

# ETUDE DE LA VARIABILITÉ DE LA PRODUCTION ÉOLIENNE AUX ÎLES-DE-LA-MADELEINE

Îles-de-la-Madeleine, Québec

Préparé pour  
Hydro-Québec Distribution

Par  
Hélimax Énergie inc.

Octobre 2008



## IDENTIFICATION DU DOCUMENT

Numéro de projet :	583
Date d'émission :	17 octobre 2008
Version du document :	Finale
Statut du document :	Privé et confidentiel
Liste de circulation :	Hydro-Québec Distribution, copie interne d'Hélimax
Historique de révision :	19 septembre 2008 – Version préliminaire 17 octobre 2008 – Version finale (nouvelles simulations et publications de résultats supplémentaires de puissances)

## CLAUSE D'EXONÉRATION DE RESPONSABILITÉ

Le présent rapport a été rédigé par Hélimax Énergie inc. (« Hélimax ») conformément à sa proposition et aux directives fournies par le « client ». Les renseignements et l'analyse figurant aux présentes sont uniquement destinés au client et aucune autre personne ne pourra s'y fier. Hélimax s'est strictement fondée sur les données actuellement disponibles et a exécuté les services conformément aux normes de diligence actuellement suivies par les cabinets d'experts-conseils qui rendent des services de nature semblable. Malgré ce qui précède, ni Hélimax, ni les personnes agissant pour son compte ne font quelque déclaration ni ne donnent quelque garantie que ce soit, expresse ou tacite, i) ayant trait à la véracité, à l'exactitude ou à l'exhaustivité des renseignements figurant aux présentes élaborés par des tiers ou obtenus de ceux-ci, y compris du client, ou ii) que l'utilisation des renseignements figurant aux présentes par le client ne portera pas atteinte aux droits de propriété privée, notamment aux droits de propriété intellectuelle de quiconque. Le client est seul responsable de l'interprétation et de l'utilisation des renseignements figurant aux présentes et de leur adaptation à sa situation particulière. Par conséquent, Hélimax n'assume aucune responsabilité quelle qu'elle soit ayant trait à tout dommage direct ou indirect ou toute autre obligation découlant de l'utilisation par le client, des renseignements, des résultats, des conclusions ou de l'analyse figurant dans le présent rapport.

## DÉFINITIONS ET SYMBOLES

CFD	Computational Fluid Dynamics
EC	Environnement Canada
kWh	kilowatt-heure
ISET	Institut für Solare Energieversorgungstechnik
kg	kilogramme
kW	kilo watt
MW	mega watt
m	mètre
m/s	mètres par seconde
N/A	non applicable
N/D	non disponible
$P_B$	puissance brute
$P_N$	puissance nette égale à la puissance brute diminuée de toutes pertes
P2	puissance brute diminuée des pertes autres que les pertes d'hystérésis, de maintenance et de pannes
$R^2$	coefficient de détermination
SIG	système d'information géographique
tr/min	tours par minute
$Z_0$	longueur de rugosité
HQ21101	mât de mesure Île-d'Entrée
HQV1101	mât virtuel Ile-du-Hâvre-aux-Maisons

## SOMMAIRE EXÉCUTIF

Hydro-Québec Distribution (HQD) entend modéliser l'intégration d'une centrale éolienne au réseau isolé diesel actuellement en opération aux Îles-de-la-Madeleine. Dans ce contexte HQD a sollicité la collaboration d'Hélimax afin d'apporter les éléments nécessaires à l'étude sur l'intégration d'un parc éolien d'une puissance installée d'environ 5000 kW constitué d'éoliennes de type GE 1.5 d'une puissance unitaire de 1,5 MW.

Pour répondre aux besoins du Client, Hélimax a entrepris la conception d'un parc virtuel composé de 3 éoliennes GE 1.5se, avec des hauteurs de moyeux de 65 m (IEC classe I) pour une puissance totale de 4500 kW. La variabilité de la production anticipée de ce parc virtuel a été estimée sur la base de la ressource éolienne mesurée à l'aide d'un mât de mesure situé sur l'Île-d'Entrée et des techniques de simulations numériques.

Le tableau suivant résume les principaux résultats obtenus dans cette étude :

### Sommaire des résultats de l'analyse météorologique

	Année de mesure	Année Typique	Année Extrême Haute	Année Extrême Basse
Vitesse du mât de mesure à 50 m (m/s)	9,2	9,1	9,6	8,7
Vitesse du mât virtuel à 50 m (m/s)	9,2	9,1	9,6	8,7
Vitesse du mât virtuel à 65 m (m/s)	9,4	9,3	9,8	8,9

### Sommaire des résultats de la variabilité de la production nette

	Année de mesure	Année Typique	Année Extrême Haute	Année Extrême Basse
Facteur d'utilisation du parc éolien virtuel (%)	49,0	48,7	51,5	45,9
Variabilité typique ( $\sigma$ ) sur 10 secondes (kW)	75	75	76	73
Variabilité typique ( $\sigma$ ) sur 1 minute (kW)	164	164	166	161
Variabilité typique ( $\sigma$ ) sur 10 minutes (kW)	264	263	278	254
Variabilité typique ( $\sigma$ ) sur 15 minutes (kW)	286	284	297	273
Variabilité typique ( $\sigma$ ) sur 40 minutes (kW)	425	422	438	406
Variabilité typique ( $\sigma$ ) sur 1 heure (kW)	496	495	515	477

Des données plus détaillées sur la variabilité de la puissance brute et celle d'une puissance P2 intermédiaire entre la puissance brute et la puissance nette sont incluses en annexe. Les résultats complets et des synthèses statistiques ont été transmis au Client sur support électronique.

Le site considéré représente un excellent potentiel éolien<sup>1</sup>. Les variations typiques de la puissance nette relativement à la puissance installée varient d'environ 2% sur un pas de temps de 10 secondes à environ 11% à l'échelle horaire.

Ces résultats sont obtenus en supposant un réseau de transport électrique stable et fort. Une étude plus poussée serait nécessaire si cette hypothèse était remise en cause dans le cas du réseau isolé des Îles-de-la-Madeleine.

<sup>1</sup> Les facteurs d'utilisation sont donnés à titre indicatif seulement. Ils ne constituent pas une estimation du productible escompté qui nécessiterait une étude spécifique.

## TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION.....	1
2	RECONSTRUCTION DE DONNÉES METEOROLOGIQUES.....	2
2.1	CARACTÉRISTIQUES DU SITE.....	2
2.2	MÉTHODOLOGIE.....	4
2.2.1	<i>Taux de recouvrement des données (%) pour Ile-d'Entrée.....</i>	<i>4</i>
2.2.2	<i>Reconstruction initiale de la série de données au mât de mesure.....</i>	<i>4</i>
2.2.3	<i>Extrapolation des données mesurées au mât virtuel.....</i>	<i>5</i>
2.2.4	<i>Série à 10 secondes.....</i>	<i>6</i>
2.2.5	<i>Ajustement climatologique, année typique, année extrême haute et année extrême basse.....</i>	<i>6</i>
3	ANALYSE DE DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES.....	8
3.1	DONNÉES DE VENT.....	8
3.1.1	<i>Vitesse du vent.....</i>	<i>8</i>
3.1.2	<i>Direction du vent.....</i>	<i>8</i>
3.2	DONNÉES DE TEMPÉRATURE.....	8
4	ESTIMATION DES SÉRIES TEMPORELLES DE PUISSANCE.....	12
4.1	CONFIGURATION DU PARC.....	12
4.2	MÉTHODOLOGIE DE L'ESTIMATION DES SÉRIES TEMPORELLES DE LA PRODUCTION.....	12
4.2.1	<i>Estimation de la puissance brute.....</i>	<i>12</i>
4.2.2	<i>Estimation de la puissance nette.....</i>	<i>13</i>
4.2.3	<i>Estimation de la puissance P2.....</i>	<i>13</i>
4.2.4	<i>Remarque.....</i>	<i>14</i>
5	REMARQUES FINALES.....	15
5.1	DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES.....	15
5.2	PRODUCTIBLE NET.....	15
5.3	CHOIX DE LA CONFIGURATION ET DES ÉOLIENNES.....	16
5.4	LIMITES DE LA MÉTHODOLOGIE.....	16
APPENDIX A	STATISTIQUES DE LA VARIABILITÉ DE LA PUISSANCE NETTE.....	18
I.	DÉFINITIONS.....	18
II.	ANNÉE DE MESURE.....	19
	<i>Variations sur 10s.....</i>	<i>19</i>
	<i>Variations sur 60s.....</i>	<i>20</i>
	<i>Variations sur 600s.....</i>	<i>21</i>
	<i>Variations sur 900s.....</i>	<i>22</i>
	<i>Variations sur 2400s.....</i>	<i>23</i>
	<i>Variations sur 3600s.....</i>	<i>24</i>
III.	ANNÉE TYPIQUE.....	25
	<i>Variations sur 10s.....</i>	<i>25</i>
	<i>Variations sur 60s.....</i>	<i>26</i>
	<i>Variations sur 600s.....</i>	<i>27</i>
	<i>Variations sur 900s.....</i>	<i>28</i>
	<i>Variations sur 2400s.....</i>	<i>29</i>

	<i>Variations sur 3600s</i> .....	30
IV.	ANNÉE EXTRÊME HAUTE.....	31
	<i>Variations sur 10s</i> .....	31
	<i>Variations sur 60s</i> .....	32
	<i>Variations sur 600s</i> .....	33
	<i>Variations sur 900s</i> .....	34
	<i>Variations sur 2400s</i> .....	35
	<i>Variations sur 3600s</i> .....	36
V.	ANNÉE EXTRÊME BASSE.....	37
	<i>Variations sur 10s</i> .....	37
	<i>Variations sur 60s</i> .....	38
	<i>Variations sur 600s</i> .....	39
	<i>Variations sur 900s</i> .....	40
	<i>Variations sur 2400s</i> .....	41
	<i>Variations sur 3600s</i> .....	42
APPENDIX B	SPÉCIFICATIONS DES ÉOLIENNES .....	43
APPENDIX C	CONFIGURATION DU PARC ÉOLIEN.....	45
APPENDIX D	MÉTHODOLOGIE UTILISÉE POUR L'ESTIMATION DES PERTES .....	46
APPENDIX E	DESCRIPTION DES PARAMÈTRES DE SIMULATION DES PERTES .....	50
APPENDIX F	LE MODÈLE METEODYN WT.....	51
APPENDIX G	LE MODÈLE WINDFARM.....	52

## LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Étapes de l'analyse météorologique et du calcul du productible .....	1
Figure 2-1 Localisation du mât de mesure, du mât virtuel et des éoliennes du parc virtuel .....	3
Figure 2-2 Moyennes annuelles de la vitesse du vent enregistrée à Ile-de-la-Madeleine (7053KGR).....	7
Figure 3-1 Profil mensuel de la vitesse du vent .....	9
Figure 3-2 Profil horaire de la vitesse du vent.....	9
Figure 3-3 Rose de vent HQ21101 – 65 m .....	10
Figure 3-4 Rose de vent HQV1101 – 50 m .....	10
Figure 3-5 Profil mensuel de la température .....	11
Figure 3-6 Profil horaire de la température .....	11

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Identification et localisation du mât de mesure et du mât virtuel et caractéristiques du site .....	2
Tableau 2-2 : Taux de recouvrement des données (%) pour Ile d'Entrée - HQ21101.....	4
Tableau 2-3 : Coefficients de corrélation et équations des régressions linéaires utilisées dans la reconstruction initiale de la vitesse du vent à 50 m.....	5
Tableau 2-4 : Données d'entrée du modèle Meteodyn .....	5
Tableau 2-5 : Moyennes annuelles des vitesses du vent (m/s) .....	7
Tableau 4-1 : Description de l'éolienne – GE 1.5se .....	12
Tableau 5-1: Moyennes annuelles des vitesses de vent.....	15
Tableau 5-2: Facteurs d'utilisation et variabilité de la puissance nette .....	15

# 1 INTRODUCTION

Hydro-Québec Distribution (« HQD » ou « Client ») entend entreprendre une étude de modélisation sur son réseau isolé aux Iles-de-la-Madeleine. Il s'agit de modéliser l'intégration d'une centrale éolienne au réseau local actuellement en opération. Dans ce contexte HQD a sollicité la collaboration d'Hélimax dans le but d'apporter les éléments nécessaires à l'étude d'intégration éolienne du projet à l'étude. HQD entend intégrer une puissance installée de l'ordre de 5000 kW constituée d'éoliennes de type GE 1,5 MW.

Des modélisations ont été effectuées pour simuler la production en puissance d'un parc éolien virtuel d'une puissance de 4500 kW durant une période d'un an sur le site ciblé par HQD avec un pas temporel allant de 10 secondes à une heure. Le schéma de la Figure 1-1 décrit l'approche méthodologique utilisée pour exécuter les étapes menant à l'estimation du productible escompté du projet.

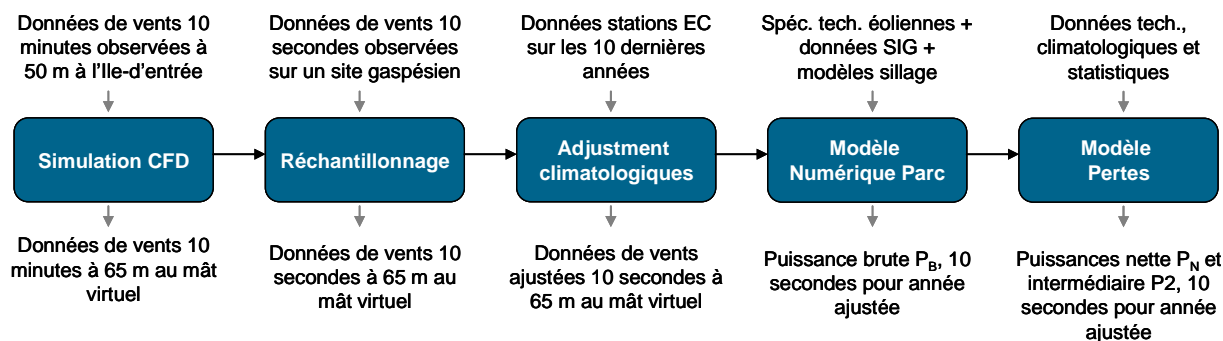


Figure 1-1 : Étapes de l'analyse météorologique et du calcul du productible

Ce document fournit l'essentiel de la méthodologie et le résumé des résultats obtenus. La première partie (sections 2 et 3) décrit la génération des données météorologiques en l'occurrence les vitesses et les directions du vent et la température ambiante. La seconde partie (section 4) présente la configuration du parc éolien et le calcul de la puissance escomptée à partir des données météorologiques. La dernière section du document (section 5) présente les principaux enseignements de l'étude.

Une analyse statistique des variations des puissances brute, nette et intermédiaire  $P_2$  (voir section 4.2.3) du parc aux échelles temporelles de 10 secondes, 1 minute, 10 minutes, 15 minutes, 40 minutes et une heure est fournie en annexe. Cette annexe comporte également quelques éléments d'explication sur les modèles utilisés pour les simulations.

Les données de vitesses et directions du vent, de température ambiante et de puissances associées à cette analyse ont été fournies au Client sur un support numérique aux échelles temporelles mentionnées ci-dessus. Des fichiers d'analyses statistiques contenant des histogrammes et des fréquences cumulées de variabilité de la production sont également transmis au Client sur ces mêmes supports électroniques.



## 2 RECONSTRUCTION DE DONNÉES METEOROLOGIQUES

Cette section fournit une description du site et des spécifications des instruments utilisés pour l'acquisition des données météorologiques.

Le site virtuel se trouve sur l'Île-du-Hâvre-aux-Maisons dans l'archipel des Îles-de-la-Madeleine, situé dans le golfe du St-Laurent, dans la province du Québec.

An avril 2006, une campagne de mesure des vents a été entreprise en vue d'estimer le gisement éolien sur l'Île-d'Entrée, pour le développement potentiel d'un projet éolien. Pour ce faire, un mât de mesure des vents, identifié « Île-d'Entrée » ou « HQ21101 » a été installé sur ce site. Le mât de mesure est situé sur l'Île-d'Entrée, à 16 km au sud-est de Cap-aux-Meules.

### 2.1 Caractéristiques du site

La description détaillée du site, la configuration de la tour de mesure et son instrumentation, ainsi que la méthodologie utilisée pour analyser et traiter les données ont été fournies au Client dans un précédent rapport intitulé « Rapport météorologique de 12 mois – Île-d'Entrée, Québec »

Le Tableau 2-1 présente les numéros d'identification du mât de mesure et du mât virtuel, leurs noms, leurs coordonnées géographiques ainsi que les principales caractéristiques de leur environnement immédiat. La Figure 2-1 présente la localisation du mât de mesure et du mât virtuel dans l'ensemble du site.

**Tableau 2-1 : Identification et localisation du mât de mesure et du mât virtuel et caractéristiques du site**

Information générale	Mât de mesure	Mât virtuel
Numéro de la station	HQ21101	HQV1101
Nom de la station	Île-d'Entrée	Île-du-Hâvre-aux-Maisons
Ville la plus proche	Cap-aux-Meules	Cap-aux-Meules
Coordonnées		
Nord	47° 16' 47,6"	47° 28' 35,0"
Ouest	61° 42' 49,6"	61° 44' 00,0"
Caractéristiques du terrain		
Topographie et obstacles	Collines aux pentes douces, peu élevées et recouvertes d'herbes	Plage au bord de l'eau

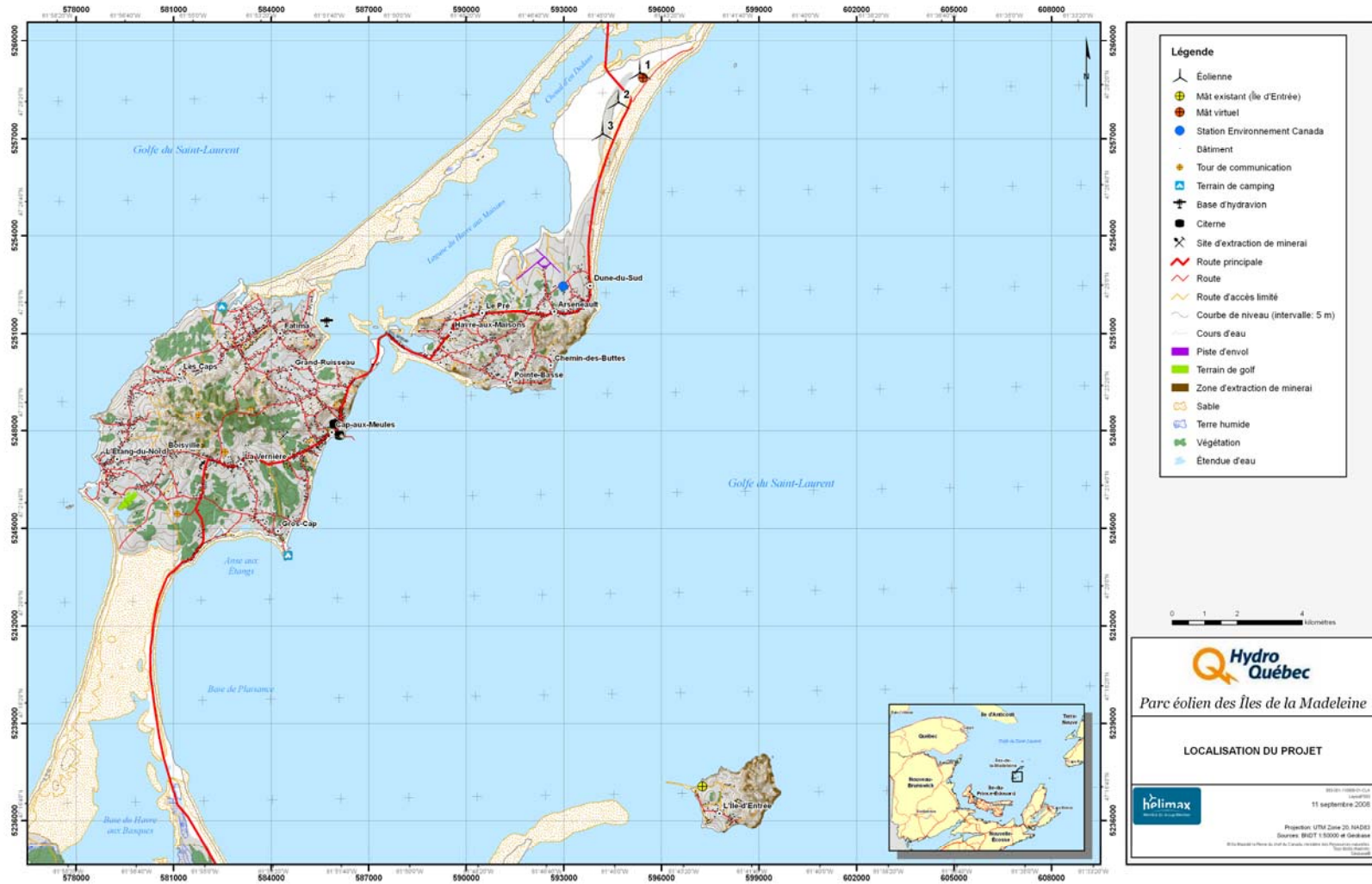


Figure 2-1 Localisation du mât de mesure, du mât virtuel et des éoliennes du parc virtuel

## 2.2 Méthodologie

Afin d'entreprendre la simulation d'une série temporelle de la production en puissance du projet éolien virtuel de l'Ile-de-la-Madeleine, Helimax a utilisé les mesures de vent et de température provenant de la campagne de mesure réalisée par HQD à l'Ile-d'Entrée. La disponibilité de ces données de ressource éolienne mesurées sur site était en effet cruciale pour mener à bien la présente étude.

### 2.2.1 Taux de recouvrement des données (%) pour Ile-d'Entrée

Le taux de recouvrement des données est défini comme le ratio du nombre d'observations valides mesurées par un mât de mesure pendant une période donnée par rapport au nombre total d'observations potentielles qui pourraient être mesurées pendant cette même période. Le recouvrement de données enregistrées au mât de l'Ile-d'Entrée est présenté en détail dans le rapport « Rapport météorologique de 12 mois – Ile-d'Entrée, Québec ». Le taux de recouvrement mensuel de la série utilisée pour la reconstruction est résumé dans le Tableau 2-2. De manière générale, les taux de recouvrement sont élevés, sauf pour les mois de février et mars 2007 où le gel a affecté certains instruments.

Tableau 2-2 : Taux de recouvrement des données (%) pour Ile d'Entrée - HQ21101

Année - Mois	Vitesse à 50 m	Vitesse à 40 m	Vitesse à 30 m	Direction à 50 m	Direction à 40 m	Température à 3 m
2006-05	100	100	100	100	100	100
2006 - 06	100	100	100	100	100	100
2006 - 07	100	100	100	100	100	100
2006 - 08	100	100	100	100	100	100
2006 - 09	100	100	100	100	100	100
2006 - 10	100	100	100	100	100	100
2006 - 11	100	100	100	100	100	100
2006 - 12	100	100	100	100	99	100
2007 - 01	100	100	100	99	99	100
2007 - 02	98	98	100	98	98	100
2007 - 03	99	99	99	97	97	100
2007 - 04	100	100	100	100	100	100

### 2.2.2 Reconstruction initiale de la série de données au mât de mesure

Les données recueillies sont à l'échelle de 10 minutes et comprennent la vitesse du vent, le maximum et le minimum de la vitesse du vent, la direction du vent et la température de l'air ambiant, ainsi que les écart-type. Afin d'obtenir une année complète d'enregistrements à chaque 10 minutes, soit 52560 valeurs, les mesures éliminées à cause du gel ont été reconstruites. La vitesse du vent à 50 m a été reconstruite à partir de la vitesse du vent mesurée à 30 m, quand celle-ci était disponible. La corrélation de données à 10 minutes et l'équation de la régression linéaire sont présentées dans le **Error! Reference source not found.** Si les mesures de la vitesse du vent n'étaient disponibles sur aucun niveau au mât de mesure, les données enregistrées à la station d'Environnement Canada Ile-de-la-Madeleine (7053KGR) ont été utilisées.

La station Ile-de-la-Madeleine (7053KGR) est située dans un milieu similaire à celui du mât de mesure et est jugée représentative pour les conditions météorologiques sur l'Ile-d'Entrée. La vitesse du vent observée à la station d'EC a été utilisée pour reconstruire, à chaque heure, la vitesse à 50 m selon l'équation présentée dans le Tableau 2-3. Les vitesses à 10 minutes ont été reconstruites de manière à ne pas changer la courbe de tendance établie en fonction des vitesses horaires. Les directions du vent ont été reconstruites en tenant compte de la variation horaire à la station d'EC et la variation au mât de mesure, avant et après la période reconstruite.

Aucune reconstruction initiale n'a été nécessaire pour la température ambiante car son taux de recouvrement était de 100%.

**Tableau 2-3 : Coefficients de corrélation et équations des régressions linéaires utilisées dans la reconstruction initiale de la vitesse du vent à 50 m**

Source de données	Coefficient de corrélation (%)	Équation de régression linéaire	Intervalle de mesure de données
Vitesse du vent à 30 m Ile-d'Entrée	98	$1,040 \times V + 0,264$	10 minutes
Vitesse du vent à 10 m Ile-de-la-Madeleine	81	$1,158 \times V + 1,901$	1 heure

### 2.2.3 Extrapolation des données mesurées au mât virtuel

#### 2.2.3.1 Vitesse et direction du vent

Pour cette analyse, la série temporelle de la vitesse et de la direction du vent à l'emplacement du mât virtuel a été produite en utilisant le model CFD du logiciel commercial Meteodyn. Une description générale de ce modèle est fournie à l'Appendix F.

Pour extrapoler la série temporelle à l'emplacement du mât virtuel, le modèle requiert les données suivantes :

- le champ de données altimétriques numériques du site;
- les valeurs de rugosité de surface pour le site;
- les données du vent mesurées par la tour de mesure.

Les données d'entrée utilisées pour exécuter Meteodyn sont présentées au Tableau 2-4. Les données météorologiques utilisées dans le modèle sont les vitesses et les directions du vent, au mât de mesure de l'Ile-d'Entrée, à 50 m au-dessus du sol, décrites dans la section 2.2.2.

**Tableau 2-4 : Données d'entrée du modèle Meteodyn**

Données d'entrée	Source de données
Élévation	Carte 1 : 50 000, Géobase
Rugosité de surface	Carte 1 : 50 000, Base nationale de données topographiques
Données météorologiques	Mât de mesure Ile-d'Entrée à 50 m

Meteodyn a produit la série temporelle à l'emplacement du mât virtuel en incluant l'effet topographique et l'effet de la rugosité du site.

Meteodyn a également produit un champ de vitesses à 50 m de résolution spatiale dans une région couvrant l'étendue du parc éolien virtuel. Les dimensions du domaine de simulation ont été choisies de manière à se conformer aux conditions de base requises par le modèle.

### 2.2.3.2 Température de l'air

L'extrapolation horizontale de la série temporelle de température à l'emplacement du mât virtuel a été produite à partir des températures de l'air mesurées au mât de Ile-d'Entrée. Afin de mieux reproduire les conditions météorologiques à l'emplacement du mât virtuel, la température enregistrée à l'Ile-d'Entrée a été ajustée sur la base de la régression linéaire obtenue avec les mesures de température à la station Ile-de-la-Madeleine (7053KGR). Le coefficient de corrélation des mesures horaire est de 99% et l'équation de la régression linéaire appliquée est :

$$T(HQV1101) = 1,0184 * T(HQ21101) - 1,9891$$

L'extrapolation verticale de la température à la hauteur du moyeu a été calculée en appliquant un gradient vertical de 0.0065 °C/m.

### 2.2.4 Série à 10 secondes

Helimax a utilisé une méthodologie spécifique pour ré-échantillonner les données de 10 minutes de vitesse, de direction et de température décrites ci-dessus à un pas temporel de 10 secondes.

Pour la vitesse du vent, des mesures de vitesses du vent échantillonnées à 10 secondes étaient disponibles sur un autre site considéré comme ayant des caractéristiques de turbulence analogues au site en étude. Les fluctuations de ces données ont été extraites, normalisées et ajoutées aux données 10 minutes en s'assurant que les moyennes et les écart-types 10 minutes des données ainsi ré-échantillonnées respectaient leurs valeurs avant ré-échantillonnage. Des opérations de filtrage intermédiaires ont été nécessaires afin d'éliminer les variations trop grandes et physiquement inacceptables des fluctuations de vitesse.

Pour la direction du vent, des fluctuations aléatoires respectant les écart-types à 10 minutes ont été insérées entre les valeurs à 10 minutes. Là encore, des opérations de filtrage intermédiaires ont permis d'éliminer les variations trop importantes et physiquement inacceptables.

Les vitesses et les directions ré-échantillonnées à 10 secondes ont été analysées sur le plan spectral et comparées à des données réellement mesurées avec un pas temporel de 10 seconde sur d'autres sites. Cette analyse a permis de s'assurer de la qualité des données ainsi reconstituées du point de vue fréquentiel.

Quant à la température, étant données les plus faibles fréquences de variation attendues et étant donnée sa plus faible influence sur la production du parc (via la densité de l'air), elle a simplement été considérée comme constante sur les intervalles de 10 minutes. Le ré-échantillonnage a consisté à produire un signal en échelons. Cette approximation a été jugée adéquate aux fins de la présente étude.

### 2.2.5 Ajustement climatologique, année typique, année extrême haute et année extrême basse

Les vitesses du vent peuvent varier significativement d'une année à l'autre en raison de l'importante variabilité atmosphérique. Pour une année et un site donnés, il arrive régulièrement que la vitesse du vent varie de plus de 10 %, et plus rarement de plus de 20 %, par rapport à la moyenne climatologique. Les données observées lors d'une campagne de mesure doivent être remises dans le contexte climatologique de la région afin de représenter au mieux le potentiel éolien dans un site sur la durée d'un projet. Ce processus est défini comme l'ajustement climatologique des vitesses du vent et repose sur des données à long terme de stations météorologiques locales.

L'ajustement climatologique des vitesses du vent se fait en faisant appel à une régression multilinéaires entre les moyennes journalières des vitesses observées au mât de mesure et les vitesses observées aux stations météorologiques à proximité du mât. Dans le cas présent, la station météorologique utilisée est Ile-de-la-Madeleine (7053KGR) et la période prise en compte pour l'ajustement climatologique est 1996-2005. Les coefficients de régression linéaire sont ensuite utilisés afin de procéder à l'ajustement climatologique des vitesses observées sur le site. Le rapport entre la vitesse ajustée climatologique et la moyenne annuelle de la vitesse du vent mesurée sur le site a été utilisée afin d'obtenir l'année typique de la série de données.

Comme indiqué sur la Figure 2-2, l'année extrême haute de la période étudiée est 2002 tandis que l'année extrême basse est 2000. Les coefficients d'ajustements pour les extrêmes haute et basse ont été déterminés de la même manière que le coefficient d'ajustement climatologique en utilisant les années extrêmes à la place de la période de 10 ans. Les moyennes annuelles de la vitesse du vent pour les différentes années sont présentées dans le Tableau 2-5.

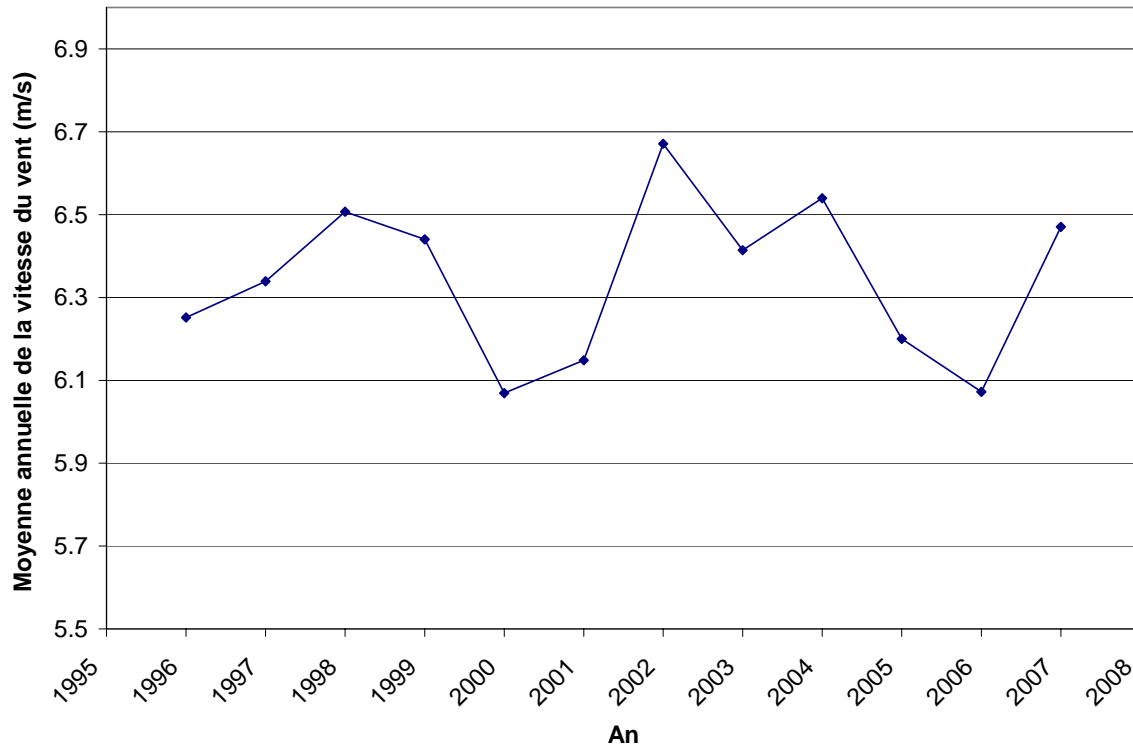


Figure 2-2 Moyennes annuelles de la vitesse du vent enregistrée à Ile-de-la-Madeleine (7053KGR)

Tableau 2-5 : Moyennes annuelles des vitesses du vent (m/s)

	Année de mesure	Année Typique	Année Extrême Haute	Année Extrême Basse
Vitesse au mât de mesure à 50 m	9,2	9,1	9,6	8,7
Vitesse au mât virtuel à 50 m	9,2	9,1	9,6	8,7
Vitesse au mât virtuel à 65 m	9,4	9,3	9,8	8,9

### 3 ANALYSE DE DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

Les données analysées sont la vitesse et la direction du vent ainsi que la température ambiante observées au mât de l'Île-d'Entrée (HQ21101) et celles extrapolées au mât virtuel de l'Île-du-Hâvre-aux-Maisons (HQV1101).

Les variations des observations et celles des données reconstruites peuvent affecter considérablement la puissance générée par le parc éolien. Les observations météorologiques suivent souvent des cycles saisonnières et journaliers.

Les cycles journaliers sont principalement causés par la variation du rayonnement incident le jour et du rayonnement restitué la nuit. Le cycle journalier apparaît clairement sur les données observées durant une campagne de mesure des vents et il est important, par conséquent, de le quantifier.

Les sections suivantes présentent l'évolution mensuelle et les variations journalières des vitesses du vent et des températures de l'air, ainsi que les distributions directionnelles des vitesses du vent pour les deux mâts.

#### 3.1 Données de vent

##### 3.1.1 Vitesse du vent

En Amérique du Nord, les vitesses du vent sont généralement plus élevées pendant l'hiver, car les patrons synoptiques augmentent la présence des hauts gradients de pression durant cette saison. La Figure 3-1 présente la variation mensuelle de la vitesse moyenne du vent observée à 50 m, ainsi que de la vitesse simulée à 50 et 65 m.

En général, le réchauffement atmosphérique pendant la journée fait augmenter le gradient de température à l'intérieur de la couche limite, induisant ainsi l'atteinte d'un maximum en après-midi. Cette augmentation du gradient thermique accroît le mélange vertical de l'air, ce qui explique l'augmentation typique des vitesses du vent dans l'après-midi. Cependant, des phénomènes locaux ou à grande échelle peuvent influencer le cycle journalier de la vitesse du vent.

La Figure 3-2 présente les profils horaires de la vitesse du vent mesurée à 50 m, ainsi que de la vitesse extrapolée au mât virtuel à 50 et 65 m. On remarque que la vitesse du vent est assez constante durant toute la journée avec une légère hausse la nuit, où elle atteint un maximum. La constance du vent au cours de la journée est probablement due à l'influence des phénomènes de grande échelle survenant sur le golfe du St-Laurent.

##### 3.1.2 Direction du vent

Les vitesses du vent sur un site particulier sont fortement influencées par les patrons synoptiques et les effets locaux causés par la topographie et la rugosité de la surface du sol. De ce fait, les vitesses du vent peuvent varier en fonction de la direction du vent. La rose des vents est un moyen couramment utilisé dans l'industrie pour décrire la distribution directionnelle de la vitesse du vent sur site. Une rose des vents montre essentiellement la distribution et l'occurrence des vitesses du vent par secteur de direction. Les secteurs directionnels prédominants et ceux ayant une forte vitesse du vent peuvent alors être facilement identifiés.

Figure 3-3 et Figure 3-4 présentent les distributions directionnelles des vents observés et simulés. Les deux roses des vents sont similaires et montrent une distribution des vitesses sur tous les secteurs allant du nord-nord-ouest au sud, avec une fréquence plus significative des vents du sud.

#### 3.2 Données de température

La température atmosphérique affecte la densité de l'air qui, à son tour, a une influence sur le potentiel du gisement éolien.

La Figure 3-5 présente la variation mensuelle de la température mesurée et de la température extrapolée à au mât virtuel au cours de la période d'observation. Les températures moyennes correspondent à une variation saisonnière typique.

Le cycle journalier de la température atmosphérique est le résultat direct du rayonnement solaire incident. Le rayonnement incident augmente la température atmosphérique à la surface du sol, laquelle atteint son maximum dans l'après-midi, tandis que le rayonnement réfléchi tend à diminuer celle-ci pour atteindre un minimum avant le lever du soleil. La Figure 3-6 présente les profils de la température moyenne horaire de l'air mesurée à 10 m, ainsi que de la température extrapolée à l'emplacement du mât virtuel à 10 et 65 m.

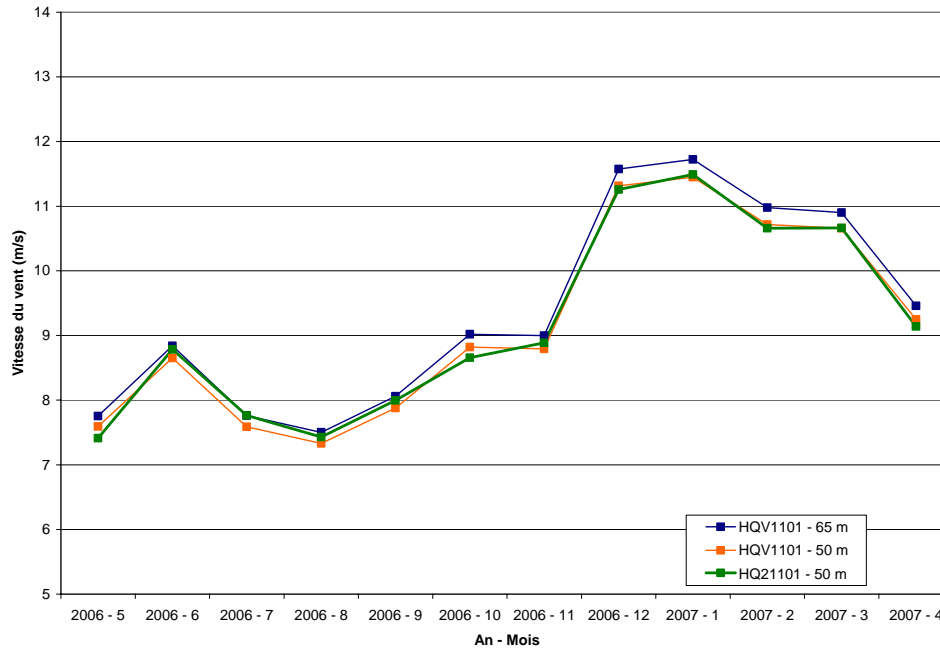


Figure 3-1 Profil mensuel de la vitesse du vent

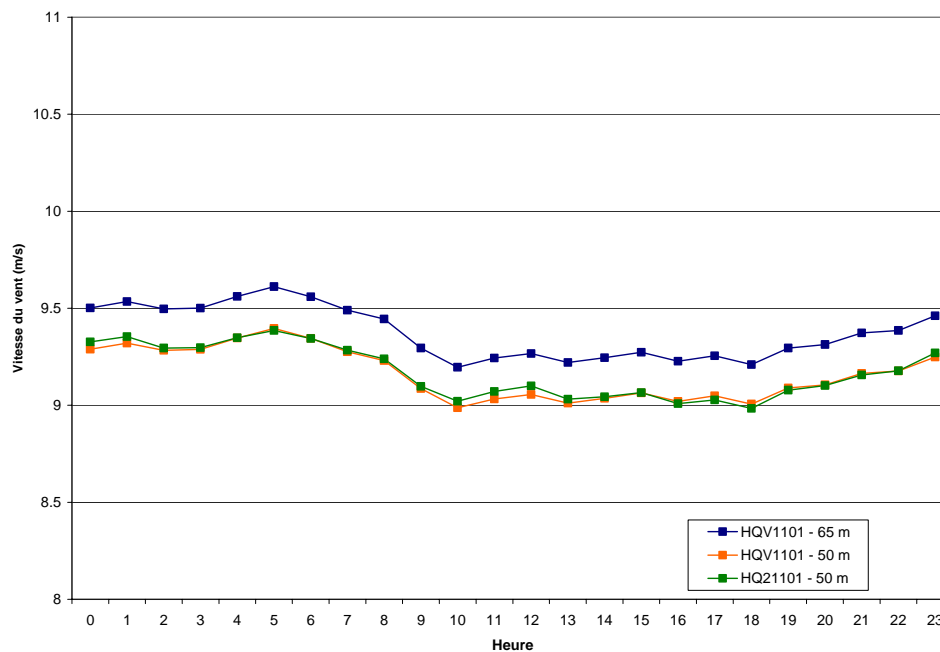


Figure 3-2 Profil horaire de la vitesse du vent



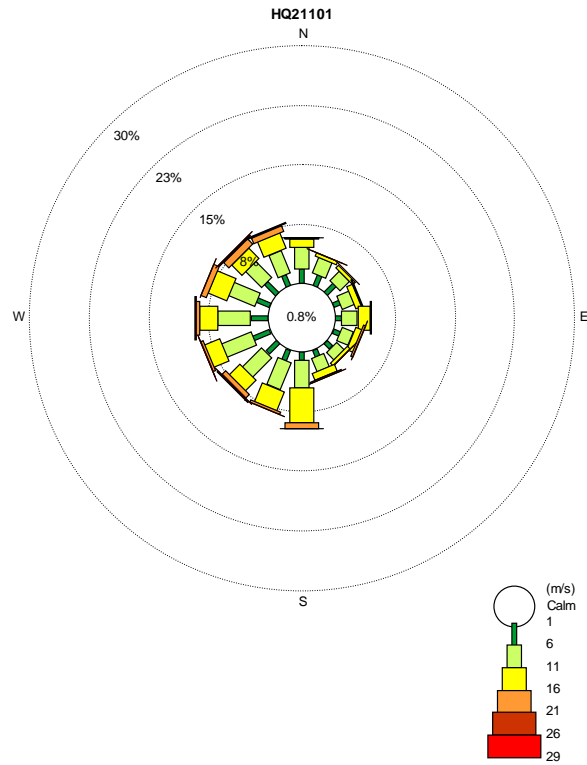


Figure 3-3 Rose de vent HQ21101 – 65 m

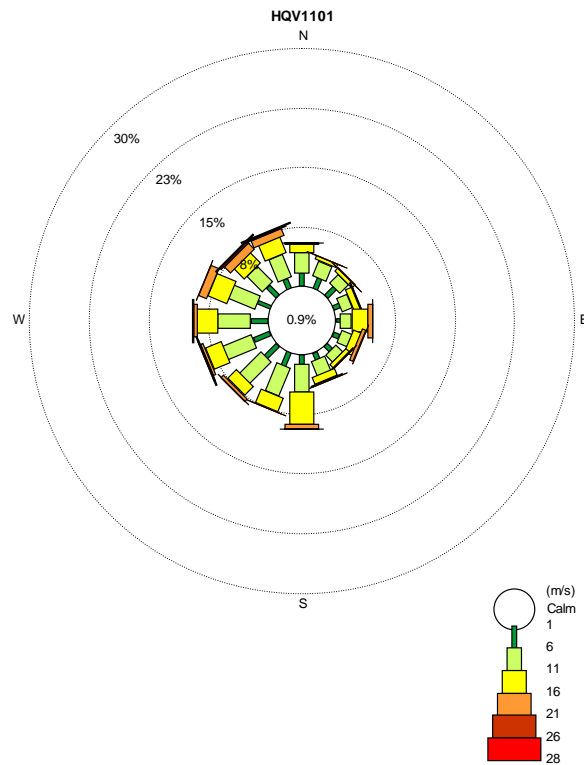


Figure 3-4 Rose de vent HQV1101 – 50 m



Figure 3-5 Profil mensuel de la température

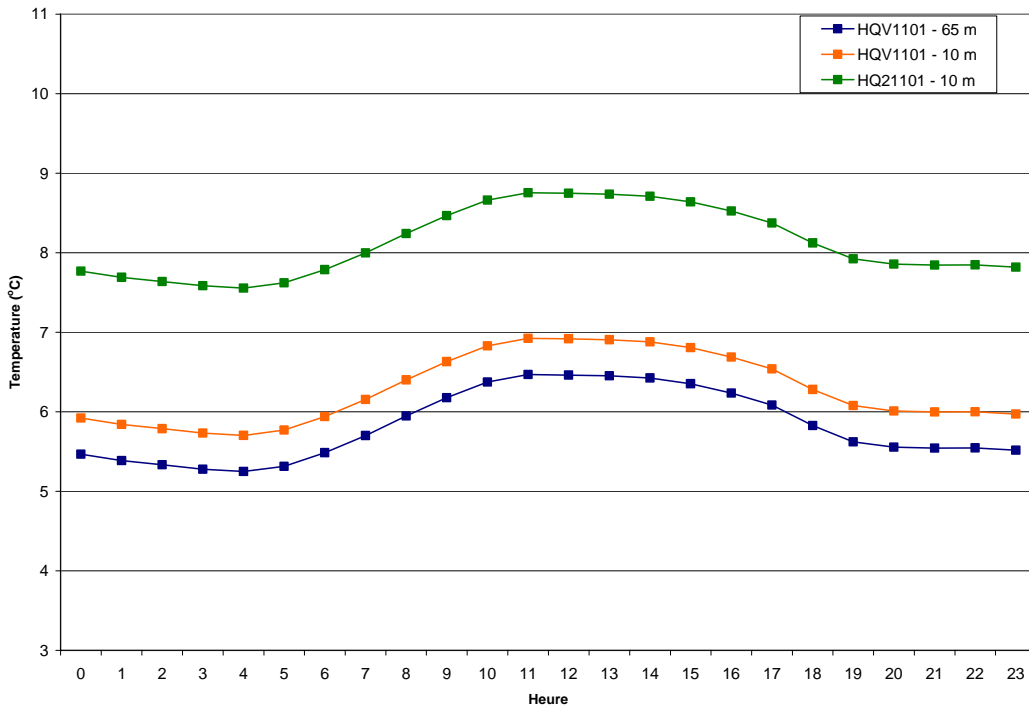


Figure 3-6 Profil horaire de la température

## 4 ESTIMATION DES SÉRIES TEMPORELLES DE PUISSANCE

### 4.1 Configuration du parc

Le Tableau 4-1 présente les caractéristiques des éoliennes sélectionnées pour configurer le parc éolien. Ce choix a été dicté par les propriétés de la ressource éolienne qui qualifie le site comme étant de classe I selon le standard IEC<sup>2</sup>.

Tableau 4-1 : Description de l'éolienne – GE 1.5se

Rotor	
Nombre de pales du rotor	3
Diamètre du rotor (m)	70,5
Surface balayée par le rotor (m <sup>2</sup> )	3904
Vitesse du rotor (tr/min)	11 à 22 (variable)
Données d'exploitation	
Puissance nominale (MW)	1,5
Vitesse de démarrage (m/s)	4
Vitesse de coupure (m/s)	25
Vitesse nominale (m/s)	12
Tour	
Hauteur du moyeu (m)	65

La configuration des éoliennes et du mât virtuel est présentée sur la Figure 1-1. Les éoliennes ont été localisées de façon à respecter les distances de sécurité vis-à-vis de la route principale et de minimiser les effets de sillage turbulent.

### 4.2 Méthodologie de l'estimation des séries temporelles de la production

#### 4.2.1 Estimation de la puissance brute

Le parc virtuel a été modélisé par une table de puissance tenant compte de l'emplacement des éoliennes sur le site de production, des effets de topographie, de rugosité, de sillage turbulent et de variation de la densité de l'air en fonction de la température. Cette modélisation s'appuie sur l'utilisation du logiciel WindFarm (voir Appendix F). La courbe de puissance des éoliennes et la configuration de parc sont fournies en Appendix A et Appendix C.

La table de puissance se présente comme un tableau à trois entrées correspondant à la vitesse et la direction du vent à une hauteur de 80 m au-dessus du sol au niveau du mât virtuel, ainsi qu'à la température ambiante, supposée uniforme sur l'étendue du site de production. Les données météorologiques simulées avec un pas temporel de 10 minutes au niveau du mât virtuel conduisent alors à des estimations de la puissance moyenne brute du parc sur des intervalle de 10 minutes.

Le ré-échantillonnage des séries de production avec un pas temporel de 10 secondes a été effectué en modélisant la relation dynamique non-linéaire des fluctuations de puissance en fonction de celles de la vitesse à cette échelle temporelle et ceci pour différents points de fonctionnement  $V_{10min}$ - $P_{10min}$ . Le modèle, optimisé en utilisant des données observées de parcs opérationnels, a donc permis de porter le pas temporel des séries temporelles de puissance de 10 minutes à 10 secondes.

<sup>2</sup> A confirmer par une étude plus détaillée d'adéquation des éoliennes au site.

En résumé, le modèle employé consiste essentiellement en une fonction de transfert algébrique multi-entrée (vitesse, direction, température) et mono-sortie (puissance) pour le parc virtuel à l'échelle de 10 minutes, assortie d'une fonction de transfert simplifiée pour simuler la dynamique (inertie) à l'échelle de 10 secondes.

#### 4.2.2 Estimation de la puissance nette

La puissance nette  $P_N$  est calculée pour chaque pas temporel à partir de la puissance brute  $P_B$  en considérant les pertes suivantes :

- $P_0$  : Pertes dues au chauffage des éoliennes (kW) ;
- $P_1$  : Pertes électriques (%);
- $P_2$  : Pertes dues aux contaminations des pales (%);
- $P_3$  : Pertes dues à la dégradation des pales (%);
- $P_4$  : Pertes dues au gel et à la glace (%);
- $P_5$  : Pertes dues à la non disponibilité du réseau (%);
- $P_6$  : Pertes dues aux températures extrêmes basses (%);
- $P_7$  : Pertes dues aux températures extrêmes hautes (%);
- $P_8$  : Pertes dues aux pannes (%);
- $P_9$  : Pertes dues aux opérations de maintenance (%);
- $P_{10}$  : Pertes dues aux erreurs d'orientation de la nacelle (%);
- $P_{11}$  : Pertes par hystérésis lors des arrêts haute-vitesse (%).

selon la formule :

$$P_N = P_B \times \eta_1 \times \eta_2 \times \dots \times \eta_{11} - P_0$$

où :

$$\eta_i = 1 - P_i / 100 : \text{ Facteur de conversion brut/net pour les diverses pertes décrites ci-dessus}$$

La méthode de simulation des pertes est décrite en Appendix D.

Il est à noter que les pertes dues à la non-disponibilité du réseau électrique de transport et de distribution d'Hydro-Québec ( $P_5$ ) ont été considérées comme nulles.

#### 4.2.3 Estimation de la puissance P2

A la demande du Client, une puissance P2 intermédiaire entre la puissance brute et la puissance nette a été définie. P2 est analogue à la puissance nette  $P_N$  mais ne tient pas compte des pertes dues aux pannes, à la maintenance et celles dues à l'effet d'hystérésis ( $P_7$ ,  $P_8$  et  $P_{11}$ ). P2 a été définie dans le but d'isoler la part de variabilité de la puissance qui est uniquement due aux variations de la ressource éolienne.

#### 4.2.4 Remarque

Il est à noter que les courbes de puissance des éoliennes sont définies jusqu'à une vitesse maximale dite vitesse de coupure. Dans le cas des éoliennes GE 1.5se, cette vitesse est de 25 m/s (voir Tableau 4-1). Le système de contrôle de l'éolienne est normalement réglé pour arrêter l'éolienne au cas où la vitesse moyenne 10 minutes du vent dépasse cette limite. Au-delà, le constructeur ne fournit pas de valeurs pour la puissance. Dans l'industrie, il est d'usage de considérer que la puissance produite est nulle au-delà de cette vitesse. Aussi, cette convention a-t-elle été appliquée par Hélimax au modèle numérique du parc virtuel. Elle s'applique donc à la puissance brute mais aussi à la puissance nette et à P2.

Le comportement dynamique des GE 1.5se est en fait plus complexe. Le système de contrôle arrête également l'éolienne si la vitesse moyenne 30 secondes dépasse 28 m/s ou si la vitesse moyenne 3 secondes dépasse 30 m/s. Le comportement dynamique des éoliennes aux vitesses élevées et proches de ces seuils, surtout celui à 3 secondes, reste tributaire des réglages fins du système de contrôle. Il est donc très difficile d'effectuer des simulations fiables sans connaître les réglages effectifs et réels du système de contrôle.

## 5 REMARQUES FINALES

### 5.1 Données Météorologiques

En se basant sur son expertise professionnelle et en utilisant les méthodes d'usage dans l'industrie, HéliMAX a effectué une étude approfondie du gisement éolien sur le domaine du projet virtuel de l'Île-du-Hâvre-aux-Maisons. En utilisant les observations météorologiques à l'Île-d'Entrée (mât de mesure) de mai 2006 à avril 2007, des séries temporelles au pas de 10 secondes ont été obtenues grâce à des simulations numériques (CFD) et des méthodologies de ré-échantillonnage appropriées. Ces données ont été ajustées pour refléter l'année de mesure, une année typique, une année extrême haute et une année extrême basse relativement aux observations des 10 dernières années des stations d'Environnement Canada dans la région. Ces résultats sont résumés dans le Tableau 5-1.

**Tableau 5-1: Moyennes annuelles des vitesses de vent**

	Année de mesure	Année Typique	Année Extrême Haute	Année Extrême Basse
Vitesse du mât de mesure à 50 m (m/s)	9,2	9,1	9,6	8,7
Vitesse du mât virtuel à 50 m (m/s)	9,2	9,1	9,6	8,7
Vitesse du mât virtuel à 65 m (m/s)	9,4	9,3	9,8	8,9

Ces données reflètent l'excellent potentiel éolien du site et le qualifient comme étant de classe I selon le standard IEC.

### 5.2 Productible net

Un parc virtuel d'une puissance de 4500 kW a été configuré sur l'Île-du-Hâvre-aux-Maisons avec 3 éoliennes de type GE 1.5se de puissance unitaire 1,5 MW. Les séries temporelles de vitesse, direction et température au mât virtuel ont été utilisées pour générer les séries temporelles de puissance du parc. Le Tableau 5-2 présente les principaux résultats de production et de variabilité de la puissance nette du parc virtuel.

**Tableau 5-2: Facteurs d'utilisation et variabilité de la puissance nette**

	Année de mesure	Année Typique	Année Extrême Haute	Année Extrême Basse
Facteur d'utilisation du parc éolien virtuel (%)	49,0	48,7	51,5	45,9
Variabilité typique ( $\sigma$ ) sur 10 secondes (kW)	75	75	76	73
Variabilité typique ( $\sigma$ ) sur 1 minute (kW)	164	164	166	161
Variabilité typique ( $\sigma$ ) sur 10 minutes (kW)	264	263	278	254
Variabilité typique ( $\sigma$ ) sur 15 minutes (kW)	286	284	297	273
Variabilité typique ( $\sigma$ ) sur 40 minutes (kW)	425	422	438	406
Variabilité typique ( $\sigma$ ) sur 1 heure (kW)	496	495	515	477

Les facteurs d'utilisation sont d'un très bon niveau. Ils ne sont donnés qu'à titre indicatif. Les variations typiques de la puissance nette relativement à la puissance installée varient d'environ 2% sur 10 secondes à environ 11% à l'échelle horaire.

A la demande du Client, des données supplémentaires sur la puissance brute et la puissance intermédiaire P2 (voir section 4.2.3) ainsi que des statistiques de variabilité de puissance ont été transmis sur support électronique. Le lecteur trouvera quelques éléments synthétiques sur ces résultats en Appendix A.

### 5.3 Choix de la configuration et des éoliennes

Des études spécifiques devront confirmer, en temps voulu, l'adéquation des éoliennes aux conditions du site. Par ailleurs, Hélimax préconise l'utilisation d'éoliennes de plus petite puissance nominale mais en plus grand nombre pour le réseau isolé en étude car, en cas de perte de puissance partielle ou totale d'une ou plusieurs éoliennes, la variation relative de la puissance serait plus faible et donc plus facile à maîtriser.

### 5.4 Limites de la méthodologie

Lors de l'utilisation et de l'interprétation des résultats de cette étude, un certain nombre d'hypothèses et de remarques devraient être rappelés.

En premier lieu, les mesures météorologiques sont sujettes à des incertitudes liées

- au ré-échantillonnage des données à l'échelle de 10 secondes,
- à la période de mesure,
- au taux de recouvrement des données disponibles,
- aux instruments de mesure,
- aux ajustement climatologiques,
- au transfert des mesures du mât de mesure au mât virtuel par simulation CFD,
- à la variabilité interannuelle de la ressource éolienne et
- aux éventuels changements climatiques.

Par ailleurs, l'estimation des puissances brute, P2 et nette est tributaire des sources d'incertitudes suivantes :

- modèle de sillage turbulent des éoliennes,
  - modèles des pertes électriques, aérodynamiques et de non disponibilité,
  - courbe de puissance des éoliennes,
  - modèle dynamique simplifié des éoliennes,
  - données SIG de topographie et de rugosité.
- 
- Concernant le modèle simplifié du parc éolien élaboré et utilisé pour cette étude, il est a rappelé qu'il s'agit essentiellement d'une fonction de transfert algébrique multi-entrée (vitesse, direction, température) et mono-sortie (puissance) pour le parc virtuel à l'échelle de 10 minutes, assortie d'une fonction de transfert simplifiée pour simuler la dynamique à l'échelle de 10 secondes. Il diffère donc des modèles dynamiques élaborés pour une seule éolienne qui sont usuellement employés pour les études électriques de réseau. Il est également rappelé que des réglages spécifiques du système de contrôle (SCADA) permettent des modifications fines du comportement dynamique de l'éolienne après installation. Ceci procure, entre autres, une certaine marge d'ajustement du comportement de l'éolienne à son milieu par l'opérateur du parc éolien.

Enfin, les résultats sont obtenus en supposant un réseau de transport électrique stable et « fort ». Une étude plus poussée serait nécessaire si cette hypothèse était remise en cause pour le réseau isolé des Iles-de-la-Madeleine. Une telle étude nécessiterait, entre autres, la description fine de l'ensemble des éléments du réseau électrique interne et externe au parc éolien.

A la lumière des remarques présentées ci-dessus, le Client est appelé à considérer les résultats statistiques issus de cette étude avec précaution. En particulier, les événements très rares, surtout à l'échelle de 10 secondes, devraient être considérés en gardant à l'esprit les facteurs d'incertitudes rappelés ci-dessus. Les simulations n'ont pas fait l'objet d'études de sensibilité. Cependant, en comparant les occurrences des événements très rares pour les 4 cas de figure considérés (années de mesure et typique, et années extrêmes haute et basse), on peut appréhender dans une certaine mesure leur signification statistique.



## APPENDIX A STATISTIQUES DE LA VARIABILITÉ DE LA PUISSANCE NETTE

Les tableaux de cette annexe présentent la variabilité de la production à différentes échelles temporelles et pour les 4 ajustements climatologiques considérés. Sont également fournis des résultats relatifs à la puissance brute  $P_B$ , nette  $P_N$  et intermédiaire  $P_2$  (voir section 4.2).

### I. Définitions

#### Histogrammes

Les histogrammes ont été calculés avec un pas de 100 kW et de façon centrée. Par exemple, la barre correspondant à la valeur 0 représente les occurrences où la variation de la puissance était supérieure à -50 kW et inférieure à 50 kW.

Les fréquences représentent le nombre d'occurrences lorsque la puissance varie de 100 kW en passant de l'instant  $i$  à l'instant  $i+1$ . Selon les cas, le pas temporel  $i$  représente une période de 10 seconde, 1 minute, 10 minutes, 15 minutes, 40 minutes ou 1 heure.

Les histogrammes ont été transmis au Client sur support électronique.

#### Fréquences cumulées et Centiles

Les fréquences cumulées ont été calculées à partir des histogrammes et donc avec un pas de 100 kW. Les fréquences cumulées et les centiles ont été estimées par interpolation linéaire. Des résultats détaillés ont été transmis au Client sur support électronique.

#### Écarts-Types relatifs

Les écarts-types relatifs ont été calculés en divisant les écarts-types en kW par la puissance totale installée de 4500 kW.

## II. Année de mesure

### Variations sur 10s

#### Variations de la Puissance Brute

Nbre de points	3153540
0,1e Centile (kW)	-350
1e Centile (kW)	-180
10e Centile (kW)	-57
90e Centile (kW)	56
99e Centile (kW)	183
99,1e Centile (kW)	358
Min (kW)	-1340
Max (kW)	1367
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	2707
Ecart-Type (kW)	61
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	1.3

#### Variations de la Puissance Nette

Nbre de points	3153540
0,1e Centile (kW)	-447
1e Centile (kW)	-196
10e Centile (kW)	-63
90e Centile (kW)	63
99e Centile (kW)	202
99,1e Centile (kW)	470
Min (kW)	-4415
Max (kW)	4338
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	8753
Ecart-Type (kW)	75
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	1.7

#### Variations de la Puissance P2

Nbre de points	3153540
0,1e Centile (kW)	-457
1e Centile (kW)	-202
10e Centile (kW)	-66
90e Centile (kW)	65
99e Centile (kW)	208
99,1e Centile (kW)	480
Min (kW)	-4415
Max (kW)	2893
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7308
Ecart-Type (kW)	76
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	1.7

Variations sur 60s

Variations de la Puissance Brute

Nbre de points	525590
0,1e Centile (kW)	-834
1e Centile (kW)	-457
10e Centile (kW)	-158
90e Centile (kW)	156
99e Centile (kW)	456
99,1e Centile (kW)	848
Min (kW)	-2344
Max (kW)	2381
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	4725
Ecart-Type (kW)	155
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	3.4

Variations de la Puissance Nette

Nbre de points	525590
0,1e Centile (kW)	-924
1e Centile (kW)	-452
10e Centile (kW)	-156
90e Centile (kW)	156
99e Centile (kW)	452
99,1e Centile (kW)	939
Min (kW)	-4321
Max (kW)	4313
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	8634
Ecart-Type (kW)	164
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	3.6

Variations de la Puissance P2

Nbre de points	525590
0,1e Centile (kW)	-947
1e Centile (kW)	-468
10e Centile (kW)	-163
90e Centile (kW)	163
99e Centile (kW)	467
99,1e Centile (kW)	958
Min (kW)	-3545
Max (kW)	3108
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	6653
Ecart-Type (kW)	167
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	3.7

Variations sur 600s

Variations de la Puissance Brute

Nbre de points	52559
0,1e Centile (kW)	-1750
1e Centile (kW)	-827
10e Centile (kW)	-254
90e Centile (kW)	247
99e Centile (kW)	869
99,1e Centile (kW)	1855
Min (kW)	-3807
Max (kW)	3874
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7680
Ecart-Type (kW)	280
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	6.2

Variations de la Puissance Nette

Nbre de points	52559
0,1e Centile (kW)	-1633
1e Centile (kW)	-773
10e Centile (kW)	-237
90e Centile (kW)	232
99e Centile (kW)	808
99,1e Centile (kW)	1744
Min (kW)	-4087
Max (kW)	4260
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	8347
Ecart-Type (kW)	264
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	5.9

Variations de la Puissance P2

Nbre de points	52559
0,1e Centile (kW)	-1730
1e Centile (kW)	-798
10e Centile (kW)	-248
90e Centile (kW)	242
99e Centile (kW)	830
99,1e Centile (kW)	1764
Min (kW)	-3596
Max (kW)	3431
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7028
Ecart-Type (kW)	271
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	6.0

Variations sur 900s

Variations de la Puissance Brute

Nbre de points	35038
0,1e Centile (kW)	-1726
1e Centile (kW)	-887
10e Centile (kW)	-281
90e Centile (kW)	279
99e Centile (kW)	935
99,1e Centile (kW)	1834
Min (kW)	-3062
Max (kW)	4101
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7163
Ecart-Type (kW)	297
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	6.6

Variations de la Puissance Nette

Nbre de points	35038
0,1e Centile (kW)	-1619
1e Centile (kW)	-844
10e Centile (kW)	-261
90e Centile (kW)	258
99e Centile (kW)	877
99,1e Centile (kW)	1843
Min (kW)	-3671
Max (kW)	4277
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7949
Ecart-Type (kW)	286
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	6.3

Variations de la Puissance P2

Nbre de points	35038
0,1e Centile (kW)	-1623
1e Centile (kW)	-854
10e Centile (kW)	-271
90e Centile (kW)	269
99e Centile (kW)	903
99,1e Centile (kW)	1808
Min (kW)	-2906
Max (kW)	3537
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	6443
Ecart-Type (kW)	286
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	6.4

Variations sur 2400s

**Variations de la Puissance Brute**

Nbre de points	13138
0,1e Centile (kW)	-2464
1e Centile (kW)	-1308
10e Centile (kW)	-430
90e Centile (kW)	439
99e Centile (kW)	1395
99,1e Centile (kW)	2503
Min (kW)	-3867
Max (kW)	4344
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	8211
Ecart-Type (kW)	443
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	9.8

**Variations de la Puissance Nette**

Nbre de points	13138
0,1e Centile (kW)	-2568
1e Centile (kW)	-1248
10e Centile (kW)	-403
90e Centile (kW)	402
99e Centile (kW)	1322
99,1e Centile (kW)	2620
Min (kW)	-4089
Max (kW)	4023
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	8112
Ecart-Type (kW)	425
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	9.5

**Variations de la Puissance P2**

Nbre de points	13138
0,1e Centile (kW)	-2345
1e Centile (kW)	-1257
10e Centile (kW)	-415
90e Centile (kW)	421
99e Centile (kW)	1323
99,1e Centile (kW)	2385
Min (kW)	-3664
Max (kW)	4023
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7687
Ecart-Type (kW)	424
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	9.4

Variations sur 3600s

Variations de la Puissance Brute

Nbre de points	8758
0,1e Centile (kW)	-2637
1e Centile (kW)	-1523
10e Centile (kW)	-532
90e Centile (kW)	536
99e Centile (kW)	1600
99,1e Centile (kW)	2768
Min (kW)	-3434
Max (kW)	4396
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7830
Ecart-Type (kW)	520
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	11.6

Variations de la Puissance Nette

Nbre de points	8758
0,1e Centile (kW)	-2760
1e Centile (kW)	-1459
10e Centile (kW)	-491
90e Centile (kW)	506
99e Centile (kW)	1534
99,1e Centile (kW)	2714
Min (kW)	-3821
Max (kW)	4122
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7943
Ecart-Type (kW)	496
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	11.0

Variations de la Puissance P2

Nbre de points	8758
0,1e Centile (kW)	-2557
1e Centile (kW)	-1459
10e Centile (kW)	-506
90e Centile (kW)	518
99e Centile (kW)	1533
99,1e Centile (kW)	2477
Min (kW)	-3385
Max (kW)	4122
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7507
Ecart-Type (kW)	497
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	11.0

### III. Année typique

Variations sur 10s

#### Variations de la Puissance Brute

Nbre de points	3153540
0,1e Centile (kW)	-350
1e Centile (kW)	-180
10e Centile (kW)	-57
90e Centile (kW)	56
99e Centile (kW)	183
99,1e Centile (kW)	358
Min (kW)	-1320
Max (kW)	1362
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	2682
Ecart-Type (kW)	61
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	1.3

#### Variations de la Puissance Nette

Nbre de points	3153540
0,1e Centile (kW)	-445
1e Centile (kW)	-195
10e Centile (kW)	-63
90e Centile (kW)	63
99e Centile (kW)	202
99,1e Centile (kW)	469
Min (kW)	-4415
Max (kW)	4339
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	8754
Ecart-Type (kW)	75
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	1.7

#### Variations de la Puissance P2

Nbre de points	3153540
0,1e Centile (kW)	-456
1e Centile (kW)	-202
10e Centile (kW)	-66
90e Centile (kW)	65
99e Centile (kW)	208
99,1e Centile (kW)	478
Min (kW)	-4415
Max (kW)	2893
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7308
Ecart-Type (kW)	76
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	1.7



## Variations sur 60s

### Variations de la Puissance Brute

Nbre de points	525590
0,1e Centile (kW)	-834
1e Centile (kW)	-458
10e Centile (kW)	-158
90e Centile (kW)	157
99e Centile (kW)	456
99,1e Centile (kW)	844
Min (kW)	-2325
Max (kW)	2388
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	4713
Ecart-Type (kW)	155
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	3.4

### Variations de la Puissance Nette

Nbre de points	525590
0,1e Centile (kW)	-922
1e Centile (kW)	-452
10e Centile (kW)	-157
90e Centile (kW)	156
99e Centile (kW)	452
99,1e Centile (kW)	936
Min (kW)	-4322
Max (kW)	4314
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	8635
Ecart-Type (kW)	164
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	3.6

### Variations de la Puissance P2

Nbre de points	525590
0,1e Centile (kW)	-942
1e Centile (kW)	-467
10e Centile (kW)	-163
90e Centile (kW)	163
99e Centile (kW)	467
99,1e Centile (kW)	955
Min (kW)	-3545
Max (kW)	3108
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	6653
Ecart-Type (kW)	167
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	3.7

Variations sur 600s

Variations de la Puissance Brute

Nbre de points	52559
0,1e Centile (kW)	-1718
1e Centile (kW)	-822
10e Centile (kW)	-254
90e Centile (kW)	247
99e Centile (kW)	865
99,1e Centile (kW)	1827
Min (kW)	-3749
Max (kW)	3875
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7624
Ecart-Type (kW)	278
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	6.2

Variations de la Puissance Nette

Nbre de points	52559
0,1e Centile (kW)	-1595
1e Centile (kW)	-775
10e Centile (kW)	-237
90e Centile (kW)	232
99e Centile (kW)	808
99,1e Centile (kW)	1740
Min (kW)	-3730
Max (kW)	4288
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	8018
Ecart-Type (kW)	263
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	5.8

Variations de la Puissance P2

Nbre de points	52559
0,1e Centile (kW)	-1656
1e Centile (kW)	-793
10e Centile (kW)	-247
90e Centile (kW)	241
99e Centile (kW)	828
99,1e Centile (kW)	1723
Min (kW)	-3541
Max (kW)	3377
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	6918
Ecart-Type (kW)	269
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	6.0

Variations sur 900s

Variations de la Puissance Brute

Nbre de points	35038
0,1e Centile (kW)	-1702
1e Centile (kW)	-878
10e Centile (kW)	-282
90e Centile (kW)	278
99e Centile (kW)	933
99,1e Centile (kW)	1821
Min (kW)	-2766
Max (kW)	4102
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	6868
Ecart-Type (kW)	296
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	6.6

Variations de la Puissance Nette

Nbre de points	35038
0,1e Centile (kW)	-1610
1e Centile (kW)	-838
10e Centile (kW)	-261
90e Centile (kW)	257
99e Centile (kW)	881
99,1e Centile (kW)	1819
Min (kW)	-3671
Max (kW)	4290
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7961
Ecart-Type (kW)	284
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	6.3

Variations de la Puissance P2

Nbre de points	35038
0,1e Centile (kW)	-1611
1e Centile (kW)	-848
10e Centile (kW)	-272
90e Centile (kW)	268
99e Centile (kW)	898
99,1e Centile (kW)	1803
Min (kW)	-2627
Max (kW)	3538
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	6165
Ecart-Type (kW)	285
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	6.3

Variations sur 2400s

**Variations de la Puissance Brute**

Nbre de points	13138
0,1e Centile (kW)	-2446
1e Centile (kW)	-1306
10e Centile (kW)	-431
90e Centile (kW)	437
99e Centile (kW)	1392
99,1e Centile (kW)	2487
Min (kW)	-3966
Max (kW)	4345
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	8310
Ecart-Type (kW)	442
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	9.8

**Variations de la Puissance Nette**

Nbre de points	13138
0,1e Centile (kW)	-2532
1e Centile (kW)	-1243
10e Centile (kW)	-402
90e Centile (kW)	401
99e Centile (kW)	1322
99,1e Centile (kW)	2426
Min (kW)	-3690
Max (kW)	4024
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7713
Ecart-Type (kW)	422
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	9.4

**Variations de la Puissance P2**

Nbre de points	13138
0,1e Centile (kW)	-2330
1e Centile (kW)	-1253
10e Centile (kW)	-414
90e Centile (kW)	418
99e Centile (kW)	1328
99,1e Centile (kW)	2362
Min (kW)	-3758
Max (kW)	4024
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7781
Ecart-Type (kW)	423
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	9.4

Variations sur 3600s

**Variations de la Puissance Brute**

Nbre de points	8758
0,1e Centile (kW)	-2629
1e Centile (kW)	-1533
10e Centile (kW)	-528
90e Centile (kW)	537
99e Centile (kW)	1607
99,1e Centile (kW)	2755
Min (kW)	-3441
Max (kW)	4396
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7837
Ecart-Type (kW)	519
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	11.5

**Variations de la Puissance Nette**

Nbre de points	8758
0,1e Centile (kW)	-2743
1e Centile (kW)	-1470
10e Centile (kW)	-489
90e Centile (kW)	502
99e Centile (kW)	1552
99,1e Centile (kW)	2601
Min (kW)	-3801
Max (kW)	4123
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7924
Ecart-Type (kW)	495
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	11.0

**Variations de la Puissance P2**

Nbre de points	8758
0,1e Centile (kW)	-2555
1e Centile (kW)	-1470
10e Centile (kW)	-504
90e Centile (kW)	515
99e Centile (kW)	1530
99,1e Centile (kW)	2462
Min (kW)	-3391
Max (kW)	4123
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7514
Ecart-Type (kW)	496
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	11.0

#### IV. Année extrême haute

Variations sur 10s

##### Variations de la Puissance Brute

Nbre de points	3153540
0,1e Centile (kW)	-354
1e Centile (kW)	-180
10e Centile (kW)	-56
90e Centile (kW)	55
99e Centile (kW)	183
99,1e Centile (kW)	363
Min (kW)	-1506
Max (kW)	1516
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	3023
Ecart-Type (kW)	61
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	1.3

##### Variations de la Puissance Nette

Nbre de points	3153540
0,1e Centile (kW)	-458
1e Centile (kW)	-197
10e Centile (kW)	-63
90e Centile (kW)	62
99e Centile (kW)	204
99,1e Centile (kW)	481
Min (kW)	-4411
Max (kW)	4379
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	8791
Ecart-Type (kW)	76
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	1.7

##### Variations de la Puissance P2

Nbre de points	3153540
0,1e Centile (kW)	-471
1e Centile (kW)	-204
10e Centile (kW)	-66
90e Centile (kW)	65
99e Centile (kW)	211
99,1e Centile (kW)	493
Min (kW)	-4411
Max (kW)	2893
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7304
Ecart-Type (kW)	77
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	1.7

Variations sur 60s

Variations de la Puissance Brute

Nbre de points	525590
0,1e Centile (kW)	-845
1e Centile (kW)	-459
10e Centile (kW)	-154
90e Centile (kW)	153
99e Centile (kW)	458
99,1e Centile (kW)	855
Min (kW)	-2499
Max (kW)	2337
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	4836
Ecart-Type (kW)	155
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	3.4

Variations de la Puissance Nette

Nbre de points	525590
0,1e Centile (kW)	-957
1e Centile (kW)	-457
10e Centile (kW)	-155
90e Centile (kW)	155
99e Centile (kW)	456
99,1e Centile (kW)	961
Min (kW)	-4319
Max (kW)	4312
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	8631
Ecart-Type (kW)	166
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	3.7

Variations de la Puissance P2

Nbre de points	525590
0,1e Centile (kW)	-972
1e Centile (kW)	-473
10e Centile (kW)	-162
90e Centile (kW)	162
99e Centile (kW)	471
99,1e Centile (kW)	987
Min (kW)	-3547
Max (kW)	3108
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	6655
Ecart-Type (kW)	168
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	3.7

Variations sur 600s

**Variations de la Puissance Brute**

<b>Nbre de points</b>	<b>52559</b>
<b>0,1e Centile (kW)</b>	-1884
<b>1e Centile (kW)</b>	-861
<b>10e Centile (kW)</b>	-257
<b>90e Centile (kW)</b>	251
<b>99e Centile (kW)</b>	894
<b>99,1e Centile (kW)</b>	1971
<b>Min (kW)</b>	-4279
<b>Max (kW)</b>	4152
<b>Moyenne (kW)</b>	0
<b>Gamme (kW)</b>	8431
<b>Ecart-Type (kW)</b>	292
<b>Puissance installée (kW)</b>	4500
<b>Ecart-Type Relatif (%)</b>	6.5

**Variations de la Puissance Nette**

<b>Nbre de points</b>	<b>52559</b>
<b>0,1e Centile (kW)</b>	-1850
<b>1e Centile (kW)</b>	-796
<b>10e Centile (kW)</b>	-239
<b>90e Centile (kW)</b>	236
<b>99e Centile (kW)</b>	829
<b>99,1e Centile (kW)</b>	1994
<b>Min (kW)</b>	-4276
<b>Max (kW)</b>	4299
<b>Moyenne (kW)</b>	0
<b>Gamme (kW)</b>	8575
<b>Ecart-Type (kW)</b>	278
<b>Puissance installée (kW)</b>	4500
<b>Ecart-Type Relatif (%)</b>	6.2

**Variations de la Puissance P2**

<b>Nbre de points</b>	<b>52559</b>
<b>0,1e Centile (kW)</b>	-1769
<b>1e Centile (kW)</b>	-824
<b>10e Centile (kW)</b>	-251
<b>90e Centile (kW)</b>	245
<b>99e Centile (kW)</b>	853
<b>99,1e Centile (kW)</b>	1872
<b>Min (kW)</b>	-4018
<b>Max (kW)</b>	3935
<b>Moyenne (kW)</b>	0
<b>Gamme (kW)</b>	7953
<b>Ecart-Type (kW)</b>	282
<b>Puissance installée (kW)</b>	4500
<b>Ecart-Type Relatif (%)</b>	6.3



Variations sur 900s

Variations de la Puissance Brute

Nbre de points	35038
0,1e Centile (kW)	-1777
1e Centile (kW)	-927
10e Centile (kW)	-284
90e Centile (kW)	280
99e Centile (kW)	957
99,1e Centile (kW)	1946
Min (kW)	-3243
Max (kW)	4268
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7511
Ecart-Type (kW)	306
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	6.8

Variations de la Puissance Nette

Nbre de points	35038
0,1e Centile (kW)	-1811
1e Centile (kW)	-871
10e Centile (kW)	-262
90e Centile (kW)	261
99e Centile (kW)	915
99,1e Centile (kW)	1927
Min (kW)	-4144
Max (kW)	4268
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	8412
Ecart-Type (kW)	297
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	6.6

Variations de la Puissance P2

Nbre de points	35038
0,1e Centile (kW)	-1680
1e Centile (kW)	-889
10e Centile (kW)	-276
90e Centile (kW)	272
99e Centile (kW)	923
99,1e Centile (kW)	1891
Min (kW)	-3090
Max (kW)	4033
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7123
Ecart-Type (kW)	296
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	6.6

Variations sur 2400s

**Variations de la Puissance Brute**

Nbre de points	13138
0,1e Centile (kW)	-2598
1e Centile (kW)	-1360
10e Centile (kW)	-439
90e Centile (kW)	449
99e Centile (kW)	1420
99,1e Centile (kW)	2599
Min (kW)	-3526
Max (kW)	4337
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7863
Ecart-Type (kW)	456
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	10.1

**Variations de la Puissance Nette**

Nbre de points	13138
0,1e Centile (kW)	-2610
1e Centile (kW)	-1301
10e Centile (kW)	-409
90e Centile (kW)	411
99e Centile (kW)	1385
99,1e Centile (kW)	2642
Min (kW)	-4176
Max (kW)	4013
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	8190
Ecart-Type (kW)	438
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	9.7

**Variations de la Puissance P2**

Nbre de points	13138
0,1e Centile (kW)	-2522
1e Centile (kW)	-1302
10e Centile (kW)	-418
90e Centile (kW)	429
99e Centile (kW)	1350
99,1e Centile (kW)	2506
Min (kW)	-3359
Max (kW)	4013
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7372
Ecart-Type (kW)	437
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	9.7

Variations sur 3600s

**Variations de la Puissance Brute**

Nbre de points	8758
0,1e Centile (kW)	-2909
1e Centile (kW)	-1588
10e Centile (kW)	-544
90e Centile (kW)	560
99e Centile (kW)	1653
99,1e Centile (kW)	2892
Min (kW)	-3825
Max (kW)	4391
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	8216
Ecart-Type (kW)	537
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	11.9

**Variations de la Puissance Nette**

Nbre de points	8758
0,1e Centile (kW)	-2953
1e Centile (kW)	-1533
10e Centile (kW)	-508
90e Centile (kW)	525
99e Centile (kW)	1575
99,1e Centile (kW)	2848
Min (kW)	-4211
Max (kW)	4116
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	8327
Ecart-Type (kW)	515
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	11.4

**Variations de la Puissance P2**

Nbre de points	8758
0,1e Centile (kW)	-2761
1e Centile (kW)	-1517
10e Centile (kW)	-518
90e Centile (kW)	539
99e Centile (kW)	1568
99,1e Centile (kW)	2746
Min (kW)	-3592
Max (kW)	4116
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7708
Ecart-Type (kW)	513
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	11.4

## V. Année extrême basse

Variations sur 10s

### Variations de la Puissance Brute

Nbre de points	3153540
0,1e Centile (kW)	-347
1e Centile (kW)	-180
10e Centile (kW)	-59
90e Centile (kW)	58
99e Centile (kW)	183
99,1e Centile (kW)	354
Min (kW)	-1253
Max (kW)	1375
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	2628
Ecart-Type (kW)	61
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	1.4

### Variations de la Puissance Nette

Nbre de points	3153540
0,1e Centile (kW)	-431
1e Centile (kW)	-193
10e Centile (kW)	-63
90e Centile (kW)	63
99e Centile (kW)	199
99,1e Centile (kW)	455
Min (kW)	-4418
Max (kW)	4341
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	8760
Ecart-Type (kW)	73
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	1.6

### Variations de la Puissance P2

Nbre de points	3153540
0,1e Centile (kW)	-439
1e Centile (kW)	-199
10e Centile (kW)	-66
90e Centile (kW)	65
99e Centile (kW)	206
99,1e Centile (kW)	462
Min (kW)	-4418
Max (kW)	2893
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7311
Ecart-Type (kW)	74
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	1.7

Variations sur 60s

Variations de la Puissance Brute

Nbre de points	525590
0,1e Centile (kW)	-820
1e Centile (kW)	-456
10e Centile (kW)	-160
90e Centile (kW)	159
99e Centile (kW)	456
99,1e Centile (kW)	836
Min (kW)	-2117
Max (kW)	2420
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	4537
Ecart-Type (kW)	155
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	3.4

Variations de la Puissance Nette

Nbre de points	525590
0,1e Centile (kW)	-894
1e Centile (kW)	-449
10e Centile (kW)	-158
90e Centile (kW)	157
99e Centile (kW)	448
99,1e Centile (kW)	918
Min (kW)	-3621
Max (kW)	4302
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7922
Ecart-Type (kW)	161
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	3.6

Variations de la Puissance P2

Nbre de points	525590
0,1e Centile (kW)	-915
1e Centile (kW)	-463
10e Centile (kW)	-165
90e Centile (kW)	164
99e Centile (kW)	462
99,1e Centile (kW)	938
Min (kW)	-3544
Max (kW)	3108
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	6652
Ecart-Type (kW)	165
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	3.7

Variations sur 600s

Variations de la Puissance Brute

Nbre de points	52559
0,1e Centile (kW)	-1590
1e Centile (kW)	-802
10e Centile (kW)	-251
90e Centile (kW)	246
99e Centile (kW)	835
99,1e Centile (kW)	1757
Min (kW)	-3236
Max (kW)	3882
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7118
Ecart-Type (kW)	270
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	6.0

Variations de la Puissance Nette

Nbre de points	52559
0,1e Centile (kW)	-1437
1e Centile (kW)	-750
10e Centile (kW)	-233
90e Centile (kW)	229
99e Centile (kW)	775
99,1e Centile (kW)	1652
Min (kW)	-4031
Max (kW)	4275
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	8306
Ecart-Type (kW)	254
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	5.6

Variations de la Puissance P2

Nbre de points	52559
0,1e Centile (kW)	-1511
1e Centile (kW)	-772
10e Centile (kW)	-245
90e Centile (kW)	240
99e Centile (kW)	796
99,1e Centile (kW)	1723
Min (kW)	-3021
Max (kW)	3696
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	6717
Ecart-Type (kW)	261
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	5.8

Variations sur 900s

**Variations de la Puissance Brute**

Nbre de points	35038
0,1e Centile (kW)	-1653
1e Centile (kW)	-859
10e Centile (kW)	-278
90e Centile (kW)	276
99e Centile (kW)	909
99,1e Centile (kW)	1777
Min (kW)	-3046
Max (kW)	4062
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7108
Ecart-Type (kW)	289
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	6.4

**Variations de la Puissance Nette**

Nbre de points	35038
0,1e Centile (kW)	-1557
1e Centile (kW)	-799
10e Centile (kW)	-256
90e Centile (kW)	255
99e Centile (kW)	854
99,1e Centile (kW)	1684
Min (kW)	-3150
Max (kW)	4260
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7410
Ecart-Type (kW)	273
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	6.1

**Variations de la Puissance P2**

Nbre de points	35038
0,1e Centile (kW)	-1596
1e Centile (kW)	-824
10e Centile (kW)	-268
90e Centile (kW)	266
99e Centile (kW)	865
99,1e Centile (kW)	1768
Min (kW)	-2868
Max (kW)	3515
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	6383
Ecart-Type (kW)	278
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	6.2

Variations sur 2400s

**Variations de la Puissance Brute**

Nbre de points	13138
0,1e Centile (kW)	-2378
1e Centile (kW)	-1264
10e Centile (kW)	-426
90e Centile (kW)	428
99e Centile (kW)	1353
99,1e Centile (kW)	2310
Min (kW)	-4143
Max (kW)	4331
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	8475
Ecart-Type (kW)	432
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	9.6

**Variations de la Puissance Nette**

Nbre de points	13138
0,1e Centile (kW)	-2332
1e Centile (kW)	-1205
10e Centile (kW)	-389
90e Centile (kW)	388
99e Centile (kW)	1281
99,1e Centile (kW)	2242
Min (kW)	-4031
Max (kW)	4017
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	8048
Ecart-Type (kW)	406
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	9.0

**Variations de la Puissance P2**

Nbre de points	13138
0,1e Centile (kW)	-2332
1e Centile (kW)	-1227
10e Centile (kW)	-408
90e Centile (kW)	408
99e Centile (kW)	1298
99,1e Centile (kW)	2223
Min (kW)	-3925
Max (kW)	4017
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7942
Ecart-Type (kW)	414
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	9.2



Variations sur 3600s

Variations de la Puissance Brute

Nbre de points	8758
0,1e Centile (kW)	-2523
1e Centile (kW)	-1490
10e Centile (kW)	-519
90e Centile (kW)	516
99e Centile (kW)	1531
99,1e Centile (kW)	2606
Min (kW)	-3493
Max (kW)	4387
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7880
Ecart-Type (kW)	507
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	11.3

Variations de la Puissance Nette

Nbre de points	8758
0,1e Centile (kW)	-2500
1e Centile (kW)	-1401
10e Centile (kW)	-478
90e Centile (kW)	478
99e Centile (kW)	1458
99,1e Centile (kW)	2407
Min (kW)	-3434
Max (kW)	4270
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7704
Ecart-Type (kW)	477
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	10.6

Variations de la Puissance P2

Nbre de points	8758
0,1e Centile (kW)	-2465
1e Centile (kW)	-1419
10e Centile (kW)	-499
90e Centile (kW)	494
99e Centile (kW)	1463
99,1e Centile (kW)	2404
Min (kW)	-3434
Max (kW)	4118
Moyenne (kW)	0
Gamme (kW)	7552
Ecart-Type (kW)	485
Puissance installée (kW)	4500
Ecart-Type Relatif (%)	10.8

Tableau 5-1 : Courbe de puissance

Vitesse du vent (m/s)	Puissance (kW)
	GE 1.5se <sup>3</sup>
3,5	0
4,0	36
4,5	66
5,0	104
5,5	150
6,0	205
6,5	269
7,0	344
7,5	428
8,0	528
8,5	644
9,0	774
9,5	927
10,0	1079
10,5	1211
11,0	1342
11,5	1401
12,0	1460
12,5	1477
13,0	1494
13,5 à 25,0	1500
Au-delà de 25	0

<sup>3</sup> Le tableau est fourni par le fabricant pour une densité de l'air de 1,225 kg/m<sup>3</sup>.

**Tableau 5-2 : Courbes de traînée**

Vitesse du vent (m/s)	Coefficient de traînée
	GE 1.5se <sup>4</sup>
3	1,27
4	1,03
5	0,91
6	0,89
7	0,89
8	0,87
9	0,80
10	0,69
11	0,55
12	0,42
13	0,32
14	0,25
15	0,20
16	0,17
17	0,14
18	0,12
19	0,10
20	0,09
21	0,07
22	0,07
23	0,06
24	0,05
25	0,05

<sup>4</sup> Valeurs assumées tirées de la fiche technique commerciale de la GE 1.5se.

## APPENDIX C CONFIGURATION DU PARC ÉOLIEN

Le tableau ci-dessous présente les coordonnées ainsi que l'altitude de chaque éolienne. Les coordonnées des éoliennes sont présentées en UTM Zone 20, Nad83.

**Tableau 5-3 : Coordonnées des éoliennes dans la configuration du parc éolien<sup>5</sup>**

# Éolienne	Est	Nord	Altitude (m au-dessus du niveau de mer)
1	595351	5259059	~ 0
2	594690	5258155	~ 0
3	594206	5257193	~ 0

<sup>5</sup> Référence: document interne Hélimax : L01-583-ILM(HQV1101)-20080905-AK00.WLX

## APPENDIX D MÉTHODOLOGIE UTILISÉE POUR L'ESTIMATION DES PERTES

Cette section fournit des éléments explicatifs détaillant la méthodologie utilisée pour l'estimation des pertes.

### Pertes dues au chauffage des éoliennes

Ces pertes correspondent à l'énergie consommée par les différents systèmes auxiliaires de chauffage de l'éolienne. Cette énergie est calculée à partir des caractéristiques de la consommation des systèmes chauffés fournies par le manufacturier de l'éolienne et des conditions météorologiques du site à l'étude (température, vitesse du vent, etc.). Ces pertes sont calculées en kW pour chaque éolienne en fonction de la vitesse du vent et de la température du site. Les calculs sont basés sur un tableau à double entrée vitesse-température fourni par GE. Les pertes dues au chauffage n'interviennent que lorsque la température descend en deçà de  $-10^{\circ}\text{C}$ .

Contrairement à tous les autres types de pertes, les pertes de chauffage sont calculées de façon absolue et ne sont pas exprimées en pourcentage de la production. Par conséquent, il est possible, dans des cas extrêmes de faibles vitesses et de basses températures, que la production nette du parc éolien soit négative.

### Pertes électriques

Les pertes électriques globales sont supposées être constantes et égales à 2,50% de la production instantanée. Cette valeur est basée sur celles généralement observées en pratique.

### Pertes dues à la contamination des profils aérodynamiques

Ces pertes sont causées par l'accumulation de poussières ou de résidus d'insectes sur la surface des pales. Les pertes par contamination sont supposées évoluer en fonction du temps selon l'équation suivante :

$$P_2(t) = 1,0 \times (1 - e^{-t/T_C})$$

Avec :

- $P_2$  : Perte relative en pourcentage.
- $t$  : Temps (en années) écoulé depuis le dernier nettoyage. En général, le nettoyage des turbines a lieu pendant l'été avec une périodicité choisie par l'opérateur.
- $T_C$  : Constante de temps supposée être de l'ordre de 6 mois.

Lors des nettoyages périodiques les pertes par contamination sont ramenées à zéro.

### Pertes dues à la dégradation des profils aérodynamiques

Les pertes énergétiques associées à cette rubrique sont causées par la dégradation de l'état de surface des pales avec l'âge. Ces pertes sont supposées évoluer en fonction du temps selon l'équation suivante:

$$P_3(t) = 1,0 \times (1 - e^{-t/T_D})$$

Avec :

- $P_3$  : Perte relative en pourcentage.
- $t$  : Temps écoulé depuis la mise en service d'un parc exprimé en années.
- $T_D$  : Constitue la constante de temps. Cette constante a été choisie de façon à refléter une dégradation typique pour le cycle de vie du parc.

### Pertes liées aux périodes de gel et à la glace (icing)

Les périodes de gel sont déterminées par tirages aléatoires de journées entières durant les mois de décembre, janvier, février et mars de chaque année et en accord avec les conditions propices à l'apparition de gel.

Le nombre d'occurrences est ajusté en fonction du nombre de journées de gel observé sur site à partir des mâts de mesure et des informations disponibles aux stations environnantes d'Environnement Canada. La valeur moyenne annuelle retenue pour le site en étude est de 2,5 jours.

Durant les périodes de gel, on considère une perte totale pour une partie des éoliennes et une dégradation des performances des éoliennes restantes.

## Perte dues à la non-disponibilité du réseau

- Ces pertes énergétiques sont causées par la non disponibilité du réseau électrique, soit pour de l'entretien, des réparations ou des pannes. Aucune perte due à la non-disponibilité du réseau de transport et de distribution d'Hydro-Québec n'a été prise en compte. Par ailleurs, aucune perte liée à la non-disponibilité du réseau collecteur des parcs éoliens n'a été prise en compte non plus.

## Pertes liées aux températures extrêmes basses

Les pertes énergétiques associées sont causées par l'arrêt des éoliennes à la suite de températures extérieures inférieures à la température d'arrêt prescrite dans les spécifications de l'éolienne.

Pour la présente étude, les éoliennes sont à l'arrêt à des températures inférieures à  $-30^{\circ}\text{C}$  et elles ne reprennent leur fonctionnement que lorsque la température remonte au-dessus de  $-24^{\circ}\text{C}$ . Lorsque ce type d'événement survient le taux de perte est de 100 %.

Les pertes ont été estimées à partir des séries temporelles de température et de puissance brute.

## Pertes liées aux températures trop élevées

Les pertes énergétiques associées sont causées par l'arrêt des éoliennes à la suite de températures extérieures supérieures à la température prescrite dans les spécifications de l'éolienne.

Pour le parc en étude, les éoliennes sont à l'arrêt à des températures supérieures à  $+40^{\circ}\text{C}$ . Lorsque ce type d'événement survient le taux de perte est de 100 %.

Les pertes ont été estimées à partir des séries temporelles de température et de puissance brute.

## Pertes liées aux opérations de maintenance

Des périodes de maintenance sont en général prévues après le rodage (500 heures de fonctionnement), puis tous les 6 mois. Des inspections annuelles plus importantes sont également réalisées. Par ailleurs, tous les 5 ans, des interventions plus complètes, dont des changements d'huile de la boîte de transmission, sont en général prévues. Enfin, l'inspection après 10 ans de service est encore plus exhaustive et comprend habituellement des changements majeurs de composants usés.

Les heures de maintenance sont a priori réparties de façon à réduire leur impact sur la production. Pour cette raison, les inspections les plus importantes (annuelles, à 5 ans et à 10 ans) sont plutôt planifiées pendant l'été tandis que les autres (inspections de 6 mois) sont effectuées de préférence l'hiver.

Une modélisation fine tiendrait compte de chaque type d'inspection avec sa durée d'intervention spécifique. Toutefois, pour la présente étude, une modélisation simplifiée a été adoptée principalement pour les deux raisons suivantes absence de plans précis d'O&M et absence de date précise de démarrage du parc.

La simulation retenue pour cette étude tient compte d'une durée moyenne de 76 heures d'intervention de maintenance par éolienne et par an. Une répartition saisonnière de ces interventions (impliquant un nombre suffisant d'équipes de maintenance travaillant en parallèle) a été supposée tel qu'indiquée au Tableau 5-4 ci-dessous.

Il est important de mentionner qu'en fonction de l'utilisation que le Client entend faire des séries chronologiques, différentes hypothèses de pertes liées aux opérations de maintenance pourront être utilisées.

**Tableau 5-4 : Répartition annuelle de la maintenance préventive**

Type d'inspection	Durée annuelle	Période	Horaire
6 mois	32 heures / éolienne	janvier – février – mars	9 h 00 – 16 h 00
1 an	44 heures / éolienne	juin – juillet – août	9 h 00 – 16 h 00

## Pertes liées aux pannes

Les pertes dues aux pannes des éoliennes ont été évaluées en considérant les composantes suivantes :

- Systèmes électriques;
- Système de régulation électronique;
- Capteurs;
- Systèmes de contrôle du pas variable;
- Système de contrôle d'orientation;
- Pales;
- Freins mécaniques;
- Moyeu;
- Boîte de transmission;
- Générateur;
- Éléments structuraux;
- Arbre de transmission.

Les pannes ont été simulées par des tirages aléatoires en respectant les temps moyens entre pannes<sup>6</sup> pour chaque catégorie et en utilisant des fréquences de pannes typiques. Pour chaque catégorie de panne, les durées moyennes de non disponibilité des éoliennes ont été simulées par des tirages aléatoires en respectant les temps moyens d'attente et de réparation. Ces temps moyens ont été estimés en classant les types d'intervention en différentes catégories allant d'une simple Remise À Zéro à distance (RAZ), à des opérations plus importantes de réparation impliquant le remplacement de pièces majeures.

Les pannes ont été simulées pour chaque éolienne de façon indépendante les unes des autres. Il est donc possible, a priori, que plusieurs éoliennes soient en pannes simultanément.

Les différents types de pannes ont également été simulés de façon indépendante mais en évitant les pannes multiples sur la même éolienne. On supposera que cette probabilité soit très faible.

La fréquence annuelle des pannes, toutes catégories confondues, a été ajustée de façon à refléter une année typique sur un cycle de vie de 20 ans.

<sup>6</sup> Traduction de l'anglais de "Mean-Time-Between-Failures".

## Pertes par hystérésis liées aux vitesses élevées

Les éoliennes GE 1.5se sont protégées contre les bourrasques et les vitesses de vents trop élevées par un système d'arrêt automatique. Toutefois, l'éolienne ne redémarre qu'à une vitesse plus faible que la vitesse ayant causé l'arrêt et ceci afin d'éviter les situations d'arrêts-démarrages répétitives. Ce comportement d'hystérésis, entraîne des pertes d'occurrences rares mais d'amplitudes potentiellement élevées. Dans le cas présent, elles ont été calculées en utilisant la série temporelle de vitesse à la hauteur des moyeux des éoliennes.

## Pertes liées aux erreurs d'orientation

Les éoliennes GE 1.5se fonctionnent en se positionnant face au vent. Une girouette située sur le toit de la nacelle fournit la direction moyenne du vent. Le système de contrôle corrige périodiquement, et non instantanément, l'orientation de la nacelle. Par ailleurs, un biais systématique peut exister entre la lecture de la girouette et la direction réelle du vent à cause du sillage des pales. L'écart entre la direction instantanée du vent et celle de la nacelle engendre alors une perte de puissance par rapport à la valeur théorique sans écart. Conformément à la pratique usuelle dans l'industrie, ces erreurs ont été estimées par le carré du cosinus de l'écart à partir des séries temporelles de la direction du vent.



## APPENDIX E DESCRIPTION DES PARAMÈTRES DE SIMULATION DES PERTES

Tableau 5-5 Description des paramètres de simulation des pertes

Type de perte	Valeur relative	Distribution annuelle	Références
Électrique (lignes, transformateurs, etc.)	2,5 %	Uniforme	Expérience d'Hélimax
Chauffage	de 0 à 0,6 % par éolienne	Selon vitesses et températures	Document interne d'Hélimax – informations sources fournies par GE
Profils aérodynamiques – Contamination	de 0 à 1 %	Progressive dans le temps	<ul style="list-style-type: none"> <li>G. P. Corten &amp; H. F. Feldcamp. <i>Insects Cause Double Stall</i>, EWEC 2001, Copenhague.</li> <li>Expérience d'Hélimax</li> </ul>
Profils aérodynamiques – Dégradation	de 0 à 1 %	Progressive dans le temps	Expérience d'Hélimax
Glace (Icing) (Arrêts, pertes de performances)	62,5 %	Aléatoire de décembre à mars de chaque année	<ul style="list-style-type: none"> <li>McKay &amp; Thomson, <i>Estimating the hazard of ice accretion in Canada from climatological data</i>, Journal of Applied Meteorology, 1969, Vol. 8, pp. 927-935.</li> <li><i>Cold Weather Wind Turbine Operation</i>, Présentation GE Wind Energy. Natural Resources Canada, Feb. 12, 2004</li> </ul>
Températures (Arrêt total pour températures extrêmes)	100 %	Selon température	<a href="http://www.gepower.com/prod_serv/products/wind_turbines/en/downloads/ge_15_brochure.pdf">http://www.gepower.com/prod_serv/products/wind_turbines/en/downloads/ge_15_brochure.pdf</a>
Disponibilité du réseau	0 %	Uniforme	Non considérée dans cette étude.
Maintenance	100 % par éolienne	Bi-annuelle en supposant 76 heures par an et par éolienne dont 32 en hiver et 44 en été	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wind Energy Report, Germany 2005/2006 – ISET</li> <li>Expérience d'Hélimax</li> </ul>
Pannes	100 % par éolienne	Aléatoire	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wind Energy Report Germany 2005/2006 – ISET</li> <li>Expérience d'Hélimax</li> </ul>
Erreur d'orientation	$\text{Cos}^2(\Delta\phi)$	Selon variabilité de la direction du vent	Pratique usuelle
Pertes d'Hystérésis – arrêts haute-vitesse	100 % par éolienne	Selon vitesses du vent	<a href="http://www.gepower.com/prod_serv/products/wind_turbines/en/15mw/specs.htm">http://www.gepower.com/prod_serv/products/wind_turbines/en/15mw/specs.htm</a>

## APPENDIX F LE MODÉLE METEODYN WT

CFD représente l'acronyme anglais pour « Computational Fluid Dynamics », qui peut se traduire par « mécanique des fluides numérique ».

La modélisation numérique en mécanique des fluides consiste à étudier les mouvements d'un fluide par la résolution numérique des équations régissant les écoulements et le transfert de chaleur. La modélisation numérique a de larges applications dans des secteurs tels que l'aérodynamique, l'aéronautique, la dynamique atmosphérique et, plus récemment, l'évaluation de la ressource éolienne.

Dans cette étude, pour les fins de l'extrapolation de la vitesse et de la direction du vent entre l'Île-d'Entrée à l'Île-du-Hâvre-aux-Maisons, la modélisation a été réalisée avec le logiciel Meteodyn WT. Ce dernier intègre, entre autres, la résolution complète des équations tridimensionnelles de Navier-Stokes en moyenne de Reynolds (RANS) avec un modèle de fermeture de type k-L, la génération automatique du maillage avec un raffinement aux points clés du domaine, ainsi que la génération automatique des conditions aux frontières.<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup> <http://www.meteodyn.com/>

## APPENDIX G LE MODÈLE WINDFARM

Le modèle WindFarm dispose de plusieurs fonctions pour créer, analyser et optimiser une configuration de parc éolien. L'aménagement des éoliennes peut être optimisé de manière à maximiser le productible énergétique ou pour minimiser les coûts énergétiques tout en tenant compte des contraintes naturelles et de celles liées à la planification (y compris le bruit) et à l'ingénierie. Le modèle calcule le productible énergétique brut d'un parc éolien tout en tenant compte des effets liés à la topographie et au sillage. Les gains ou les pertes topographiques relatifs à la tour de mesure des vents sont évalués pour chaque emplacement d'éolienne. L'analyse du productible énergétique comprend de nombreuses options sophistiquées pour calculer les pertes liées aux effets de sillage.

La méthodologie utilisée pour évaluer le productible énergétique d'un parc éolien est la suivante :

- Configurer et optimiser l'aménagement du site en établissant les paramètres appropriés pour le modèle tout en considérant les conditions du site et les spécifications des turbines;
- Choisir le modèle permettant le calcul des effets de sillage;
- Convertir le champ de ressource éolienne (produit par le modèle WAsP ou Meteodyn) et entrer les distributions des vitesses de vents mesurées, y compris l'extrapolation verticale et la turbulence;
- Calculer le productible énergétique.