
Forum

Forum provides an opportunity for commentary on articles published in ESR and for the expression of opinion on any other subject that relates to energy problems. Contributions are invited. (For further information see inside back cover.)

L'Énergie du vent : évolution passée et future et prévision des coûts

PHILIPPE DUNSKY

*Visquem de l'aire del cel
(Vivons de l'air du ciel), proverbe catalan*

(There is) good reason to expect that in the next 10 to 12 years,... wind will produce the cheapest electricity available from any resource
Electric Power Research Institute

*Moi, je travaille avec le vent qui est la respiration du bon Dieu
le meunier dans Lettres de mon moulin par Alphonse Daudet*

Introduction

Depuis ses premiers balbutiements en Europe, la technologie éolienne est devenue une source importante de production d'énergie. Aujourd'hui, plus de 3.600 mégawatts (MW) de puissance éolienne est installée à travers le monde, soit un peu plus que l'équivalent d'un projet comme Grande-Baleine (qui aurait coûté plus de 13 milliards \$Cdn de 1992), alors que quelque 3.500 MW à 12.000 MW risquent de s'ajouter à cela d'ici seulement cinq à dix ans.

L'utilisation accrue de cette source d'énergie est le résultat de progrès technologiques majeurs. Notamment, la diminution du poids des pales, l'utilisation de tours tubulaires, l'augmentation de l'espace balayé du rotor, la hausse importante du placement du moyeu et une meilleure compréhension et connaissance des vents, font toutes en sorte que l'énergie éolienne prend tran-

L'auteur est directeur du Centre HÉLIOS - Stratégies énergétiques et environnementales une société indépendante à but non lucratif formée afin d'analyser, d'élaborer et de disseminer des stratégies énergétiques et environnementales adaptées aux impératifs du XXI^e siècle. L'auteur tient à souligner l'appui financier d'Hydro-Québec pour la réalisation de ce texte.

quillement sa place comme source principale pour les besoins énergétiques croissants du monde entier.

Au Québec, un premier projet éolien de taille est censé produire ces premiers kilowatt-heures d'ici un an. Le contrat liant Hydro-Québec et Énergie Éolienne Kenetech, prévoit à cet effet la construction de quelque 350 machines éoliennes, d'une puissance installée de 335 kilowatts (kW) chacune, dans trois "parcs" gaspésiens. À moins de nouveaux développements entre temps, le Québec deviendra alors, avec le Minnesota, le deuxième plus important producteur d'énergie éolienne en Amérique du nord, après la Californie.

Mais de nombreuses questions demeurent à l'égard du potentiel éolien du Québec. L'énergie éolienne a-t-elle atteint son sommet technologique? Sinon, jusqu'où les progrès continueront-ils? Quelle place l'éolien peut-il occuper au Québec, où l'abondance de rivières puissantes est reconnue et exploitée?

Le texte suivant vise à démontrer le grand intérêt que représente l'énergie éolienne pour le Québec. Je traiterai notamment de l'évolution de la technologie au fil des siècles, de son état actuel, du potentiel québécois et, de façon très succincte, des impacts environnementaux et sociaux appréhendés. De plus, le texte tentera d'émettre une hypothèse concernant l'évolution du coût de l'énergie éolienne — suite à des progrès technologiques prévisibles — au cours des dix prochaines années.

Cette évaluation démontre qu'en dépit des grands progrès récents, la technologie éolienne cache encore quelques surprises. De par l'utilisation de meilleurs matériaux et une augmentation progressive de la taille des machines, le vent a encore beaucoup d'énergie à nous offrir. Au Québec cette énergie, tout comme celle cachée dans nos rivières, est particulièrement abondante.

Bref historique

Depuis que les Égyptiens utilisèrent l'énergie du vent pour remonter le Nil à contre courant, on ne cesse de chercher des façons pour exploiter plus efficacement cette ressource à la fois puissante et impressionnante. C'est en 1180, en Normandie, que les moulins à vent firent leur première apparition. Durant le siècle suivant, cette "technologie" se répandit à travers l'Europe, de la France à l'Angleterre, ensuite aux Flandres, à l'Allemagne, au Danemark pour enfin arriver, au début des années 1300, en Pologne. Selon les historiens français, quelques 500.000 moulins à vent étaient installés et en opération en Europe au cours du 19e siècle, alors que le même nombre de moulins se retrouvait alors à travers la Chine. Aux États-unis, l'arrivée de l'âge industriel mettra en péril la survie même des moulins à vent, tout comme celle des bateaux à voile. À quelques exceptions près, l'utilisation de l'énergie du vent à des fins mécaniques et de transport disparaîtra par la suite (voir figure 1).

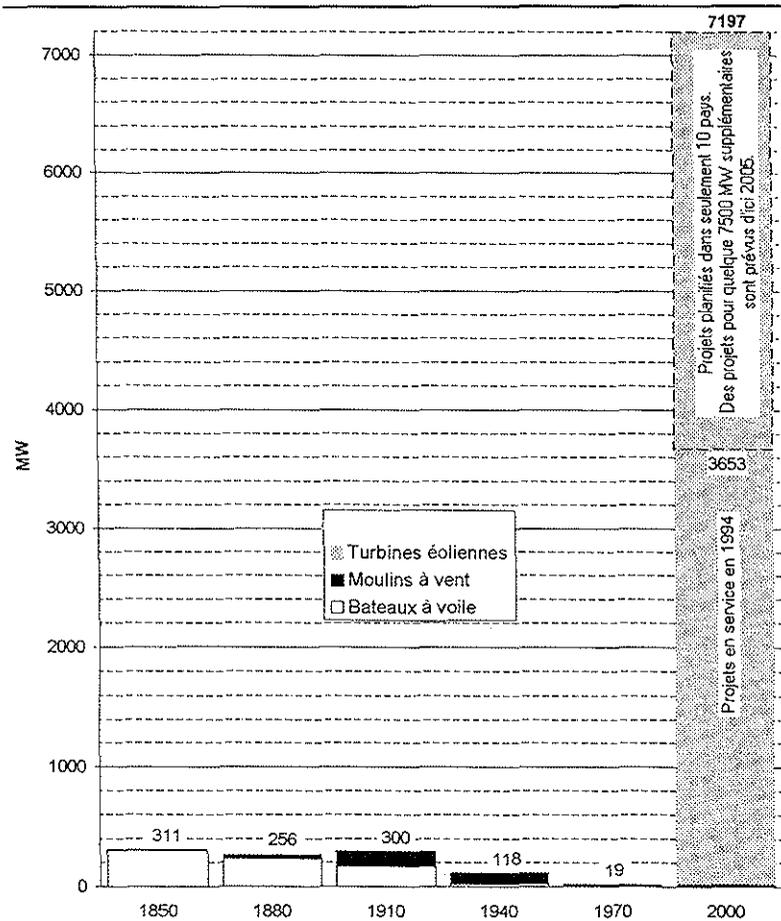


Figure 1: Évolution de l'utilisation du vent, 1850-2000

Sources: Gipe (1995b), Gipe et Nies (1995), AWEA (1995), Davidson (1995)

Mais au début des années 1970, aux prises avec une première crise mondiale de l'énergie, le monde occidental se met une fois de plus à investir dans cette ressource prometteuse. Pour la première fois, l'Allemagne se dote d'un budget de recherche et développement (R&D) pour l'énergie éolienne qui atteignit les 25 millions \$US en 1981. Un an plus tôt, le budget américain de R&D éolien avait atteint sa propre pointe, soit quelque 65 millions \$. Ce sont ces initiatives, couplées à des engagements importants d'achats de cette technologie notamment par la Californie, qui furent le fer de lance nécessaire pour repartir l'industrie éolienne telle qu'on la connaît aujourd'hui.

Les améliorations techniques et technologiques qui en résultèrent furent importantes. Dès 1979, suite à l'arrivée, l'année précédente, de crédits d'impôts californiens, des compagnies se sont jointes à la course pour construire de plus en plus de machines. Petites au début (on commençait avec des turbines de 10 à 30 kW), leur taille a connu une croissance progressive au cours

des années 1980, grimpant jusqu'à 300 kW et même 500 kW à la fin de la décennie (voir figure 2).

Depuis 1990, on assiste à une tendance mondiale vers la croissance accrue des tailles des machines éoliennes les plus avancées. Partant de 500 kW en 1990, celles-ci grimpèrent à 550 kW en 1992, à 600 kW en 1993, à 750 kW en 1994 et, enfin, à 1.000 kW cette année. Des machines de 1,5 MW seront commercialement disponible depuis le début de cette année (voir tableau 1).

Mais ce n'est pas que la taille qui a augmenté; l'efficacité des machines conçues pour exploiter l'énergie du vent est aujourd'hui quelque dix fois plus importante qu'elle ne l'était au début du siècle (voir tableau 2). Dû à des améliorations dans le design aérodynamique, le contrôle mécanique et le poids des matériaux (voir tableau 3), c'est cette efficacité qui fait de l'énergie éolienne une source moderne et compétitive.

État actuel

Aujourd'hui, l'exploitation de l'énergie éolienne est en pleine croissance, non seulement en Amérique du nord, mais plus encore en Europe. De plus, les pays non-industrialisés et, plus particulièrement l'Inde, s'engagent eux aussi dans cette voie.

En 1994, l'énergie du vent a produit 6 terawatt-heures (TWh) d'électricité à travers le monde (environ 3.500 MW de puissance installée), dont 47% provenant de la Californie et 34% divisés également entre l'Allemagne et le Danemark. Mais ce constat ne peint pas le plein portrait de l'état de l'énergie éolienne au monde. Ce sont plutôt les récents engagements de nombreux pays et régions à utiliser des quantités importantes de cette source d'énergie, qui reflètent sa réalité prometteuse.

Partant de 100 MW cette année, les Pays Bas, le pays avec la plus grande densité population/surface habitable à l'exception du Bangladesh, vise 800 MW d'ici l'an 2000, soit 10% de sa production totale d'électricité. En Allemagne, l'état du Lower Saxony atteindra les 1.300 MW d'ici dix ans, alors que dans un autre état, Schleswig Holstein, 1.800 MW sont soit déjà en service, soit en attente des autorisations finales (déjà, la place qu'occupe l'éolien dans le bilan énergétique de cet état est passée de 0,4% en 1988 à 6% en 1995). La puissance éolienne californienne devrait doubler à plus de 3.000 MW d'ici l'an 2000 si l'agence réglementaire ré-approuve le résultat d'un processus d'appel d'offres compétitif. Dans l'état d'Iowa, on attend le feu vert pour construire 105 MW immédiatement. Au Minnesota, la Northern States Power compte ajouter 415 MW à son réseau d'ici 2002. L'Irlande vient d'approuver près de 75 MW d'énergie éolienne. La Russie s'apprête à acheter 2.400 MW. En Inde, l'année 1994 voyait la production éolienne tripler, de 100 MW à 300 MW, et on s'attend à ce que 500 MW soient installés en 1996 et jusqu'à 1.200 MW d'ici 2000. En Espagne, on devra atteindre les

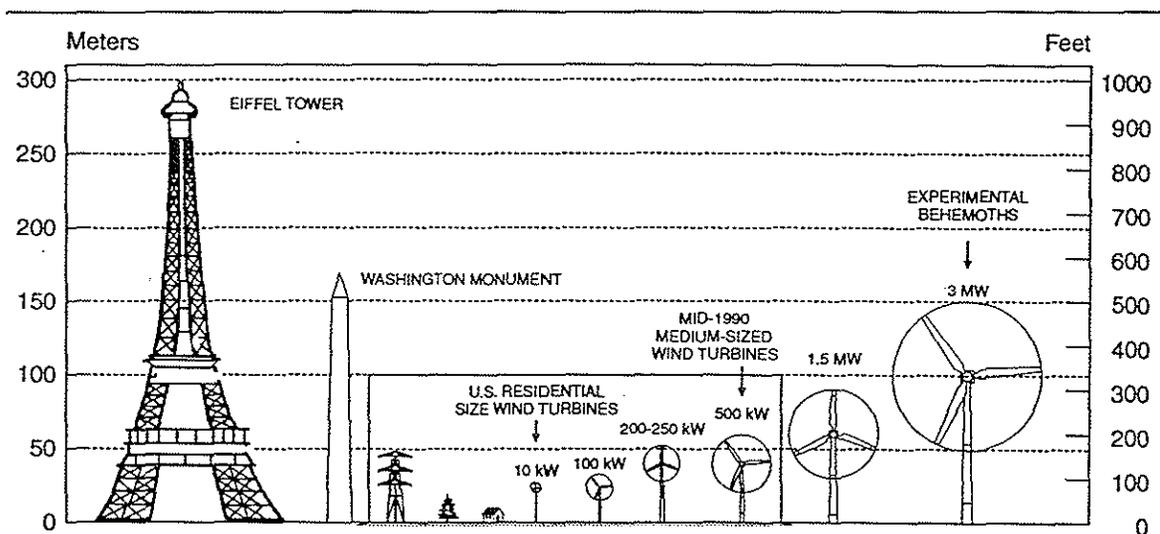


Figure 2: Comparaison visuelle des tailles des machines (tirée de Gipe (1995a))

Tableau 1: Les nouvelles machines à vent (adapté de Milborrow (1995))

Manufacturier et turbine	Pays	Puissance (kW)	Rotor (m)	Hauteur du moyeu (m)	nombre de pales	date de mise en marché
HMZ Windmaster	PB	≈ 50	43,4	48,0	2	juillet 1991
HSW 750	DE	750	46,0	55,0	3	novembre 1993
Bonus 750	DK	800	50,0	50,0	3	octobre 1994
Nordex N52	DE	1.000	52,0	60,0	3	février 1995
Elkraft 1000	DK	1.000	50,0	55,0	3	septembre 1993
Enercon E-55	DE	1.000	55,0	60,0	3	septembre 1995
Nedwind 50	PB	1.000	52,0	40,0	2	mars 1994
Nordic 1000	SE	1.000	53,0	58,0	2	septembre 1995
RES 1 MW	AN	1.000	50,0	45,0	3	1996
Tacke 1 MW	AN	1.000	60,0	60,0	3	fin 1995
WEG 1000	AN	1.000	50,0	--	2	début 1996
HMZ Windmaster 1300	PB	1.300	45,0	60,0	2	décembre 1993
Nordtank NTK 1500	DK	1.500	60,0	60,0	3	automne 1995
Vestas V60	DK	1.500	57,0/63,0	60,0	3	novembre 1995

100 MW en 1996 (83 MW sont déjà en service), alors que la Grèce produira vraisemblablement plus de 400 MW d'ici 5 ans. Le Texas a donné l'autorisation pour l'installation de 250 MW, alors que l'Angleterre s'apprête à dépasser les 500 MW sous peu. Le Danemark, comptant déjà 500 MW en 1994, compte tripler sa propre production afin d'atteindre 1.500 MW d'ici 10 ans. Enfin, la Chine a annoncé en 1995 qu'elle vise l'installation de 1.000

Tableau 2: Efficacité des machines à vent (adapté de Gipe (1995b))

<i>Machine à vent</i>	<i>Diamètre</i>	<i>Puissance</i>
Moulin à vent hollandais	30 m	30 kW
Turbine éolienne moderne (taille équiv.)	30 m	300 kW
Machines à pales multiples "Brush"	17 m	12 kW
Turbine éolienne moderne (taille équiv.)	17 m	75-100 kW
"Aermotor"	5 m	0,5 kW
Turbine éolienne moderne (taille équiv.)	5 m	5-6kW

Tableau 3: Avantages et désavantages des modèles 1.000 kW et plus ("multi-mégawatts")

<i>Pays industrialisés</i>		<i>Pays non-industrialisés</i>	
<i>Avantages</i>	<i>Désavantages</i>	<i>Avantages</i>	<i>Désavantages</i>
<ul style="list-style-type: none"> • vents assez forts pour tirer profit • pales beaucoup plus légères • location de terres (\$) • main-d'oeuvre (\$) • matériel: pales (\$) • matériel: tours (\$) • matériel: fondations (\$) • espace visuel sauvegardé • délais d'obtention d'autorisations 	<ul style="list-style-type: none"> • nécessité de grues "géantes" (\$) • fiabilité des pales 	<ul style="list-style-type: none"> • — 	<ul style="list-style-type: none"> • vents pas assez forts • poids trop important pour les sols • poids et dimensions trop importantes pour les infrastructures routières • manque d'accès à la machinerie lourde (grues géantes)

MW éoliens d'ici 5 ans. De plus, de nombreux autres pays considèrent à l'heure actuelle le développement de quantités importantes d'énergie éolienne.

Enjeux-clés pour l'avenir de l'éolien

Certains enjeux techniques et technologiques détermineront la place offerte aux éoliennes au Québec comme ailleurs. Les paragraphes qui suivent offrent une discussion de ces enjeux qui sont résumés au tableau 3.

Taille

Voilà possiblement une des plus importantes questions pour l'avenir de la filière éolienne. Alors que certains croient qu'un diamètre de 50 mètres (m) et une puissance de 500 kW sont des limites qui ne peuvent être dépassées, d'autres voient un avenir prometteur dans des machines "multi-mégawatts," ou 1 MW et plus. Il semble que les deux auront raison.

Pour les pays non-industrialisés, là où la plus importante croissance aura lieu, les plus petites machines (200 kW à 300 kW) semblent représenter une puissance optimale et ce, pour plu-

sieurs raisons. Premièrement, les pays non-industrialisés se retrouvent généralement dans des régions peu venteuses, ce qui demande l'utilisation d'éoliennes à plus petite échelle (les grandes turbines ne sont utiles que pour les sites plus venteux). Deuxièmement, les sols et les infrastructures routières seront souvent incapables de supporter les dimensions et le poids des multi-mégawatts. Et troisièmement, la disponibilité de grues dites "géantes", nécessaires pour l'entretien de ces grandes machines, est difficile à garantir dans ces pays.

Mais pour les pays industrialisés, où les vents sont souvent assez élevés pour tirer profit efficacement des multi-mégawatts (comme dans le cas du Québec), celles-ci peuvent s'avérer l'option la plus économiquement et socialement rentable. Il est vrai que certains aspects de l'utilisation des multi-mégawatts coûtent plus cher qu'ils en économisent. Par exemple, les grues utilisées pour l'entretien d'une turbine d'un mégawatt coûtent plus du double de celles qu'on utiliserait pour un 500 kW. De plus, certains risques augmentent avec l'utilisation des multi-MW, notamment en ce qui concerne la fiabilité des pales. Mais les économies d'échelle peuvent être d'autant plus importantes, comme l'ont vu les Danois et Hollandais, pionniers de l'utilisation de ces machines.

De telles économies d'échelle s'expliquent par plusieurs facteurs. Premièrement, le coût d'achat ou de location des terres diminue. Deuxièmement, le coût de la main-d'oeuvre pour une machine d'un mégawatt sera vraisemblablement moins élevé que pour deux machines de 500 kW. Troisièmement, des économies dues à l'utilisation réduite de matériaux, notamment pour les pales, les tours et leurs fondations, réduiront d'autant plus les coûts unitaires. Et quatrièmement, des pales de plus en plus légères (voir tableau 4) permettront de bénéficier de la pleine avantage qu'offrent des plus grandes machines. Enfin, notons que l'utilisation des multi-mégawatts réduirait l'espace visuel relatif occupé par cette filière, ce qui offre des bénéfices sociaux importants. Ce dernier fait pourrait aussi avoir un effet bénéfique sur les délais nécessaires à l'obtention des autorisations gouvernementales.

En général, il semble raisonnable de croire que dans le cas du Québec, où la vitesse moyenne des vents est particulièrement élevée, l'utilisation de machines 1 MW+ s'avérerait l'option la plus économiquement rentable. À cet égard, la compétition entre manufacturiers est intense, et on pouvait s'attendre à leur arrivée sur le marché mondial avant la fin de l'année 1995 (voir tableau 1).

Poids

Le poids des pales des nouvelles machines éoliennes a baissé sensiblement depuis les premières versions. Aujourd'hui, les pales d'un rotor de 60m de diamètre pèsent environ 10 tonnes métriques, comparé à des pales de même taille pesant 20 tonnes

Tableau 4: Poids relatif des pales à travers les générations technologiques et temporelles (adapté de Gipe (1995b))

Génération	Technologie	masse/ surface /pale (kg/m ²)	Changement (vs. année précédante) [cumulatif]	Matériel
début des années 80	à fibre de verre	2,0 - 3,0 (moy.: 2,5)	(-) [-]	polyester renforcé de fibre de verre
fin des années 80	à fibre de verre	1,5 - 3,0 (moy.: 1,75)	(-30%) [-30%]	polyester renforcé de fibre de verre
début des années 90	à fibre de verre	1,0 - 1,5 (moy.: 1,25)	(-29%) [-50%]	polyester renforcé de fibre de verre
maintenant	à composite de bois	0,7 - 0,9 (moy.: 0,80)	(-36%) [-68%]	bois
post-1995	de haute performance	0,5 - 0,7 (moy.: 0,60)	(-25%) [-76%]	époxyde renforcée de fibre de verre et de fibre de carbone

il y a 10 ans, et jusqu'à 60 tonnes pour les premiers modèles californiens du début des années 1980. On s'attend largement maintenant à ce que le poids des pales continue de baisser, offrant des réductions supplémentaires de 25% dans les 12 à 24 mois prochains (voir tableau 4).

Vitesse des vents

En termes de potentiel éolien, ni la Californie, où se situe la plus importante production d'énergie éolienne au monde, ni le Danemark, le plus important fournisseur et exportateur de technologies éoliennes, ni non plus le Texas, qui s'appête à ajouter 250 MW d'énergie éolienne à son réseau principal, semblent pouvoir se comparer au Québec. Malgré la faiblesse relative de nos *connaissances* du vent québécois, de nombreux sites d'aéroport ont connu, depuis plus de 40 ans, un mesurage constant. L'analyse suivante se base sur les mesures prises à l'aéroport de Montjoli en Gaspésie.

Selon les données, les vents à Montjoli seraient de 8% supérieurs aux vents des côtes danoises, de 16% supérieurs à ceux situés à Amarillo au Texas, et de 22% supérieurs à ceux de la San Gorgonio Pass en Californie, site du parc éolien le plus productif au monde. Parmi 12 sites évalués par le Département américain de l'énergie (DOE) pour leur potentiel éolien, un seul, au Wyoming, serait presque aussi venteux que Montjoli (voir figure 3). Comparés à la moyenne des 12 sites américains, choisis pour la force de leurs vents, les vents de Montjoli, choisis pour leur faiblesse relative (mais à l'intérieur d'une région généralement venteuse), sont de 24% supérieurs.

Bref, si la vitesse des vents est un facteur-clé dans la détermination d'un leader nord-américain en production d'énergie éolienne, le Québec serait mal placé de ne pas sauter sur l'occasion.

Potentiel

Sans relevé systématique du gisement éolien au Québec, il est difficile de confirmer le potentiel précis. Mais déjà des extrapolations et des hypothèses peuvent être mises de l'avant: 1) le potentiel québécois est parmi les plus élevés au monde; 2) le gisement aux meilleurs sites en Gaspésie risque fort bien de s'élever à 12 à 14 mètres par seconde (m/s) à des hauteurs de 50m (à l'intérieur de certains micro-climats); 3) l'hypothèse mise de l'avant par l'Association canadienne d'énergie éolienne, à l'effet qu'une première tranche de 8,4 TWh peut être exploitée à 4,4¢/kWh (soit le coût unitaire du projet hydroélectrique Grande-Baleine), qu'une deuxième de 15,8 TWh peut être exploitée au coût de 4,8¢/kWh et qu'une troisième, à 5,4¢/kWh, peut s'élever à 13,0 TWh, n'est pas déraisonnable (surtout advenant une baisse des taux de change et/ou l'installation d'une infrastructure de fabrication québécoise); et 4) l'estimé du Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie (CANMET, 1991), à l'effet que le Québec possède un potentiel réaliste de plus de 26 TWh, pourrait être revu à la hausse (on parle maintenant de 50 TWh ou plus), tout comme pourrait l'être la proportion réaliste canadienne que cela représenterait (alors que CANMET l'estimait à 49%, plusieurs parlent aujourd'hui de 75% du potentiel canadien réalisable).

Prévisions des coûts

Hypothèse 1: puissance des machines

La prévision des coûts futurs de l'énergie éolienne au Québec ne peut se faire sans hypothèses sur le type de machine qui sera utilisé. À cet égard, un aperçu de l'évolution courante de ces machines m'amène à utiliser l'hypothèse suivante: machines de 300 kW à 500 kW aujourd'hui; machines de 1.000 kW à partir de 1998 et machines de 1.500 kW à partir de l'an 2001, après quoi je ne prévois aucune hausse supplémentaire de leur taille (notons que selon la compagnie Vestas, le coût supplémentaire pour une hausse de puissance de 20% (machine de 600 kW plutôt que de 500 kW) ne serait que de l'ordre de 3%). Il est important de noter que cette évaluation peut être conservatrice, puisque les turbines de 1.500 kW viennent d'être rendues commercialement disponibles. Cependant, je crois qu'il serait préférable d'attendre quelques années après le début de la commercialisation, afin de donner le temps aux manufacturiers de optimiser leur technologie.

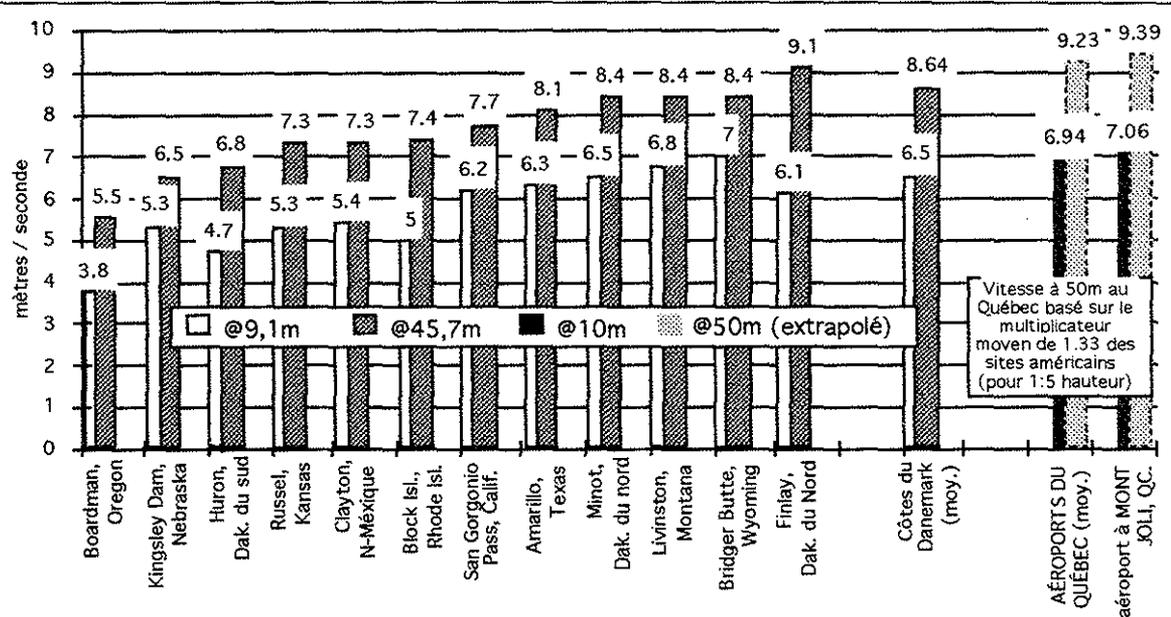


Figure 3: Vitesses des vents: sites québécois vs. sites américains et danois
 Sources: CANMET (1992), Whamsley et Morris (1994), Gipe (1995b), World Bank (1986)

Hypothèse 2: vitesse des vents

L'autre facteur-clé dans le coût futur de l'énergie éolienne concerne la vitesse des vents. Je base mon évaluation sur les vents de Montjoli, dont les données précises à une hauteur de 10m sont connues (7,06 m/s). J'extrapole ensuite, en me basant sur l'augmentation des vitesses de vents à 12 sites américains lorsqu'on monte à des hauteurs 5 fois plus élevées (voir figure 3 et note 4 du tableau 6), que la vitesse à 50m est d'environ 9,4 m/s. Je crois que le cas de Montjoli peut être révélateur puisqu'il se situe à l'intérieur d'une région assez venteuse, mais à un endroit choisi pour la faiblesse relative de ses vents (comme tout aéroport). Il semble tout à fait raisonnable de croire qu'un bon nombre de sites au Québec connaissent des vents de la même qualité que ceux de Montjoli, et que de tels sites pourraient représenter une production éolienne très importante. Tomber à un niveau de vents moins important ne sera pas nécessaire, selon l'Association canadienne de l'énergie éolienne, avant d'atteindre une production annuelle de quelque 8,4 TWh, ce qui représenterait quelque 3.000 MW de puissance installée. D'ailleurs, la possibilité que de nombreux micro-climats, ayant des vents beaucoup plus puissants (souvent 25% à 35% plus élevés que la moyenne de la région), n'est pas négligeable. Cependant, en l'absence de cas connus, je n'en tiens pas compte dans cette évaluation (le cas des Îles de la Madeleine, qui connaît effectivement des vents plus forts, est particulier, puisque les coûts d'installation s'élèvent aussi avec l'éloignement).

Prévisions des coûts

En partant de l'hypothèse surannée mais utile de Cavallo, et al. (1993) (voir tableau 5), je prévois que les coûts de l'énergie éolienne au Québec, du moins pour une première tranche de quelque 1.500 à 3.000 MW, et sans compter les possibilités de micro-climats plus intéressants, connaîtront une chute *du 5,5¢Cdn/kWh d'aujourd'hui à quelque 3,9¢/kWh en 2004* (\$ de 1994), selon un taux de change de 1,36\$Cdn/\$US (voir tableau 6). Cette évaluation ne tient pas compte de la possibilité de se doter d'usines de fabrication locales qui, en plus de réduire le coût du transport des pièces, diminuerait l'importance de la volatilité du taux de change.

Enjeux environnementaux et sociaux

Bien sûr, la prévision des coûts ci-hauts n'est que partielle. À cela s'ajoutent les coûts et bénéfices environnementaux et sociaux. L'objectif du texte suivant n'est pas de calculer ces coûts et bénéfices, mais de donner un simple portrait de ceux-ci.

Coûts environnementaux et sociaux

En ce qui concerne les externalités négatives, elles sont associées surtout au risque de collision avec des oiseaux et aux impacts visuels et sonores. Concernant la première, choisir intelligemment les sites d'installations d'éoliennes constitue la meilleure prévention (les sites de Altamont Pass en Californie et de Tarifa en Espagne ont été choisis sans aucune considération pour les voies migratoires, ce qui a mené à des impacts importants sur l'avifaune). De plus, l'utilisation de tours tubulaires plutôt qu'à treillis, réduit d'avantage la possibilité d'accidents (en privant l'oiseau d'un perchoir intéressant). Enfin, d'autres solutions ayant trait au signal sonore, entre autres, sont en train d'être développées par différentes instances gouvernementales, ainsi que par des compagnies telles que Kenetech.

Sans vouloir minimiser ces impacts, les cas les plus connus de *mortalité de l'avifaune* touchent presque exclusivement l'aigle dorée, une espèce particulièrement à risque à cause de sa vision; lorsqu'un aigle dorée circule au-dessus d'un parc d'éoliennes et qu'il aperçoit sa proie, il se jette vers elle sans même s'apercevoir du rotor qui les sépare. Mais la plupart des oiseaux ne partagent pas cette particularité. Une étude danoise qui a examiné 135 machines à 9 sites différents, a conclu que le risque de collision était "négligeable" (Pedersen et Nohr, 1989). La même conclusion figurait dans une étude de 11 parcs éoliens par l'Académie nord-allemande pour la protection de la nature, ainsi que dans une autre du Département américain de l'énergie (dans Gipe, 1995b).

Au San Gorgonio Pass en Californie, la Southern California

Tableau 5: Prévisions surannées de Cavallo, et al. (1993) à 6,6 - 7,3 m/s (coûts en \$ de 1994*)

	1990	1995	2000	2010	2020
Puissance installée (kW)	100	300	500	500	1.000
Hauteur du moyeu (m)	25	30	40	40	50
Diamètre du rotor (m)	18,3	33	40	40	51,7
Vitesse des vents au moyeu (m/s)**	6,6	6,8	7,0	7,0	7,3
Coût à l'installation (\$US/kWh)	1.100	1.000	950	850	800
Coûts d'opération et d'entretien (¢US/kWh)	1,7	1,3	1,0	0,8	0,6
Coût total (¢US/kWh)	7,20	5,00	4,30	3,60	3,13

* coûts en \$ de 1993 comparables avec \$ de 1994 dû à un taux d'inflation très faible ($\pm 0\%$)

** modifié pour la hauteur selon la règle 1/7 (voir note 4 du tableau 6)

Tableau 6: Notre prévision de l'avenir technique et économique de l'énergie éolienne au Québec (en \$ de 1994)^{1,2}

	1995 ³	1998	2001	2004
Puissance installée (kW)	330 - 500	1.000	1.500	1.500
Hauteur du moyeu (m)	33 - 40	50	60	60
Diamètre du rotor (m)	35 - 40	50	55	55
Vitesse de vents au moyeu (m/s) ⁴	8,9	9,4	10,2	10,2
Coût à l'installation (\$US/kW) ⁵	1.000	850	800	800
Coûts d'opération et d'entretien (¢US/kWh) ⁶	1,00	0,75	0,65	0,60
Coût total (¢US/kWh)	3,85	3,17	2,93	2,88
Coût total (¢Cdn/kWh) [$\times 1,36$ \$Cdn/\$US]	5,24	4,31	3,98	3,92

1/ Le tableau ci-dessus ne vise pas à présenter des données directement comparables aux coûts totaux d'énergie et de puissance des filières compétitives avec l'éolienne, puisque cette dernière ne peut fournir un facteur d'utilisation semblable aux sources thermiques ou hydrauliques (avec réservoir). À cette fin, une étude poussée, incluant une analyse détaillée de la distribution temporelle et saisonnière des vents, serait requise afin de mieux cerner les coûts unitaires additionnelles attribuables à l'énergie éolienne (via le stockage de l'eau dans les réservoirs, par exemple). Notons cependant qu'au Québec, la distribution des vents comporte une relation directe avec le froid et, conséquemment, avec la pointe hivernale. Il serait donc erroné de comparer cette filière sur la base strictement de sa contribution (facteur d'utilisation) annuelle moyenne (c'est à dire en majorant ces coûts par le coût moyen de puissance additionnelle identifié par Hydro-Québec).

2/ Je suppose ici que le financement est assumé par Hydro-Québec. J'utilise ainsi un coût du capital de 6,5% réel (9,5% nominal). Mes autres hypothèses concernent la période de capitalisation (30 ans) et le facteur d'utilisation (30%).

3/ Le coût total prévu pour 1995 équivaut à 95,3% du prix offert par Hydro-Québec à Kenetech-Québec pour la construction du parc gaspésien de 100 MW (5,5¢/kWh). La différence ne s'explique pas par une marge de profit quelconque (en fait, je crois probable qu'en raison d'un taux de change beaucoup plus favorable au moment de la signature du

contrat ($\pm 1,28\$Cdn/\US vs. $1,36\$Cdn/\US au 05.12.95), le prix payé à Kenetech ne générera aucun profit pour la firme), mais plutôt par letaux d'emprunt plus avantageux dont bénéficierait Hydro-Québec si celle-ci prenait la responsabilité financière du projet, comme je l'assume.

4/ Chiffres basés sur les vents à Montjoli, calculés à partir de la mesure réelle de 7,06 m/s à 10 m de hauteur (Whamsley et Morris, 1994), ajusté d'abord pour 50 m en utilisant le multiplicateur moyen (1,33) de 12 sites analysés par le département américain de l'énergie (DOE) à des hauteurs semblables (9,1 m et 45,7 m vs. 10 m et 50 m). Notons que ce ratio correspond bien à la règle du 1/7, qui stipule que la vitesse des vents augmentent de 10% à chaque redoublement de la hauteur (cette règle, qui est très approximative et souvent critiquée pour ses sous-estimations, aurait donné un multiplicateur de 1,26). Le calcul est donc $7,06 * 1,33 = 9,39$ m/s à 50 m à Montjoli. Les données à des hauteurs de 40 et 60 mètres sont basées sur le même calcul.

5/ L'évolution du coût de l'installation dépend notamment des variations dans le coût des matériaux, que je prévois ici diminuer selon la croissance de la puissance installée des machines (0,5 MW à 1 MW à 1,5 MW). Notons que les meilleurs turbines de Kenetech atteignait déjà, en 1995, 850 \$U.S./kWh prévu ici pour 1998.

6/ Malgré une hausse des coûts associée à l'utilisation de grues "géantes," la croissance des tailles des machines éoliennes devrait produire une baisse du coût de la main d'oeuvre par unité de production, ce qui explique le déclin des coûts d'opération et d'entretien jusqu'en l'an 2001 (selon la croissance des tailles des machines). De plus, des améliorations dans la fiabilité des machines (notamment des pales) devraient mener à une petite réduction supplémentaire de ces coûts, de 0,65 ¢US/ kWh à 0,60 ¢US/kWh, même après que les machines aient atteint leur sommet de 1,5 MW chacune. Je prévois, cependant, que la baisse des coûts d'opération et d'entretien ne se poursuive pas, de façon significative à tout le moins, après l'an 2004.

Edison Company a trouvé, en 1985, 38 oiseaux morts, sur 32 à 37 millions qui passent dans cette région à chaque année. Cet échantillon a permis de croire que, de façon générale, le taux de mortalité de l'avifaune dû aux éoliennes de la San Gorgonio Pass serait de 0,006% à 0,009% (McCrary, et al., 1983). Ce taux devrait cependant diminuer suite à des choix de sites mieux informés et à l'utilisation d'approches innovatrices pour signaler aux oiseaux la présence des pales tournantes. Enfin, notons que le taux de mortalité de l'avifaune associé aux lignes de transmission, par exemple, est sensiblement plus élevé que les pires cas associés à l'énergie éolienne (Orloff et Flannery, 1992). Ce fait est d'ailleurs d'autant plus pertinent dans le cas d'un système hydroélectrique, puisque les oiseaux sont attirés par la présence de poissons dans les réservoirs (Beauharnois étant un excellent exemple).

Concernant l'impact visuel, la réaction de la population dépend entièrement de l'aménagement des "parcs." Si, par exemple, les machines sont trop collées les unes aux autres, ou si des machines de différentes hauteurs sont placées ensemble, ou encore si des machines sont placées à différents angles ou à différentes élévations, l'impact visuel peut être important. Mais lorsque des parcs d'éoliennes sont bien planifiés et aménagés, le public a tendance à les accepter. Le choix de tours tubulaires, plutôt que ceux à treillis a aussi un impact positif important sur l'acceptation du public.

En ce qui concerne l'utilisation du territoire et l'espace occupée, notons que la densité de puissance est généralement autour de 1,0-5,0 MW/km², comparée à une densité de puissance à La Grande d'à peine 1,2 MW/km². De plus, alors que 3% du sol est nécessairement occupé par les installations éoliennes, les 97% qui restent demeurent entièrement disponibles à d'autres usages, notamment pour fins agricoles et d'élevage de bétail. (L'aménagement de pistes cyclables est une autre utilisation intéressante, expérimentée avec succès en Europe, et peut provoquer un apport important au tourisme "vert.")

Concernant l'impact sonore, il s'agit d'assurer un espacement raisonnable entre les turbines et les édifices résidentiels (environ 150 mètres pour que l'impact sonore soit moins de 45 décibels (dB[A]), un niveau généralement acceptable. Le bruit à une maison moyenne, par exemple, est de 50 dB[A], alors qu'un doux chuchotement représente quelque 30dB[A] et le son du vent dans les arbres 55 dB[A].) Sur ce point, les manufacturiers eux-mêmes ont tendance à s'imposer des normes très sévères. D'ailleurs, le bruit à proximité d'habitations est généralement moins élevé que les normes imposées sur les appareils domiciliaires, soit les piscines extérieures, les pompes thermiques, etc.

Bénéfices environnementaux et sociaux

Un premier bénéfice social à noter est associée aux recettes que peuvent percevoir des propriétaires de terres, notamment de fermes, par la compagnie d'électricité. Au Québec, où les projets d'éoliens sont susceptibles d'être situés davantage sur des fermes privées que sur des terres publiques, ces recettes peuvent en effet constituer un revenu d'appoint pour de nombreux propriétaires de fermes, entraînant ainsi, dans certains cas, un bénéfice important en terme de rétention de populations rurales. À titre d'exemple, le projet de 100 MW au Québec de la compagnie Kenetech comprend des paiements de l'ordre de 300.000\$ par année aux propriétaires, soit environ 1.000\$ par machine de 300 kW par an.

Le rapprochement consommateur/lieu de production (ou, plus précisément, consommateur/lieu des impacts) peut aussi être perçu comme un bénéfice social, surtout dans le but d'une plus grande sensibilisation et, surtout, responsabilisation des citoyennes et des citoyens. Cependant, le positionnement de cette externalité dépend des alternatives: de façon générale, elle est positive lorsque comparée à une centrale thermique au gaz naturel ou au charbon, ainsi qu'à une centrale hydroélectrique située sur les côtes de la baie James ou de la baie d'Hudson, mais plutôt négative devant la possibilité de piles à combustibles résidentielles ou de panneaux solaires-photovoltaïque placés sur les toitures. Enfin, elle est plutôt neutre lorsque comparée à une série de mini-centrales hydroélectriques dans le sud du Québec.

Un dernier atout, sinon externalité positive dans le sens généralement compris, a rapport avec la *modularité de mise en service* et ses effets bénéfiques sur l'environnement. En effet, les courts délais de mise en service de la technologie éolienne permettrait à une compagnie comme Hydro-Québec de diminuer l'écart entre l'offre et la demande. Mise à part l'importance financière de cet atout, l'effet environnemental peut être particulièrement important: en cas de demande plus élevée que prévue, le recours à des ajouts à un parc éolien permettrait d'éviter des importations à court terme, dont les sources sont souvent thermiques, alors que, dans le cas de demande interne plus faible que prévue, la mise en service d'éoliennes peut être différée, contrairement aux méga-centrales hydroélectriques qui, elles, pourraient dans un cas pareil causer des coûts environnementaux et sociaux sans que les bénéfiques énergétiques ne soient requis. Une plus grande modularité amène à une diminution du gaspillage économique *et* environnemental.

En tout, il est probable que le ratio coût/bénéfice social net, incluant l'apport financier aux propriétaires de fermes, soit plus ou moins nulle, du moins pour une première tranche de 2.000 à 3.000 MW. Néanmoins, l'importante étude du Pace University Center for Environmental and Legal Studies (1990), estime que le coût des impacts environnementaux de l'énergie éolienne se situe entre 0 et 0,1¢/kWh. Ce dernier se compare à 0-0,4¢/kWh pour l'énergie solaire-photovoltaïque, 1,1¢/kWh pour une centrale au gaz naturel à cycle combinée et 2,9¢/kWh pour une centrale nucléaire.

Conclusion

L'énergie éolienne a connu une période de maturation extrêmement rapide depuis son introduction en Californie au début des années 1980. Son coût direct (énergie seulement), qui devra atteindre les 4¢/kWh d'ici seulement quelques années, est très compétitif avec les autres sources de production québécoises, dont l'hydroélectricité. Aux plans environnemental et social, peu de technologies de production électrique se comparent avantageusement aux technologies d'exploitation du vent qui parcourent le territoire québécois; même l'énergie solaire-photovoltaïque pourrait poser plus d'impacts et de risques que l'énergie du vent. Enfin, au moment où l'exploitation continue des grandes rivières québécoises est remise en cause, on s'aperçoit que notre potentiel éolien est possiblement le plus important en Amérique du nord.

Il ne reste plus d'obstacles majeurs au développement de l'énergie éolienne au Québec. Bien planifié, entre autres avec la mise en place d'une infrastructure de fabrication locale, un tel développement pourrait atteindre des objectifs multiples: créations d'emplois en région, maintien de tarifs bas, minimisation des impacts environnementaux, apport financier aux proprié-

taires de terres (fermes), responsabilisation des consommateurs et diminution du gaspillage des ressources naturelles.

Références

- American Wind Energy Association (AWEA) (1995) *The US Wind Energy Industry*.
- Cavallo, A.J., S.M. Hock et D.R. Smith (1993) 'Wind Energy: Technology and Economics' in L. Burnham (ed.) *Renewable Energy: Source for Fuels and Electricity* (Washington, DC and Covelo, CA: Island Press), pp. 121-56.
- Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie (CANMET) (1992) *Canadian Wind Energy Technical and Market Potential* (Ottawa: Ministère de l'énergie, des mines et des ressources du Canada) octobre.
- (1991) *Résumé de projets sur l'énergie éolienne 1985-1991* (Ottawa: Ministère de l'énergie, des mines et des ressources du Canada) janvier.
- Davidson, R. (1995) 'Trade Mission Signs Series of Wind Deals in China,' *Windpower Monthly*, April, p. 28.
- Gipe, P. (1995a) *L'énergie éolienne dans le monde (présentation au débat public sur l'énergie au Québec)*.
- (1995b) *Wind Energy Comes of Age* (New York: John Wiley & Sons).
- Gipe, P. et N. Nies (1995) *Aperçu sur la production mondiale d'électricité par aérogénérateurs*, mai.
- Lazard, Laidlaw & Mead Inc. (1994) *The Wind Power Industry*, November.
- McCrary, M.D., R.L. McKernan, W.D. Wagner, R.E. Landry et R.W. Schreiber (1983) *Summary of Southern California Edison's Bird Monitoring Studies in the San Geronio Pass* (Rosemead, CA: auto-publié).
- Milborrow, D. (1995) 'Jumbos and the Square Cube Law,' *Windpower Monthly*, April pp. 38-41.
- Orloff, Susan et Anne Flannery (1992) *Wind Turbine Effects on Avian Activity, Habitat Use, and Mortality in Altamont Pass and Solano County Wind Resource Areas* (Sacramento: California Energy Commission), March.
- Pace University Center for Environmental and Legal Studies (1990) *Environmental Costs of Electricity*, for New York State Energy Research and Development Authority and United States Department of Energy (New York: Oceana Publications Inc.).
- Pedersen, B. et H. Nohr (1989), *Consequences of Minor Windmills for Bird Fauna - English Summary* (Denmark: Ornis Consult) June.
- Whamsley, J.L. et R.J. Morris (1994) *Cartes des ressources en énergie éolienne au Canada (rapport ARD-92-003-F)* pour Environnement Canada, Service de l'environnement atmosphérique, octobre.
- World Bank (1986) *Guidelines for Assessing Wind Energy Potential* (Energy Department Paper No.34) August, Washington.