

# Systèmes de conversion de l'énergie éolienne

## 1.0 Introduction

L'échauffement différentiel de la surface terrestre par la soleil entraîne le déplacement d'importantes masses d'air sur la terre, c'est-à-dire le vent. Les systèmes de conversion de l'énergie éolienne transforment l'énergie cinétique du vent en électricité ou en d'autres formes d'énergie. La production d'énergie éolienne a connu une croissance extraordinaire au cours de la dernière décennie, car cette énergie est reconnue comme étant un moyen écologique et économique de produire de l'électricité.

Un nombre croissant de pays adhèrent au Protocole de Kyoto élaboré en 1997, et l'énergie éolienne est devenue l'un des moyens les plus efficaces d'atteindre les objectifs qui y sont énoncés. Les pays signataires du Protocole de Kyoto s'engagent à réduire les émissions de gaz à effet de serre d'au moins 5 % par rapport à leur niveau de 1990, et ce au cours de la période allant de 2008 à 2012. Selon l'organisme américain Energy Information Administration, la consommation mondiale d'électricité, qui était de 12 833 TWh en 1999, passera à 22 230 TWh en 2020. Cette hausse sera principalement attribuable aux pays en développement, où deux milliards de personnes sont encore privées d'électricité [1]. L'ensemble des carburants servant à la production mondiale d'électricité en 1999, présenté à la figure 1, montre que les combustibles fossiles comptaient alors pour 62 %, tandis que les ressources renouvelables, comme l'énergie hydroélectrique, éolienne et solaire, comptaient pour 20,2 % [2].

Selon une évaluation du cycle de vie de ces différentes sources d'énergie réalisée par Hydro-Québec, les émissions de gaz à effet de serre produites par l'ensemble de carburants de 1999 se chiffrent à 510 kilotonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> par TWh [3], comparativement à 9 kilotonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> par TWh pour l'énergie éolienne. Une turbine de 660 kW fonctionnant à un facteur de capacité annuel de 0,35 peut produire environ 2 GWh d'électricité par année, soit une quantité suffisante pour 250 maisons canadiennes normales. Cette simple turbine peut épargner l'équivalent de 1 000 tonnes d'émission de CO<sub>2</sub> basé sur les taux d'utilisation de carburant en 1999 pour la production d'électricité. Si on utilisait cette turbine au lieu d'une centrale à charbon pour produire la même quantité d'électricité, on pourrait réduire ces émissions de 1 930 tonnes d'équivalent de CO<sub>2</sub>.

Outre les occasions d'affaires offertes par la déréglementation du marché de l'électricité, la production d'énergie éolienne a un énorme potentiel de création d'emplois dans les domaines du développement, de la fabrication, de la maintenance et du fonctionnement de systèmes éoliens [4]. Le tableau 1 montre le nombre d'emplois que permettrait de créer l'utilisation de l'énergie éolienne par rapport aux autres technologies utilisées pour produire de l'électricité [5].

## 2.0 Récents développements au sein de l'industrie éolienne

### 2.1 Puissance installée

La production mondiale d'énergie éolienne a connu une croissance rapide à partir du début des années 90. Comme le montre la figure 2, le taux de croissance annuelle moyen de la capacité installée mondiale d'énergie éolienne était de 31 % entre 1994 et 2001 [6], ce qui fait de l'industrie éolienne l'une des celles qui croît le plus rapidement. Contrairement à la dernière poussée observée dans la production d'énergie éolienne au cours des années 70 et au début des années 80, qui était principalement attribuable à l'embargo pétrolier décrété contre les pays de l'OPEP, la vague actuelle de développement de l'énergie éolienne est propulsée par de nombreuses forces favorables. Mentionnons notamment les incroyables avantages qu'elle présente sur les plans

par Liuchen Chang,  
Université du Nouveau-Brunswick, NB

### Sommaire

L'énergie éolienne a connu une très forte croissance au cours de la dernière décennie grâce aux avantages qu'elle présente pour l'environnement, aux percées technologiques connexes et aux programmes d'encouragement gouvernementaux. Le présent article fait état des récents développements concernant les systèmes de conversion de l'énergie éolienne ainsi que des avantages sociaux et environnementaux qui y sont associés. Il comporte également une analyse des problèmes liés à l'interconnexion des ressources distribuées, y compris l'énergie éolienne et l'énergie électrique. On y présente aussi les progrès accomplis par le Canada et le groupe IEEE en ce qui concerne l'élaboration des normes d'interconnexion ainsi que les derniers programmes de R.-D. dans le domaine des systèmes de conversion de l'énergie éolienne.

### Abstract

Wind power capacity has experienced tremendous growth in the past decade, thanks to wind power's environmental benefits, technological advance, and government incentives. This paper presents the recent developments in wind energy conversion systems, and their social and environmental benefits. The paper provides a review of the interconnection issues of distributed resources including wind power with electric power systems, and reports the developments of interconnection standards in Canada and IEEE. The paper also describes the recent R&D programs in wind energy conversion systems.

Figure 1: Ensemble de carburants servant à la production mondiale d'électricité en 1999.

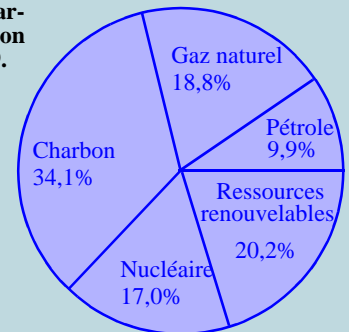


Tableau 1: Création directe d'emplois

Technologie	Emplois/TWh/année
Nucléaire	100
Géothermale	112
Charbon 1	16
Thermie solaire	248
Éolienne	542

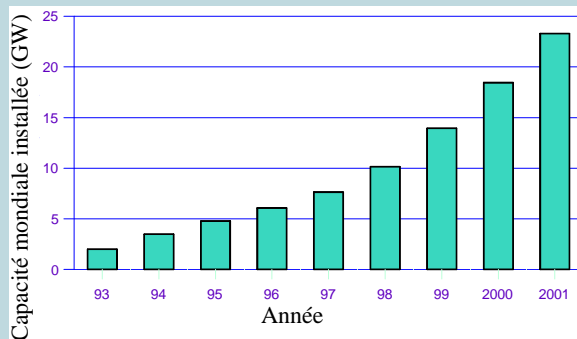


Figure 2: Capacité mondiale installée d'énergie éolienne

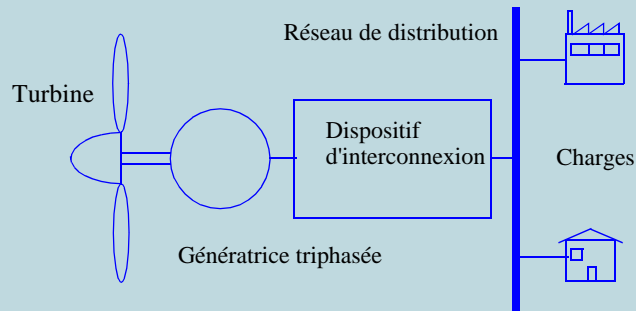


Figure 3: Structure d'un système normal de conversion de l'énergie éolienne

environnemental, social et économique, sa maturité technologique, la déréglementation des marchés de l'électricité sur la scène mondiale, le soutien du public et les programmes d'encouragement gouvernementaux. Au Danemark, l'énergie éolienne comptait pour 18 % de la consommation d'électricité en 2001, et cette proportion devrait passer à 50 % d'ici 2030. Le Canada avait une capacité totale installée d'énergie éolienne de 198 MW en 2001, et de nouveaux parcs d'éolienne devraient être aménagés en Ontario, à l'Île-du-Prince-Édouard et en Alberta. Le Canada possède d'énormes ressources éoliennes à la grandeur de son territoire. Selon l'Association canadienne de l'énergie éolienne (CanWEA), si les politiques gouvernementales appropriées sont mises en place, l'énergie éolienne pourrait permettre de produire 5 % de l'électricité canadienne d'ici 2010. CanWEA a publié un document intitulé *Wind Vision for Canada*, qui comporte des recommandations visant à produire 10 000 MW d'énergie éolienne d'ici 2010.

## 2.2 Percées technologiques

Grâce aux efforts intensifs de R.-D. déployés au cours des 30 dernières années, la conversion de l'énergie éolienne est devenue un moyen fiable et concurrentiel de produire de l'électricité. La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles. Le taux d'utilisation moyen des centrales éoliennes commerciales est d'environ 98 % [6]. Le coût de l'énergie éolienne continue de diminuer grâce aux percées technologiques, à l'accroissement du niveau de production et à l'utilisation de grandes turbines. Il était de 35 ¢US/kWh en 1980 et se situe maintenant entre 4 et 6 ¢US/kWh [6][7]. La capacité moyenne des nouvelles éoliennes est de 805 kW et le coût de la capacité installée moyenne a chuté à moins de 1 000 \$US/kW en 2000. Le tableau 2 montre les coûts d'installation de divers types d'éoliennes au Canada en 2001 [8]. Dans ce tableau, la "Grande éolienne" servirait à la production d'énergie d'utilité générale, la "Petite éolienne" serait utilisée pour produire de l'énergie résidentielle, tandis que l'expression

Tableau 2: Coûts liés aux diverses centrales éoliennes

Coût en \$CAN	Grande éolienne	Petite éolienne	Collectivité éloignée
Capacité (kW)	75 000	10	325
Taille de la turbine (kW)	750	10	65
Coût en capital (\$/kW)	\$1 400	\$ 3 500	\$3 000
Taux de financement (%)	7,5%	10%	8,5%
Facteur de capacité	35%	23%	25%
Coût énergétique (\$/kWh)	\$0,058	\$0,237	\$0,195

"Collectivité éloignée" fait référence aux systèmes diesel-éoliens utilisés dans les collectivités éloignées.

## 2.3 Programmes d'encouragement

Les principaux programmes d'encouragement visant à favoriser la production d'énergie éolienne sont une combinaison de subventions en capital et de paiements à prix forts. Dans un marché de l'électricité déréglementé, de nombreux producteurs d'énergie éolienne peuvent vendre leur production électrique au prix établi pour l'énergie écologique. Au Canada, la Loi de l'impôt sur le revenu prévoit un amortissement accéléré des biens en capital pour la production d'énergie éolienne. Ainsi, un producteur peut déduire entièrement les coûts de la première éolienne expérimentale installée la première année et recourir au financement par actions accréditatives. En décembre 2001, le gouvernement fédéral a lancé un programme d'encouragement pour favoriser la production de l'énergie éolienne. Pour chaque kWh produit, le gouvernement verse un incitatif financier de 1,2 ¢/kWh, qui diminue graduellement à 0,8 ¢/kWh, pour les dix premières années de production.

## 3.0 Structure des systèmes de conversion de l'énergie éolienne

Les principales composantes d'un système ordinaire de conversion de l'énergie éolienne sont une turbine, une génératrice triphasée, un dispositif d'interconnexion et un système de contrôle, comme le montre la figure 3. Les turbines peuvent être à axe vertical ou horizontal. La plupart des turbines modernes sont dotées d'un axe horizontal comprenant deux ou trois pales, et peuvent fonctionner face au vent ou sous le vent. Les principales composantes de la nacelle d'une éolienne classique sont illustrées à la figure 4. La turbine peut être à vitesse constante ou à vitesse variable. Les turbines à vitesse variable peuvent produire de 8 à 15 % plus d'énergie que les turbines à vitesse constante, mais elles doivent être dotées d'un convertisseur électronique de puissance pour produire une tension et une fréquence fixes pour les charges. La plupart des fabricants de turbines installent maintenant un démultiplicateur entre le rotor de la turbine à basse vitesse et la génératrice triphasée à haute vitesse. La configuration à entraînement direct, où le rotor de la turbine est couplé directement à la génératrice, est d'une grande fiabilité, exige une maintenance minimale et permet parfois de réduire les coûts. Plusieurs concepteurs ont opté pour la configuration à entraînement direct pour leurs nouvelles turbines.

Dans un avenir rapproché, les éoliennes seront dotées de génératrices synchrones, de génératrices synchrones à aimants permanents ou de génératrices asynchrones, y compris les modèles à cage d'écureuil et à rotor bobiné; certaines en sont d'ailleurs déjà pourvues. On utilise souvent les génératrices à aimants permanents et les génératrices à induction à cage d'écureuil pour les petites et moyennes turbines en raison de leur fiabilité et de leur coût moins élevé. Diverses turbines à haute puissance sont actuellement dotées de génératrices à induction, de génératrices synchrones à aimants permanents et de génératrices synchrones à bobines de champs.

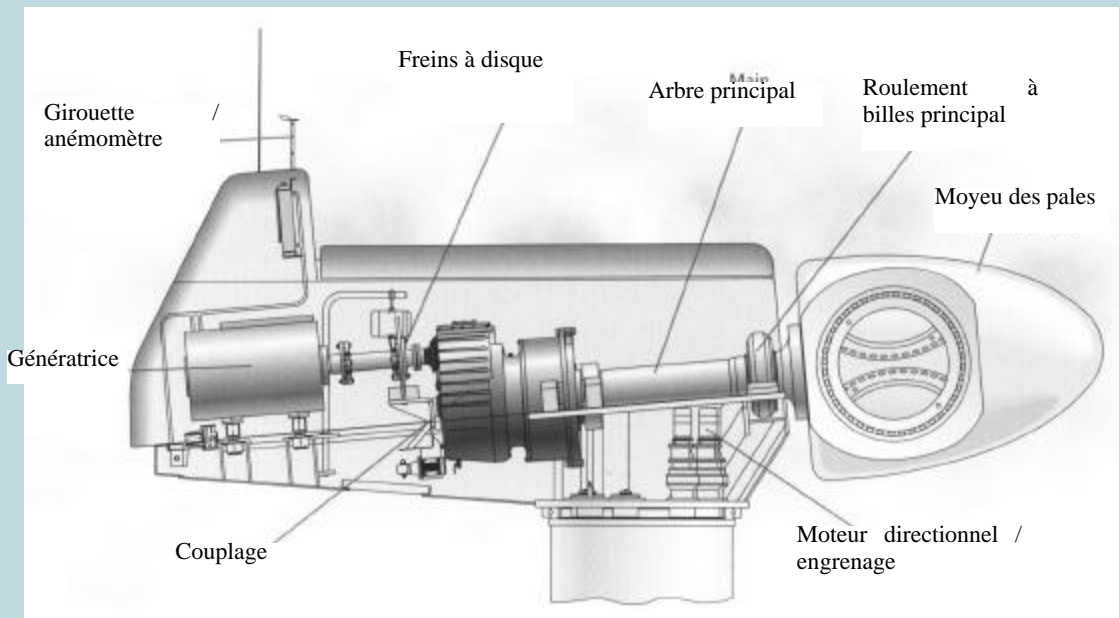


Figure 4: Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine

Les dispositifs d'interconnexion assurent le réglage de la puissance, le démarrage en douceur et les fonctions d'interconnexion des turbines. Il s'agit très souvent de convertisseurs électroniques. La plupart des turbines modernes sont dotées de convertisseurs à modulation d'impulsions en durée (MID) à commutation forcée permettant de produire de l'énergie de qualité à tension et à fréquence fixes. Les deux types de convertisseurs, soit à source de tension avec régulation de tension et à source de tension avec régulation de courant, ont été utilisés pour les éoliennes. Le réglage de certaines turbines à grande puissance est assuré par un convertisseur à double MID, qui permet le transport d'énergie dans les deux sens entre la génératrice de la turbine et les services publics d'électricité.

#### 4.0 Interconnexion avec les systèmes d'énergie électrique

Trente-six états américains ont mis en place un programme de facturation nette et plusieurs provinces canadiennes envisagent de leur emboîter le pas. Dans le cadre de ce programme, un utilisateur de services publics peut installer une petite génératrice sur sa propriété et

vendre l'électricité au tarif auquel il achète l'électricité des services publics. Les programmes de facturation nette ont amélioré considérablement l'économie des petites ressources distribuées (RD), y compris l'énergie éolienne. Les normes qui s'appliquent aux grandes centrales électriques reliées aux systèmes d'énergie électrique ne comportent pas de dispositions concernant les ressources distribuées. En vue de fournir des lignes directrices à tous les partenaires, y compris les services publics, les producteurs indépendants d'électricité, les utilisateurs et les fabricants d'équipement, des efforts sont déployés, au Canada et sur la scène internationale, pour élaborer des normes d'interconnexion. Appuyé par Ressources naturelles Canada et Industrie Canada, Électro-Fédération Canada est en train d'élaborer des lignes directrices canadiennes visant à raccorder les petites ressources distribuées aux services publics. [9]. Ces lignes directrices porteront principalement sur les questions d'interconnexion relatives aux génératrices de faible puissance à convertisseur, comme les photovoltaïques, les éoliennes, les piles à combustibles et les microturbines. Le Standards Coordinating Committee 21 on Fuels, Photovoltaics, Dispersed Generation, and Energy Storage d'IEEE a formé des groupes de travail pour élaborer IEEE P1547, la Draft Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, et P1589, la Draft Standard for Conformance Tests Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems (EPS).

Les configurations types des ressources distribuées raccordées aux systèmes d'énergie électrique sont présentées à la figure 5. Les principales exigences des ressources distribuées en matière d'interconnexion peuvent être regroupées dans les trois catégories suivantes : exigences générales, exigences en matière de sécurité et de protection, et exigences en matière de qualité énergétique.

#### 4.1 Exigences générales

Régulation de la tension - La ressource distribuée (RD) doit éviter que la tension produite au point de couplage commun (PCC, voir la figure 5) se situe dans la plage A spécifiée dans la norme ANSI C84.1 (ou la norme CSA CAN3-C235-83) [10]. Dans le cas d'un réseau de 120/240V, la tension maximale devrait être de 126/252V et la tension maximale de 114/226V.

Synchronisation - La synchronisation de la RD ne devrait pas causer plus de +/- 5 % de fluctuation de tension au PCC.

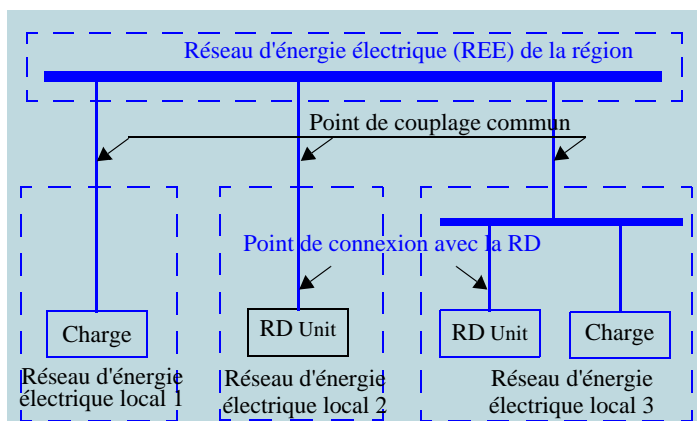


Figure 5: Ressources distribuées raccordées à un réseau d'énergie

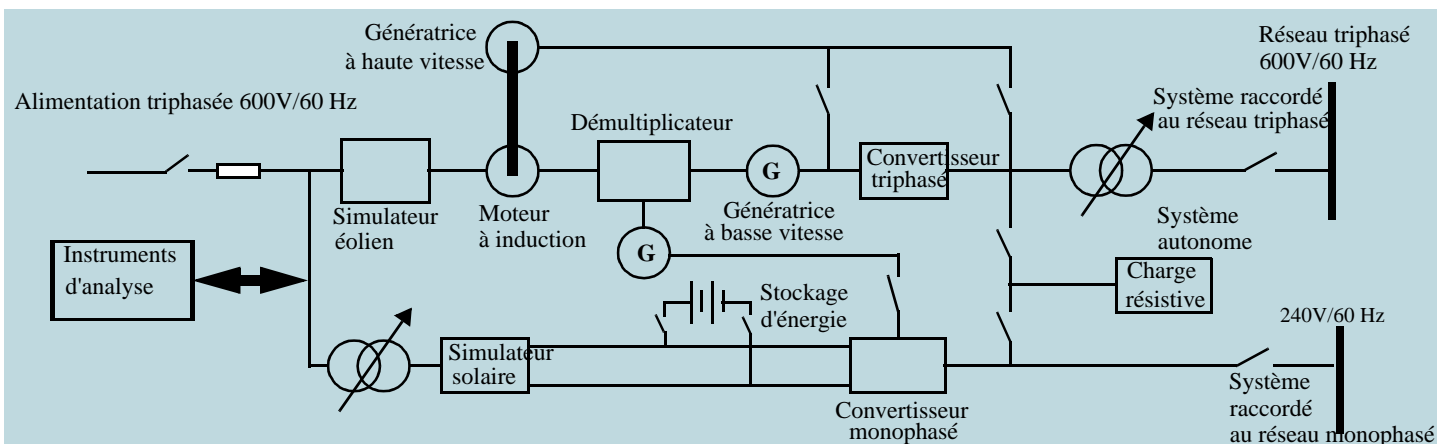


Figure 6: Schéma unifilaire de l'installation d'essai de l'Université du Nouveau-Brunswick pour les systèmes de conversion de l'énergie éolienne et solaire

Surveillance - Une RD de 250 kW ou plus devrait permettre de surveiller l'état de la connexion, autant la production de puissance active que réactive au point de connexion.

Dispositif d'isolement - Un dispositif d'isolement à point de coupure visible, verrouillable et facilement accessible devrait être installé entre la RD et le réseau d'énergie électrique (REE).

#### 4.2 Exigences en matière de sécurité et de protection

Perturbation de tension - À des tensions anormales, la RD devrait cesser d'alimenter le REE dans le délai de déclenchement spécifié.

Perturbation de fréquence - La RD devrait cesser d'alimenter le REE si la fréquence se situe à l'extérieur de la plage allant de 59,3 à 60,5 Hz.

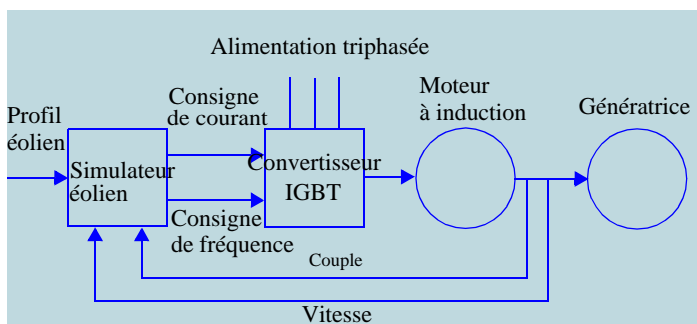


Figure 7: Simulateur éolien



Figure 8: Simulateur éolien

Perte de synchronisme - Une RD de 250 kW ou plus devrait être dotée d'un dispositif de protection contre la perte de synchronisation.

Reconnexion - La RD doit pouvoir être raccordée de nouveau au système d'alimentation cinq minutes après que la tension et la fréquence du REE soient revenues à la normale.

Îlotage accidentel - La RD devrait cesser d'alimenter le REE dans les deux secondes suivant l'îlotage du réseau.

#### 4.3 Exigences en matière de qualité énergétique

Harmoniques - La distorsion harmonique totale d'une RD, définie comme étant la somme des harmoniques de courant RMS divisée par le courant maximal à la charge, devrait être inférieure à 5 %. Chaque harmonique individuelle devrait être inférieure au niveau spécifié.

Injection directe de courant - L'injection directe de courant de la RD devrait être de moins de 0,5 % de sa puissance nominale.

Papillotement - La RD ne devrait pas créer de papillotement indésirable pour les autres clients du REE de la région.



Figure 9: Éolienne Bergey Excel de 10 kW destinées aux activités de R.-D. sur les convertisseurs



Figure 10: Éolienne Lagaway LW18 de 80 kW destinées aux activités de R.-D. sur les convertisseurs

## 5.0 Installations d'essai des systèmes de conversion de l'énergie éolienne

Pour satisfaire à la demande croissante d'applications en énergie éolienne, il faudra déployer d'intenses efforts en recherche et développement afin de faire avancer des technologies sûres, fiables et économiques pour la conversion de l'énergie éolienne. Appuyés par la Canadian Foundation of Innovation, Terrain d'essais éoliens de l'Atlantique inc., Ressources naturelles Canada et l'Université de Moncton, l'Université du Nouveau-Brunswick a élaboré un programme unique de recherche et développement et mis en place une installation d'essai pour les systèmes de conversion de l'énergie éolienne et solaire. Cette installation est située à proximité de l'éolienne de 5 MW du Terrain d'essais éoliens de l'Atlantique (TEEA), à l'Île-du-Prince-Édouard. Comme le montre la figure 6, l'installation est dotée de composants de systèmes de conversion d'énergie éolienne et solaire de diverses structures, comme des générateurs à haute vitesse (vitesse fixe ou variable pouvant produire 100 kW), des génératrices à entraînement direct et à vitesse variable (génératrices à bobines de champs et génératrices synchrones à aimants permanents, pouvant produire jusqu'à 50 kW), un convertisseur triphasé (100 kW), des convertisseurs monophasés (autonomes ou raccordés au réseau, pouvant produire jusqu'à 25 kW) et des accumulateurs.

Le simulateur éolien permet aux chercheurs de travailler dans un environnement d'essai contrôlé adapté aux génératrices, aux convertisseurs et aux opérations des éoliennes, ce qui accroît la productivité de la recherche. L'installation est également dotée d'une infrastructure permettant le développement de méthodes de contrôles perfectionnées visant à améliorer certains aspects liés à la performance du système, par exemple l'extraction maximale de la puissance des sources d'énergie éolienne ou solaire. Le simulateur éolien reproduit les caractéristiques de production d'une éolienne à diverses vitesses à l'aide d'un dispositif d'entraînement par induction à vitesse réglable [11], comme le montre la figure 7. Pour ce qui est de la génératrice et des convertisseurs électroniques d'énergie, le moteur à induction se comporte de la même façon qu'une éolienne à vitesse variable. Le simulateur éolien, qui fait partie de l'installation d'essai des systèmes de conversion de l'énergie éolienne et solaire, est illustré à la figure 8, où l'on peut voir également diverses génératrices.

À l'heure actuelle, les chercheurs de l'Université du Nouveau-Brunswick s'efforcent de mettre au point de nouveaux convertisseurs électroniques d'énergie et d'élaborer des stratégies de contrôle perfectionnées pour des systèmes de conversion de l'énergie éolienne à vitesse variable. Mentionnons notamment le convertisseur IGBT monophasé de 10kW/240V raccordé au réseau utilisant une éolienne Bergye Excel de 10 kW à Charlottetown (Î.-P.-É.) et le convertisseur IGBT triphasé de 100kW/380V raccordé au réseau utilisant une éolienne Lagawey LW18 de 80kW à North Cape (Î.-P.-É.). Le système de 10 kW a été développé pour la production d'énergie résidentielle (figure 9), tandis que le système de 100 kW a été élaboré pour les applications diesel-éoliennes dans les collectivités éloignées (figure 10). La figure 11 montre une autre vue de l'installation. La portée des travaux de R.-D. a été élargie pour comprendre les systèmes de production d'énergie distribuée alimentés par des micro-centrales hydroélectriques utilisant des microturbines, en plus des éoliennes.

On peut voir le parc d'éoliennes de 5,28 MW et l'installation d'essai du Terrain d'essais éoliens de l'Atlantique (TEEA), situés à North Cape, la pointe la plus septentrionale de l'Île-du-Prince-Édouard

## 6.0 Références

- [1]. U.S. Energy Information Administration, International Energy Outlook 2001, mai 2001.
- [2]. U.S. Energy Information Administration, International Energy Annual 1999, janvier 2001.
- [3]. Gagnon, Luc. Greenhouse Gas Emissions from Electricity Generation Options, Hydro-Québec, avril 2000, www.hydroquebec.com/

environnement.

- [4]. Singh V. et J. Fehrs. The Work that Goes into Renewable Energy, Renewable Energy Policy Project, novembre 2001. www.repp.org.
- [5]. Worldwatch Institute. State of the World - 1991.
- [6]. International Energy Agency. Wind Annual report 2000, mai 2001.
- [7]. US Department of Energy. Wind Power Today, 2001. www.eren.doe.gov/wind/
- [8]. Brothers, Carl. Cost Analysis, Atlantic Wind Test Site inc., février 2002.
- [9]. www.micropower-connect.org National Electrical Manufacturers Association. ANSI C84.1-1995, Electrical Power Systems and Equipment - Voltage Ratings, 1995.
- [10]. Chang, L., R. Doraiswami, T. Boutot et H. Kojabadi. Development of a Wind Turbine Simulator for Wind Energy Conversion Systems, IEEE CCECE2000 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Halifax, Canada, mai 2000.



Figure 11 : Vue du parc d'éoliennes de Windmill de l'Île-du-Prince-Édouard.

### À propos de l'auteur

Liuchen Chang est titulaire d'un baccalauréat en génie électrique de l'Université Northern Jiaotong de Pékin, d'une maîtrise de la China Academy of Railway Sciences de Pékin et d'un doctorat de l'Université Queens de Kingston.

Il est professeur en génie électrique et en génie informatique et titulaire de la Chaire en génie de la conception environnementale du CRSNG du département de génie électrique et de génie informatique de l'Université du Nouveau-Brunswick.

Ses principaux intérêts de recherche et son expérience concernent la production d'énergie distribuée, la conversion de l'énergie renouvelable, l'analyse et la conception de machines électriques, les variateurs de vitesse, l'électrotechnique et les systèmes de traction électrique. LChang@unb.ca

