

**CHOIX DE LA FILIÈRE ÉNERGÉTIQUE  
POUR LA PRODUCTION  
D'ÉLECTRICITÉ AU QUÉBEC**

**ÉOLIEN  
VS  
THERMIQUE**

Expertise préparée par

Réal Reid, ing.

Pour le

Regroupement pour la Responsabilité Sociale des Entreprises (RRSE)

Dossier R-3526-2004

Régie de l'Énergie du Québec

Avril 2004

**RRSE.DOC.7**

**Sommaire**

Pour rencontrer l'augmentation prévue de la demande, le Québec semble vouloir se tourner vers les centrales thermiques au gaz naturel. Les centrales au gaz représentent une très belle technologie. Mais cette technologie est importée, que ce soit l'équipement ou le carburant, rien ou presque ne proviendra du Québec.

À part l'investissement initial, pour une centrale au gaz naturel comme «Le Suroît», le Québec devra importer environ 300 Millions \$ par année de carburant. Une telle centrale émettra quelque 2,25 Million de tonnes de gaz à effet de serre par année, soit une augmentation de l'ordre de 3 % pour le Québec.

De plus, il semble que le Québec se doterait d'une autre centrale au gaz à Bécancour, plus petite que la centrale projetée du Suroît (825 MW), celle de Bécancour serait de 507 MW, donc environ 1,56 Million (net) de tonnes de gaz à effet de serre par année ». On planifie aussi d'utiliser la centrale de Tracy comme centrale de base, ce qui pourrait ajouter jusqu'à 1,9 Mtonnes de gaz à effet de serre.

### **Une autre solution pourrait être de fournir les besoins à partir de l'éolien.**

Pour fournir un service sensiblement équivalent à la centrale projetée du Suroît, un projet éolien :

- nécessiterait un parc éolien de 1800 à 2900 MW (dépendant du choix de l'emplacement) jumelé à l'exploitation des centrales hydrauliques existantes ou (à titre d'exemple) à l'ajout d'un groupe turbine-alternateur additionnel à la centrale de Ste-Marguerite;
- pourrait respecter les délais de construction, mise en service, évoqués pour justifier le recours à la filière thermique;
- éviterait la production de gaz à effet de serre;
- exploiterait une ressource indigène au Québec;
- créerait une activité industrielle de 200 à 700 M\$ par année pour la fabrication des éoliennes durant 5 années à 300 - 600 MW par année et créerait près de 200 - 400 emplois permanents pour l'opération et l'entretien des parcs éoliens;
- résulterait en un coût de production de l'électricité de l'ordre de 4,1 à 6,2 ¢/kWh versus 6,9 ¢/kWh pour « Le Suroît », une économie qui actualisée sur 20 ans vaut de 0,5 à 2,0 Milliards de \$ présents.

## 1. Introduction

Particulièrement au Québec, où la ressource est reconnue comme exceptionnelle (1)<sup>1</sup>, l'exploitation de la filière éolienne peut constituer le complément idéal au parc, actuel et à venir, de production hydraulique. Ressource renouvelable et fonctionnant à l'aide d'un carburant gratuit, l'éolien présente par ailleurs un avantage net au chapitre économique, tant sur le plan des coûts de production que sur celui du développement économique et industriel. Son potentiel de création d'emplois industriels (75 à 80 % du coût total d'un projet) est très intéressant par opposition aux emplois exportés pour l'achat de turbines à gaz et pour la production du gaz qu'elles consommeront.

Sur le plan économique et à la lumière des projets en opération au Danemark, en Allemagne et en Espagne, il appert que l'industrie éolienne mondiale est en pleine croissance et que le Québec, possédant des atouts indéniables en ce domaine, pourrait y occuper une place de choix. Ainsi:

- l'industrie éolienne jouit d'un chiffre d'affaires mondial de l'ordre de 16 G\$ par année (12 Milliards pour les nouvelles éoliennes installées en 2003 (2) et 3,8 Milliards pour les 75 TWh produits (3) en 2003);
- avec une croissance de plus de 26 % en 2003, elle démontre une croissance annuelle de plus de 25 % pour une 7<sup>ième</sup> année consécutive;
- un taux de nouvelles installations en 2003 de 8133 MW, pour un total de 39294 MW installés (2, 4).
- L'industrie éolienne mondiale (fabrication, construction et entretien) procure de l'emploi à près de 100 000 personnes.

La production d'électricité éolienne fait aujourd'hui appel à des technologies éprouvées. Les exemples démontrent également, hors de tout doute, qu'elle comble des besoins énergétiques essentiels des pays utilisateurs, le Danemark comblant, à certaines périodes de l'année, plus de 70% de la puissance électrique requise pour ses propres besoins. En 2002, 55 % de l'électricité pour la région de Navarre en Espagne provenait de l'éolien (5). Par ailleurs, les coûts de production de l'éolien sont extrêmement concurrentiels et sont de l'ordre de 4 à 5,5 ¢/kWh, à la condition que la propriété et l'exploitation des parcs éoliens, au Québec, soient confiés à Hydro-Québec.

Le Québec jouit de conditions exceptionnelles qui garantiraient le plein essor de cette filière d'énergie et des retombées économiques intéressantes, si un Programme éolien était mis en œuvre immédiatement par le gouvernement. En effet, le lancement d'un tel programme, spécifique et à long terme, permettrait d'implanter une industrie québécoise de l'éolien, laquelle pourrait profiter des marchés d'exportation qui s'ouvrent déjà dans les provinces canadiennes et aux États-Unis. À titre d'exemple, l'implantation d'une telle industrie, en Espagne, associée au lancement d'un programme d'achat éolien, a permis d'atteindre un contenu local de 90 % et la création d'au moins 20 000 emplois dans les

---

<sup>1</sup> Références en fin de texte

usines d'assemblage des éoliennes et de fabrication de leurs composantes, chiffres qui pourraient s'appliquer de même manière au Québec.

Au Québec, la ressource éolienne est supérieure à la ressource hydraulique, de plus, elle est mieux répartie géographiquement. Généralement bien acceptée par la population, elle est parfaitement complémentaire avec un parc de production électrique basé sur la ressource hydraulique, elle présente également une très bonne corrélation mensuelle avec la demande (voir référence 6, graphique 4, voir aussi les références 7 et 8), réduisant par le fait même les besoins de stockage.

Tout comme l'hydraulique, l'éolien fait appel à une ressource qui est renouvelable et les investissements requis pour lancer un projet de production d'électricité à partir de la ressource éolienne consistent principalement en investissements en capital auxquels on ajoute des frais d'entretien, le carburant étant gratuit. Cependant, contrairement à un projet de production d'électricité basé sur la ressource hydraulique, l'éolien présente un fort contenu d'emplois industriels (75 à 80 % du coût total du projet) à comparer à des emplois en chantiers pour l'hydraulique ou des emplois à l'extérieur du Québec pour la filière au gaz.

A la lumière des projets en opération au Danemark, en Allemagne et en Espagne, jumelé à la directive de l'Union Européenne sur l'utilisation des ressources renouvelables, en majorité l'éolien (9), et compte tenu des atouts dont jouit le Québec, il appert que le lancement d'un programme de production d'électricité à partir de la filière éolienne s'avère, plus que jamais, présenter une solution efficace et rentable pour combler les besoins en énergie du Québec.

## 2. État de l'industrie et de la production d'électricité à partir de la ressource éolienne dans le monde

Voici les points saillants relatifs à l'état de l'industrie éolienne dans le monde:

- un chiffre d'affaires mondial de l'ordre de 16 G\$ par année (12 Milliards pour les nouvelles éoliennes installées en 2003 (2) et 3,8 Milliards<sup>2</sup> pour les 75 TWh produits (3) en 2003);
- une croissance de plus de 26 % en 2003 (4), elle démontre une croissance annuelle de plus de 25 % pour une 7<sup>ième</sup> année consécutive;
- la mise en service de 8133 MW de nouvelles unités éoliennes en 2003, pour un total mondial de 39294 MW installés (2, 4), équivalent à la capacité totale du parc de production électrique d'Hydro-Québec;
- la puissance globale installée a cru de 500 % de 1997 à 2003 (2, 4), soit de 7636 MW à 39 294 MW. Il est bon de rappeler que le mémoire présenté par le SPSI à la régie en 1998 (6) était basé sur les chiffres de 1997;
- une capacité mondiale de production de plus de 15 000 MW par année;
- Mu par la directive de l'Union Européenne (12 % de son énergie totale doit provenir de sources renouvelables en 2010, ce qui se traduit par 22 % de son électricité), on prévoit que le total mondial atteindra 95 000 MW en 2008 et 194 000 MW en 2013 (4). Basé sur les discussions pour l'extension de la directive 2010 à 2020, pour l'Europe seulement on atteindrait 180 000 MW en 2020 (9).
- La capacité éolienne installée à la fin de 2003 produira environ 85 TWh par année, soit 50 % de l'énergie annuelle produite par Hydro-Québec.

---

<sup>2</sup> valeur de l'électricité estimée à 5 ¢/kWh

### 3. État de la technologie

Au delà des mythes et des demi-vérités associés à la production d'électricité à partir de la ressource éolienne, il importe de préciser que la production d'électricité à partir de cette source d'énergie fait aujourd'hui appel à des technologies éprouvées et disponibles "par catalogue", comme en témoignent les faits suivants:

- des unités de production de 2 à 5 MW sont commercialement disponibles, elles ont de 80 à 126 mètres de diamètre et sont montées sur des tours de 80 à 120 mètres de hauteur, les éoliennes modernes sont les plus grosses machines tournantes au monde;
- des unités de production ont démontré une disponibilité de plus de 98 % et elles peuvent fonctionner:
  - sous des climats froids; des versions arctiques sont disponibles pour un coût majoré d'environ 5 % par rapport aux versions standards;
  - sous des conditions givrantes; des éoliennes sont fabriquées pour opérer sous ces conditions jusqu'à 100 jours par année;
- la production d'électricité d'une centrale éolienne peut être prévue 48 heures à l'avance, avec une précision de l'ordre de 10 %, les technologies permettant cette prévisibilité sont appliqués depuis 1999 et s'améliorent d'année en année;
- une haute pénétration démontrée dans plusieurs pays, la partie ouest du Danemark comble, à certaines périodes de l'année, plus de 70 % de la puissance électrique requise pour ses besoins propres. La région de Navarre en Espagne, quant à elle, produisait 55 % de son électricité à partir de l'éolien en 2002 et on prévoyait doubler l'apport des énergies renouvelables pour 2005 (5), ce qui donnerait 71 % de la production électrique produite par l'éolien.

#### EXEMPLES DE MYTHES

Même avec ces faits que l'on peut vérifier dans la presse spécialisée, les conférences ou les communiqués de presse, auprès d'agences comme les associations nationales de l'énergie éolienne (américaine, canadienne ou européenne, l'APPA espagnole,...), l'Agence Internationale de l'Énergie, ... les mythes ont la vie dure. En voici quelques exemples:

### Mythe no 1

Les éoliennes ne fonctionnent que 30 % du temps ??

On fait ici référence au facteur de capacité que l'on confond avec le temps de marche. En fait, comme en fait foi le tableau ci-dessous, une éolienne dont la qualité de la ressource éolienne permet d'obtenir un facteur de capacité de 30 % (après avoir tenu compte des pertes) fonctionnerait 78 % du temps.

Si on acceptait ce mythe, on devrait aussi dire que l'hydraulique au Québec ne fonctionne que 60 % du temps, ou que le projet « Le Suroît » est conçu pour fonctionner seulement 90 % du temps?? On serait en droit de se demander avec quoi va-t-on s'éclairer pour le reste du temps.

Le temps de marche est le temps compris entre les vitesses d'amorçage et d'éclipsage de l'éolienne. En général, c'est le nombre d'heures dans une année où les vents sont entre 4 mètres/seconde (m/s) et 25 m/s. Le pourcentage du temps de marche est le temps de marche divisé par 8760 heures multiplié par 100, ou :

vitesse d'amorçage = vitesse du vent où l'éolienne commence à produire

vitesse d'éclipsage = vitesse du vent à laquelle on arrête l'éolienne pour la protéger

heures de marche = nombre d'heures où :  $4 \text{ m/s} < \text{vitesse du vent} < 25 \text{ m/s}$

% temps de marche =  $(\text{heures de marche} / 8760) \times 100$

Le facteur de capacité (FC) est la puissance moyenne d'une éolienne, sur une base annuelle. On peut aussi l'exprimer comme la production annuelle de l'éolienne divisée par sa puissance nominale et par 8760 heures, ou :

$$\text{FC} = \text{Énergie annuelle en MWh} / \text{puissance nominale en MW} / 8760 \text{ heures}$$

Pour une éolienne typique, pour une vitesse moyenne annuelle des vents donnée, on obtient :

	Vitesse moyenne annuelle du vent, m/s				
	5	6	7	8	9
% temps de marche	60	70	77	81	86
FC	0,13	0,20	0,28	0,35	0,42

### Mythe no 2

Les éoliennes ne sont pas conçues pour résister aux rigueurs du climat québécois?

En fait des éoliennes ont été installées au Nord du cercle polaire en Suède et en Finlande. Dans l'Ungava québécois, une éolienne a fonctionné pendant plus de 15 ans sans que les rigueurs du climat ne l'affectent, deux éoliennes ont été installées sur une colline surplombant Whitehorse au Yukon où en plus de basses températures, les conditions givrantes sont sévères. Northern Power Systems, du Vermont, a conçu une éolienne de 100 kW pour opération en Antarctique où le climat est beaucoup plus sévère qu'au Québec. A Searsburgh dans les montagnes du sud du Vermont, un parc éolien de 5,5 MW a été construit dans une zone où les conditions givrantes sont fréquentes. Comme rapporté ci-haut (état de la technologie) :

- des unités de production ont démontré une disponibilité de plus de 98 % et elles peuvent fonctionner:
  - sous des climats froids; des versions arctiques sont disponibles pour un coût majoré d'environ 5 % par rapport aux versions standards;
  - sous des conditions givrantes; des éoliennes sont fabriquées pour opérer sous ces conditions jusqu'à 100 jours par année;

Si on acceptait ce mythe, il faudrait accepter qu'un vent de 15 m/s, à  $-20^{\circ}\text{C}$ , 90 % d'humidité relative et 12 % de turbulence au Québec est différent d'un vent de 15 m/s, à  $-20^{\circ}\text{C}$ , 90 % d'humidité relative et 12 % de turbulence ailleurs dans le monde.

### Mythe no 3

Le potentiel éolien québécois ne dépasse guère les 3000 MW !

Ce mythe est basé sur un rapport du Conseil National de la Recherche du Canada datant de 1978 – 1980. Le potentiel économique prévisible pour le Canada était évalué, pour la technologie prévue en 1985, à 4500 MW, dont 75 – 80 % au Québec. Il va sans dire qu'avec les développements de la technologie éolienne des derniers 20 ans, le potentiel économique a explosé au point où, au Québec, le potentiel économique de l'éolien est de beaucoup supérieur au potentiel hydraulique.



#### Mythe no 4

À chaque MW d'éoliennes installé, il faut jumeler un MW de thermique pour assurer la stabilité en puissance!

Ce mythe provient du fait que la puissance d'une éolienne varie dans le temps, parfois de façon assez abrupte, mais on oublie que les fluctuations du vent n'affectent pas toutes les éoliennes en même temps. Dans l'ouest du Danemark, les fluctuations de l'ensemble des 2360 MW installés sont environ le 1/3 des fluctuations d'un parc éolien (10). Sachant que les fluctuations de la production d'un parc éolien sont inversement proportionnelles à la racine carrée du nombre d'éoliennes dans le parc, les fluctuations de l'ensemble des 2960 MW de l'ouest du Danemark sont de beaucoup inférieures aux fluctuations de puissance d'une éolienne. De plus, la production d'un parc éolien est prévisible à  $\pm 10\%$  48 heures à l'avance.

Un danger beaucoup plus grand pour les réseaux est la perte d'une pièce majeure d'équipement, qui peut représenter jusqu'à 10 % de la capacité du réseau. Des changements de cet ordre de grandeur sont peu probables avec l'énergie éolienne, à cause de sa distribution géographique (10) et du nombre d'éoliennes installées pour une production énergétique donnée.

Des données provenant du Laboratoire National des Énergies renouvelables américain (NREL) montrent que la réserve tournante serait de l'ordre de 3 % pour une pénétration éolienne de 5 %, allant jusqu'à 10 % pour une pénétration éolienne de 20 % (10). Le coût de telles réserves serait de l'ordre de 2 \$Cdn/MWh pour une pénétration éolienne de 5 % allant jusqu'à 6,5 \$Cdn/MWh pour un taux de pénétration de 20 % (10, 11).

Le consensus émergent aux États-Unis est que les fluctuations de puissance de l'éolien ajoutent très peu aux coûts, si peu que dans certains cas le coût additionnel est ignoré (11)

#### Mythe no 5

Installer 1000 MW d'éolien en Gaspésie pourrait exiger 420 M\$ d'ajout au réseau de transport.

La Gaspésie est un cas atypique où il n'y a pratiquement pas de production d'électricité. Son électricité provient de la côte Nord où d'ailleurs au Québec et transite par l'île d'Orléans. La demande de pointe avoisine les 1200 MW. Il n'y a pas de gros centre de consommation.

Un programme éolien pour la Gaspésie devrait s'articuler autour des particularités de sa demande et des particularités de la ressource éolienne. C'est-à-dire que pour une demande distribuée et une ressource distribuée on devrait viser une production éolienne distribuée. Par exemple, on pourrait installer une puissance éolienne égale ou supérieure d'environ 20 % à la demande d'une ville ou d'une source de demande donnée (demande de pointe plus la demande minimale) à proximité de cette ville ou source de demande. En procédant ainsi pour l'ensemble de la Gaspésie, on pourrait installer la demande de pointe plus la demande minimale, soit approximativement 1440 MW. Le réseau actuel ne serait pas plus sollicité qu'il ne l'est actuellement et la Gaspésie pourrait « exporter » jusqu'à 1200 MW vers le cœur du Québec (conditions de vents forts et de demande minimale).

L'implication, ici, est que certains (petits) parcs éoliens seraient raccordés au réseau de distribution.

### Mythe no 6

La Gaspésie est le seul endroit intéressant au Québec!

Certes la Gaspésie possède une ressource éolienne intéressante, mais elle ne représente qu'environ 2 % du potentiel québécois et elle n'est pas la région montrant les meilleurs vents. Étant donné que l'électricité consommée en Gaspésie provient d'assez loin, les pertes en transport en font peut-être une bonne région pour installer les premiers 1200 à 1440 MW québécois. Mais au-delà de ce total, beaucoup d'autres régions du Québec possèdent une ressource éolienne plus intéressante que la Gaspésie et ne nécessiteraient pas d'investissements majeurs au réseau de transport.

### Mythe no 7

Les appels d'offres en Gaspésie vont nous montrer le vrai coût de l'éolien!

Ce mythe confond le prix d'une commodité avec son coût. Par exemple le prix d'une auto neuve chez le concessionnaire est différent du coût chez le fabricant (Hydro-Québec Production est un fabricant d'électricité).

Le projet d'achat de la production provenant de 1000 MW d'éoliennes sur 10 ans peut sembler un projet important. Mais si on considère les projections d'installations mondiales, au bout de 10 ans, le Québec possèdera environ 1 % du total mondial. Un taux de fabrication et d'installation de 100 MW par année est environ 0,7 % de la capacité actuelle de production au niveau mondial.

D'où le projet d'installer 1000 MW en 10 ans en Gaspésie est un projet important pour la Gaspésie, mais il n'est pas conçu pour révéler les coûts de la technologie ni pour donner un prix compétitif, pour les raisons suivantes :

- On fait acheter l'éolien par Hydro-Québec Distribution qui n'a pas accès au stockage pour régulariser la production éolienne. Hydro-Québec Production charge 9\$/MWh à HQD pour fournir un service d'équilibrage – encore là, ce n'est pas un coût, c'est le prix qu'HQP charge – quel est le coût à HQP pour le service d'équilibrage? D'après les études américaines et anglaises (10,11), pour le faible taux de pénétration que ce 1000 MW donnera, le coût devrait être de l'ordre 1,0 \$/MWh. N'a-t-on pas ici un programme conçu pour augmenter les profits de la partie non régie d'Hydro-Québec au détriment de la partie régie et des consommateurs;

- Hydro-Québec a choisi d'acheter la production éolienne plutôt que d'être propriétaire et opérateur des parcs éoliens, ce qui entraîne un surcoût de l'ordre de 1,4 à 2,0 ¢/kWh, selon la méthodologie de calcul de Wiser et al. (référence 12, tableau de la page 8);

- Comme nous l'avons mentionné, les quantités sont petites, 100 MW par année sur une capacité mondiale d'environ 15 000 MW par année. Spécialement par rapport à

l'expérience espagnole où un contrat de 1400 MW à être livré en 3 ans (presque 500 MW par année) a mené à des coûts intéressants. Il faut rappeler ici, que l'éolien est un produit manufacturé et qu'établir des usines pour les faire tourner à 10-20 % de leur capacité optimale mène à des coûts élevés;

- Cibler la Gaspésie ou le potentiel n'est que de l'ordre de 2 % du potentiel québécois mènera aussi à des coûts plus élevés;

- La réponse aux appels d'offre sera probablement morcelée, ce qui mènera à installer plusieurs petits parcs éoliens, par plusieurs intervenants, avec des éoliennes provenant de plusieurs manufacturiers, ce qui ne permettra aucune économie d'échelle. Il faut rappeler ici, que l'éolien est un produit manufacturé et que ses coûts sont grandement influencés par le volume annuel, non seulement de fabrication mais aussi d'installation et d'exploitation;

- Il faut aussi considérer que ce projet ne s'inscrit pas dans la continuité du projet « Le Nordais », les expertises développées pour ce premier projet ne serviront probablement pas et un nouveau groupe de personnel devra être formé, ce qui augmentera encore les coûts.

**Basé sur ces points, notre opinion est que le projet d'installation en Gaspésie mènera à des prix de l'ordre de 10 ¢/kWh, alors qu'un projet de plus d'envergure conçu pour offrir de l'électricité d'origine éolienne au moindre coût aux québécois résulterait en des coûts, à Hydro-Québec, de l'ordre de 4 à 5 ¢/kWh.**

Pour obtenir le plus bas coût possible de l'éolien dans un contexte québécois, il faudrait :

- établir les cartes des vents pour l'ensemble du Québec avec les technologies les plus récentes, telles que celle développée par le groupe d'Environnement Canada (1) à une résolution de 200 mètres (résolution suffisante pour la planification) (coût ~ 100 à 150 k\$, délais ~ 6 à 8 mois)

- superposer la carte du réseau de transport aux cartes des vents;

- choix d'un manufacturier (par appel d'offres);

- choix d'un constructeur de parcs éoliens (par appel d'offres);

- étude des économies d'échelle potentielles avec le fabricant et le constructeur – détermination du volume optimal;

- montage financier :

- propriété publique ou privée;

- fabrication locale (main d'œuvre industrielle 50 % plus dispendieuse au Danemark qu'au Québec);

- conception des parcs éoliens en tenant compte du réseau de transport et du coût final livré à Montréal,

### Mythe no 8

Installer 1000 MW sur 10 ans en Gaspésie amènera le Québec parmi les grands joueurs de l'éolien!

Si on le considère par rapport à la demande de pointe du réseau :

- comparé au Danemark, le Québec devrait avoir 22 000 MW de déjà installé;
- comparé à l'Espagne, le Québec devrait avoir 4 000 MW de déjà installé;

Si on le considère par rapport à la population:

- comparé au Danemark, le Québec devrait avoir 3 000 MW de déjà installé;
- comparé à l'Espagne, le Québec devrait avoir 1 000 MW de déjà installé;
- comparé à l'Allemagne, le Québec devrait avoir 1 200 MW de déjà installé;

Si on le considère par rapport à la superficie:

- comparé au Danemark, le Québec devrait avoir 100 000 MW de déjà installé;
- comparé à l'Espagne, le Québec devrait avoir 19 000 MW de déjà installé;
- comparé à l'Allemagne, le Québec devrait avoir 63 000 MW de déjà installé;

Bien qu'installer 1000 MW d'éolien au Québec soit un grand pas en avant : quel que soit le paramètre choisi pour se comparer aux autres pays, 1000 MW en 10 ans nous laissera très loin derrière les « meneurs ». Considérant que le taux annuel de croissance de la puissance installée en Europe excède les 25 %, en prenant le plus bas des critères de comparaison ci-haut (Espagne par rapport à la population) : lorsque le dernier des 1000 MW aura été installé au Québec, le ratio espagnol par rapport à la population, sera 9 fois plus élevé que celui du Québec.

### Mythe no 9

La filière éolienne doit répondre à un service de base

Une telle exigence provient probablement d'une méconnaissance de la filière éolienne. Il est généralement reconnu que l'éolien est un bon producteur d'énergie mais un pauvre producteur de puissance. En exiger un service de base va à l'encontre de ses caractéristiques intrinsèques et résultera en un gonflement des coûts.

Dans les études d'intégration de l'éolien aux réseaux d'électricité, on a cherché différentes façons de le modéliser. Une des premières méthodes considérait l'éolien comme une charge négative, c'est-à-dire que lorsque le vent souffle, on considère l'éolien comme réduisant la demande du réseau.

Une deuxième façon de le représenter est le jumelage **HYDRO-ÉOLIEN**. L'éolien étant considéré comme une rivière additionnelle qui serait détournée dans un des réservoirs

hydrauliques d'Hydro-Québec, augmentant et sécurisant les apports du complexe hydroélectrique. Cette rivière additionnelle serait une rivière virtuelle puisque son apport serait sous forme de kWh directement sur le réseau électrique plutôt qu'en eau dans un réservoir. Une étude démontrant les avantages du jumelage **hydro-éolien** avait été faite par l'Association canadienne de l'énergie éolienne avec la coopération d'Hydro-Québec (13). Cette étude jumelait un parc éolien de 100 kW avec une centrale hydraulique de 600 kW, conçue pour une hauteur de chute variable de 5 à 15 %. La contribution de l'éolien augmentait le niveau d'eau et à la 3<sup>e</sup> année était créditée d'un avantage économique de 16 à 47 % dépendant des scénarios étudiés

Une étude plus récente (7), basé sur les modèles de gestion des réservoirs du réseau hydroélectrique du Québec, montre qu'un grand volume d'énergie éolienne (plus de 10 TWh) pourrait être géré de façon optimale par la ressource hydraulique.

#### Mythe no 10

La puissance ferme disponible associée à la capacité nominale installée est nulle.

Des études ont été faites sur la contribution de l'éolien à la puissance disponible. Une de ces études pour la passe Altamont en Californie montrait que la présence de l'éolien à la pointe était équivalente à une centrale de 25 % de sa capacité nominale, disponible en tout temps. Mais la Californie est un cas atypique. Une autre étude a été faite en Alberta où on supposait de l'éolien installé à quatre endroits différents du réseau de transport, couvrant littéralement les quatre coins du réseau principal de l'Alberta, là encore on a trouvé une présence en puissance équivalente à 20-25 %.

Une étude plus récente (14), rapportée dans la référence 6, confirmait que pour un parc éolien de 100 MW à Cap-Chat, il y avait coïncidence avec la reconstitution d'une courbe de demande réelle (données basées sur 30 ans de relevés) et la production potentielle de ce même parc éolien (données historiques de la mesure des vents).

La demande de pointe du réseau québécois est grandement influencée par le facteur de refroidissement éolien, étant donné l'importance du parc résidentiel chauffé à l'électricité au Québec. Dans sa réponse à la FCEI (15) Hydro-Québec mentionne l'influence des vents en hiver : 500 MW par 5 km/h

D'où, il est faux de prétendre que : « la puissance ferme disponible associée à la capacité nominale installée est nulle ». Mais faute d'une étude statistique poussée, il ne nous est pas possible de confirmer la valeur de 25 % de la capacité nominale installée.

#### 4. La Ressource éolienne du Québec

En 1995, Hydro-Québec et le ministère des Ressources Naturelles du Québec ont mandaté WECTEC (un consultant de Californie) et l'UQAR (Université du Québec à Rimouski) pour faire un relevé des données de vent disponibles. Les données de vent utilisables, pour fins d'analyse, se résument à 18 stations d'aéroports réparties principalement dans la vallée du St-Laurent. Pour l'ensemble du Québec, chaque station représentait environ 86 000 km<sup>2</sup>, soit l'équivalent d'un carré de 292 km de côté. Les mesures aux aéroports sont généralement prises à 10 mètres d'altitude, ce qui donne une imprécision lorsqu'on doit extrapoler au 80 m de hauteur du moyeu d'une éolienne moderne. De plus, en 1995, ils (WECTEC-UQAR) n'avaient tout simplement pas de données pour représenter l'intérieur du Québec.

De nouvelles méthodes d'évaluation de la ressource éolienne appliquent les données historiques de météo à la prospection éolienne (1), ce qui donne un historique d'environ 50 ans aux résultats. Les travaux de l'équipe canadienne sont faits en collaboration avec le centre de recherche Danois de Risø. Les résultats de calibration (validation du modèle avec des mesures anémométriques) en Suisse, au Sinaï et plus récemment en Saskatchewan et en Gaspésie montrent une précision de l'ordre du 0,5 mètre/seconde. Cette méthode est présentement utilisée pour produire un « ATLAS ÉOLIEN » canadien. La méthode est présentée au document RRSE.doc.6.

Les résultats obtenus selon la méthode développée à Environnement Canada sont présentés aux figures 2, 3 et 7, du document RRSE.doc.6, sous forme de cartes des vents et sous forme d'histogrammes des superficies en km<sup>2</sup> jouissant d'un vent donné. On peut résumer ces données :

- L'ensemble du Québec (fig. 2, RRSE.doc.6 et fig. 7, RRSE.doc.6) présente 933 800 km<sup>2</sup> ayant des vents supérieurs à 7 m/s, ce qui à une densité moyenne de 5 MW/ km<sup>2</sup> (note en bas de page)<sup>3</sup> permettrait d'installer 4 669 000 MW d'éoliennes pouvant produire 14 000 TWh/année. À des vents supérieurs à 8 m/s, on retrouve 555 100 km<sup>2</sup>, ce qui à 5 MW/ km<sup>2</sup> permettrait d'installer près de 2 775 000 MW d'éoliennes pouvant produire 8930 TWh par année.

- Au sud du 55<sup>e</sup> parallèle (fig. 3, RRSE.doc.6 et fig. 7, RRSE.doc.6), c'est-à-dire de la frontière des États-Unis jusqu'à la limite nord des lignes actuelles de transport d'électricité, on retrouve 298 450 km<sup>2</sup> de superficie présentant des vents supérieurs à 7 m/s, ce qui permettrait d'installer, à une densité moyenne de 5 MW/ km<sup>2</sup>, 1 492 000 MW d'éoliennes qui pourraient produire 4450 TWh par année. À des vents supérieurs à 8 m/s, on retrouve 155 500 km<sup>2</sup>, ce qui à 5 MW/ km<sup>2</sup> permettrait d'installer près de 778 000 MW d'éoliennes pouvant produire 2568 TWh par année.

- Par différence, le Québec au nord du 55<sup>e</sup> parallèle présente une superficie de 635 400 km<sup>2</sup> ayant une vitesse des vents supérieure à 7 m/s. Cette ressource permettrait d'installer 3 180 000 MW d'éoliennes pouvant produire près de 9560 TWh par année.

---

<sup>3</sup> on retrouve dans la littérature des taux d'installation de 1 à 10 MW/ km<sup>2</sup>. Dans la passe Altamont en Californie, on construisait 8,6 MW/km<sup>2</sup>, un exemple récent est un parc de 204 MW au Nouveau-Mexique (16) construit à raison de 8,5 MW/km<sup>2</sup>

Rappelons ici, que de projets d'envergure, bien conçus permettraient d'obtenir de l'énergie éolienne à moins de 5,6 ¢/kWh pour des vents supérieurs à 7 mètres/seconde et à moins de 4,7 ¢/kWh pour des vents supérieurs à 8 m/s. Ces coûts incluent le raccordement au réseau et le support en puissance (aussi appelé service d'équilibrage).

Évidemment, tout ce territoire n'est pas aménageable à 5 MW du km<sup>2</sup> (il est généralement avantageux d'aménager les parcs à plus de 5 MW/ km<sup>2</sup>, lorsque les conditions le permettent). Mais le portrait global montre un potentiel énorme, avec des vitesses moyennes annuelles des vents de 7 à 11 mètres par seconde. Ce qui fait de la ressource éolienne québécoise une ressource de bien meilleure qualité que la ressource Européenne (Allemagne, Espagne et Danemark).

Il est intéressant de rappeler ici qu'en 1977, McConnell et Vansant (17), à partir des données d'aéroport, estimaient le potentiel éolien du Québec à environ 200 000 MW.

## 5. Quelques exemples récents de coûts de l'éolien

La littérature récente offre une perspective sur le coût des machines éoliennes. Par contre, le coût du kilowattheure produit par l'éolien est fortement dépendant de la qualité des vents ou en d'autres termes, de la qualité de la ressource éolienne au site où à la région ou on veut l'harnacher :

- le département de l'énergie américain, via Bonneville Power Administration, autorise 830 MW (7 projets) d'éolien, dans les états de Washington et d'Orégon. Les projets seront en opération dans environ 2,5 ans. Le coût moyen de l'électricité éolienne sera de moins de 3 ¢US/kWh en incluant le coût du support en puissance (18, 19);
- aux Etats-Unis, des projets ont été réalisés pour moins de 3 ¢US/kWh qui, en incluant le Production Tax Credit (PTC) donne un prix d'environ 3,8 ¢US/kWh;
- en Écosse, un projet a été soumis (bidded) à 1,89 pence/kWh (approx. 4,4 ¢CDN/kWh);
- l'Association américaine de l'énergie éolienne (AWEA) rapportait que le projet Stateline de FPL Energy (frontière des États de Washington et de l'Orégon, environ 300 MW, produira de l'énergie électrique pour 2,5 ¢US/kWh (20) ;
- BPA (Bonneville power Administration), qui en 2001 a émis un appel d'offres pour 1000 MW, a reçu des propositions pour plus de 2600 MW d'éolien. Selon George Darr de BPA, le coût devrait être moins de 30 \$/MWh (3¢/kWh) (21), (à noter : ces coûts n'incluent pas le PTC de 1,5 ¢/kWh pour 10 ans, actualisé sur la vie de 20 ans, le 1,5 ¢ représente 0,9 ¢/kWh; d'où le coût sans le PTC serait de moins de 3,9 ¢/kWh);
- le parc éolien de 48 MW « Nine Canyon » coûtera (au début) environ 3,5 ¢/kWh après le PTC (22);
- avec le PTC, la plupart de l'énergie éolienne au Texas (900 MW déjà installé en 2001) revient à moins de 3 ¢/kWh (23);
- la compagnie Montana Power s'est entendue avec Montana Wind Harness pour acheter 150 MW de puissance éolienne à un taux de 31,65 \$/MWh (3,165 ¢/kWh), une entente qui inclut la construction d'une usine d'assemblage dans l'état (24) ;
- Energy NorthWest rapporte des ententes d'achat (purchase agreements) de 3,2 à 3,5 ¢/kWh pour le projet de Nine Canyon. Ces prix excluent le PTC et les frais de support en puissance d'environ 1,3 ¢/kWh que BPA fournira (25);
- l'Association Américaine de l'Énergie Éolienne (AWEA) prévoit que plus de 2000 MW d'éolien seront installés aux États-Unis en 2001 (26). Quatre parcs éoliens de 200 MW ou plus seront installés au Texas, en Californie et dans les États du Nord-Ouest en 2001. Certains de ces nouveaux projets fourniront de l'électricité à moins de 3 ¢US/kWh, ce qui est inférieur au coût de l'électricité produite avec le gaz naturel;
- dans une réponse à la Régie de l'Énergie, datée du 9 mai 2002 (27), page 2, on cite : « Le prix de vente de l'énergie éolienne ..... serait de l'ordre de 3,2 – 3,5 ¢/kWh;



- dans le rapport annuel de l'agence internationale de l'énergie (28), on montre :
  - en page 79 et en page 81, figure 4.3 et tableau 4.3, les prix payés en Europe (Unit price paid to wind generators). Ils vont de 2,46 US¢/kWh à 11,83 US¢/kWh;
  - en page 99, figure 6.4, le Danemark présente l'évolution des coûts estimés de l'électricité produite par l'éolien au Danemark, de 1981 à 1999, les coûts seraient passés de 1,2 à 0,25 couronnes danoises du kilowattheure (de 25 à 5,2 ¢Cdn/kWh);
  - l'Espagne, en page 201, y explique sa structure de coûts, qui sont de l'ordre de 6,4 Eurocents/kWh;
  - en page 242, figure 21.2, les Etats-Unis montrent l'évolution des coûts de l'énergie éolienne de 1980 à 2002, ou le coût serait passé de 85¢US/kWh à 3 ¢US/kWh, voir aussi page 247, texte sur les tendances de coûts ou ces chiffres sont repris.

### PROJECTIONS !

- Le rapport annuel de Vestas pour l'année 2000 (29), discute de l'évolution du coût de l'éolien, figure 2, page 11, où on cite un prix de 0,03 Euros à la fin de l'an 2000, soit environ 4,5 ¢CDN/kWh. Ce coût est pour les conditions suivantes :
  - vie de 20 ans;
  - taux d'intérêt de 6 %;
  - opération et entretien à 0,007 Euros (environ 1 ¢CDN/kWh);
  - vents de 6,7 mètres/seconde à 45 mètres d'altitude.

note : les vents québécois sont supérieurs à ceux utilisés par Vestas, ce qui donnerait un coût de l'éolien inférieur au coût cité par Vestas;

- basé sur le marché et sur l'expérience de l'industrie, les chiffres suivants représentent l'état de l'art de l'éolien en 2001, dans des conditions optimales (30):
  - coût d'investissement de l'ordre de 765 \$/kW installé;
  - coût de l'électricité de 3,61 ¢/kWh;
  - prévu chuter à 2,62 ¢/kWh en 2010, pour un coût d'investissement de 555 \$/kW installé;
- une analyse de tendances des coûts, publiée dans WindStats Newsletter, montre que le prix de l'éolien sera entre 23 et 26 \$/MWh (entre 2,3 et 2,6 ¢/kWh) en 2010 et baissera à entre 18 et 21 \$/MWh en 2020 (31).

NOTES:

- la majorité de ces prix sont des prix de producteurs privés. Weiser et son groupe (12) ont démontré qu'une compagnie de service public (Utility), de par sa façon de calculer arriverait à des coûts d'environ 30 % inférieurs;
- les prévisions et les coûts dans le cas de l'Europe sont pour des vents moindres que les vents que l'on peut trouver au Québec. Par exemple, l'Espagne fait des prévisions basées sur un vent (moyenne annuelle) de l'ordre de 6,5 à 7 mètres/seconde, alors qu'au Québec, on peut compter sur des vents de l'ordre de 7,5 à 9 mètres/seconde. Cette différence implique des coûts inférieurs de l'ordre de 20 %.
- Les coûts obtenus de la littérature donnent une idée des progrès réalisés par la technologie, ils ne constituent pas une évaluation des coûts réalisables au Québec. Pour obtenir les coûts réalisables au Québec, on doit jumeler les coûts de l'équipement éolien installé (que l'on peut obtenir de la littérature) aux vents, au réseau de transport et aux autres conditions locales du Québec.

## **6. Des exemples probants de succès dont pourrait s'inspirer le Québec**

La production d'électricité à partir de la ressource éolienne est aujourd'hui une réalité bien concrète, tel qu'en témoignent les pays qui font appel à cette filière d'énergie.

### **6.1. Danemark**

S'agissant de la production d'électricité à partir de la ressource éolienne, signalons que le Danemark produit près de 20 % de ses besoins en électricité par cette source d'énergie, pour une capacité installée de 3 110 MW à la fin de l'année 2003.

Par ailleurs, avec plus de 60 % du marché mondial, en l'an 2000, le Danemark exportait plus de 2,3 G\$ d'unités de production éoliennes ainsi que des composantes associées. Il en tirait près de 16 000 emplois, soit 4 300 chez les fabricants d'éoliennes et 11 700 chez les fabricants de composantes. En 2003, la part danoise du marché mondial est passée sous la barre des 40 %, du à l'évolution des taux de change et à l'émergence de la compétition (GE aux USA, Gamesa en Espagne, ...)

### **6.2. Allemagne**

L'Allemagne a débuté plus tard que le Danemark avec un programme d'incitatifs financiers visant à encourager l'utilisation de l'énergie éolienne, incitatifs basés sur les coûts environnementaux évités par cette source d'énergie. Elle possède aujourd'hui (fin 2003) un parc de production installé de 14 609 MW, un fabricant important (Enercon) et procure de l'emploi à 35 000 personnes.

Les coûts environnementaux associés à l'utilisation du charbon ou du nucléaire pour la production d'électricité mais évités par l'utilisation d'unités de production éoliennes ont été crédités à la production d'électricité à partir de la ressource éolienne et constituent les incitatifs payés à cette filière d'énergie.

### **6.3. Espagne**

L'Espagne est remarquable parce qu'en plus de construire des parcs éoliens, elle a su développer une industrie manufacturière (28, page 62).

L'Espagne est relativement une nouvelle venue dans le domaine éolien, le déploiement éolien ayant démarré vers 1992 et ayant été stimulé en 1995 sous l'impulsion gouvernementale garantissant des marges bénéficiaires pour les producteurs d'électricité faisant appel à cette source d'énergie. Le plan mis de l'avant par le gouvernement espagnol établit un prix devant être payé au producteur d'électricité faisant appel à cette technologie, prix qui comprend la valeur intrinsèque de la production électrique sans pollution de l'éolien.

De plus, le déploiement d'unités éoliennes aidant à combler les besoins en énergie de l'Espagne a incité à la fabrication locale des unités installées dans ce pays, la fabrication locale résultait essentiellement de l'association entre la firme Gamesa - un avionneur - et le fabricant éolien danois Vestas (Gamesa et Vestas ont divorcé en 2001). Ainsi, 3 ans

après l'entente Gamesa-Vestas, on y relevait un contenu local à plus de 90 %. À la fin de 2003, on y fabriquait des unités de 600 kW à 2 MW et l'Espagne avait installé 6802 MW d'éoliennes. On y associe également 20 000 emplois directs et indirects, le chiffre d'affaire des entreprises associées à l'industrie de l'éolien étant de l'ordre de 2,6 G\$ par année, en forte croissance.

#### **6.4. Union Européenne**

Basé sur un livre blanc de 1997, l'Union Européenne a adopté (en 2001) une directive selon laquelle 12 % de son énergie totale doit provenir de sources renouvelables en 2010, ce qui se traduit par 22 % de son électricité. Le conseil Européen des énergies renouvelables (EREC) a analysé la performance des différents secteurs (éolien, hydraulique, géothermie et photovoltaïque) par rapport aux objectifs de 2010. Selon cette analyse (9, 32), ces technologies atteindront leurs objectifs de 2010, plus spécifiquement, l'énergie éolienne atteindra ses objectifs avant 2010.

L'EREC, propose que 20 % de l'énergie européenne provienne de sources renouvelables en 2020. Pour la production électrique, la contribution des 5 technologies principales (éolien, hydraulique, PV, biomasse et géothermique) atteindra 33,8 %. La plus grande partie proviendra de l'éolien qui à ce stage aura atteint 180 000 MW de capacité installée (9, 32). Selon les mêmes références, de 2001 à 2020, les cinq secteurs permettront une économie de carburant de l'ordre de 116 milliards d'Euros.

Pour l'éolien, on prévoit un investissement de 55 milliards d'Euros de 2001 à 2010 et de 101 milliards d'Euros de 2011 à 2020. La réduction des gaz à effet de serre attribuée à l'éolien serait de 99 MT (mégatonnes) en 2010, soit près de 30 % des engagements de l'Union Européenne envers Kyoto. Pour 2020, l'éolien contribuera 236 MT de réduction des gaz à effet de serre. Le secteur éolien serait responsable de la création de 184 000 emplois en 2010 et de 318 000 emplois en 2020.

## **7. Incidences locales liées à la fabrication d'éoliennes**

En examinant les incidences associées à la fabrication d'unités de production éoliennes dans plusieurs pays, les constatations suivantes émergent clairement des initiatives mises de l'avant par plusieurs pays:

- les entreprises danoises de fabrication d'unités éoliennes se sont installées en Allemagne après que les autorités gouvernementales eurent créé les conditions pour que le marché de l'énergie éolienne s'y développe. L'Allemagne a par la suite investi afin de développer sa propre industrie éolienne, laquelle répond à plus de 60 % aux besoins de son marché local;
- les entreprises danoises et allemandes se sont installées en Espagne après que l'Espagne eut également créé les conditions pour que le marché de la production d'électricité à partir de cette source d'énergie s'y développe;
- des fabricants danois se sont installés en Italie après que l'Italie eut créé les conditions similaires à celles de l'Espagne;
- le fabricant danois d'éoliennes Vestas a implanté une usine en Écosse au printemps 2002, après que le gouvernement britannique eut mis en place des conditions similaires à celles de l'Espagne et de l'Italie;
- Selon son rapport annuel de 2003, le fabricant danois d'éoliennes Vestas planifie l'implantation d'une usine en Espagne en 2004 (pour retrouver le marché perdu après le divorce Gamesa-Vestas?).

**D'où, notre recommandation :**

- **pour rencontrer la demande croissante en énergie électrique au Québec;**
- **pour tirer avantage de l'immense ressource éolienne québécoise;**
- **pour respecter les principes du développement durable;**

**le gouvernement du Québec doit :**

- **refuser tout projet de recours à la filière thermique pour rencontrer les nouveaux besoins en énergie;**
- **dans un premier temps (si l'urgence des besoins d'énergie invoquée par Hydro-Québec s'avère) autoriser Hydro-Québec à se faire construire un parc éolien suffisant pour :**
  - **fournir la quantité d'énergie annuelle escomptée du projet « Le Suroît », (un parc éolien d'approximativement 2000 MW)**

- **fournir la quantité d'énergie escomptée du projet de Bécancour en discussion avec Trans Canada Energy (un parc éolien d'approximativement 1400 MW)**

- **fournir la quantité d'énergie escomptée de la centrale thermique de Tracy (autre que celle venant de la production lorsqu'elle est utilisée comme centrale de support en puissance) (un parc éolien d'approximativement 900 MW)**

- **dans un deuxième temps adopter une politique énergétique favorisant l'implantation d'une industrie éolienne au Québec. Le rôle de l'éolien serait de suppléer à la ressource hydraulique déjà développée pour rencontrer la croissance de la demande électrique québécoise et par le fait même refuser tout projet de développement de la filière thermique.**

## 8. Un programme éolien pour le Québec

### 8.1. Les atouts de l'éolien au Québec

Le Québec jouit de conditions exceptionnelles qui garantiraient le plein essor de la filière éolienne ainsi que des retombées économiques intéressantes. Ainsi:

- la ressource éolienne au Québec s'avère plus importante que la ressource hydraulique mais elle est mieux répartie géographiquement que cette dernière et son cycle de production est plus compatible aux besoins mensuels en électricité du Québec que celui présenté par la ressource hydraulique, en d'autres mots, la production éolienne suit la courbe de la demande, réduisant les besoins en stockage (6, 7); citons aussi le Windpower Monthly de mars 2004 : « la distribution saisonnière de l'énergie éolienne non seulement est en symbiose avec la demande au Canada, mais elle complémente l'apport hydraulique, permettant aux compagnies d'électricité de sauver plus d'eau dans les réservoirs » (8),
- en comparant les cartes des vents du Québec à celles du Danemark ou de l'Allemagne, on y constate une "qualité des vents" supérieure, sur un territoire 35 fois plus vaste que celui du Danemark;
- un des atouts majeurs dont jouit le Québec est la capacité de régulation de ses unités de production d'électricité, l'hydraulique s'avérant le meilleur partenaire de l'éolien à cause de la disponibilité de grands réservoirs, ces derniers assurant ainsi la régulation nécessaire à l'utilisation efficace de la ressource éolienne tout en optimisant le rendement du parc de production hydraulique;
- Citons ici la référence 8 : « la flexibilité opérationnelle de l'hydraulique en fait la meilleure source d'électricité pour supporter le développement des autres sources d'énergie renouvelable ». Voir aussi la référence 7, selon laquelle (en référant au portefeuille hydraulique d'Hydro-Québec) : « **Un grand volume d'énergie éolienne (plus de 10 TWh) peut être géré de façon optimale par le portefeuille hydraulique** » et ils ajoutent : « **Jusqu'à une certaine proportion (~10 à 20 %) (i.e, de 18 à 36 TWh) le profil annuel de production d'une source d'énergie n'apporte pas de valeur ou de coût particulier lorsque géré avec un stockage hydraulique important** ».
- Les lignes de transport qui ont été construites pour raccorder les gisements hydrauliques couvrent un vaste territoire où la ressource éolienne est également importante, ce qui permettrait de minimiser les coûts de raccordement des premiers grands parcs éoliens;
- la croissance annuelle de la demande électrique, prévue par Hydro-Québec, permettrait de "faire une place" à l'énergie éolienne en lui allouant une proportion pouvant aller jusqu'à 100 % de la nouvelle demande prévue, ce qui résulterait dans la mise en service d'unités de production éoliennes pouvant atteindre jusqu'à 1000 MW par année, dans le cas d'une croissance de la demande prévue de 1,5 % par année;

- les consultations publiques menées par la Régie de l'énergie en 1998, en plus d'avoir démontré la viabilité de la production d'électricité par la ressource éolienne, ont également établi que la production d'électricité par cette source d'énergie est vivement souhaitée par la population;
- le temps de réalisation de projets éoliens est relativement court. Selon l'association américaine de l'énergie éolienne (AWEA) (33), le délai normal pour compléter un projet éolien est de l'ordre de 18 à 24 mois, incluant l'évaluation de la ressource éolienne et l'obtention des autorisations requises.

## 8.2. Un programme conçu pour les besoins spécifiques du Québec

A la lumière des conclusions qui se dégagent des expériences espagnoles, allemandes et italiennes et des récents développements dans ce secteur d'activité, nous pouvons donc proposer un programme de développement éolien qui soit assuré d'une forte rentabilité tout en supportant la venue d'au moins un fabricant d'unités éoliennes au Québec, selon les paramètres suivants:

- depuis la recommandation de la Régie en 1998, la barrière à l'entrée a augmenté à tel point que la recommandation de la Régie, de 50 MW par année, devrait maintenant se lire comme étant de plus de 300 MW par année, voir la référence 2 (500 % d'augmentation de 1997 à 2003). Mais, ce 300 MW ne tient pas compte de la consolidation que l'industrie éolienne a vécu depuis 1997 (le nombre de fabricants a été réduit de beaucoup). À notre avis, tenant compte de ces facteurs, le minimum requis pour intéresser un fabricant important et s'assurer de coûts intéressants serait maintenant de l'ordre de 4 à 500 MW par année;
- en plus de fournir l'énergie attendue de la filière thermique (Le Suroît, TCE à Bécancour et la centrale de Tracy) on devrait réserver une part importante (jusqu'à 100 %) de la nouvelle demande à l'énergie éolienne, on créerait ainsi un marché local atteignant 1000 MW par année; un marché qui permettrait d'approcher les coûts de production des éoliennes (et des parcs éoliens) de l'exemple espagnol.

Un tel programme résulterait en des incidences économiques et des coûts de production qui se présentent ainsi:

- implantation, au Québec, d'au moins un fabricant d'éoliennes ce qui, après 3 années, permettrait l'atteinte d'un contenu local élevé, évalué à 90 % dans le cas de l'Espagne;
- création d'environ 12 000 emplois directs et indirects, (nous utilisons 12 emplois du MW produit, l'association des manufacturiers éoliens du Danemark utilisait 22 emplois du MW (17 en usine et 5 pour la planification, la construction et l'exploitation des parcs éoliens); l'Allemagne compte 35 000 emplois pour un taux d'installation annuelle de l'ordre de 2500 à 2800 MW, ce qui donne de 12 à 14 emplois du MW);
- un coût de production de l'électricité éolienne, pour les unités déployées sur le territoire du Québec, de l'ordre de 4,0 à 5,5 ¢/kWh à la condition que la propriété et l'exploitation des parcs éoliens soient confiés à Hydro-Québec ou à une autre société apparentée (une Société de l'Énergie Éolienne Québécoise à la SEBJ).



### 8.3. Un scénario conçu pour les besoins spécifiques du Québec

Le programme pourrait être réalisé selon différents scénarios. Nous en donnons trois exemples, par ordre de préférence :

#### Scénario 1

- Dans un premier temps, tout en refusant le recours à la filière thermique, le gouvernement du Québec mandate Hydro-Québec pour réaliser le programme éolien:

Hydro-Québec, (en supposant que l'urgence évoquée pour réaliser le projet « Le Suroît » est vérifiée (bas niveau des réservoirs – risque de rupture de stock)) :

- à l'aide des données de vent présentées dans le document RRSE.doc.6, va en appel d'offres pour se faire livrer clef en mains,

- (avec ou sans contrat d'opération)
- un (ou des) parc éolien pouvant produire 6,5 TWh par année (pour remplacer l'énergie escomptée du Suroît), à être construits le plus tôt possible (délai de 18 à 24 mois selon AWEA (33)).
- un (ou des) parc éolien pouvant produire 4,1 TWh par année (pour remplacer l'énergie escomptée du projet TCE à Bécancour), à être construits le plus tôt possible.
- un (ou des) parc éolien pouvant produire 2,6 TWh par année (pour éviter d'avoir à faire appel à la centrale thermique de Tracy), à être construits le plus tôt possible.

- Hydro-Québec choisit les emplacements des parcs éoliens par rapport à ses lignes de transport et par rapport à la ressource éolienne, de façon à minimiser les coûts globaux,

- Hydro-Québec ajuste la puissance de ses centrales hydrauliques (par exemple Manic 3PA, Manic 2PA, Manic 1PA), pour pouvoir fournir le support en puissance nécessaire ou alternativement construit des centrales à turbine à gaz à cycle simple pour fournir la puissance d'urgence dans les périodes de fortes demandes.

Quelques uns des critères de l'octroi du ou des contrats pourraient être :

- la rapidité d'exécution,
- le coût,
- le choix de la machine éolienne,
- la garantie de production,
- le pourcentage de contenu local.

Alternativement, Hydro-Québec pourrait aller en appel d'offres pour choisir un (ou des) fabricants d'éoliennes puis aller en appel d'offres pour faire construire le ou les parcs éoliens avec les éoliennes choisies.

Passé cette urgence qui incite Hydro-Québec à faire appel à la filière thermique, pour faire face à la croissance future de la demande, Hydro-Québec devrait développer des ententes avec Environnement Canada pour faire une carte des vents du Québec à une résolution de 200 mètres (coûts de l'ordre de 100 à 150 k\$ et délais de l'ordre de 6 à 8 mois), pour pouvoir planifier de la même façon (via appel d'offres) pour la livraison clef en mains de parcs éoliens (de l'ordre de 1000 MW par année) dans la ou les régions

qu'elle aura ciblées. Hydro-Québec pourra ainsi gérer de façon harmonieuse l'intégration de l'éolien à l'hydraulique.

## Scénario 2

Advenant l'impossibilité de faire réaliser le scénario 1 par Hydro-Québec, le gouvernement devrait considérer l'approche utilisée par M. Bourassa pour le complexe hydroélectrique de la Baie James<sup>4</sup> soit la création d'une « Société de l'Énergie Éolienne du Québec (SÉÉQ) ».

Tout en refusant le recours à la filière thermique, le gouvernement du Québec mandate la SÉÉQ pour réaliser le programme éolien dont le mandat serait de faire construire les parcs éoliens et les livrer opérationnels à Hydro-Québec production.

La SÉÉQ (en supposant que l'urgence évoquée pour réaliser du projet « Le Suroît » est vérifiée (bas niveau des réservoirs – risque de rupture de stock)) :

- à l'aide des données de vent présentées dans le document RRSE.doc.6 va en appel d'offres pour se faire livrer clef en mains :

- (avec ou sans contrat d'opération)
  - un (ou des) parc éolien pouvant produire 6,5 TWh par année (pour remplacer l'énergie escomptée du Suroît), à être construits le plus tôt possible, qu'elle transfère à Hydro-Québec production dès que le parc est opérationnel,
  - un (ou des) parc éolien pouvant produire 4,1 TWh par année (pour remplacer l'énergie escomptée du projet TCE à Bécancour), à être construits le plus tôt possible, qu'elle transfère à Hydro-Québec production dès que le parc est opérationnel,
  - un (ou des) parc éolien pouvant produire 2,6 TWh par année (pour éviter d'avoir à faire appel à la centrale thermique de Tracy), à être construits le plus tôt possible, qu'elle transfère à Hydro-Québec production dès que le parc est opérationnel,

Passé l'urgence qui incite Hydro-Québec à faire appel à la filière thermique, pour faire face à la croissance future de la demande, la SÉÉQ :

- cartographie ou fait cartographier les vents;
- développe des ententes avec un (ou des) manufacturiers d'éoliennes pour faire fabriquer les éoliennes au Québec);
- construit ou fait construire des parcs éoliens;
- livre les parcs éoliens opérationnels à Hydro-Québec;
- ou alternativement elle opère les parcs éoliens et livre l'énergie à Hydro-Québec qui doit l'accepter en priorité.

- La SÉÉQ se coordonne avec Hydro-Québec pour choisir l'emplacement des parcs éoliens par rapport aux lignes de transport;

- la SÉÉQ a accès au personnel qualifié d'Hydro-Québec, selon des ententes à développer;

- Hydro-Québec gère son réseau de transport en conséquence;

- Hydro-Québec ajuste la puissance de ses centrales hydrauliques (par exemple Manic 3PA, Manic 2PA, Manic 1PA), pour pouvoir fournir le support en puissance

---

<sup>4</sup> création de la SEBJ

nécessaire ou alternativement construit des centrales à turbine à gaz à cycle simple pour fournir la puissance d'urgence dans les périodes de fortes demandes.

### Scénario 3

Scénario où le gouvernement confie le développement de la filière éolienne au privé.

**Il faut rappeler ici que ce scénario mènera obligatoirement à des coûts de l'électricité éolienne plus élevés, de l'ordre de 1,4 à 2 ¢/kWh, que si la propriété est confiée à Hydro-Québec ou à une autre société de la couronne (la SÉÉQ). Selon l'interprétation de Wiser et al (12), les deux facteurs principaux qui expliquent cette différence sont:**

- le pouvoir d'emprunt d'une compagnie d'électricité publique, selon le tableau de la référence 12, à la page 8, le taux d'intérêt des emprunts de la compagnie d'électricité serait de 5 % et de 7,5 % pour les promoteurs privés,
- la période d'amortissement de la dette, qui serait de 20 ans (durée de vie de l'équipement) pour la compagnie d'électricité serait de 15 ans pour les promoteurs privés.

**On peut faire la même analyse en comparant les références 34, page 20 et 35 page 46. La compagnie d'électricité finance pour la vie de l'équipement (25 ans) versus 15 ans pour le privé. De même, le taux d'actualisation nominal est de 9,1 % pour la compagnie d'électricité versus 12,2 % pour le privé.**

Tout en refusant le recours à la filière thermique, le gouvernement du Québec édicte une quote-part éolienne qu'Hydro-Québec devrait acheter en priorité. Cette quote-part :

- pourrait être basée sur un objectif de production annuelle. Une quote-part de 41 TWH à être obtenue dans 10 ans représenterait la somme des projets (Le Suroît + TCE à Bécancour) plus la production escomptée de Tracy, et la croissance de la demande sur 10 ans à 1,5 % par année;
- pourrait être basée sur un objectif de puissance éolienne installée (exemple du Texas), par exemple 14 000 MW à être installé sur 10 ans (toujours pour fournir l'énergie escomptée du thermique plus la croissance de la demande à 1,5 % sur 10 ans);

Les promoteurs privés s'organiseraient pour réaliser des parcs éoliens qu'ils opéreraient et dont ils vendraient la production à Hydro-Québec. Un ou des fabricants et peut-être des constructeurs de parcs éoliens pourraient être intéressés à venir s'établir au Québec.

Hydro-Québec devrait :

- accepter sur son réseau les parcs éoliens où les promoteurs privés auraient choisi de les construire (note : le poste élévateur au voltage de la ligne de transport fait partie du parc éolien);
- acheter toute l'électricité produite par les parcs éoliens;
- assurer la stabilité du réseau;
- régulariser la production éolienne et assurer la support en puissance en ajustant la puissance de ses centrales hydrauliques (par exemple Manic 3PA, Manic 2PA, Manic

1PA) ou alternativement en construisant des centrales à turbine à gaz à cycle simple pour fournir la puissance d'urgence dans les périodes de fortes demandes.

## 8,4 Méthodologie de réalisation de parcs éoliens

Pour implanter une industrie éolienne au Québec, et :

- rencontrer la demande croissante en énergie électrique au Québec, tout en maintenant les coûts d'électricité les plus bas possibles;
- tirer avantage de l'immense ressource éolienne québécoise;
- respecter les principes du développement durable;
- créer de l'emploi de qualité (en usine) au Québec;
- éviter le recours à la filière thermique;

Nous proposons la formation d'un groupe de travail (à l'intérieur d'Hydro-Québec) qui inclurait des spécialistes des domaines nécessaires pour piloter le projet éolien. Son mandat serait de planifier et concevoir les parcs éoliens, obtenir les permis nécessaires, négocier les ententes avec les propriétaires terriens, recruter (par appel d'offres) un fabricant d'éoliennes et un constructeur de parcs éoliens, mettre en service et transférer les parcs éoliens opérationnels à Hydro-Québec production.

Le groupe de travail serait formé de trois équipes :

- la première équipe serait responsable de dresser la cartographie des vents, l'obtention des permis, la négociation des ententes avec les propriétaires de terrains. En plus des quantités d'énergie requises pour éviter le recours à la filière thermique, elle aurait à faire les études de faisabilité et à négocier le financement pour 1000 MW par année de parcs éoliens, de deux à trois ans avant la mise en service de chaque bloc de 1000 MW. (Note : le travail de cette équipe pourrait être confié à un constructeur de parcs éoliens recruté par appel d'offres);
  - cette première équipe serait responsable de préparer une série de projets annuels de 1000 MW, et en coopération avec Hydro-Québec, d'en établir un classement par ordre croissant de coûts, pour pouvoir les réaliser dans cet ordre;
- la deuxième équipe aurait la responsabilité de finaliser la conception du (ou des) parc (études d'avant projet), construire les routes, les lignes et le poste de raccordement, ériger les éoliennes et installer le poste de commande du parc. (Note : le travail de cette équipe pourrait être confié à un constructeur de parcs éoliens recruté par appel d'offres);
- la troisième équipe serait responsable de la mise en service et du transfert à Hydro-Québec. Cette équipe pourrait aussi opérer le parc pour quelques mois ou de façon permanente en coopération avec le groupe production d'Hydro-Québec. (Note : le travail de cette équipe pourrait être confié à un constructeur de parcs éoliens recruté par appel d'offres);

Le groupe de travail (ou le constructeur de parcs éoliens) se coordonnerait avec le fabricant des éoliennes (recruté par appel d'offres) qui, avec son réseau de sous-traitants, produirait les éoliennes à un taux de 1000 MW par année.



## 9. Analyse économique : Le thermique vs l'éolien

### 9.1. Coût de l'alternative éolienne au projet « Le Suroît »

Pour faire une comparaison économique de la filière éolienne en comparaison avec la filière thermique, comme **cas de base**, nous utiliserons le projet « Le Suroît » planifié par Hydro-Québec, puisque ses paramètres sont connus. Nous utiliserons un vent moyen annuel de 8 mètres/seconde, ressource que nous avons identifiée en abondance dans quelques régions du Québec (voir section 4, la ressource éolienne du Québec) à proximité du réseau de transport à 735 kV d'Hydro-Québec, voir aussi les figures 6 et 7, RRSE.doc.6.

Afin d'obtenir des caractéristiques « puissance/énergie » comparables au projet « Le Suroît » soumis par Hydro-Québec Production, un parc (ou des parcs) d'éoliennes totalisant 2197 MW devrait être mis en service, pour un coût total de 2781 M\$.

Pour obtenir ces coûts, nous avons utilisé des informations obtenues de la bourse du Danemark (36) concernant le prix de vente d'unités éoliennes reçues en commande par son partenaire espagnol « Gamesa » au début de l'an 2000 – 1400 MW pour 5 Milliards de Couronnes danoises<sup>5</sup> -, nous obtenons un coût de vente des unités éoliennes livrées à ce client, transposé au contexte québécois, de 1265,82 \$Cdn du kW installé et raccordé au réseau<sup>6</sup>, un coût qui se répartit comme suit :

- un coût de vente de base de 793 \$/kW;
- une majoration de 5 % pour la version « nordique » de ces unités;
- des frais de planification, de construction et de raccordement au réseau de 25 % (37);
- une réserve de 20 % pour les imprévus;
- un coût de 37 M\$ (38) pour le support en puissance, à titre d'exemple, ce pourrait être un 3e groupe turbine-alternateur ajouté à la centrale de Ste-Marguerite, ou une partie du coût de sur-équipement des centrales Manic 3, 2 et 1, ou...

Les principaux paramètres financiers et énergétiques qui nous permettent d'établir le coût de la production d'électricité à partir de l'option éolienne à 4,87 ¢/kWh sont :

- un taux d'actualisation nominal de 9,1 %, un taux d'inflation de 2,5 % (35) et une vie utile de 20 ans : donnent un coût de capital, net d'inflation, de 114,33 \$/kW/année;

---

<sup>5</sup> taux de conversion utilisé de 0,2220 \$Cdn par Couronne danoise, La Presse, 1<sup>er</sup> avril 2004,

<sup>6</sup> ici, raccordé au réseau signifie que le réseau de collecte d'électricité à moyenne tension, le poste élévateur à la tension de réseau de 735 kV et les équipements de protection du réseau font partie du parc éolien.

- une production annuelle nette de 2958 kWh/kW<sup>7</sup>, pour un vent de 8 mètres/seconde après allocation de 14 % de pertes, résulte en un coût de capital de l'énergie produite de 3,87 ¢/kWh (114,33/2958);
- un coût d'opération et d'entretien de l'ordre de 1 ¢/kWh (39).

Le tableau 1 en annexe au présent document (RRSE.doc.7) présente un chiffrer comparatif des flux monétaires, sur une base annuelle, pour les deux propositions (Le Suroît versus éolien) avec une mise en service en 2008. Les résultats démontrent de façon éloquente un coût actualisé de la filière éolienne inférieur de 1,6 Milliards \$ par rapport à l'option s'appuyant sur la filière au gaz naturel. Ces résultats sont aussi présentés sous forme graphique à la même annexe.

Ces résultats s'appliquent pour des éoliennes aux mêmes coûts que celles fabriquées en Espagne (en d'autres mots pour des éoliennes importées d'Espagne). Les résultats sont pour des projets financés par Hydro-Québec ou par une autre société appartenant au gouvernement québécois : selon Wisner and Kahn (40), les coûts de tels projets devraient être inférieurs de 30 à 40 % à ceux appartenant à des promoteurs privés.

## 9.2. Analyse de sensibilité

En utilisant le tableau 1 comme cas de base, nous examinerons l'impact de divers paramètres sur les coûts comparatifs de la filière éolienne par rapport à la filière thermique.

### Fabrication locale :

En Espagne, où les éoliennes pour le contrat de 1400 MW cité plus haut (36) étaient fabriquées, les salaires industriels étaient 8 % plus élevés qu'au Québec en 2000, en tenant compte de la variation des taux de change depuis, on obtient un coût de la main d'œuvre industrielle de 25 % supérieure au coût de la main d'œuvre industrielle québécoise (taux de change 2000- 2004 (1,62/1,40) multiplié par le 1,08 de 2000). La portion du coût d'une éolienne provenant de la main d'œuvre est approximativement de 50 %. D'où, la fabrication locale réduirait le coût des éoliennes de 12,5 %. D'où, le parc de 2197 MW coûterait 343 M\$ de moins que le cas de base, donnant un avantage éolien versus « Le Suroît » de 1975 M\$.

---

<sup>7</sup> performance moyenne de 7 éoliennes de 0,66 à 3 MW de puissance nominale



### Crédit de gaz à effet de serre :

.Selon Hydro-Québec (35), la centrale au gaz recevrait des crédits de CO<sub>2</sub>, mais un parc éolien pourrait en recevoir plus (puisqu'il ne produit pas de CO<sub>2</sub>). Ces crédits de CO<sub>2</sub> pourraient être vendus à 10 ou 15 \$/tonne de CO<sub>2</sub>. L'avantage de l'éolien par rapport au Suroît serait de 0,35 ¢/kWh à 0,52 ¢/kWh, pour une différence de revenu annuel de 22,75 à 33,8 M\$. Actualisé sur 20 ans à 9,1 % nominal avec une inflation de 2,5 %, on obtient de 252 à 374 M\$ de plus que le cas de base, soit un avantage de l'éolien sur « Le Suroît » de 1884 à 2006 M\$.

Une étude préparée pour l'état de New-York (41) établissait les externalités environnementales d'une centrale au gaz naturel à 0,8 à 1,2 ¢Cdn/kWh (576 à 864 M\$ actualisé sur 20 ans).

### Variation des coûts du gaz:

M. Greenspan, le président de la réserve fédérale américaine, dans un discours prononcé en janvier dernier prévoyait que d'ici 2007-2008, les coûts du gaz naturel pourraient augmenter de 50 %, ce qui augmenterait les coûts de l'électricité produite par la centrale du Suroît de 2,13 ¢/kWh, pour une augmentation des coûts annuels de 138,45 M\$ par année. Actualisé sur 20 ans à 9,1 % nominal avec une inflation de 2,5 %, on obtient une valeur présente de 1522 M\$, augmentant l'avantage de l'éolien par rapport au projet « Le Suroît » de 1522 M\$ par rapport au cas de base ou un avantage de l'éolien sur « Le Suroît » de 3154 M\$.

### Augmentation du coût du financement :

Une augmentation des taux d'intérêt désavantagerait l'éolien plus que le gaz. Le coût d'investissement pour l'éolien est de 2781 M\$ versus 550 M\$ pour le gaz, sur la différence de 2231 M\$, une augmentation de 1 % du taux nominal d'actualisation d'Hydro-Québec, tous les autres paramètres demeurant inchangés, donnerait une augmentation différentielle du coût de l'éolien de 16,5 M\$ par année. Montant qui actualisé sur 20 ans à 9,1 % nominal avec une inflation de 2,5 %, donne une valeur présente de 183 M\$, réduisant l'avantage de l'éolien sur le Suroît par rapport au cas de base d'autant, laissant un avantage de l'éolien sur « Le Suroît » de 1449 M\$.

### Augmentation du coût installé, raccordé au réseau, du parc éolien :

Si le coût du parc éolien, raccordé au réseau était augmenté de 10 %. Le coût global du projet éolien augmenterait de 278 M\$ par rapport au cas de base (puisque, dans le cas de l'éolien, la majorité des frais sur 20 ans proviennent de l'investissement initial). L'avantage de l'éolien par rapport au « Suroît » serait réduit d'autant par rapport au cas de base, laissant un avantage de l'éolien sur « Le Suroît » de 1354 M\$.

Si le coût du parc éolien, raccordé au réseau était augmenté de 20 %. Le coût global du projet éolien augmenterait de 556 M\$ par rapport au cas de base (puisque, dans le cas de l'éolien, la majorité des frais sur 20 ans proviennent de l'investissement initial). L'avantage de l'éolien par rapport au Suroît serait réduit d'autant par rapport au cas de base, laissant un avantage de l'éolien sur « Le Suroît » de 1076 M\$.

### Vents plus faibles que le cas de base :

Une vitesse moyenne annuelle des vents de 7,5 m/s plutôt que de 8 m/s utilisé pour le cas de base, exigerait un parc éolien de 2449 MW pour produire les 6,5 TWh escomptés du projet « Le Suroît ». Le coût du parc éolien (incluant le coût de son raccordement au réseau) serait de 3095 M\$. L'avantage de l'éolien sur le gaz serait réduit de 314 M\$ (3095 – 2781), laissant un avantage de l'éolien sur « Le Suroît » de 1318 M\$.

Une vitesse moyenne annuelle des vents de 7,0 m/s plutôt que de 8 m/s utilisé pour le cas de base, exigerait un parc éolien de 2783 MW pour produire les 6,5 TWh escomptés du projet « Le Suroît ». Le coût du parc éolien (incluant le coût de son raccordement au réseau) serait de 3513 M\$. L'avantage de l'éolien sur le gaz serait réduit de 732 M\$ (3513 – 2781), laissant un avantage de l'éolien sur « Le Suroît » de 900 M\$.

#### Financement privé vs public :

Comme on l'a vu, selon Wisner et al (12) un projet financé par Hydro-Québec ou une corporation gouvernementale obtiendrait des coûts inférieurs de 1,4 à 2 ¢/kWh, lorsque comparé au privé. Cette différence représente un coût annuel de 91 à 130 M\$, actualisé sur 20 ans à 9,1 % nominal avec une inflation de 2,5 %, on obtient 1007 à 1439 M\$. Ce qui réduirait l'avantage éolien versus le Suroît à entre 625 M\$ et 193 M\$, soit de 1007 à 1439 M\$ de moins que le cas de base.

#### Frais d'équilibrage:

Est-ce que l'on doit ajouter des frais d'équilibrage à la production éolienne?

La réponse est : « peut-être que oui, peut-être que non », dépendant du service exigé de l'éolien!

Dans le cadre de l'appel d'offres de 1000 MW pour la Gaspésie, Hydro-Québec exige de l'éolien un service de base! Une telle exigence est surprenante! Il est généralement reconnu que l'éolien est un bon producteur d'énergie mais un pauvre producteur de puissance. En exiger un service de base va à l'encontre de ses caractéristiques intrinsèques et résultera en un gonflement des coûts : est-ce le but recherché?

Le jumelage Hydro-Éolien est reconnu comme étant le moyen idéal d'optimiser le recours à l'éolien (6, 7, 8 et 13). À titre d'exemple, si on suppose une centrale hydraulique de 1600 MW, ayant une hauteur de chute de 145 mètres, alimentée par un réservoir de 625 km<sup>2</sup> et ayant un marnage de 45 mètres, auquel on jumèle un parc éolien de 2000 MW à un facteur de capacité de 0,30. D'octobre où le réservoir hydraulique est à sa hauteur maximale à mai, où il est à sa hauteur minimale, le parc éolien réduirait la chute du niveau de 25 mètres, permettant à la centrale hydraulique (à la fin du cycle) de produire 25 % plus de puissance pour un débit donné ou de consommer 25 % moins d'eau pour une puissance donnée. Pour cet exemple de jumelage, on devrait créditer l'éolien d'un support en puissance moyen de 200 MW, ce qui aurait une valeur de 9\$/MWh. Cette valeur, convertie au 6,5 TWh escompté du parc éolien qui remplacerait « Le Suroît » donne une amélioration annuelle de 58,5 M\$, qui actualisée sur 20 ans vaut 648 M\$.

Selon Milborrow (10), pour le taux de pénétration qu'un parc d'éoliennes remplaçant « Le Suroît » aurait sur le réseau d'Hydro-Québec, le coût d'équilibrage pourrait être de 1

à 2 \$US/MWh (1,32 à 2,64 \$Cdn/MWh) pour un réseau alimenté par du thermique, alors qu'Hydro-Québec exige des frais d'équilibrage de 9 \$/MWh pour le 1000 MW de la Gaspésie?? Le coût de 2,64 \$ /MWh se traduit par un coût annuel de 17,2 M\$ et le coût actualisé sur 20 ans est de 190 M\$.

Doit-on créditer l'éolien pour sa contribution au réseau hydroélectrique ou le débiter parce qu'on cherche à lui faire jouer un rôle (service de base) contre sa nature? C'est une réponse à +648 M\$ ou à - 190 M\$. Une réponse provient de Milborrow (42) « prices are what you want them to be » ce qui pourrait se traduire par : « ça dépend de ce que l'on veut prouver » !

Résumé de l'analyse de sensibilité :

(données actualisées sur 20 ans à 9,1 %, inflation à 2,5 %)

## Avantage de l'éolien versus Le Suroît

Cas de base (tableau 1)	1632 M\$
Fabrication locale	+ 343 M\$
Crédit de gaz à effets de serre	+ 252 à 374 M\$
augmentation des coûts du gaz, + 50 %	+ 1522 M\$
augmentation des taux d'intérêts, + 1 %	- 183 M\$
augmentation du coût final des parcs éoliens	
installés, + 10 %	- 278 M\$
+ 20 %	- 556 M\$
vents plus faibles que prévus, - 0,5 m/s	- 314 M\$
- 1,0 m/s	- 732 M\$
financement privé, (15 ans à 12,2 %, inflation de 2,5 %)	- 1007 M\$ à - 1439 M\$
équilibrage, dépendant du mode d'intégration	+ 648 M\$ ou - 190 M\$

Comme on peut le constater, à partir du cas de base, aucune des variations de paramètres ne rend l'éolien moins rentable que le thermique. Spécialement si on considère qu'avec le volume de fabrication, préconisé dans le présent mémoire, les probabilités de fabrication locale sont très bonnes.

**9.3. Retombées**

En plus de produire de l'électricité à meilleur coût que la filière thermique, d'utiliser une ressource indigène au Québec et de produire une électricité propre, presque sans gaz à effets de serre, l'éolien est un produit manufacturé qui crée de l'emploi local, ce qui génère des retombées intéressantes pour les gouvernements. De plus, la pratique générale aux États-Unis et en Europe est de compenser les propriétaires terriens où l'énergie éolienne est harnachée.

Retombées aux gouvernements :

Les deux paliers de gouvernement (provincial et fédéral) bénéficieraient des retombées produites par la création d'emplois.

Le recours à l'éolien exigerait l'évaluation de la ressource éolienne, la planification des parcs, la fabrication des éoliennes et de leurs composantes, la construction des parcs: routes; fondations; raccordement au réseau électrique (installation des transformateurs élévateur de tension du voltage industriel (600 volts) au voltage intermédiaire (25, 35, 69 ou 120 kV), d'un réseau de cueillette de l'électricité au voltage intermédiaire choisi, d'un poste de raccordement au réseau, incluant le transformateur élévateur à la tension du réseau); érection des éoliennes, surveillance et entretien des éoliennes.

Les Danois utilisent un facteur de 22 emplois créés par MW installé. En Allemagne où historiquement on a installé de plus grosse éoliennes qu'au Danemark, le ratio serait plutôt de l'ordre de 14. En utilisant un ratio plus conservateur de 12 et un taux

d'installation de 1000 MW par année après l'urgence de remplacer l'énergie escomptée des projets thermiques (Le Suroît, TCE à Bécancour et la centrale de Tracy), on obtient :

- pour les cinq premières années où en « urgence » on construit des parcs éoliens pour produire l'énergie escomptée du Suroît, de TCE à Bécancour et de Tracy, un niveau d'emploi passant de 1500 à 14 400 personnes par année pour une moyenne de 880 emplois annuels (1<sup>e</sup> année, éoliennes importées – augmentation graduelle du contenu local jusqu'à 80 %),

- pour les années suivantes, un taux de production/installation de 1000 MW/année (croissance de la demande rencontrée par l'éolien) un niveau de 12 000 emplois permanents,

Nous avons estimé des emplois de qualité industrielle à 42 750 \$/année par personne avec un taux d'inflation annuelle de 2,5 %. En estimant les impôts payés sur ces emplois tant au provincial qu'au fédéral et en calculant la TVQ et la TPS sur le salaire après impôts, nous obtenons les retombées suivantes :

	Québec	Fédéral
Impôt sur le salaire	4935 \$	4097 \$
TVQ et TPS	2414 \$	2106 \$
Retombées par emploi	7349 \$	6203 \$
1 <sup>e</sup> année du plan d'urgence, 1 500 emplois	11 M\$	9 M\$
2 <sup>e</sup> année du plan d'urgence, 4 900 emplois	37 M\$	31 M\$
3 <sup>e</sup> année du plan d'urgence, 10 000 emplois	77 M\$	65 M\$
4 <sup>e</sup> année du plan d'urgence, 13 200 emplois	104 M\$	88 M\$
5 <sup>e</sup> année du plan d'urgence, 14 400 emplois	117 M\$	99 M\$
6 <sup>e</sup> année +, à 1000 MW/an, 12 000 emplois	100 M\$	84 M\$
actualisé sur 20 ans (9,1 %, inflation à 2,5 %)	850 M\$	716 M\$
actualisé sur 20 ans, en ¢/kWh	1,19	1,00
Le niveau de croisière de la 6 <sup>e</sup> année actualisé sur 10 ans (terme du PTC américain)	1,81 ¢/kWh	1,53 ¢/kWh

En comparaison, après la phase de construction, le niveau d'emploi pour la centrale thermique du Suroît serait de 52 emplois permanents.

#### Redevances aux propriétaires des terrains où l'énergie éolienne sera cueillie

En général (pratique américaine) cette redevance est de l'ordre de 0,1 ¢/kWh. Elle fait partie des frais d'opération et d'entretien de 1,0 ¢/kWh. Une éolienne de 2 MW générerait une redevance d'environ 6 000 \$/année. Selon Chappell (43), en termes de revenu par hectare, un fermier peut augmenter son revenu annuel de 30 à 100 % dépendant du type de culture qu'il pratique.

#### **9.4. Impact environnemental comparatif de l'option « gaz naturel » vs la filière éolienne**

Comme mentionné ci-haut, l'impact environnemental de la centrale au gaz naturel « Le Suroît » est :

- la production de plus de 2,25 million de tonnes par année de CO<sub>2</sub> , soit l'équivalent d'une flotte de 600 000 véhicules automobiles;
- la production de près de 240 tonnes par année d'oxydes d'azote NO<sub>x</sub> ;
- la production de polluants – incluant des gaz à effet de serre – et une consommation d'énergie durant la construction de la centrale.

Quant à lui, l'impact environnemental de la filière éolienne se résume à :

- la production de polluants – incluant des gaz à effet de serre – durant la fabrication des éoliennes et la construction des parcs éoliens. Une étude de l'Association des fabricants danois (44) démontre que la consommation d'énergie, pour ces activités, représente l'équivalent de 2 à 3 mois de production d'électricité sur la vie utile de 20 ans des éoliennes (rendement sur l'investissement (énergie produite/énergie consommée) de 69 à 103);
- un faible impact sur la faune, notamment durant la phase de construction des parcs – durée de construction sur le site d'environ 3 mois -,
- des risques de collision des oiseaux (45), notamment avec les lignes électriques raccordant les éoliennes individuelles à l'intérieur des parcs éoliens (une solution consiste à enfouir le réseau de raccordement);
- de faibles inconvénients associés au bruit (46), les éoliennes modernes ne produisant que 40 dB à une distance de 400 mètres des tours;
- un faible impact visuel, les parcs éoliens étant généralement conçus pour être en harmonie avec leur environnement immédiat.

## **10. Exemple de projets permettant d'éviter la filière thermique :**

Comme exemple de parcs éoliens qui permettraient d'éviter la filière thermique, nous proposons quatre régions qui pourraient fournir la même quantité d'énergie qu'escompté du projet « Le Suroît », du projet de Bécancour de TCE et de la centrale de Tracy opérée en sus du support en puissance lors des périodes de pointe de l'hiver. La figure 6, RRSE.doc.6 de l'annexe 1 au présent mémoire, montre le réseau de transport superposé sur la carte des vents pour les 4 zones analysées, alors que la figure 7, RRSE.doc.6, cibles 1, 2, 3 et 4, de la même annexe, montre les histogrammes des superficies exposées à un vent donné.

La proposition, ici, est que le parc éolien soit opéré en coopération avec le complexe hydroélectrique près duquel il est situé, en ce sens que pour éviter la construction de nouvelles lignes de transport, la production totale hydraulique et éolienne ne surcharge

pas la (ou les) ligne de transport. La puissance hydraulique serait modulée pour combler la capacité de la ligne de transport moins la production éolienne. Ainsi, la demande plus faible faite à l'hydraulique permettrait de rebâtir les réserves au complexe hydroélectrique situé près du parc éolien ou à un autre complexe hydroélectrique raccordé au réseau.

Les besoins exprimés pour le thermique sont :

Tracy	Le Suroît	TCE Bécancour
Énergie Ann, TWh 2,6	6,5	4,1
Puissance installée, MW 600	825	507

Ces besoins pourraient être comblés par:

### 10.1. Cible 1 : Parc éolien dans Charlevoix

Encadré par des lignes à 735 kV

Energie ann, TWh	6,5	4,1	2,6
Puissance, MW, à v = 7,75 m/s	935		
Puissance, MW, à v = 7,25 m/s	1554	1643	303
Puissance, MW, à v = 6,75 m/s			849
Puissance totale, MW	2489	1643	1152
Coût du parc éolien, Raccordé au réseau, M\$	3151	2080	1458
Coût, incluant entretien, ¢/kWh	5,4	5,6	6,1
Avantage sur le Suroît, actualisé sur 20 ans, M\$	1095		

ou par :

### 10.2. Cible 2 : Parc éolien région de La Grande 4 – Laforge

Energie ann, TWh	6,5	4,1	2,6
Puissance, MW, à v = 9,25 m/s	1788	303	
Puissance, MW, à v = 8,75 m/s		888	770
Puissance totale, MW	1788	1191	770
Coût du parc éolien, Raccordé au réseau, M\$	2263	1508	975
Coût, incluant entretien, ¢/kWh	4,1	4,3	4,4
Avantage sur le Suroît, actualisé sur 20 ans, M\$	1983		

ou par :



### 10.3. Cible 3 : Parc éolien en Montérégie, à l'ouest de St-Jean sur Richelieu,

(à proximité du réseau à 735 kV)

Energie ann, TWh	6,5	4,1	2,6
Puissance, MW , à v = 7,25 m/s	115		
Puissance, MW , à v = 6,75 m/s	2861	1888	1197
Puissance totale, MW	2976	1888	1197
Coût du parc éolien, Raccordé au réseau, M\$	3767	2390	1515
Coût, incluant entretien, ¢/kWh	6,2	6,3	6,3
Actualisé sur 20 ans, avantage sur le Suroît, M\$	479		

ou par :

### 10.4. Cible 4 : Parc éolien dans la région Manic - Outardes - Bersimis

(à proximité du réseau à 735 kV)

Énergie ann, TWh	6,5	4,1	2,6
Puissance, MW, à v = 8,25 m/s	2095		
Puissance, MW, à v = 7,75 m/s		1461	927
Coût du parc éolien, Raccordé au réseau, M\$	2654	1862	1173
Coût, incluant entretien, ¢/kWh	4,7	5,1	5,1
Avantage sur le Suroît, actualisé sur 20 ans, M\$	1592		

Notes :

- dans les 4 zones, le meilleur de la zone a été utilisé en premier lieu pour remplacer l'énergie escomptée du projet « Le Suroît », en deuxième lieu, pour remplacer l'énergie escomptée du projet de TCE à Bécancour et en troisième lieu pour remplacer l'énergie escomptée de Tracy opérée en centrale de base. Ce qui explique que les coûts du kWh peuvent augmenter puisqu'on peut avoir à faire appel à des vents plus faibles (dans la zone étudiée) pour compléter le total,

- des densités moyennes de 5 MW/km<sup>2</sup> ont été utilisées . En Montérégie, puisque la zone est assez densément peuplée, il pourrait être difficile d'y installer une densité moyenne de 5 MW/km<sup>2</sup>. Par contre, dans la passe Altamont en Californie, on construisait

8,6 MW/km<sup>2</sup>, un exemple plus récent est un parc de 204 MW au Nouveau-Mexique (16) construit à raison de 8,5 MW/km<sup>2</sup>.

## 11. Principales Conclusions

Les principales conclusions se résument à :

- L'éolien est très abondant au Québec, plus de 75 fois la capacité hydraulique déjà aménagée;
- la technologie éolienne a atteint un niveau de maturité suffisant pour envisager l'opération fiable dans le climat québécois;
- l'éolien se marie bien avec l'hydraulique, permettant de bonifier et la filière hydraulique et la filière éolienne;
- combiné avec l'hydraulique, il permettrait d'éviter la filière thermique tout en réalisant des économies appréciables pour Hydro-Québec, le Québec ainsi que pour les consommateurs;
- pour pallier au risque anticipé de rupture de stock (bas niveau des barrages) des parcs éoliens pourraient être mis en service à l'intérieur d'un délai de 3 ans, sous les lignes de transport existantes, près du complexe « La Grande », près du complexe Manic-Outardes-Bersimis, dans Charlevoix ou en Montérégie;
- pour les 4 cibles étudiées, un calcul de rentabilité par rapport au projet du « Suroît » montre un coût inférieur de l'ordre de 0,7 à 2,8 ¢/kWh, se traduisant par une valeur actualisée nette de l'ordre de 0,48 à 1,98 Milliards \$;
- une analyse de sensibilité montre que le rendement par rapport au thermique est robuste;
- la fabrication locale (très probable aux volumes proposés) permettrait des économies additionnelles de 343 M\$ actualisé sur les 20 ans de vie des parcs éoliens;
- le recours à l'éolien plutôt qu'à la filière thermique, créerait 12 000 emplois de qualité (industrielle), ce qui permettrait au gouvernement du Québec de bénéficier de retombées de l'ordre de 1,2 ¢/kWh ou d'un équivalent de 77 M\$ par année;
- les parcs éoliens devraient être construits pour être opérés par Hydro-Québec production, ce qui permettrait un rendement optimal de la filière éolienne pour l'ensemble des québécois;
- le recours à l'éolien aiderait le Québec à rencontrer ses obligations par rapport à Kyoto.

## 12. Recommandations

A la lumière des recommandations formulées en 1998 par la Régie de l'énergie, actualisées en tenant compte de l'évolution récente de la production d'électricité à partir de la ressource éolienne, et :

- pour rencontrer, à moindre coût, la demande croissante en énergie électrique au Québec;
- pour tirer avantage de l'immense ressource éolienne québécoise;
- pour respecter les principes du développement durable;

- Le RRSE recommande que le gouvernement du Québec refuse tout recours à la filière thermique pour rencontrer les nouveaux besoins en énergie, et:
- mandate Hydro-Québec pour réaliser le programme éolien suivant :

- la construction de parc éoliens de l'ordre de 4000 à 5700 MW, à être mis en service de 2005 à 2008, pour remplacer l'énergie escomptée de la filière thermique (Le Suroît, TCE à Bécancour et le recours à Tracy);
- à partir de 2008, la construction de parc éoliens de l'ordre de 1000 MW par année, de façon à pouvoir rencontrer la croissance anticipée de la demande électrique québécoise;
- sélectionne, à l'issue d'un processus d'appel d'offres, un fabricant éolien et un constructeur de parcs éoliens afin de fournir à Hydro-Québec des parcs éoliens clef en mains, cette dernière en assurant l'exploitation pour combler les besoins en énergie du Québec;

- à défaut d'orienter Hydro-Québec vers la filière éolienne, le Gouvernement du Québec doit créer une société d'Énergie Éolienne du Québec (à la SEBJ) dont le mandat serait :

- la construction de parc éoliens de l'ordre de 4000 à 5700 MW, à être mis en service avant 2007, pour remplacer l'énergie escomptée de la filière thermique (Le Suroît, TCE à Bécancour et le recours à Tracy). Ces parcs de production devant être remis à Hydro-Québec pour être opérés par Production;
- la construction de parc éoliens de l'ordre de 1000 MW par année de façon à pouvoir rencontrer la croissance anticipée de la demande électrique québécoise. Ces parcs de production devant être remis à Hydro-Québec pour être opérés par Production;
- sélectionne, à l'issue d'un processus d'appel d'offres, un fabricant éolien et un constructeur de parcs éoliens afin de lui fournir des parcs éoliens clef en mains, qu'elle pourra ensuite transférer à Hydro-Québec, cette dernière en assurant l'exploitation pour combler les besoins en énergie du Québec;
- Hydro-Québec, dans ce cas, aurait le mandat d'assurer la gestion et la propriété des parcs éoliens, de modifier son réseau de transport pour en acheminer la production et de modifier la gestion de son parc hydraulique pour assurer l'intégration harmonieuse et au moindre coût de l'éolien.

### 13. Références

- 1- Robert Benoît, Wei Yu and David Lemarquis, Environnement Canada: “Mesoscale Mapping of the Wind Energy Climate of Canada”, CanWEA Wind Energy Conference, Ottawa, Canada, October 29-31, 2001. Voir aussi: Wei Yu, Robert Benoît: “Mesoscale Mapping of the Wind Energy Climate of Canada”, Conférence Énergie éolienne et climats froids, Matane, Québec, 29-31 août 2001,
- 2- AWEA News Release: “Global Wind Power Growth Continues to Strengthen”, March 10, 2004,
- 3- EWEA News Release: “Wind power expands 23 % in Europe but still only a 3-Member State story – Lower installation rate puts EU Renewables Directive at risk”, Brussels, 3<sup>rd</sup> February 2004,
- 4- BTM Consult ApS, Press Release: “International Wind Energy Development – World Market Update 2003 – Forecast 2004-2008”, March 19, 2004,
- 5- “Berlin Provides Focus for European Vanguard”, Wind Directions, January/February 2004, pages 25-27,
- 6- "Demande d'avis sur le développement de l'énergie éolienne au Québec", mémoire déposé auprès de la Régie de l'Énergie, Dossier no. R-3395-97, Syndicat Professionnel des Scientifiques de l'IREQ, 30 avril 1998,
- 7- Forcione, A., Saulnier, B. Krau, S., IREQ et Lafrance, G., INRS: “Integration of Wind and Hydro Power Systems, A discussion of cost (or optimization of value?) of wind integration for grid operators” IEA R&D Wind, Topical Expert Meeting # 41, Portland, Oregon, November 5-6, 2003,
- 8- WindPower Monthly: “Hydro Link”, March 2004, p. 8,
- 9- Wind Directions: “New Analysis Projects 20 % Renewables by 2020”, January/February 2004, pages 34-37,
- 10- Milborrow, David: “The real Cost of Integrating Wind”, WindPower Monthly, February 2004, pages 35-39,
- 11- O’Bryant, Mike: “An American Lesson in Positive Pragmatism”, WindPower Monthly, February 2004, pages 39-41,
- 12- Bolinger, M., Wiser, R. & Golove, B., Lawrence Berkeley National Laboratory: “Revisiting the « Buy versus Build » Decision for Public Owned Utilities in California Considering Wind and Geothermal Resources”, October 2001,
- 13- Tellier, J. “Critères d’analyse des variantes hydro-éoliennes comme filières de production d’énergie”, Association Canadienne de l’Énergie Éolienne en collaboration avec Hydro-Québec, janvier 1996.
- 14- Hydro-Québec, étude de Lambert et Marcotte présentée au Congrès annuel de l’Association canaienne de l’énergie éolienne, Régina, Saskatchewan, octobre 1994,

- 15- Demande R-3526-2004, Réponses d'Hydro-Québec aux intervenants, HQ-3, Document FCEI, page 24 de 106, Original : 2004-03-30,
- 16- Drew Robb: "Standing up to transmission reliability standards", GE Energy, Power Engineering, (<http://pe.articles.printthis.clickability.com>),
- 17- Vansant, J. H. et McConnell, R.D., "Electrical Energy from Quebec's Winds", Hydro-Québec, IREQ rapport no. 1575, 24 mars 1977,
- 18- New Energy, no. 5, 2001, page 56,
- 19- AWEA News Release: "Federal Power Agency Issues Largest Wind Solicitation Ever", February 23, 2001 ,
- 20- Mike O'Bryant: "Northwest on the brink of boom", WindPower Monthly, June 2001, page 50,
- 21- Briefly Noted, WindPower Monthly, August 2001, page 9,
- 22- RES USA signs deal for construction of Nine Canyon Wind Farm : Project to be financed by sale of Bonds, Press Release Renewable Energy systems, 20 November 2001, (<http://www.res-ltd.com/news/20-11-01.htm>),
- 23- Mike O'Bryant, "The Texas Secret", WindPower Monthly, December 2001, page 47,
- 24- O'Bryant, Mike: "Montana seeks local benefits", WindPower Monthly, January 2002, page 21,
- 25- "Wind for Nuclear", Briefly Noted, WindPower Monthly, April 2002, page 20,
- 26- "Global Wind Energy Market Report – Wind energy growth was steady in 2000; Outlook for 2001 is Bright" Wind energy & Energy policy / AWEA Home page, 2001 by the American Wind Energy Association, January 30, 2001, (<http://www.awea.org/faq/global200.htm>),
- 27- Dossier de la Régie de l'énergie no. R-3470-2001, "Réponse à la régie de l'énergie sur le Nine Canyon Wind Project", réponse à la question 7 de la Régie,
- 28- IEA Wind Energy Annual Report, 2002, Implementing Agreement for Co-Operation in the Research and Development of Wind turbine Systems, April 2003,
- 29- Annual Report 2000, Vestas Wind Systems A/S, Smed Sørensens Vej 5, DK-6950 Ringkøbing, Denmark, 28 March 2001,
- 30- "Wind Force 12 – How Wind could provide 12 % of the world's electricity by 2020", Renewable Energy World, Review Issue 2002-2003, July-Aug 02, page 85,
- 31- Economics, WindPower Monthly, October 2002, page 70,
- 32- "La UE fijara el 20 % de renovables como nuevo objetivo pra el 2020", Asociacion de Productores de Energias Renovables –APPA, ([http://www.appa.es/dch/nps/np\\_objetivorenovablesue.htm](http://www.appa.es/dch/nps/np_objetivorenovablesue.htm)),

- 33- American Wind Energy Association, (<http://www.awea.org>), « The most frequently asked questions about wind energy », 2002, page 4,
- 34- Régie de l'Énergie, Décision D-2003-159, dossier R3515-2003, 19 août 2003,
- 35- “Réponses d’Hydro-Québec production à la demande de renseignements no.1 de la Régie au producteur en date du 25 mars 2004” Demande d’avis sur la sécurité énergétique des québécois à l’égard des approvisionnements électriques et la contribution du projet du Suroît, R-3526-2004, HQP-3, Document 1, 19 mars 2004,
- 36- Vestas, Stock Exchange announcement no 01/2000, Ringkøbing, Danemark, 21 janvier 2000,
- 37- What does a wind turbine cost, guided tour, 8 mai 2000, (<http://www.windpower.org/tour/econ/index.htm>),
- 38- Réponses d’Hydro-Québec aux questions des intervenants, HQ-3, document AQLPA/SÉ, page 109 de 128. Original : 2004-03-30
- 39- Operation and Maintenance Cost for Wind Turbines, guided tour, 6 août 2000 (<http://www.windpower.org/tour/econ/oandm.htm>),
- 40- Wiser, R. et Kahn, E.: “Alternative windpower ownership structures: Financing terms and project costs”, 1996, May 1, (<http://www.osti.gov/apo/servlets/purl/272563-8E6zYZ/webviewable>),
- 41- Ottinger, R., “Environmental Costs of Energy”, report prepared for the New-York State Energy Research and Development Authority (NYSERDA) and the U. S. Department of Energy, 1990,
- 42- Milborrow, conversation privée,
- 43- Chappell, Marc, “Farming the Wind”, Association Canadienne de l’Énergie Éolienne, Conférence et exposition annuelle, Ottawa, Ontario, Octobre 2001,
- 44- voir le site internet : <http://www.windpower.org>, guided tour, « Energy Payback Period for Wind Turbines », voir aussi le site internet : <http://www.awea.org/faq/bal.html>, Gipe, Paul, « How much energy does it takes to build a wind system in relation to the energy it produces? »,
- 45- voir le site internet : [www.windpower.org](http://www.windpower.org), guided tour, « Birds and Wind Turbines »,
- 46- voir le site internet : [www.windpower.org](http://www.windpower.org), guided tour, « Sound from a Wind Turbine »,



## Annexe 1

### Figures et Graphiques

- Flux monétaires : Éolien versus «Le Suroît»
  - chiffrier
  - graphique