



RETSCREEN® INTERNATIONAL
CENTRE D'AIDE À LA DÉCISION
EN ÉNERGIE RENOUVELABLE
www.retscreen.net

ANALYSE DE PROJETS D'ÉNERGIES RENOUVELABLES : MANUEL D'INGÉNIERIE ET D'ÉTUDES DE CAS RETSCREEN®



Centre de la technologie
de l'énergie de CANMET
- Varennes (CTEC)

En collaboration avec :



Chapitre 2 ANALYSE DE PROJETS D'ÉNERGIE ÉOLIENNE

Exonération

Cette publication, diffusée à des fins uniquement didactiques, ne reflète pas nécessairement le point de vue du gouvernement du Canada et ne constitue en aucune façon une approbation des produits commerciaux ou des personnes qui y sont mentionnées, quels qu'ils soient. De plus, pour ce qui est du contenu de cette publication, le gouvernement du Canada, ses ministres, ses fonctionnaires et ses employés ou agents n'offrent aucune garantie et n'assument aucune responsabilité.

© Ministre de Ressources
naturelles Canada 2001 - 2002.



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

Canada



Chapitre 2 | TABLE DES MATIÈRES

1	CONTEXTE - PROJETS DE CENTRALE ÉOLIENNE	5
1.1	Description des éoliennes	7
1.2	Marché des centrales éoliennes	8
1.2.1	Applications hors réseau	9
1.2.2	Applications en réseau	9
2	MODÈLE RETSCREEN POUR PROJETS DE CENTRALE ÉOLIENNE	13
2.1	Production énergétique non corrigée	14
2.1.1	Distribution de la vitesse du vent	14
2.1.2	Courbe d'énergie	15
2.1.3	Calcul de la production énergétique non corrigée	15
2.2	Production énergétique brute	16
2.3	Énergie renouvelable fournie	17
2.3.1	Énergie renouvelable captée	17
2.3.2	Capacité d'absorption du réseau et énergie renouvelable fournie	17
2.3.3	Excédant disponible d'énergie renouvelable	19
2.3.4	Rendement spécifique	19
2.3.5	Facteur de puissance installée	19
2.4	Validation	19
2.4.1	Validation du modèle de centrale éolienne par comparaison avec un modèle de simulation horaire	20
2.4.2	Validation du modèle de centrale éolienne par comparaison avec des données monitorées	24
2.5	Sommaire	25
	RÉFÉRENCES	27



Chapitre 2 | ANALYSE DE PROJETS DE CENTRALE ÉOLIENNE

Le manuel Analyse de projets d'énergies renouvelables : Manuel d'ingénierie et d'études de cas RETScreen® est un document de référence électronique destiné aux professionnels et aux étudiants universitaires. Le présent chapitre couvre l'analyse de projets potentiels de centrale éolienne avec le logiciel d'analyse de projets d'énergies renouvelables RETScreen® International; il présente le contexte de ces projets ainsi qu'une description détaillée des algorithmes utilisés dans le modèle RETScreen® pour projets de centrale éolienne. Une collection d'études de cas de projets de centrale éolienne, comprenant mandats, solutions et informations sur comment ces projets se sont comportés dans la réalité, est disponible sur le site Web du Centre d'aide à la décision en énergie renouvelable RETScreen® International www.etscreen.net.

1 CONTEXTE - PROJETS DE CENTRALE ÉOLIENNE¹

Le vent est une source d'énergie cinétique renouvelable qui présente un potentiel considérable dans plusieurs régions du monde. L'énergie que peuvent capter les éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs, dépend en grande partie de la vitesse moyenne du vent à l'échelle locale. Les régions où l'on observe le potentiel le plus intéressant sont les côtes, les zones dégagées de l'intérieur ou les rives de plans d'eau. Certaines régions montagneuses présentent également un grand intérêt. Malgré les restrictions géographiques inhérentes au choix de l'emplacement des centrales éoliennes, il existe de nombreux endroits dans la plupart des régions du monde où l'énergie éolienne pourrait satisfaire une grande partie de la demande locale d'électricité (Rangi et coll., 1992).



Figure 1 :

Parc éolien de 39.6 MW raccordé à un réseau central en Espagne.

Crédit photo :

Photo © BONUS Energy A/S

1. Une partie du texte est une traduction tirée de deux rapports produits avec le soutien de CANMET : **Wind Energy Basic Information**, document d'information publié par l'Association canadienne de l'énergie éolienne et Rangi, R., Templin, J., Carpentier, M. et Argue, D., **Canadian Wind Energy Technical and Market Potential**, Direction de la technologie de l'efficacité énergétique et des énergies de remplacement, Énergie, mines et ressources Canada (CANMET), Ontario, octobre 1992.

La demande mondiale d'éoliennes connaît une croissance rapide depuis une quinzaine d'années. En 2001 seulement, l'industrie éolienne a accru sa puissance installée de près de 5 500 MW. Selon des estimations, la capacité en énergie éolienne dépasse 24 000 MW à l'échelle mondiale (Wind Power Monthly, 2001). La majorité de la demande découle du souci d'aménager des centrales électriques utilisant des combustibles « moins polluants ». On aménage des parcs à éoliennes multiples produisant plusieurs mégawatts, comme montré à la **Figure 1**. Au cours des dix dernières années, la puissance typique de génération d'électricité pour une seule éolienne est passée d'environ 100 kW à 1 MW ou davantage, avec certains projets d'énergie éolienne développés au large des côtes, comme montré à la **Figure 2**. La conséquence de ces progrès est que maintenant de grandes centrales éoliennes fournissent de l'électricité dans certaines parties du monde, à un prix concurrentiel à celui de l'énergie produite par les installations conventionnelles (par ex. : les centrales nucléaires et les centrales thermiques au mazout ou au charbon).



Figure 2 :

Éoliennes de 2 MW dans un parc éolien de 40 MW au large des côtes du Danemark.

Crédit photo :

Photo © BONUS Energy A/S

Les éoliennes peuvent aussi être utilisées pour des projets de moins grande envergure. Des installations de taille moyenne sont utilisées sur les réseaux isolés. De plus petites installations hors réseau permettent le pompage de l'eau ou les applications autonomes de recharge de batteries.

La viabilité financière des centrales éoliennes est généralement plus grande dans les régions « venteuses », le potentiel énergétique étant proportionnel au cube de la vitesse du vent.



Toutefois dans la pratique, la production d'énergie est généralement davantage proportionnelle au carré de la vitesse du vent. Cette différence s'explique par les caractéristiques et les rendements aérodynamique, mécanique et électrique de conversion d'énergie des éoliennes. Ainsi, l'énergie que peut produire une éolienne augmente d'environ 20 % pour chaque augmentation de 10 % de la vitesse du vent. Le choix de l'emplacement de la centrale éolienne est un préalable essentiel à la viabilité financière de l'entreprise. Il est important de noter que puisque la perception sensorielle de l'être humain par rapport au vent repose habituellement sur l'observation d'extrêmes météorologiques sur de courtes périodes, comme les tempêtes de vent et les impressions de refroidissement éolien, certains endroits peuvent être considérés à tort comme venteux. Une bonne évaluation de la ressource éolienne est donc un élément essentiel à la réalisation des projets d'aménagement de centrales éoliennes.

1.1 Description des éoliennes

La technologie éolienne est arrivée à maturité au cours des 15 dernières années sous l'effet de la concurrence commerciale mondiale, de la production de masse et des progrès techniques attribuables à la recherche et au développement (R-D). Les inquiétudes quant au coût élevé et au peu de fiabilité des éoliennes s'en sont trouvées grandement réduites. Les coûts des projets de centrale éolienne ont diminués et le taux de disponibilité des machines est maintenant régulièrement supérieur à 97 %. En outre, le facteur d'utilisation (énergie produite par rapport à la capacité annuelle à la puissance nominale) des projets récents est passé de 15 % à 30 % dans les sites avec un bon régime des vents (Rangi et coll., 1992).

Les éoliennes modernes sont automatisées. Les forces aérodynamiques qui entrent en jeu dans leur fonctionnement sont les mêmes que celles qui sont créées par les ailes d'un avion. La plupart des éoliennes sont pourvues d'un anémomètre qui mesure continuellement la vitesse du vent. Lorsque celle-ci est assez élevée pour compenser la friction du rotor, les mécanismes de commande lui permettent de tourner et ainsi de produire une faible puissance. Cette vitesse, appelée vitesse de démarrage, est habituellement d'environ 4 m/s, soit la force d'une brise légère. La puissance produite croît rapidement à mesure que la force du vent augmente. Lorsqu'elle atteint le niveau maximum admissible pour l'éolienne installée, les mécanismes de commande assurent la régulation à la puissance nominale. La vitesse du vent à laquelle une machine fournit sa puissance nominale est appelée vitesse nominale; en général, elle équivaut à environ 15 m/s. Si la vitesse du vent continue à augmenter, le système de commande arrête le rotor pour éviter que des dommages ne soient causés à l'éolienne. Cette vitesse de décrochage est généralement d'environ 25 m/s.

Voici quels sont les principaux composants d'une éolienne moderne :

- un rotor, bipale ou tripale, qui convertit l'énergie du vent en énergie mécanique par l'entraînement de son arbre;
- une tour sur laquelle est fixé le rotor et qui est assez élevée pour exploiter les vents plus forts en altitude;

- un multiplicateur (boîte de vitesses), qui relie le rotor à la génératrice;
- un système qui commande le démarrage et l'arrêt de l'éolienne et surveille son fonctionnement; et
- une fondation solide qui assure la résistance de l'ensemble par grands vents et/ou dans des conditions de givrage (ACÉÉ, 1996).

La **Figure 3** montre la configuration typique d'une éolienne à axe horizontal. Il existe également des éoliennes à axe vertical, mais ce type de machine n'est pas aussi répandu que celles à axe horizontal dans les récents projets mis en œuvre dans le monde.

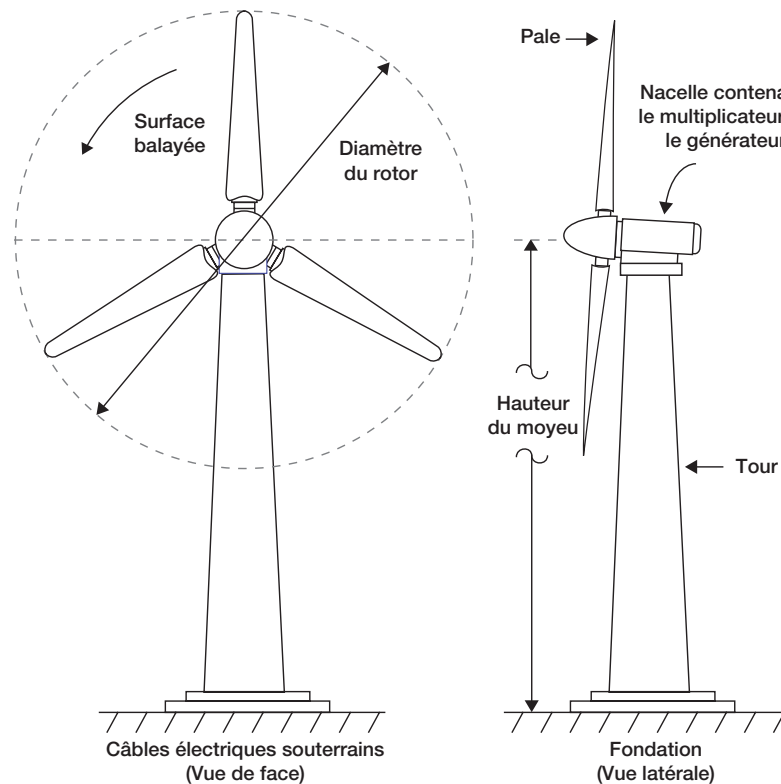


Figure 3 :
Schéma d'une éolienne.

1.2 Marché des centrales éoliennes

Le marché des éoliennes peut être divisé selon l'utilisation finale de la technologie. Celle-ci est couramment exploitée pour des applications hors réseau. Toutefois, ce sont les applications avec raccordement au réseau électrique qui présentent le plus grand potentiel commercial.

1.2.1 Applications hors réseau

Historiquement, c'est dans les endroits isolés, loin d'un réseau électrique et là où les besoins en énergie sont relativement faibles (généralement de moins de 10 kW), que l'énergie éolienne était la plus concurrentielle. Dans ce type d'applications hors réseau, l'énergie du vent est captée par les éoliennes afin de recharger des batteries. L'énergie électrique ainsi emmagasinée permet alors de fournir de l'électricité sur demande (voir *Figure 4*). Le pompage de l'eau, où l'eau peut aussi être emmagasinée en vue d'un usage ultérieur, est par ailleurs une des plus anciennes formes d'exploitation de l'énergie éolienne. Dans les sites isolés hors réseau, l'utilisation d'éoliennes pour la production d'énergie électrique, est très concurrentielle par rapport à l'extension du réseau électrique, aux batteries non rechargeables, aux génératrices à effet Pelletier, à moteur diesel ou à moteur à essence. Les éoliennes sont aussi très concurrentielles dans les applications de pompage de l'eau (Leng et coll., 1996).

1.2.2 Applications en réseau

Les systèmes éoliens raccordés à un réseau électrique transfèrent directement l'énergie produite au réseau. On distingue deux types d'applications :

1. Le réseau isolé, où la puissance installée par éolienne varie en général de 10 kW à 200 kW environ.
2. La centrale éolienne avec raccordement à un réseau central, où la puissance installée par éolienne varie en général de 200 kW à 2 MW.

Le modèle RETScreen® International pour projets de centrale éolienne

Le modèle RETScreen® International pour projets de centrale éolienne permet d'évaluer la production d'énergie, la viabilité financière et les réductions d'émissions de gaz à effet de serre pour des projets de centrale éolienne raccordés à un réseau isolé ou à un réseau central d'électricité, et ce partout à travers le monde. Ces projets vont des vastes parcs composés de plusieurs éoliennes jusqu'aux petites éoliennes individuelles, en passant par les systèmes hybrides éolien-diesel.



Figure 4 :
Éolienne de 10 kW hors réseau au Mexique.

Crédit photo :
Charles Newcomber/NREL Pix

■ **Réseaux isolés**

Dans les régions éloignées, la production d'électricité est généralement coûteuse en raison du prix élevé du transport du carburant diesel. Lorsque la ressource éolienne est suffisante, une petite centrale éolienne peut être installée pour fournir de l'électricité en complément de la centrale diesel. Ces centrales sont désignées normalement sous le nom de systèmes hybrides éolien-diesel. La fonction première de la centrale éolienne est de contribuer à réduire la consommation de carburant diesel. Un système hybride éolien-diesel est montré à la **Figure 5**.



Figure 5 :
Éolienne de 50 kW reliée à un réseau isolé dans l'Arctique.

Crédit photo :
Phil Owens/Nunavut Power Corp.



■ Réseaux centraux

Les applications avec raccordement à un réseau central se répandent de plus en plus. Dans les régions relativement venteuses, les éoliennes sont regroupées pour former des parcs d'éoliennes ayant une capacité totale de plusieurs mégawatts. Habituellement, la superficie occupée par le parc d'éoliennes sert aussi à d'autres fins, comme l'agriculture ou la sylviculture. Par ailleurs, une autre forme répandue d'exploitation de l'énergie éolienne inclut l'installation d'une ou plusieurs grandes éoliennes par des particuliers, des entreprises ou des coopératives.

Un parc d'éoliennes comme celui montré à la **Figure 6**, comprend plusieurs éoliennes (souvent installées en rangs perpendiculaires à la direction des vents dominants), des voies d'accès, des raccordements électriques ainsi qu'un poste de raccordement, un système de surveillance et de commande, et dans les parcs de grande envergure, un bâtiment d'entretien. Pour mener à bien un projet de centrale éolienne, il faut évaluer la ressource éolienne, obtenir toutes les approbations et les permis requis, assurer la conception de l'infrastructure civile, mécanique et électrique, exécuter les travaux d'implantation des éoliennes, acheter l'équipement, puis construire et mettre en service l'installation. La construction comporte plusieurs étapes : préparation du site, aménagement des voies d'accès, coulage des fondations des éoliennes, installation des câbles de raccordement électrique et des transformateurs, érection des éoliennes, du poste de raccordement et du bâtiment d'entretien.



Figure 6 :

Composants d'un parc d'éoliennes aux États-Unis.

Crédit photo :

Warren Gretz/NREL Pix

L'évaluation de la ressource éolienne et l'obtention des approbations nécessaires à l'aménagement d'un parc sont souvent les activités qui prennent le plus de temps dans un projet de centrale éolienne. Elles peuvent prendre jusqu'à quatre ans dans le cas d'un important parc nécessitant une étude d'impact environnemental détaillée. D'ordinaire, les travaux de construction comme tels durent environ un an. La mesure précise de la ressource éolienne à un endroit donné est un des aspects les plus importants de l'exécution d'un projet de centrale, car la ressource éolienne disponible au site projeté peut influencer de manière spectaculaire le coût de production de l'électricité. Dans les cas où l'étude de pré faisabilité indique qu'un projet d'énergie éolienne pourrait être financièrement viable, il est typiquement recommandé qu'un développeur effectue des mesures du vent pendant toute une année à l'emplacement exact de la future centrale (Brothers, 1993; ACÉÉ, 1996; et Lynette et coll., 1992). La **Figure 7** montre l'installation d'un mât météorologique de 40 m au Centre de la technologie de l'énergie de CANMET – Varennes, au Canada.



Figure 7 :

Installation d'un mât météorologique de 40 m.

Crédit photo :

GPCo Inc.

Pour des projets de très petite envergure (par ex. : chargement de batteries hors réseau ou pompage de l'eau), le coût du monitoring éolien peut être supérieur au coût d'achat et d'installation d'une petite éolienne. Dans ce cas, une évaluation détaillée de la ressource éolienne ne serait normalement pas effectuée.

2 MODÈLE RETSCREEN POUR PROJETS DE CENTRALE ÉOLIENNE

Le modèle RETScreen pour projets de centrale éolienne permet d'évaluer les projets d'énergie éolienne pour des applications connectées au réseau, et ce dans le monde entier. Ces applications vont des grands parcs à plusieurs éoliennes et/ou des projets avec une seule éolienne de grande taille, aux systèmes hybrides éolien-diesel de taille moyenne ou plus petite.

Le modèle RETScreen pour projets de centrale éolienne comporte cinq feuilles de calcul : *Modèle énergétique*, *Caractéristiques des équipements*, *Analyse des coûts*, *Analyse des réductions d'émissions de gaz à effet de serre (Analyse des GES)* et *Sommaire financier*.

Les feuilles de calcul **Modèle énergétique** et **Caractéristiques des équipements** doivent être remplies en premier, suivi par la feuille **Analyse des coûts** et enfin, par la feuille **Sommaire financier**. La feuille **Analyse des GES** est facultative. Cette feuille est fournie pour aider l'utilisateur à évaluer l'atténuation potentielle de gaz à effet de serre (GES) engendrée par le projet proposé. En général, les feuilles de calcul sont remplies du haut vers le bas et le processus peut être répété aussi souvent que nécessaire pour optimiser la conception du projet au niveau des coûts et de l'utilisation de l'énergie.

Pour aider l'utilisateur à caractériser un système de centrale éolienne avant d'en évaluer les coûts et la performance énergétique, certaines valeurs sont suggérées, comme le « Taux d'absorption de l'énergie éolienne suggéré » pour les projets situés sur des réseaux isolés. Les valeurs estimées ou suggérées sont basées sur les données entrées par l'utilisateur et peuvent être utilisées en première analyse, même si elles ne sont pas nécessairement des valeurs optimales.

Cette section décrit les différents algorithmes utilisés dans RETScreen pour calculer, sur une base annuelle, la production énergétique de systèmes à énergie éolienne. Un schéma fonctionnel des algorithmes est montré à la **Figure 8**. Le calcul de la courbe d'énergie et de la production énergétique non corrigée sont décrits dans la *section 2.1*. La production énergétique brute, qui tient compte des variations de la pression atmosphérique et de la température, est calculée dans la *section 2.2*. Le calcul de la production d'énergie nette (c.-à-d. qui prend en compte diverses pertes) et de l'énergie renouvelable fournie sont couverts à la *section 2.3*. Une validation du modèle RETScreen pour projets de centrale éolienne est présentée dans la *section 2.4*.

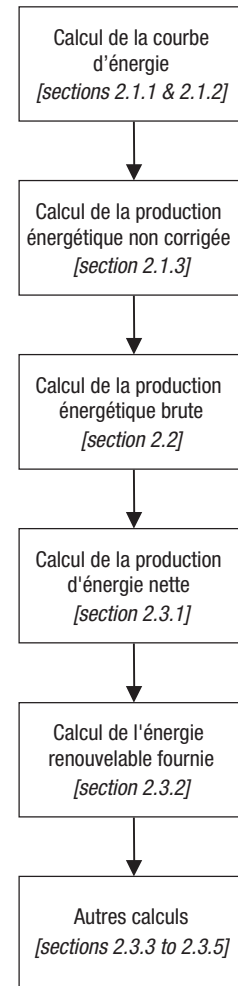


Figure 8 :

Schéma fonctionnel du modèle énergétique pour centrale éolienne.

Les principales limites du modèle sont qu'il ne considère pas pour le moment les projets de centrale éolienne autonome qui nécessitent des accumulateurs électriques (batteries) et qu'il n'a pas encore été validé pour les éoliennes à axe vertical. Aussi, le modèle s'adresse principalement aux applications « à faible taux de pénétration ». Pour les projets éoliens « à taux de pénétration élevé » actuellement mis au point pour le couplage éolien-diesel en réseau isolé, l'utilisateur aura besoin de déterminer avec précision le « taux d'absorption de l'énergie éolienne », ce qui demandera vraisemblablement de plus amples informations. Cependant, ces limitations sont sans conséquence pour la majorité de la capacité éolienne installée dans le monde de nos jours.

2.1 Production énergétique non corrigée

Le modèle calcule la production énergétique non corrigée des installations éoliennes. Il s'agit de l'énergie qu'une ou plusieurs éoliennes produiront dans des conditions standard de température et de pression atmosphérique. Le calcul repose sur la courbe de production énergétique des éoliennes présélectionnées (déterminées dans la feuille de calcul *Caractéristiques des équipements*) et sur la vitesse moyenne du vent à la hauteur du moyeu au site proposé.

2.1.1 Distribution de la vitesse du vent

La distribution de la vitesse du vent, lorsque requise par le modèle (voir section 2.1.2), est calculée dans RETScreen comme une fonction de la densité de probabilité de Weibull. Cette distribution est souvent utilisée en génie énergétique éolien, car elle correspond bien à la distribution des vitesses du vent, observée à long terme sur un grand nombre de sites. Dans certains cas, le modèle utilise également la distribution de Rayleigh de la vitesse du vent, qui est un cas particulier de la distribution de Weibull, avec un facteur de forme (décrit ci-dessous) égal à 2.

La fonction de la densité de probabilité de Weibull représente la probabilité $p(x)$ d'avoir une vitesse du vent x pendant l'année, comme le montre l'expression suivante (Hiester et Pennell, 1981) :

$$p(x) = \left(\frac{k}{C}\right) \left(\frac{x}{C}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{C}\right)^k\right] \quad (1)$$

Cette expression est valable pour $k > 1$, $x \geq 0$ et $C > 0$. Le facteur de forme k est spécifié par l'utilisateur. De façon générale le facteur de forme est compris entre 1 et 3. Pour une vitesse moyenne du vent donnée, un faible facteur de forme indique que la distribution des vitesses du vent est relativement large de part et d'autre de la moyenne, alors qu'un facteur de forme élevé indique que la distribution des vitesses du vent est relativement étroite de part et d'autre de la moyenne. Pour une vitesse moyenne du vent donnée, un faible facteur



de forme conduira normalement à une production d'énergie plus élevée. C est le facteur d'échelle, calculé à partir de l'équation suivante (Hiester et Pennell, 1981) :

$$C = \frac{\bar{x}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (2)$$

où \bar{x} est la valeur moyenne de la vitesse du vent et Γ est la fonction gamma.

2.1.2 Courbe d'énergie

La courbe d'énergie permet de déterminer la quantité totale d'énergie produite par une éolienne dans une gamme de vitesses moyennes annuelles du vent. Dans le modèle RETScreen, la courbe d'énergie est établie pour une vitesse moyenne annuelle du vent comprise entre 3 et 15 m/s et est donnée graphiquement dans la feuille de calcul *Caractéristiques des équipements*.

L'utilisateur peut spécifier la courbe d'énergie en choisissant les données parmi les options suivantes : *Standard*, *Personnalisée* et *Définie par l'utilisateur*. Pour les courbes d'énergie *Standard* et *Personnalisée*, le modèle utilise la courbe de puissance de l'éolienne entrée par l'utilisateur et la fonction de densité de probabilité de Weibull décrite dans la section 2.1.1. Dans le cas définie par l'utilisateur, ce dernier entre directement les données de la courbe d'énergie.

Dans les cas *Standard* et *Personnalisée*, l'utilisateur établit la courbe de puissance de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent par incréments de 1 m/s, entre 0 m/s et 25 m/s. Chaque point de la courbe d'énergie $E_{\bar{v}}$ est calculé par :

$$E_{\bar{v}} = 8760 \sum_{x=0}^{25} P_x p(x) \quad (3)$$

où \bar{v} est la vitesse moyenne du vent considérée ($\bar{v}=3, 4, \dots, 15$ m/s), P_x est la puissance fournie par l'éolienne à la vitesse du vent x et $p(x)$ est la fonction de densité de probabilité de Weibull pour la vitesse du vent x , calculée pour une vitesse moyenne du vent \bar{v} .

2.1.3 Calcul de la production énergétique non corrigée

Le calcul de la production énergétique non corrigée donne l'énergie produite par les éoliennes dans des conditions standards de température et de pression atmosphérique. Son calcul est basé sur une vitesse moyenne du vent à la hauteur du moyeu pour le site étudié. À cause du phénomène de cisaillement du vent, la vitesse du vent à la hauteur du moyeu est habituellement plus élevée que celle mesurée à la hauteur habituelle où sont placés les



anémomètres. Le modèle RETScreen utilise la loi suivante pour calculer la vitesse moyenne du vent à la hauteur du moyeu (Gipe, 1995) :

$$\frac{\bar{V}}{\bar{V}_0} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^\alpha \quad (4)$$

où \bar{V} est la vitesse moyenne du vent à la hauteur du moyeu H , \bar{V}_0 est la vitesse moyenne du vent à la hauteur de l'anémomètre H_0 et α est l'exposant caractérisant le cisaillement du vent. Les valeurs H , H_0 , \bar{V}_0 et α sont spécifiées par l'utilisateur².

Une fois que la moyenne annuelle de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu \bar{V} est calculée, la production énergétique non corrigée E_U est simplement calculée par interpolation de la courbe d'énergie de la section 2.1.2 pour la valeur de \bar{V} .

2.2 Production énergétique brute

La production énergétique brute est l'énergie annuelle totale produite par le système éolien, avant considération des pertes, à la vitesse du vent, à la pression atmosphérique et aux conditions de température du site étudié. Cette quantité est utilisée dans RETScreen pour déterminer l'énergie renouvelable fournie (section 2.3). La production énergétique brute E_G est calculée par :

$$E_G = E_U c_H c_T \quad (5)$$

où E_U est la production énergétique non corrigée, et c_H et c_T sont des coefficients de correction barométrique et thermique. c_H et c_T sont donnés par :

$$c_H = \frac{P}{P_0} \quad (6)$$

$$c_T = \frac{T_0}{T} \quad (7)$$

où P est la moyenne annuelle de la pression atmosphérique sur le site, P_0 est la pression atmosphérique standard de 101,3 kPa, T est la moyenne annuelle de la température absolue du site et T_0 est la température absolue standard de 288,1 K.

2. La même équation est utilisée pour calculer la vitesse du vent à 10 mètres de hauteur, soit avec H égale à 10 m. Cette dernière valeur n'influence pas la procédure de calcul; elle est calculée pour fournir une base de comparaison commune pour des sites auxquels la vitesse du vent a été mesurée à des hauteurs différentes.



2.3 Énergie renouvelable fournie

Le modèle RETScreen pour projets de centrale éolienne calcule l'énergie renouvelable fournie au réseau électrique, après prise en compte de diverses pertes. Dans le cas particulier des réseaux isolés, la quantité d'énergie éolienne qui peut être absorbée par le réseau est aussi prise en compte.

2.3.1 Énergie renouvelable captée

L'énergie renouvelable captée est égale à la quantité d'énergie produite par le système éolien, corrigée en fonction des pertes des équipements :

$$E_C = E_G c_L \quad (8)$$

où E_G est la production d'énergie brute et c_L est le coefficient de pertes, donné par :

$$c_L = (1 - \lambda_a)(1 - \lambda_{s\&i})(1 - \lambda_d)(1 - \lambda_m) \quad (9)$$

où λ_a est le coefficient de pertes par effet de sillage, $\lambda_{s\&i}$ est le coefficient de pertes par enrasement des pales ou résultantes du verglas, λ_d est le coefficient des pertes pour causes d'arrêts et λ_m est un coefficient représentant les pertes diverses. Les coefficients λ_a , $\lambda_{s\&i}$, λ_d et λ_m sont spécifiés par l'utilisateur dans la feuille de calcul *Modèle énergétique*.

2.3.2 Capacité d'absorption du réseau et énergie renouvelable fournie

Le modèle calcule l'énergie éolienne fournie E_D par :

$$E_D = E_C \mu \quad (10)$$

où E_C est l'énergie renouvelable captée (voir équation 8) et μ est le taux d'absorption de l'énergie éolienne.





Le taux d'absorption de l'énergie éolienne est le pourcentage de l'énergie captée qui peut être absorbée par le réseau auquel le système est raccordé. Pour les applications raccordées à un réseau central, ce taux est toujours égal à 100 % car on estime que le réseau est assez gros pour absorber toute l'énergie produite par le projet de centrale éolienne. Pour les réseaux isolés, la valeur du taux d'absorption est entrée par l'utilisateur.

Dans le cas des réseaux isolés, le modèle calcule un *taux suggéré d'absorption de l'énergie éolienne*. Celui-ci est trouvé par interpolation des valeurs du **Tableau 1**, où le *taux de pénétration éolien* (TPE) est défini par :

$$TPE = \frac{P_{\text{éol}}}{PP} 100 \quad (11)$$

où $P_{\text{éol}}$ est la puissance éolienne installée et PP est la charge de pointe du réseau électrique, ces deux valeurs étant spécifiées par l'utilisateur. $P_{\text{éol}}$ est obtenue en multipliant le nombre d'éoliennes par leur capacité (puissance) nominale.

Vitesse moyenne du vent (m/s)	Taux de pénétration éolien (TPE)			
	0 %	10 %	20 %	30 %
0	100 %	100 %	100 %	100 %
4,9	100 %	98 %	96 %	93 %
5,6	100 %	98 %	94 %	90 %
6,3	100 %	98 %	93 %	87 %
6,9	100 %	97 %	92 %	84 %
8,3	100 %	96 %	90 %	82 %

Tableau 1 : Taux d'absorption de l'énergie éolienne suggéré pour les réseaux isolés.

Comme on peut le voir dans le **Tableau 1**, le taux suggéré d'absorption de l'énergie éolienne varie en fonction de la vitesse du vent et du taux de pénétration éolien. Il est calculé pour la vitesse du vent à la hauteur du moyeu. Les valeurs du **Tableau 1** sont issues de simulations faites pour établir le montant d'énergie éolienne fournie à partir de centrales qui seraient installées en des communautés éloignées (c.-à-d. avec des réseaux isolés). Les simulations considèrent des combinaisons de différents régimes de vent, profils de charge des réseaux et courbes de puissance d'équipements. Les résultats détaillés peuvent être trouvés dans le manuel de Rangl et coll. (1992).

Le modèle RETScreen suggère des valeurs de taux d'absorption de l'énergie éolienne seulement pour des taux de pénétration éoliens inférieurs à 25 %. Cependant, si le taux de pénétration éolien est supérieur à 3 % et la vitesse du vent à la hauteur du moyeu est de 8,3 m/s ou plus, le modèle ne suggère pas de valeur. Dans ces conditions, le taux d'absorption de l'énergie éolienne variera grandement en fonction de la configuration du système et des stratégies de contrôle adoptées.





2.3.3 Excédant disponible d'énergie renouvelable

L'excédant disponible d'énergie renouvelable E_X est simplement la différence entre l'énergie captée E_C et l'énergie éolienne fournie E_D :

$$E_X = E_C - E_D \quad (12)$$

2.3.4 Rendement spécifique

Le rendement spécifique Y est obtenu en divisant l'énergie renouvelable captée E_C par la surface balayée par l'hélice de l'éolienne :

$$Y = \frac{E_C}{NA} \quad (13)$$

où N est le nombre d'éoliennes et A est la surface balayée par l'hélice d'une éolienne.

2.3.5 Facteur de puissance installée

Le facteur de puissance installée FPI est égal à la puissance moyenne produite par l'installation sur une année, divisé par sa puissance nominale. Il est calculé par la formule suivante (Li et Priddy, 1985) :

$$FPI = \left(\frac{E_C}{P_{éol} h_Y} \right) 100 \quad (14)$$

où E_C est l'énergie renouvelable captée exprimée en kWh, $P_{éol}$ est la puissance installée de la centrale éolienne exprimée en kW et h_Y est le nombre d'heures dans une année.

2.4 Validation

De nombreux experts ont contribué au développement, test et validation du modèle RETScreen pour projets de centrale éolienne. Ceux-ci incluent des experts en modélisation éolienne, des ingénieurs experts en coûts, des spécialistes en modélisation des gaz à effet de serre, des professionnels en analyse financière et des scientifiques spécialisés dans les bases de données météorologiques de satellites ou de stations de surveillance au sol.





Cette section présente deux exemples des validations conduites. Premièrement, les prédictions du modèle RETScreen pour projets de centrale éolienne ont été comparées aux résultats d'un programme de simulation horaire. Deuxièmement, les prédictions du modèle ont été comparées à des données annuelles mesurées sur le site d'un projet réel de centrale éolienne.

2.4.1 Validation du modèle de centrale éolienne par comparaison avec un modèle de simulation horaire

Dans cette section, les prévisions du modèle RETScreen pour projets de centrale éolienne sont comparées avec celles d'un modèle horaire. Le modèle horaire HOMER utilisé, est un modèle d'optimisation pour la conception de systèmes d'alimentation électrique autonomes (voir NREL, 2001). Il utilise des simulations horaires pour optimiser la conception de systèmes d'alimentation hybrides et peut modéliser des combinaisons de plusieurs systèmes notamment éolien, photovoltaïque, groupe électrogène diesel et batterie d'accumulateurs. La présente validation n'utilise pas les capacités d'optimisation d'HOMER; le programme est utilisé seulement comme un outil de simulation. Deux configurations ont été testées : un petit parc d'éoliennes connectées à un réseau isolé et un grand parc éolien connecté à un réseau central.

■ Petit parc d'éoliennes

La configuration du système utilisé pour ce test est basée sur un cas réel d'éoliennes à Kotzebue en Alaska, une petite communauté côtière à environ 50 km au nord du cercle polaire arctique (voir CADDET, 2001). Le système de 10 éoliennes totalisant une puissance nominale de 500 kW, est financé conjointement par l'US Department of Energy (DOE), l'Electric Power Research Institute (EPRI) et l'Alaska Energy Authority – Alaska Industrial Development Export Authority (AEA/AIDEA). Le projet éolien est conçu pour un petit réseau local alimentant une population de 3 500 personnes et pour fournir 6 % de la demande totale d'énergie électrique de la ville. La configuration du projet éolien est présentée dans le **Tableau 2**.

Éoliennes	Atlantic Orient Corporation AOC 15/50
Nombre d'éoliennes	10
Diamètre de l'hélice	15 m
Surface balayée	177 m ²
Hauteur du moyeu	24 m
Type de raccordement	Réseau local isolé
Puissance de pointe du réseau local	3,6 MW

Tableau 2 : Configuration du système éolien de Kotzebue.





La courbe de puissance de l'éolienne AOC 15/50 est donnée à la **Figure 9**. Les mêmes valeurs ont été utilisées dans les deux logiciels.

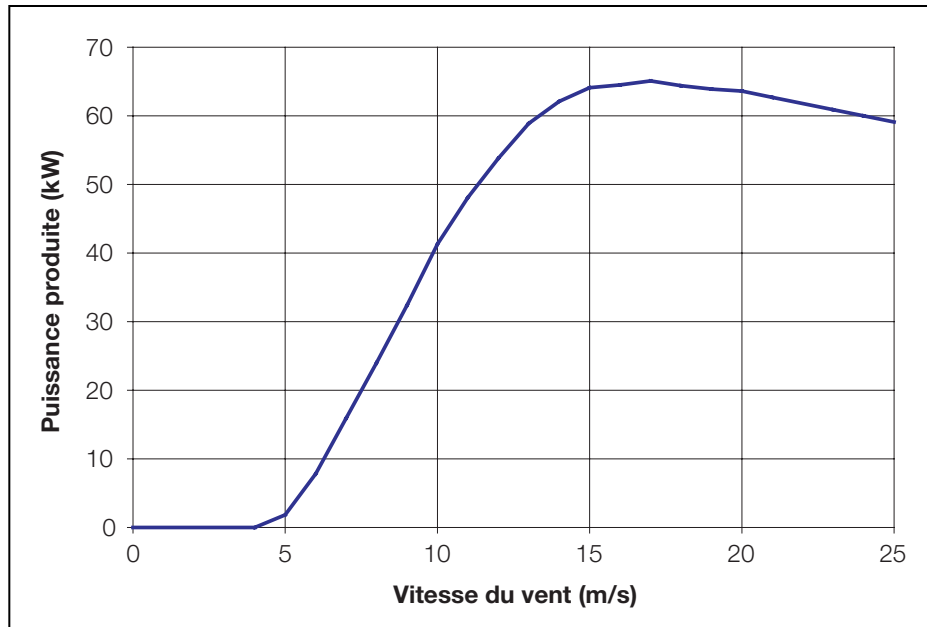


Figure 9 :

Courbe de puissance de l'éolienne AOC 15/50.

Pour les données météorologiques, la base de données intégrée à RETScreen a été utilisée pour les valeurs de Kotzebue/Wien, en Alaska. RETScreen et HOMER diffèrent au niveau du type de vitesses du vent qu'ils utilisent. HOMER utilise des valeurs mensuelles (voir **Tableau 3**) et estime stochastiquement des valeurs horaires à partir d'elles. Pour sa part, RETScreen nécessite simplement la valeur moyenne annuelle pour la vitesse du vent, laquelle est égale à 5,8 m/s (toutes les valeurs de vitesse du vent ont été mesurées à une hauteur de 9,4 m). Dans les deux modèles, la distribution des vents de Weibull a été utilisée avec un facteur de forme de 2,0. La moyenne annuelle de la pression atmosphérique est de 101,1 kPa et la moyenne annuelle de la température est de -6°C .

RETScreen requiert un exposant exprimant le cisaillement du vent pour calculer automatiquement la vitesse du vent à la hauteur du moyeu. Un exposant de 0,14 a été utilisé, donnant ainsi une vitesse du vent de 6,6 m/s. Avec HOMER, le facteur d'échelle de la vitesse du vent doit être entré manuellement. Le facteur utilisé a été fixé à 6,6/5,8 ou 1,138 de manière à ce que les deux programmes, RETScreen et HOMER, utilisent la même moyenne de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu (6,6 m/s).

Mois	Vitesse moyenne du vent (m/s)
janv.	6,5
févr.	5,5
mars	5,3
avr.	5,4
mai	5,1
juin	5,6
juill.	5,7
août	5,8
sept.	6,1
oct.	6,2
nov.	6,7
déc.	6,0
Moyenne annuelle	5,8

Tableau 3 :
Vitesse moyenne du vent à Kotzebue, Alaska.

La comparaison entre HOMER et RETScreen demande d'exercer un certain jugement puisque les deux programmes n'ont pas nécessairement besoin des mêmes données d'entrées ou ne prennent pas forcément en compte les mêmes phénomènes physiques. À bien des égards, RETScreen tend à être plus minutieux dans sa description du système. Par exemple, RETScreen calcule automatiquement les coefficients de corrections barométrique et thermique. Dans HOMER, ces valeurs doivent être entrées manuellement sous forme d'un facteur d'échelle appliqué à la courbe de puissance. De la même manière, RETScreen permet à l'utilisateur de préciser les pertes par effet de sillage, les pertes par encrassement des pales et résultantes du verglas, les pertes pour causes d'arrêts et les diverses pertes; celles-ci n'ont pas leur équivalent dans HOMER. Finalement, RETScreen permet à l'utilisateur de préciser le taux d'absorption de l'énergie éolienne, alors qu'il n'y a pas d'équivalent dans HOMER. Pour cette raison, la comparaison sera plus significative si la *production énergétique non corrigée* calculée par RETScreen est utilisée plutôt que l'*énergie renouvelable fournie*.

Le **Tableau 4** compare les productions d'énergie annuelles prévues par RETScreen et HOMER. Comme on peut le voir, l'accord entre les deux logiciels est excellent. La *section 2.4.2* montre que l'accord avec des données expérimentales est aussi acceptable en ce qui concerne l'énergie renouvelable effectivement fournie, c'est-à-dire quand la production d'énergie est corrigée en fonction des pertes du système et des effets de la température et de la pression atmosphérique.



RETScreen Production énergétique non corrigée (MWh)	HOMER Production énergétique totale (MWh)	Différence (%)
1 532	1 515	+1,12 %

Tableau 4 : Comparaison des productions annuelles d'énergie pour un petit parc d'éoliennes.

■ Grande centrale éolienne

La configuration du second test de validation est un grand parc éolien relié à un réseau central. Les caractéristiques principales du système sont les suivantes :

- 76 éoliennes Vestas V47-600 kW (hauteur du moyeu 55 m, diamètre 47 m).
- Vitesse moyenne annuelle du vent : 8,1 m/s.
- Température moyenne annuelle : 12 °C.
- Altitude du site : 250 m; pression atmosphérique moyenne annuelle : 98,4 kPa.
- Distribution de la vitesse du vent : Weibull, facteur de forme = 1,8.
- Exposant pour le cisaillement du vent : 0,14.

La courbe de puissance de l'éolienne Vestas V47-600kW est donné à la **Figure 10**. Les mêmes valeurs ont été utilisées dans les deux logiciels.

Selon RETScreen, la vitesse moyenne du vent à la hauteur du moyeu est égale à 10,3 m/s. Comme dans le cas du petit parc éolien, le facteur d'échelle de la vitesse du vent est égal à $10,3/8,1$ ou 1,272 et doit être entré manuellement dans HOMER afin que les deux programmes utilisent les mêmes moyennes pour la vitesse du vent à la hauteur du moyeu.

Comme précédemment, les valeurs de la *production énergétique non corrigée* calculées par RETScreen ont été utilisées, plutôt que l'*énergie renouvelable fournie*, pour faciliter la comparaison avec HOMER. Cette comparaison est analysée dans le **Tableau 5**. Une fois de plus, l'accord entre les deux logiciels est excellent.

RETScreen Production énergétique non corrigée (GWh)	HOMER Production énergétique totale (GWh)	Différence (%)
258,2	265,2	-2,64 %

Tableau 5 : Comparaison pour la production d'énergie annuelle – grande centrale éolienne.

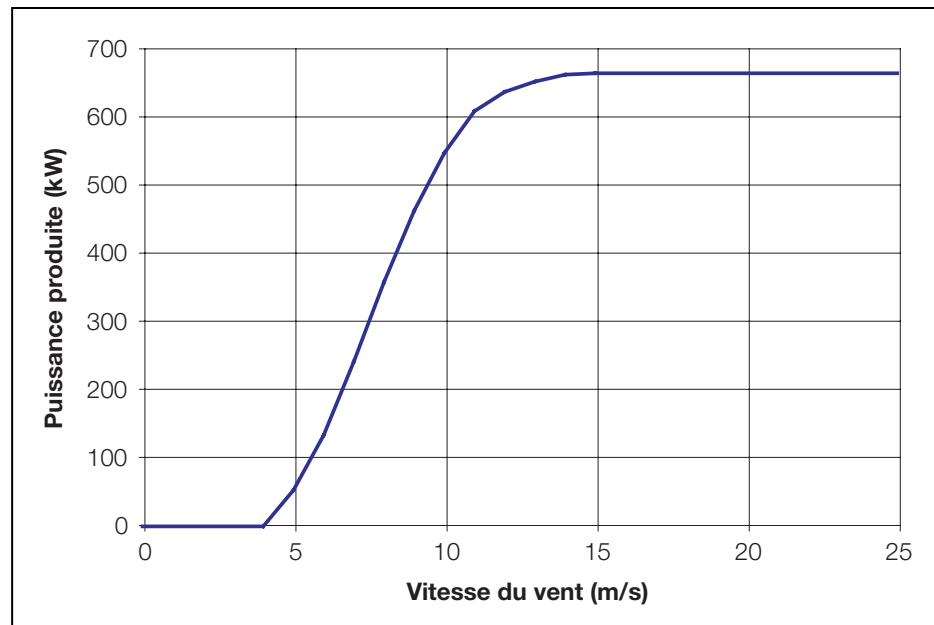


Figure 10 :
 Courbe de puissance de l'éolienne Vestas V47-600kW.

2.4.2 Validation du modèle de centrale éolienne par comparaison avec des données monitorées

Des données expérimentales annuelles ont été publiées pour le système décrit dans la section 2.4.1. Cela rend possible une validation expérimentale limitée du modèle RETScreen pour projet de centrale éolienne.

Le système de 10 éoliennes a été installé en plusieurs phases. La production d'électricité des éoliennes 1 à 3 était disponible pour les années 1998 et 1999; pour les éoliennes 4 à 10, les données pour une année de production étaient disponibles de juillet 1999 à juin 2000. Ces données de production d'électricité sont disponibles dans le rapport CADDET (2001). Bergey (2000) présente aussi le rendement du système pour les 10 éoliennes. Une restriction doit être associée cependant à l'utilisation de ces données à l'effet qu'il n'est pas rare que la production d'un projet éolien ne soit pas représentative durant ses premières années d'existence suite à des « problèmes de jeunesse » et des besoins de réglages. Ceci est particulièrement vrai pour les applications isolées et doit être considéré dans l'interprétation de la comparaison qui suit.

Les vitesses expérimentales du vent présentées dans le **Tableau 6**, ont été entrées dans RETScreen. En l'absence d'informations additionnelles, les estimations conservatrices suivantes ont été utilisées : taux d'absorption de l'énergie éolienne de 95 %, pertes par effet de sillage de 3 %, pertes par encrassement des pales et résultantes du verglas de 5 % et pertes diverses de 5 %. Les « autres pertes et causes d'arrêts » sont difficiles à estimer. Selon CADDET (2001), les éoliennes ont été disponibles 96 % du temps. Cependant, cette estimation exclut tous les arrêts effectués pour l'entretien planifié et les pannes du réseau,



qui doivent être incluses dans les données utilisées par RETScreen. Le paramètre « autres pertes et causes d'arrêts » a été estimé à environ 10 %, ce qui est probablement encore trop faible en regard des conditions difficiles auxquelles le système a été soumis et compte-tenu du fait que le système était encore en période de « rodage ».

Le **Tableau 6** résume les prévisions de RETScreen par comparaison à la production réelle d'énergie. RETScreen prédit raisonnablement la production annuelle d'électricité, excepté en 1999 où la production d'énergie du système monitoré semble avoir été en deçà des attentes. Par exemple, en comparant la production des éoliennes 1 à 3 en 1998 et en 1999, il apparaît que les 3 éoliennes produisaient 23 % moins d'énergie en 1999 alors que la moyenne des vents était supérieure de 10 % à celle de 1998. De même, la production moyenne par éolienne pour une vitesse de vent de 5,4 m/s était de 69,5 MWh en 1999 d'après CADDET (2001) alors qu'elle était de 117,0 MWh (soit 68 % de plus) en 1999/2000 pour une même vitesse moyenne du vent de 5,4 m/s selon Bergey (2000). Ces discordances font probablement suite aux problèmes expérimentaux des premières années d'opération du système éolien installé et devraient être résolues par la suite. La comparaison des prévisions de RETScreen avec les données expérimentales est toutefois acceptable et ainsi, en tenant compte de la comparaison modèle-à-modèle de la *section 2.4.1*, la validité de RETScreen est confirmée pour des projets de centrale éolienne qui en sont au stade de préfaisabilité.

Période	Éoliennes	Vitesse moyenne du vent (m/s)	Prévisions de RETScreen (MWh)	Production réelle d'électricité (MWh)	Différence (%)
1998*	1 à 3	4,9	250	270,9	-8 %
1999*	1 à 3	5,4	317	208,6	+52 %
juillet 1999-juin 2000*	4 à 10	5,1	646	546,9	+18 %
1999-2000**	1 à 10	5,4	1 057	~ 1 170,0	-10 %

(*) d'après CADDET (2001). (**) d'après Bergey (2000).

Tableau 6 : Comparaison des prévisions de RETScreen avec les données réelles de Kotzebue, Alaska.

2.5 Sommaire

Dans cette section les algorithmes utilisés par le modèle RETScreen pour projets de centrale éolienne ont été expliqués en détail. Le modèle utilise une courbe de puissance spécifiée par l'utilisateur et la fonction de distribution de probabilité des vitesses du vent de Weibull pour calculer la courbe d'énergie de l'éolienne. La production énergétique est alors ajustée en fonction des effets de la température et de la pression atmosphérique, ainsi qu'en fonction de diverses pertes précisées par l'utilisateur. Dans le cas des réseaux isolés, le calcul de l'énergie éolienne fournie tient compte du taux d'absorption de l'énergie éolienne. La comparaison des prévisions du modèle RETScreen avec les résultats d'un programme de simulations horaires et de données monitorées montre que la précision du modèle RETScreen pour projets de centrale éolienne est excellente pour la préparation d'études de préfaisabilité, en particulier si l'on considère que RETScreen ne requiert qu'une seule donnée de vitesse de vent contre 8 760 données pour la plupart des modèles de simulation horaire.





RÉFÉRENCES

- Association canadienne de l'énergie éolienne (ACÉE), *Wind Energy Basic Information*, document de référence publié avec l'appui de CANMET, 1996.
- Bergey, M., *Small Wind Systems For Rural Energy Supply*, Village Power 2000, Washington, DC, USA, 2000.
- Brothers, C., *Wind Generation Systems for Remote Communities - Market Assessment and Guidelines for Wind Turbines Selection*, Association canadienne de l'électricité, projet n° 9123 G 880, 1993.
- CADDET, *Technical Bulletin No. 143*, 2001.
- Conover, K., *Wind Energy Financial Due Diligence*, R. Lynette & Associates, présenté au séminaire Opportunities for Finance and Investment in Wind Energy, 1994.
- Elliot, D. et coll., *Wind Energy Resource Atlas of the United States*, SERI, 1986.
- Gipe, P., *Wind Energy Comes of Age*, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 1995.
- Hiester, T.R. and Pennell, W.T., *The Siting Handbook for Large Wind Energy Systems*, WindBooks, New York, USA, 1981.
- Le Gourières, D., *Wind Power Plants: Theory and Design*, Pergamon Press, 1982.
- Leng, G., Dignard-Bailey, L., Bragagnolo, J., Tamizhmani, G. and Usher, E., *Overview of the Worldwide Photovoltaic Industry*, rapport n° 96-41-A1 (TR), Laboratoire de recherche en diversification énergétique de CANMET, Ressources naturelles Canada, Varennes, QC, Canada, J3X 1S6, 1996.
- Li, K.W. and Priddy, A.P., *Power Plant System Design*, John Wiley & Sons Inc., New York, USA, 1985.
- Lynette, R. and Ass., *Technical and Economic Potential for Wind Energy Development in Ontario*, préparé pour l'Independent Power Producers' Society of Ontario, 1992.
- NREL, *HOMER, The Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*, disponible au National Renewable Energy Laboratory, 1617 Cole Boulevard, Golden, Colorado 80401-3393, USA, 2001.
- Rangi, R., Templin, J., Carpentier, M. and Argue, D., *Canadian Wind Energy Technical and Market Potential*, DTEER, Énergie, mines et ressources Canada, 1992.
- Reid, R., *Application de l'éolien aux réseaux non-reliés*, Hydro-Québec, Congrès de l'ACFAS, Montréal, QC, Canada, 1996.
- SunMedia GmbH, *Wind Turbine Market: Types, Technical Characteristics, Prices*, 1999.
- Vesterdal, J., *The Potential of Wind Farms*, ELSAM, 1992.





WECTEC, *Évaluation du potentiel éolien du Québec*, rapport préparé pour le Ministère des Ressources naturelles du Québec, 1996.

Wind Power Monthly, *The Windicator-Operational Wind Power Capacity Worldwide*, 2001.

Winkra-Recom, *Wind Turbine Market - Types, Technical Characteristics, Prices*, 1995/96.

Zond, *Wind Power Economics*, séminaire Opportunities for Finance and Investment in Wind Energy, 1994.



