial et génèrent des revenus d'exportations de 800 M\$ (\$CAN) par année (Idem. et AP 1997). Étant donné le régime des vents du Québec, et considérant le potentiel d'exportation extraordinaire qui s'ouvre présentement aux États-Unis, mais plus encore dans les pays en voie de développement, le Québec pourrait songer sérieusement à se doter d'une stratégie visant à faire de lui le Danemark de l'Amérique du Nord et des pays de la Francophonie.

C. Politique d'Hydro-Québec

Toutefois, le Québec a pris du retard dans le dossier de l'éolien, et d'autres régions du continent sont en train de se positionner avantageusement à cet égard. Soulignons en particulier le Minnesota, qui s'est déjà doté d'un plan pour l'installation de 425 MW d'ici cinq ans (ACÉÉ 1995, p.11), et le Texas, dont le plan original de 250 MW sera bientôt revu à la hausse (CEMM 1997b).

1. Engagements d'Hydro-Québec

Dans sa réponse à une des questions de la Commission de l'économie et du travail, Hydro-Québec (1997b) clarifie ses propres engagements en matière d'énergie éolienne pour les prochaines années :

- deux contrats totalisant 40,4 MW (sites en Gaspésie, 284 GWh/an) sont signés et pourront aller de l'avant si le promoteur obtient ses certificats d'autorisation à temps, soit en avril 1997 ;

- un contrat de 2,3 MW (aux Îles-de-la-Madeleine, 17 GWh/an) « fait face à certaines difficultés » — il n'est pas clair de quelle façon HQ entend procéder ;
- une entente de 2,1 MW (à Cap-Chat, 15 GWh/an) a été signée en 1994, mais la signature d'un contrat « a été reportée jusqu'à la fin de la Commission d'enquête sur les achats d'électricité par Hydro-Québec auprès des producteurs privés » ;
- un programme de mesure des vents est amorcé, qui permettra de petits projets de démonstration individuels pouvant totaliser jusqu'à un maximum de 20 MW ;
- un programme « quote-part » de 10 MW par an sur 10 ans réservés à la filière éolienne a été annoncé au Sommet de l'économie et de l'emploi de novembre 1996. Le programme n'a pas encore été lancé.

Hydro-Québec s'est donc engagé, pour l'instant, à ajouté un total d'entre 100 et 164,7 MW à son réseau d'ici l'an 2006 ou 2007.

2. Analyse de la stratégie d'Hydro-Québec

a. Prudence

Les engagements d'Hydro-Québec en matière d'énergie éolienne, s'ils se réalisent, sont une nette amélioration par rapport au passé. Toutefois, ils ne permettront probablement pas d'atteindre les potentiels de développement économique qu'offrent les ressources éoliennes du Québec.

La stratégie d'Hydro-Québec en est une de prudence. Les projets de démonstration, les limites de 10MW par an sur le programme d'achat de producteurs privés, et l'absence de volonté de poursuivre elle-même le développement de la filière, font état de cette prudence. Cette approche conservatrice est compréhensible dans la mesure où les choix de la société d'État se font uniquement sur la base des coûts directs (excluant ainsi les coûts environnementaux et sociaux), et surtout où le seul objectif est de répondre aux besoins énergétiques internes du Québec.

b. Possibilités économiques

Selon Hydro-Québec (1997b), le programme d'achats de 10 MW par an sur dix ans sera suffisant pour « maximiser les retombées manufacturières au Québec ». Une telle déclaration est douteuse.

La maximisation des retombées manufacturières au Québec repose sur : (1) un maximum de contenu québécois des éoliennes installées au Québec, ce qui passe notamment par l'emplacement d'usines de fabrication et d'assemblage ici ; (2) le nombre et la position concurrentielle des fabricants et

manufacturiers québécois; et (3) l'octroi aux usines québécoises, par leurs entreprises mères, des droits de vente sur des territoires donnés (ex.: Amérique du Nord, pays de la Francophonie, etc.).

À la limite, l'engagement d'Hydro-Québec d'acheter 10 MW par an sur 10 ans permettrait l'installation d'une usine d'assemblage au Québec, et peut-être même d'une usine de fabrication. Toutefois, étant donné les engagements d'autres pays et régions du monde, on peut douter de la probabilité qu'un total de 10 MW annuellement soit suffisant pour créer une véritable industrie éolienne au Québec, capable de vendre et même de prendre un rôle de leadership sur les vastes marchés d'exportation.

D. Mieux positionner le Québec

Dans la mesure où le Québec décide d'exploiter son potentiel éolien pour des fins notamment de développement économique et d'exportations, parmi d'autres avantages¹⁷, plusieurs options au-delà des engagements actuels d'Hydro-Québec devront être envisagés. Une combinaison des options suivantes peut être employée pour maximiser les retombées de la filière éolienne au Québec.

1. Intégration des externalités

La planification intégrée des ressources, méthode privilégiée par la nouvelle politique énergétique, stipule que le choix de ressources à développer doit se faire selon une analyse exhaustive des coûts et des risques économiques, sociaux et environnementaux de chaque option. Par la suite, on trouve le portefeuille de ressources qui minimise le plus possible l'ensemble de ces coûts et risques, qu'on appelle aussi « externalités ».

L'intégration systématique des externalités environnementales et sociales au sein du processus de planification pourrait avoir comme conséquence, comme cela a été le cas ailleurs en Amérique du Nord, de favoriser l'option éolienne. Toutefois, cette option ne permet pas de se fixer des objectifs précis.

2. Quotes-parts

On peut aussi atteindre les objectifs de la planification intégrée des ressources, en ce qui a trait à l'énergie éolienne du moins, par le biais d'un programme de quotes-parts.

¹⁷ L'énergie éolienne procure également des avantages nets en matière de protection de l'environnement et des ressources. En outre, les emplois associés à la filière éolienne sont de plus longue durée que ceux qui sont associés aux projets hydroélectriques, et la ressource éolienne est située principalement dans des régions du Québec n'ayant pas auparavant bénéficiées des retombées économiques de la production d'électricité (ex.: en Gaspésie).

Un tel programme vise à réserver une partie des sources additionnels auxquelles la société d'État fera appel, pour une filière ou groupe de filières particulières. Afin d'accélérer le développement éolien au Québec, tout en minimisant les risques financiers pour la société d'État, Hydro-Québec pourrait bonifier sa quote-part de 10MW/an sur 10 ans par un engagement à recourir à cette filière pour un certain pourcentage de ses besoins futurs, par exemple 40 % ou 60 %. Une telle politique réserverait ainsi un minimum de 10MW/an sur 10 ans, ainsi qu'un pourcentage fixe de tout besoin supplémentaire, à cette filière^{18,19}.

De cette façon, Hydro-Québec pourrait créer les conditions nécessaires pour vraiment maximiser les retombées associés à cette filière et appuyer le développement d'une industrie québécoise d'énergie éolienne, tout en minimisant les risques associés aux prévisions de la demande. Pour l'industrie, la combinaison d'une garantie d'achat minimum par Hydro-Québec et de la perspective de ventes supplémentaires pourrait suffire pour rendre le Québec un endroit attrayant pour l'installation d'usines et l'octroi de droits d'exportation de la technologie.

Soulignons toutefois que cette option n'est pas applicable dans le cadre d'un marché ouvert et concurrentiel au détail.

3. Marché de permis échangeables

Dans la mesure où le Québec choisit la voie de l'ouverture du marché du détail à la concurrence, un autre modèle, le marché de permis échangeables pour les nouvelles filières renouvelables (« *Renewable Portfolio Standard* »), ressemble aux quotes-parts et permet d'atteindre les mêmes objectifs avec autant sinon plus d'efficacité.

Le marché des permis échangeables, appliqué d'abord aux États-Unis pour diminuer les émissions de gaz sulfurique, crée d'abord une certaine quantité de permis qu'il faut détenir pour avoir le droit de poursuivre certaines activités. Dans le cas des énergies renouvelables, par exemple, l'on pourrait légiférer pour que tout producteur qui veut vendre au marché du détail doive soit assurer que 10% de ses ventes viennent de sources renouvelables, soit acheter des crédits, pour une même quantité d'énergie (10% de ses ventes), auprès d'un autre producteur qui, lui, utilise ces filières. Le prix de ces crédits est déterminé par le marché.

¹⁸ Soulignons que les quotes-parts ne doivent pas devenir des cadeaux. Ainsi, tout contrat devra passer par un processus d'appel d'offres public, lequel met plusieurs fabricants d'éoliennes en concurrence. L'industrie éolienne est composée de suffisamment de joueurs majeurs pour qu'une réelle concurrence puisse faire bénéficier les consommateurs québécois. Les résultats du récent appel d'offres au Minnesota sert de bon exemple.

Aussi, soulignons que l'objectif de pénétration du marché ne doit pas, par le biais d'un tel marché, se faire d'un seul coup. En effet, un tel marché peut être évolutif, prévoyant par exemple que 2% des ventes viennent de nouvelles filières renouvelables d'ici un an, 4% d'ici 3 ans, 6% d'ici 5 ans, 8% d'ici 7 ans et 10% d'ici 10 ans. Ainsi, les prix des crédits sur le marché demeureront à un niveau économique intéressant.

Enfin, soulignons que devant la restructuration des marchés de l'électricité aux États-Unis, plusieurs administrations songent présentement à la mise sur pied d'un tel marché. Ce modèle fait partie par ailleurs de plusieurs projets de loi, tant au niveau fédéral que des États, et présentés tant par des Républicains que par des Démocrates. Les taux semblent à ce moment varier entre 4% et 10%.

4. Tarification déterminative (« verte »)

La politique énergétique du Québec stipule qu'Hydro-Québec devra songer à mettre sur pied un programme de « tarification verte » visant la promotion de l'énergie éolienne (Gouvernement du Québec 1996b, p.48). Une telle tarification permet aux consommateurs de choisir de payer une prime, le cas échéant, pour être alimentés à partir d'énergie éolienne. Selon certains, l'exemple du papier recyclé démontre que des consommateurs sont prêts à payer plus cher en échange d'une plus grande protection de l'environnement.

Cette option ne serait pas en soi suffisante pour stimuler une véritable industrie éolienne au Québec, mais peut jouer un rôle dans le cadre d'une politique plus globale comprenant d'autres mesures particulières parmi celles qui sont décrites ici.

5. Facturation inverse

Tout comme la tarification verte, la facturation inverse ne peut pour l'instant jouer qu'un rôle marginal dans le cadre d'une stratégie plus globale visant à promouvoir efficacement la ressource éolienne. Toutefois, cette option ouvre des possibilités très importantes pour l'avenir.

La facturation inverse vise les consommateurs qui veulent s'alimenter à leur propre source d'électricité, en l'occurrence l'énergie éolienne²⁰. Puisque l'éolien est une ressource intermittente, ces consommateurs devront toujours dépendre du réseau principal pour une partie de leurs besoins. En outre, leur éolienne pourra produire de l'électricité à des moments où le consommateur n'en a pas besoin.

¹⁹ Soulignons également qu'un tel mécanisme peut être appliqué dans le cadre d'une des options les plus intéressantes pour la restructuration du marché de l'électricité québécois, soit la création d'une bourse unique.

La facturation inverse vise à optimiser de telles situations, en assurant que le courant supplémentaire produit par l'éolienne est retourné au réseau principal, et que le consommateur-propriétaire de cette installation reçoit un crédit pour l'énergie qu'il aurait ainsi vendu au service public. Cette politique existe aujourd'hui dans plus de 20 États américains, et le prix payé au consommateur-producteur est équivalent soit aux coûts évités de la compagnie, soit à ses tarifs (Wan 1996). Soulignons qu'une telle politique ne s'applique qu'à une partie très marginale de la population, mais qui pourrait s'accroître au cours des prochaines années.

6. Crédits fiscaux

Aux États-Unis et dans de nombreuses régions du monde, des crédits fiscaux sont offerts aux entreprises œuvrant dans la fabrication, l'assemblage, la construction et l'exploitation de nouvelles filières renouvelables, et en particulier de l'éolien. Cette option pourrait être intéressante, notamment pour encourager l'installation d'industries au Québec et leur participation sur les marchés de l'exportation. Évidemment, cette option s'adresse aux législateurs et non à Hydro-Québec.

²⁰ Les politiques de facturation inverse sont généralement limitées aux petites sources d'énergie renouvelable, excluant ainsi la cogénération industrielle au gaz naturel, par exemple, ou encore la production d'hydroélectricité par l'Alcan.

III. CONCLUSION

La filière éolienne a évolué de façon considérable depuis ses débuts en 1979. Des progrès technologiques ont permis des réductions importantes des coûts de la filière, et des progrès continus offrent l'espoir de diminutions supplémentaires, possiblement de l'ordre de 20% à 35%.

Entre-temps, le marché de l'énergie éolienne a connu une croissance spectaculaire. De 90 MW installés il y a 15 ans, elle compte aujourd'hui bien au-delà de 6000 MW en service. Ces dernières années ont par ailleurs vu une expansion sans précédent, la puissance mondiale ayant triplé en cinq ans, et ayant doublé depuis seulement deux ans et demi. L'énergie éolienne occupe aujourd'hui le premier rang de toutes les filières énergétiques au monde, en terme de taux de croissance annuelle de sa part de marché.

Au-delà de la technologie, la ressource éolienne du Québec est abondante. Entre 50% et 80% du potentiel d'énergie éolienne au Canada se retrouve au Québec, et les vents du Québec se comparent très favorablement aux meilleurs sites américains et danois.

Cette ressource impressionnante pourrait être exploitée en vue de maximiser les retombées pour le Québec. Toutefois, la politique actuelle d'Hydro-Québec, quoique améliorée par rapport au passé, n'est pas suffisante à cet égard, et un ensemble de mesures devront être prises pour assurer que les retombées potentielles soient réalisées.

Grâce à une stratégie claire et efficace, le Danemark, ce petit pays scandinave, est aujourd'hui devenu le géant mondial de l'énergie éolienne, occupant 60% du marché mondial et générant près de 10 000 emplois et près d'un milliard de dollars en exportations par année. En élaborant et en adoptant un ensemble de moyens précis et ciblés, le Québec pourrait devenir le Danemark de l'Amérique du Nord ou des pays de la Francophonie, étant donné l'abondance sur son territoire d'une ressource énergétique parmi les plus prometteuses au monde.

PARTIE 3

L'ÉNERGIE

SOLAIRE PHOTOVOLTAÏ QUE

[version papier seulement]

Photo : Maison suisse, avec système solaire-photovoltaï que intégré directement au toit

I. LA TECHNOLOGIE ET LES MARCHÉS

A. Historique

L'effet photovoltaïque a été démontré pour la première fois par Edmond Becquerel alors qu'il travaillait au laboratoire de son père en France en 1839 (Green 1993). Toutefois, ce n'est qu'en 1954, à la suite de l'établissement d'une industrie moderne de semi-conducteurs, que les Laboratoires Bell ont mis à l'œuvre les premiers modèles de production d'électricité photovoltaïque. Peu après, et grâce à leur faible poids et leur haute fiabilité, les systèmes PV sont devenus l'option privilégiée pour les besoins énergétiques des vaisseaux spatiaux. Ce créneau a permis à la technologie photovoltaïque de se bâtir, de s'améliorer et, surtout, de réduire ses coûts jusqu'à exorbitants.

Les progrès du solaire-photovoltaïque ont continué, sans que le monde énergétique n'en prenne vraiment connaissance, jusqu'à la première crise mondiale de l'énergie au début des années 70. Cette crise pétrolière, et la deuxième qui surviendrait quelques années plus tard, ont soudainement aidé à attirer l'attention des décideurs politiques et énergétiques sur les sources « alternatives », dont en premier lieu le solaire-PV. C'est ainsi que d'importants budgets de recherche-développement ont été débloqués dans un effort pour assurer que les prix des PV diminuent encore plus rapidement, ce qui était nécessaire pour que cette filière occupe un jour une part importante du marché mondial de l'électricité.

La fin des années 70 et le début, aux États-Unis, de l'ère Reagan, ont amené un désengagement et, qui plus est, un désintérêt généralisé pour l'état d'avancement de la science photovoltaïque. Néanmoins, malgré une baisse considérable des budgets de recherche-développement, des progrès importants ont depuis eu lieu, et les PV ont commencé à percer dans des créneaux d'envergure, dont les calculatrices de poche (22% des ventes aux É.-U. en 1989), les systèmes de communication (21%), les bouées et les systèmes de transport (9%) et les stations de pompage (6%) (Kelly 1993).

L'évolution de technologies comme le solaire-photovoltaïque repose sur la percée d'une succession de créneaux, qui font à la fois augmenter la production et diminuer les coûts grâce aux économies d'échelle. Aujourd'hui, alors que les systèmes PV sont moins dispendieux et plus efficaces que jamais, ils atteignent systématiquement de nouveaux marchés et se rapprochent rapidement des marchés principaux, soit pour les besoins de base en électricité.

B. État actuel

1. Définition

La technologie photovoltaïque que transforme la lumière — ou le « rayonnement solaire » — directement en électricité. En effet, l'intensité énergétique des rayons solaires est suffisante pour modifier la structure atomique d'un matériau semi-conducteur et générer ainsi un courant électrique (HQ 1992c). Les cellules photovoltaïques produisent du courant continu (CC).

Différentes façons existent pour convertir l'énergie du soleil en électricité. Dans un premier temps, deux catégories distinctes peuvent être identifiées. Une première catégorie technologique est celle des « concentrateurs », qui utilisent des miroirs et d'autres matériaux pour concentrer les *rayons directs* sur le semi-conducteur préféré. La deuxième catégorie est composée de techniques « plates » (soit en feuilles, soit posées en couches minces), qui utilisent tout le rayonnement solaire disponible (« rayonnement solaire global »), quoique plus diffus, pour produire l'électricité. Dans le présent rapport, nous traiterons uniquement des techniques en feuilles ou en couches minces, étant donné que le Québec est particulièrement bien doté de rayonnement solaire global (lumière), même en dépit de températures relativement froides.

Actuellement, plus de 75% des modules photovoltaïques vendus sont composés de cellules en silicium mono ou poly cristallin (TN Conseil 1995). Soulignons que les autres matériaux, par exemple le cadmium ou l'indium, posent certains risques pour la santé et l'environnement. De toute évidence, les techniques à base de silicium sont les plus prometteuses.

2. Gains technologiques

L'efficacité de conversion ces cellules en silicium a grandement progressé au cours des deux dernières décennies. Par exemple, alors que les dépôts en couches minces à base de silicium amorphe (a-Si) connaissaient une efficacité de 5% en 1994 (ASES 1994), une firme américaine a annoncé en octobre 1996 avoir atteint 14,5% avec le même matériel (PR Newswire 1996a).

De plus, des progrès technologiques ont permis d'améliorer de façon importante les techniques de découpe, où d'importantes pertes de matière première se produisent (TN Conseil 1995). Ainsi, les techniques de dépôts en couches minces permettent de réduire les quantités de matière première plus de 10 fois. Elles permettent également d'utiliser des matériaux beaucoup moins purs, et donc beaucoup moins chers. Enfin, et surtout, elles permettent l'automatisation des procédés par la conception de chaînes de montage et d'assemblage, ce qui permet des baisses considérables des coûts de production (*Ibid*).

3. Gains économiques

Grâce aux gains technologiques décrits ci-dessus, la rentabilité économique de l'option photovoltaïque que s'améliore rapidement. Alors que le solaire-PV coûtait environ 80 000 \$ (US) par kW en 1975, il n'en coûtait que 4 100 \$ en 1994 (Worldwatch 1997). Plus récemment, une percée importante semble avoir eu lieu, alors qu'une coentreprise formée par Amoco (pétrolière multinationale) et Enron (le premier producteur indépendant d'électricité au monde) a remporté, à la suite d'un appel d'offres public, un contrat pour 5 MW d'énergie solaire-photovoltaïque que, au prix de seulement 1 750 \$ (US) par KW (PV Connections 1995). Ce projet utilise également la technologie des dépôts en couches minces à base de silicium amorphe (a-Si), et se fait dans le cadre de l'établissement par Amoco-Enron d'une usine de fabrication qui produira 10 MW de couches photovoltaïques a-Si annuellement.

Aujourd'hui la technologie photovoltaïque a suffisamment progressé pour que ses coûts dépendent essentiellement des économies d'échelle associées aux chaînes automatisées en usine. Les gains continus dépendront ainsi de l'évolution du marché pour cette ressource électrique.

C. Marché

Après celui de l'énergie éolienne, le marché du solaire-photovoltaïque que s'accroît à un rythme plus rapide que toute autre technologie de production d'électricité, soit à un taux de croissance annuelle d'environ 20%.

1. Pénétration systématique des marchés

La pénétration par le solaire-PV du marché énergétique passe par plusieurs étapes, ou créneaux. La première étape est constituée de produits « hors-réseau », par exemple les calculatrices ou les systèmes de communication. Cette étape est déjà franchie, et a servi de tremplin au lancement d'une véritable industrie photovoltaïque.

La deuxième étape vise les besoins traditionnels d'électricité, mais pour des endroits et situations particuliers. Notamment, le solaire-PV peut être économique aujourd'hui pour certaines applications dans des réseaux isolés, principalement dans les pays du Sud (électrification rurale), mais également dans les pays du Nord (en évitant des coûts importants associés à la construction de nouvelles lignes de transport ou de génératrices au diesel). Cette même étape comprend l'utilisation du solaire-PV de façon distribuée

(ou « disséminée »), soit principalement sur les toits des consommateurs eux-mêmes, ou encore de façon décentralisée, soit principalement en appui au réseau local de moyenne tension.

La troisième étape touche à la demande de pointe et à la demande de climatisation. Dans certains cas et pour certains besoins, le PV peut déjà être économique pour ces besoins précis, afin d'éviter le recours à des centrales coûteuses pour quelques heures par année en hiver, ou pour répondre à une demande qui augmente de pair avec la production d'électricité du solaire-PV. Enfin, la dernière étape est la production de masse, pour les besoins en électricité de tous ordres et à tout endroit.

Aujourd'hui, le solaire-PV a franchi la première étape, a percé la seconde, et amorce les troisième et quatrième.

2. Projets précis (quelques exemples)

À travers le monde, plusieurs projets permettent d'envisager une croissance continue et même accélérée de la filière du solaire-photovoltaïque.

a. Engagements en Arizona

Dans le cadre de la restructuration des marchés de l'électricité, l'État de l'Arizona a récemment annoncé qu'il mettrait en place un système de permis échangeables pour assurer que 0,5% de la production totale d'électricité de l'État vienne de source solaire d'ici l'an 1999, et 1% d'ici l'an 2001. L'équivalent au Québec représenterait 185 MW d'énergie solaire en 1999 et 370 MW en 2001.

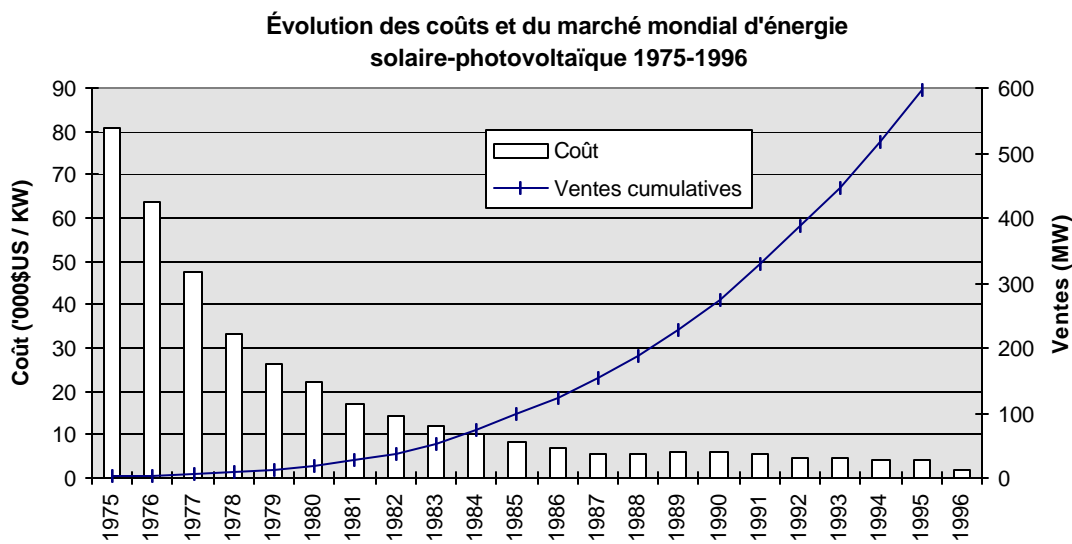
b. Centrales en Inde

En Inde, pays qui avait auparavant une politique visant à installer 25 MW d'énergie solaire-PV, l'État du Rajasthan a récemment signé un contrat avec Enron/Amoco Solar pour l'installation d'une centrale de 50 MW d'énergie solaire-PV (PR Newswire 1996c). Ces 50 MW s'ajoutent aux 17 MW déjà en production en Inde (AWEA 1997c).

c. Financement en Californie

Dans le cadre de la restructuration de son marché de l'électricité, la Californie a décidé d'accorder 540 millions de \$ (US) au développement accru des nouvelles filières renouvelables. Dans sa proposition initiale rendue publique le 16 janvier 1997, la Commission de l'énergie de la Californie, qui aura le dernier mot sur la question, recommande de réserver 20 % de cette somme, soit l'équivalent de près de 150 M\$ (\$CAN), aux technologies d'énergie solaire-PV (Independent Power Report 1997). Plusieurs projets

Figure 5.



Données²¹ compilées de Worldwatch 1997 et PV Connections 1995

solaire-PV existait déjà en Californie, dont une centrale de 2 MW et un programme très réussi d'installation du solaire-PV sur les toits résidentiels, à Sacramento (UPVG 1996a).

d. Maisons solaires au Japon

Au Japon, l'entreprise de construction de maisons Misawa a récemment annoncé qu'elle vendrait dès cette année des « maisons solaires », munies de panneaux solaires-PV de Enron/Amoco Solar. Misawa prévoit vendre 1 200 maisons solaires dès cette année, et s'est engagée à étendre le service au secteur commercial et industriel.

e. Zone d'entreprises solaires au Nevada

La Corporation for Solar Technology and Renewable Resources a été lancée en 1995 pour faire de l'ancien site de tests nucléaires, situé dans le désert du Nevada, une zone réservée aux projets solaires. L'entreprise vise l'installation à moyen terme de 100 MW d'énergie solaire-PV. Un premier contrat a déjà été confié à Enron-Amoco, pour l'installation de 10 MW (PR Newswire 1996b).

f. La Banque mondiale en Afrique

²¹ Coût unitaire pour 1996 basé sur un contrat entre Amoco-Enron et Pacific Gas & Electric Company pour 5 MW, au prix de 1,75\$(US)/watt.

La Banque mondiale a récemment lancé un programme visant à assurer que les ménages ruraux en Afrique soient dotés d'au moins une ampoule électrique pour la lecture la nuit. Ainsi, 200 000 systèmes d'éclairage au solaire-PV ont fait l'objet d'un contrat avec une firme privée. En outre, la Banque vient de lancer un programme de prêts de 145 millions de \$ par année pour aider les pays non industrialisés à développer et installer les nouvelles filières d'énergie renouvelable (UPVG 1996e).

g. Centrale électrique à Hawaii

Enron/Amoco Solar a également signé un contrat pour construire une centrale solaire-PV de 4 MW dans l'État d'Hawaii (UPVG 1996c et PR Newswire 1996b)).

h. Centrales électriques en Italie

La société d'État italienne ENEL a construit une centrale d'électricité photovoltaïque de 3,3 MW à Serre. Une deuxième centrale de 0,6 MW, appartenant à la société ENEA, est exploitée à Mont Aquilone depuis 1986. (IEA 1994)

i. Mille toits allemands

Un projet lancé en 1990 par le gouvernement allemand, nommé « 1000 toits », cherchait à intégrer les couches photovoltaïques à mille toits résidentiels au pays. Le projet a dû être renommé lorsque le nombre de toits recouverts a atteint près du triple de l'objectif initial.

Évidemment, ce ne sont que quelques-uns des projets présentement en cours. À titre d'exemple, en 1993 plus de trente compagnies d'électricité américaines comptaient déjà des installations d'énergie solaire-photovoltaïque.

D. Prévisions pour l'avenir

Quatre facteurs importants touchent le marché futur de l'énergie solaire-photovoltaïque :

- les gains technologiques, sur le plan de l'efficacité de conversion, mais aussi des techniques de découpe ;
- les coûts, une fonction de la technologie, mais également de l'évolution du marché (croissance, risques) ;
- les politiques nationales et régionales, qui influenceront sur la vitesse de la pénétration des marchés énergétiques par le solaire-PV ; et

- la croissance des besoins énergétiques, notamment dans les pays non industrialisés tels que ceux de l’Afrique, de l’Amérique latine, l’Inde et la Chine.

1. Gains technologiques

La filière du solaire-photovoltaïque que a connu des gains technologiques importants depuis deux ou trois décennies. Toutefois, la filière n’a toujours pas atteint sa maturité technologique, et plusieurs progrès, surtout sur le plan de l’efficacité de conversion, devront continuer au cours des prochaines années. En particulier, les modules à base de silicium devront devenir encore plus efficaces, et certains prévoient des taux de conversion de 29% à 30%, soit environ le double du taux actuel.

2. Gains économiques

Les coûts de la technologie photovoltaïque que devront continuer à baisser, et permettre de produire de l’électricité pour aussi peu que 4,5¢(US)²² du kilowattheure (Zweibel et Barnett 1993). Ce déclin des prix dépendra en grande partie de la production annuelle, qui devra atteindre environ 500 MW avant que l’on puisse profiter pleinement des économies d’échelle. Soulignons que si les ventes mondiales continuent de croître au même rythme qu’aujourd’hui, la production annuelle atteindra les 500 MW d’ici 8 ans.

3. Politiques nationales et régionales

Les politiques nationales et régionales de promotion de l’énergie solaire-photovoltaïque que sont difficiles à prédire. Toutefois, les indices sont très favorables en ce qui a trait à l’accélération des efforts gouvernementaux en matière de solaire-PV.

Depuis quelques années, des politiques de facturation inverse, dont l’objectif principal est l’accélération de l’utilisation du solaire-PV, se répandent partout dans le monde occidental. Ainsi, plus de 22 États américains ont aujourd’hui adopté de telles politiques, de même que le Japon, l’Allemagne, la Suisse et d’autres pays. L’Ontario a récemment inauguré son propre programme de facturation inverse.

En outre, des changements importants affectent aujourd’hui les politiques énergétiques des institutions multinationales, telle la Banque mondiale, qui délaissent le financement de mégaprojets en faveur de projets énergétiques décentralisés et distribués, donc de projets d’énergie solaire-photovoltaïque que.

²² Soulignons que dans toute comparaison des coûts de centrales traditionnelles d’aujourd’hui avec les coûts du PV, on doit tenir compte des coûts de production, de transport et de distribution que le solaire-PV évite. Ainsi, les coûts évités d’aujourd’hui pour Hydro-Québec, incluant la production, le transport et la distribution, sont d’environ 6,7¢/kWh (\$CAN).

Par ailleurs, alors que les enjeux environnementaux deviennent de plus en plus importants et reconnus, et que des traités internationaux concernant, par exemple, les changements climatiques et la biodiversité, sont signés, les pays seront appelés à adopter des politiques structurelles et économiques favorisant les options telles que le solaire-PV.

Enfin, soulignons que les restructurations des marchés aux États-Unis, au Canada et en Europe (voir document thématique sur la restructuration) pourraient avoir un impact positif sur l'option solaire-PV, dans la mesure où (1) des prélèvements permettent la poursuite de la recherche, développement et démonstration, (2) la structure tarifaire reflète la ventilation des coûts énergétiques par tranche d'activité (production, transport, distribution), (3) les coûts en rade (« stranded costs ») des vieilles centrales sont récupérés grâce à un prélèvement sur la distribution, et (4) la facturation inverse est permise. À ce stade-ci, tout indique que ces quatre éléments feront partie de la plupart des modèles de restructuration des marchés de l'électricité.

4. Croissance des besoins des pays non industrialisés

De toute évidence, la croissance des besoins en électricité des pays non industrialisés sera à l'avenir le moteur de la croissance de la production et de la consommation mondiales d'énergie solaire-photovoltaïque.

L'énergie solaire-PV est en fait particulièrement bien adaptée aux besoins de la plupart de ces pays, où les réseaux de transport d'électricité sont absents de l'environnement d'environ deux milliards d'habitants, et où l'absence d'infrastructures routières convenables rend exorbitants les coûts de construction de grands projets.

Les principaux besoins des pays non industrialisés qui pourront accélérer les ventes de solaire-PV au cours des prochaines années sont notamment :

- **eau** — pompage d'eau pour consommation et pour irrigation
- **santé** — frigorification de vaccins dans les hôpitaux et centres de santé communautaire
- **éducation** — éclairage pour les études la nuit; pour certains besoins à l'école
- **communications** — électricité pour la téléphonie, la télévision et la radio

Les exemples suivants (UPVG 1996d,e) illustrent la nature de ces besoins et des marchés qui s'ouvrent présentement au solaire-photovoltaïque :

- plus de 175 000 villages dans le monde reçoivent déjà leur électricité de source solaire-photovoltaïque ;

- le programme de prêts aux nouvelles filières renouvelables de la Banque mondiale, son projet d'installation de 200 000 systèmes d'éclairage PV en Afrique ;
- le programme du gouvernement de l'Inde, qui prévoit offrir de l'électricité de base à 100 000 villages ruraux à partir principalement du solaire-PV, et qui prévoit installer des téléphones solaires-PV dans chacun des 500 000 villages du pays ;
- le programme mexicain, qui prévoit électrifier quelque 60 000 villages par le solaire-PV d'ici l'an 2000 ;
- le programme zaïrois d'utilisation du solaire-PV pour les hôpitaux ; à titre d'exemple, à l'hôpital Bulape, qui dessert plus de 50 000 patients par année, les salles d'opération, les appareils de radiographie, les salles d'attente, les salles des patients, les laboratoires et la climatisation fonctionnent tous entièrement à l'électricité solaire-photovoltaïque ;
- le programme guatémaltèque d'installation de systèmes solaire-PV sur les toits de résidences, par le service public ; et
- au Maroc, en l'absence de programmes précis, les panneaux solaire-PV sont vendus dans les bazars et les marchés en plein air, à côté de tapis, de poêles et de marmites.

Soulignons enfin que selon la Banque mondiale, les pays non industrialisés investiront plus de mille milliards de dollars dans la production d'électricité d'ici l'an 2000.

5. Prévisions

La croissance de la production et de la consommation d'énergie solaire-photovoltaïque dépendra de nombreux facteurs, et il est difficile de prévoir avec précision son évolution future. Cela est d'autant plus vrai que plusieurs s'attendent à des « sauts » technologiques, dont ni la nature ni le moment peuvent être prévus.

Néanmoins, certaines tentatives de prévision ont été effectuées. Maycock (repris dans Thomas 1994), par exemple, a tenté une prévision de 20 ans, soit de relativement courte durée étant donné que la percée des marchés par le solaire-PV est censée continuer bien au-delà de l'an 2010. Selon Maycock, le marché du solaire photovoltaïque s'accroîtra par un facteur de 20 à 100 entre 1990 et 2010. Le tableau suivant résume cette prévision.

Tableau 4. Prévisions du marché mondial du solaire-photovoltaï que 1990-2010 (en MWc)

SECTEUR DE MARCHÉ	Scénario	1990	2000	2010
Produits de consommation (calculatrices,...)	<i>Business as Usual</i>	16	50	150
	Scénario accéléré	16	70	500
Résidentiel hors-réseau (aux É.-U.)	<i>Business as Usual</i>	3	10	50
	Scénario accéléré	3	20	100
Rural hors-réseau (mondial)	<i>Business as Usual</i>	6	8	200
	Scénario accéléré	6	15	600
Communications	<i>Business as Usual</i>	14	30	150
	Scénario accéléré	14	40	200
Systèmes commerciaux PV/diesel	<i>Business as Usual</i>	7	20	100
	Scénario accéléré	7	50	1000
Résidentiel relié au réseau	<i>Business as Usual</i>	1	1	100
	Scénario accéléré	1	5	600
Centrales électriques	<i>Business as Usual</i>	1	5	50
	Scénario accéléré	1	10	1000
TOTAUX	<i>Business as Usual</i>	48	124	800
	Scénario accéléré	48	210	4000

Aussi, soulignons que dans sa prévision à long terme (1990-2060), la pétrolière Shell prévoit que le solaire-PV occupera, vers le milieu du prochain siècle, une part de marché de l'ordre de 300 exajoules, soit 3×10^{20} joules, ou *l'équivalent de presque toute la production énergétique mondiale d'aujourd'hui* (Shell 1994).

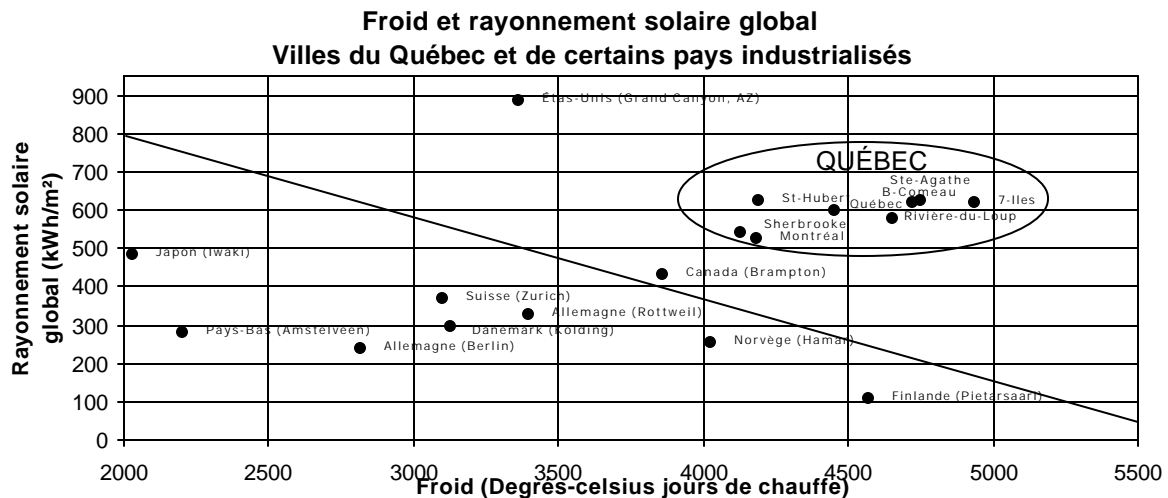
II. LE QUÉBEC

A. Le potentiel du Québec

1. Gisement solaire du Québec

Contrairement aux perceptions, la chaleur n'est pas nécessairement indicative du potentiel solaire d'une région. En effet, alors que la chaleur moyenne (mesurée en degrés-jours) est particulièrement faible au Québec, le rayonnement solaire global (RSG), la vraie mesure du potentiel d'énergie solaire-photovoltaïque, y est relativement élevé.

Figure 6.



Données cumulatives pour la période hivernale (1^{er} octobre au 31 mars)
Données de Turmel (1995)

Comme le démontre le graphique ci-dessus, le potentiel d'énergie solaire-PV du Québec est plus élevé que celui d'un nombre important de villes de pays industrialisés, dont la majorité ont toutefois des climats beaucoup moins froids que le notre. Soulignons par ailleurs que les données présentées représentent la quantité totale d'énergie, mesurée en kWh, qui tombe sur un mètre carré *durant l'hiver*, soit durant les six mois d'octobre à mars.

Pour l'année longue, le RSG des principales villes du Québec varie entre 1465 kWh/m² (Val d'Or) et 1606 kWh/m² (St-Hubert). Le tableau qui suit présente une comparaison du rayonnement solaire global annuel de différentes villes du monde.

Tableau 5. Rayonnement solaire global (RSG) annuel - certaines villes du monde et villes du Québec

Ville	RSG	Ville	RSG
1. San Diego (Californie)*	2110	9. Québec	1486
2. Honolulu (Hawaii)*	2000	10. Montréal	1466
3. Miami (Floride)	1870	11. Val d'Or	1465
4. Athènes (Grèce)	1678	12. Manaus (Brésil)	1430
5. Saint-Hubert	1606	13. Paris (France)	1303
6. Pise (Italie)*	1547	14. Zürich (Suisse)*	1220
7. Sainte-Agathe	1539	15. Tokyo (Japon)*	1190
8. Baie-Comeau	1509	16. Hambourg (Allemagne)*	1083

** Régions ayant des installations ou politiques solaire-PV importantes
Données de TN Conseil (1995) et Boes et Luque (1993)*

Soulignons que le potentiel solaire-PV de Saint-Hubert est moins de 20 % *inférieur* à celui de Honolulu (États-Unis), 8% *supérieur* à celui de Manaus (Brésil) et près de 50 % *supérieur* à celui de Hambourg (Allemagne).

2. Bénéfices du froid

De plus, soulignons un fait intéressant de la technologie solaire-PV : la puissance maximale produite par une cellule PV diminue avec l'augmentation de la température (de 0,3% à 0,5% par °C) (TN Conseil 1995, p.8). Ainsi, le climat froid du Québec augmente la productivité du solaire-PV, et améliore sa position vis-à-vis les autres villes du monde présentées au tableau précédant.

3. Espace occupé

Le rayonnement solaire global (RSG) relativement élevé du Québec lui permet d'envisager la production d'énergie de source solaire-photovoltaïque. Sur la base des données produites par TN Conseil pour Hydro-Québec, on peut déduire la superficie qu'occuperaient des cellules solaires-PV pour produire une quantité particulière d'électricité.

Ainsi, et à titre indicatif, *pour répondre à 100 % de la demande d'électricité* du Québec d'aujourd'hui, des systèmes solaires-PV efficaces à 8,5% devront être installés sur une surface totale de quelque 1 100 km², soit 7% de la surface totale qu'occupent présentement les installations d'Hydro-Québec. Avec une efficacité de conversion de 14,5%, soit le taux de conversion récemment atteint, 650 km² sont requis, alors que des cellules à 20% efficaces nécessiteraient seulement 470 km² pour répondre à la demande totale en

énergie des Québécois en 1995. Ce dernier chiffre représente 3% de la surface présentement occupée par les installations d'Hydro-Québec.

Ces chiffres n'ont une valeur qu'indicative. En réalité, l'apport du solaire-PV devra être bonifié par un apport de puissance, le soleil n'étant pas disponible à tout moment de l'année.

Par ailleurs, soulignons que, contrairement aux filières traditionnelles, l'espace qu'occuperait le solaire-PV n'entre pas en conflit avec d'autres utilisations du territoire, étant constitué principalement de toits résidentiels et commerciaux.

4. Potentiel économique

Il est difficile de cerner avec précision la quantité d'énergie de source solaire-photovoltaïque qui pourrait être économique au Québec dans un avenir prévisible. Toutefois, suivant le modèle de pénétration des marchés présenté à la page 30 du présent rapport, on peut identifier les utilisations en dehors du réseau principal, par exemple aux Îles-de-la-Madeleine ou dans le Nord du Québec, comme étant des marchés à cibler à court terme, et qui mériteraient donc une étude plus approfondie.

À plus long terme, le développement du marché québécois de l'énergie solaire-PV dépendra en grande partie de l'évolution des coûts (qui devront continuer à chuter au cours des prochaines années), ainsi que des politiques que le Québec et Hydro-Québec adopteront. Nous abordons ces questions vers la fin du présent rapport, à la section II.C.

B. Politique d'Hydro-Québec

Mise à part son utilisation de systèmes hybrides diesel/PV pour certains besoins de télécommunications (ce qui n'est pas négligeable), la politique d'Hydro-Québec en matière de solaire-PV semble être limitée à la veille technologique. En effet, les renseignements et rapports fournis à la Commission de l'économie et du travail par la société d'État ne font aucune mention de cette technologie, et ce ni dans les documents traitant des nouvelles filières renouvelables, ni dans ceux traitant de la recherche-développement.

L'approche d'extrême prudence de la société d'État peut s'expliquer par l'état actuel des coûts du solaire-PV, qui demeurent trop élevés pour être rentables dans la plupart des utilisations au Québec. Cependant, cette logique ignore la nature même de l'histoire et de l'évolution continue du solaire-PV.

En effet, le solaire-PV est en pleine évolution, autant sur le plan technologique qu'économique, et plusieurs s'attendent à des « bonds » technologiques importants au cours des prochaines années. De tels bonds

pourraient arriver à n'importe quel moment et avoir des répercussions de premier ordre sur les coûts et donc la rentabilité du solaire-PV au Québec.

Advenant une telle situation, une politique de veille technologique serait insuffisante pour permettre à Hydro-Québec et à la société québécoise de profiter pleinement des occasions offertes. Toutefois, une politique relativement modeste, mais comprenant notamment des projets de démonstration et d'évaluation, et intégrant certains mécanismes de marché précis (voir ci-après), pourrait permettre au Québec de tirer profit de tels progrès.

Comme effet secondaire, une telle politique peut également appuyer la pénétration par des industries québécoises de certains créneaux au niveau mondial, et notamment dans les climats nordiques. En particulier, mentionnons les pays de l'Europe de l'Est, où les besoins de production additionnelle d'électricité connaîtront une forte croissance au cours des prochaines décennies, notamment avec le vieillissement de centrales nucléaires et la croissance économique.

C. Mieux positionner le Québec

Plusieurs options s'offrent pour mieux positionner le Québec face à des progrès attendus et inattendus dans le domaine du solaire-PV. Ces options devront être combinées pour maximiser leur effet.

1. Recherche-développement-démonstration

La première option impliquerait qu'une plus grande part des activités de recherche-développement-démonstration soit consacrée à la filière du solaire-PV. Notamment, certaines nouvelles techniques, dont les bardeaux PV, les fenêtres PV et d'autres matériaux standard qui intègrent directement les cellules photovoltaïques, devront prioritairement faire l'objet de projets de démonstration en climat froid.

2. Facturation inverse

La facturation inverse (voir partie II (éolien), section II.D.4) est un mécanisme de marché permettant d'offrir aux consommateurs intéressés à s'alimenter en énergie solaire-PV la vraie valeur économique de leur investissement. En effet, en permettant au consommateur de vendre son énergie excédentaire sur le réseau principal, l'amortissement de son investissement peut se faire de façon plus rapide, et la compagnie d'électricité reçoit de l'électricité qu'elle aurait autrement dû acheter ailleurs ou produire elle-même.

3. Location des équipements

La facturation inverse pourra se faire de concert avec un programme de location des équipements solaire-PV aux consommateurs désireux d'en devenir éventuellement les propriétaires. De tels programmes existent à de nombreux endroits ailleurs en Amérique du Nord, par exemple en Ontario, et peuvent constituer un « coup de pouce » pour l'installation de systèmes photovoltaïques par les consommateurs eux-mêmes.

4. Crédits fiscaux

Des crédits fiscaux peuvent être un outil permettant d'améliorer la rentabilité de systèmes solaire-photovoltaïques pour les consommateurs désireux de les acheter. De tels crédits peuvent se justifier par le bénéfice social créé par les « pionniers », soit ces citoyens qui ne désirent pas attendre la diminution progressive des coûts et qui sont dès aujourd'hui prêts à installer des systèmes qui peuvent servir à la fois de modèles et de tests réels pour la société dans son ensemble.

5. Autres

D'autres outils et mécanismes visant à accélérer les nouvelles filières d'énergie renouvelable devraient également être envisagés dans le contexte d'une stratégie solaire. Ainsi, l'intégration systématique des externalités au sein des processus décisionnels, la tarification déterminative (« verte »), les quotes-parts et l'établissement d'un marché de permis échangeables peuvent tous constituer de puissants outils pour faire avancer la connaissance et l'utilisation au Québec de la filière de l'énergie solaire-photovoltaïque. Ces mécanismes sont décrits dans le présent document à la partie 2 (éolien), section II.D.4.

RÉFÉRENCES

- ACÉÉ. 1994. *Perspectives sur la technologie éolienne*, 34pp. 18 novembre.
- ACÉÉ. 1995. *Mémoire présenté dans le cadre du débat public sur l'énergie*, 14pp. Août.
- AELN. 1996. "Activate Solar Two Demonstration Project (Daggett,CA)". Communiqué de presse conjoint du U.S. Department of Energy et Southern California Edison Company, format courrier électronique. 4 juin.
- Alliance for Affordable Energy, American Council for an Energy Efficient Economy, American Rivers, American Solar Energy Society, American Whitewater Affiliation, Biomass Energy Advocates, Citizen Action, Citizen Action Coalition of Indiana, Center for Energy Efficiency and Renewable Technologies, Conservation Law Foundation, Environmental Defense Fund, Environmental Law & Policy Center of the Midwest, Iowa SEED Coalition, Minnesotans for an Energy-Efficient Economy, National Consumer Law Center, Natural Resources Defense Council, New England FLOW, Northwest Conservation Act Coalition, Nuclear Information and Resource Service, Project for Sustainable FERC Energy Policy, Public Citizen, RENEW Wisconsin, River Alliance of Wisconsin, Solar Energy Industries Association, Southern Environmental Law Association Center, Sustainable New-Wealth Industries, 20/20 Vision, Union of Concerned Scientists. 1997. *A Federal Agenda for Electric-Industry Restructuring*. 13 février.
- American Solar Energy Society (ASES). 1994. *Progress in Solar Energy Technologies and Applications - An Authoritative Review*, 64pp. Janvier.
- American Wind Energy Association (AWEA). 1996a. *1995 Worldwide Wind Energy Production*. Juin.
- Associated Press (AP). 1997. "Danish Windmills in Lead", par internet. 2 janvier.
- Association canadienne d'énergie éolienne (ACÉÉ). 1993. *Mémoire présenté à la Commission de l'économie et du travail de l'Assemblée nationale - Plan de développement 1993-1995 d'Hydro-Québec*, 69pp. Février.
- AWEA. 1996b. "Worldwide Wind Capacity Surpasses 5,000 MW Mark--And Continued Growth is Expected" (communiqué). 12 avril.
- AWEA. 1997a. "Wind Energy Continues as World's Fastest-Growing Energy Source" (communiqué). 28 janvier.
- AWEA. 1997b. "Enron Acquires Zond, Launches Enron Renewable Energy Corp." (communiqué). 6 janvier.
- AWEA. 1997c. "Wind Power Moves Ahead of Planners in India" (communiqué). 3 février.
- Ballard Power Systems Inc. 1996. *Ballard Power Systems Inc. Annual Report 1995 - Powering the Future*.
- Boes, Eldon C. et A. Luque. 1993. "Photovoltaic Concentrator Technology", 361-401, dans T.B. Johansson et al. (eds.), *Renewable Energy - Sources for Fuels and Electricity*, (Island Press: Washington, DC), 1160pp.
- Canadian Energy Markets Monthly (CEMM). 1997a. "U.S. D.O.E Draft Legislation Would Give Utilities Choice to Compete Head-to-Head or to Broker Power for Customers", Karen Morris, internet. 16 janvier.

- Cavanagh, James E., J.H. Clarke et R. Price. 1993. "Ocean Energy Systems", 513-547, dans T.B. Johansson et al. (eds.), *Renewable Energy - Sources for Fuels and Electricity*, (Island Press: Washington, DC), 1160pp.
- CEMM. 1997b. "U.S. Southwestern Utilities will Test the Public's Sensitivity to the Total Resource Cost of Electricity", Karen Morris, internet. 12 février.
- Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie (CANMET). 1992. *Canadian Wind Energy Technical and Market Potential*, R. Rangi, J. Tremplin, M. Carpentier, D. Argue, 88pp. Octobre.
- Danish Energy Agency (Ministry of Environment and Energy). 1996. *Energy Solutions in Denmark - Clean and Efficient*, p.10. Avril.
- De La Quill III, Pascal, D. Kerney, M. Geyer et R. Diver. 1993. "Solar Thermal Electric Technology", 213-296, dans T.B. Johansson et al. (eds.), 1993, *Renewable Energy - Sources for Fuels and Electricity*, (Island Press: Washington, DC), 1160pp.
- Dunsky, Philippe. 1995. "Énergie éolienne", 1-19, dans ENJEU, *Comparaison technico-économique des options éolienne et solaire-passive avec l'hydroélectrique*, pour Hydro-Québec, 44pp. Août.
- Dunsky, Philippe. 1996. "L'énergie du vent : évolution passée et future et prévision des coûts", 276-291, dans *Energy Studies Review*, Vol.7, No.3.
- Expert Group on Renewable Energy Technologies (EGRET). 1996. *The Development and Use of Renewable Energy Technologies*. Préparé dans le cadre d'un livre blanc du gouvernement de l'Australie sur la politique énergétique. Printemps, 59pp.
- Gipe, Paul et N. Nies. 1995. *Aperçu sur la production mondiale d'électricité par aérogénérateurs*, pour le Débat public sur l'énergie. 11 mai.
- Gipe, Paul. 1995. *Wind Energy Comes of Age* (New York: John Wiley & Sons), 536pp.
- Gouvernement du Québec. 1996a. *Rapport de la Table de consultation du Débat public sur l'énergie*.
- Gouvernement du Québec. 1996b. *L'énergie au service des Québécois — une perspective de développement durable*, 108pp.
- Green, Martin A. 1993. "Crystalline and Polycrystalline Silicon Solar Cells", 337-360, dans T.B. Johansson et al. (eds.), *Renewable Energy - Sources for Fuels and Electricity*, (Island Press: Washington, DC), 1160pp.
- Grubb, Michael J. et N.I. Meyer. 1993. "Wind Energy: Resources, Systems, and Regional Strategies", 157-212, dans T.B. Johansson et al. (eds.), 1993, *Renewable Energy - Sources for Fuels and Electricity*, (Island Press: Washington, DC), 1160pp.
- Houston Chronicle. 1996. "Amoco/Enron in Japanese Venture to Sell Rooftop Modules", par internet. 4 mai.
- Hydro-Québec. 1980. *Une stratégie pour la décennie 80*, 98pp. 16 décembre.
- Hydro-Québec. 1992a. *Suivi du Plan de développement 1990-1992, horizon 1999 - rapport particulier 'La production privée d'électricité'*.
- Hydro-Québec. 1992b. *Plan de développement - proposition*, 47-48.
- Hydro-Québec. 1992c. "Les utilisations nouvelles : le photovoltaïque", dans *Prospectons*, vol. 1, no 5. Août.
- Hydro-Québec. 1995a. *Coût de revient d'un parc d'éoliennes au Québec*.

- Hydro-Québec. 1995b. "La comparaison des modes de production de l'électricité", 17-84, dans Gouvernement du Québec, *Cahier d'information sur le débat public - La production d'électricité*, 131pp.
- Hydro-Québec. 1997a. Communication écrite de madame Francine Beaudry, conseillère Relations gouvernementales. 20 février.
- Hydro-Québec. 1997b. *Les nouvelles filières d'énergie renouvelable*. 6 février.
- Independent Power Report. 1997. "IPP Group Hits CEC Plan for Spending \$540-Million for Renewable Projects", 19-20. 24 janvier.
- International Energy Agency (IEA). 1994. *PV Power*. Septembre.
- Kelly, Henry. 1993. "Introduction to Photovoltaic Technology", 296-336, dans T.B. Johansson et al. (eds.), *Renewable Energy - Sources for Fuels and Electricity*, (Island Press: Washington, DC), 1160pp.
- Legault, Richard. 1996. Communication téléphonique avec le promoteur du projet éolien de 100 MW en Gaspésie. Août.
- Les Affaires\$. 1997. "Boralex effectue une émission de 30 M\$ et regroupe ses actions", François Riverin, p.84. 22 février.
- Miljø& Energi Ministeriet. 1996. *Energy 21 - The Danish Government's Action Plan for Energy 1996*, 41-42. Juin.
- National Renewable Energy Laboratory (NREL). Octobre 1993. *Profiles in Renewable Energy - Case Studies of Successful Utility-Sector Projects*.
- Pacific Gas and Electric Company (PG&E). 1993. *The Altamont Wind Plant Case Study*.
- Palmerini, Civis G., 1993, "Geothermal Energy", 549-591, dans T.B. Johansson et al. (eds.), *Renewable Energy - Sources for Fuels and Electricity*, (Island Press: Washington, DC), 1160pp.
- PR Newswire. 1996a. "New World Record Sustains U.S. Leadership in Photovoltaic Technology", par internet. 28 octobre.
- PR Newswire. 1996b. "Amoco/Enron Solar Wins Contract to Build Largest Photovoltaic Power Plant in the United States", par internet. 28 octobre.
- PR Newswire. 1996c. "Amoco/Enron Solar Signs Contract for World's Largest Photovoltaic (Solar Electric) Power Plant", par internet. 7 mars.
- PV Connections. 1995. "Amoco/Enron PV Proposal at Under 2\$/Wp", de l'internet. Automne.
- PV-Compact. 1993. *Photovoltaic Collaborative Market Project to Accelerate Commercial Technology*. 3 octobre.
- Reuter. 1996. "Novel Italian Electric Plant Looks to the Sun", par internet. 16 février.
- Shell Selected Paper. 1994. *Energy for Development*, par Peter Kassler. Novembre.
- The Gazette (Montreal). 1997. "Look Out, Here Comes Enron", Andrew McIntosh, G1-G3. 22 février.
- Thomas, Raye. 1994. *Global Markets in Photovoltaics : Opportunities for Canadian Industry*.
- TN Conseil. 1995. *Énergie photovoltaïque pour la production d'électricité*, pour Hydro-Québec, 19pp. Avril.
- Turmel, Jean-François. 1995. *Les concepts avancés en efficacité énergétique*.
- United States General Accounting Office (GAO). 1993. *Electricity Supply - Efforts Under Way to Develop Solar and Wind Energy - Report to the Chairman, Subcommittee on*

Investigations and Oversight, Committee on Science, Space, and Technology, House of Representatives, 80pp. Avril.

- UPVG. 1996b. "The Extent of the TEAM-UP Program in the United States" (communiqué). Printemps.
- UPVG. 1996c. "Amoco and Enron Propose to Sell Solar Electricity to Hawaiian Utility" (communiqué). Printemps.
- UPVG. 1996d. "Solar Industry Growing Due to New Market Trends" (communiqué). Printemps.
- UPVG. 1996e. "Demand for Solar Electricity Soars in Developing World" (communiqué). Printemps.
- Utilities Photovoltaic Group (UPVG). 1996a. "Sacramento Utility Pioneers Use of PV" (communiqué). Printemps.
- Wan, Yih-huei. 1996. *Net Metering Programs (draft #2)*, for National Renewable Energy Laboratory. 24 septembre.
- Windletter. 1995. "NSP Awards Next 100-MW Wind Project to Zond Systems", auteur inconnu, vol. 22, no.7. Juillet.
- Worldwatch Institute. 1996. *Vital Signs - The Trends That Are Shaping Our Future*, par Lester R. Brown, C. Flavin et H. Kane. (New York: W.W. Norton & Co.), 169pp.
- Worldwatch Institute. 1997a. *Worldwatch Database Disk*, fichier "Energy - Solar.wk1", mise à jour de janvier 1997.
- Worldwatch Institute. 1997b. *Worldwatch Database Disk*, fichier "Energy - Wind.wk1", mise à jour de janvier 1997.
- Zweibel, Ken et A. M. Barnett. 1993. "Polycrystalline Thin-Film Photovoltaics", 437-481, dans T.B. Johansson et al. (eds.), *Renewable Energy - Sources for Fuels and Electricity*, (Island Press: Washington, DC), 1160pp.