

**ANNEXE A  
RÉPONSE À LA QUESTION 1.19**

**ANALYSE MÉTÉOROLOGIQUE  
DE 12 MOIS DE DONNÉES  
KANGIQSUALUJJUAQ**

**ANALYSE MÉTÉOROLOGIQUE  
DE 36 MOIS DE DONNÉES  
AKULIVIK**



# ANALYSE MÉTÉOROLOGIQUE DE 12 MOIS DE DONNÉES

## Kangiqsualujjuaq, Québec

Préparé pour  
Hydro-Québec

Par  
Hélimax Énergie inc.

Montréal, novembre 2008



## IDENTIFICATION DU DOCUMENT

Numéro du projet : 389

Date d'émission : 26 novembre 2008

Version : Finale

Statut du document : Privé et confidentiel

Liste de circulation : Hydro-Québec, copie interne d'Hélimax

## 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 basée 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

agl	au-dessus du niveau du sol
BNDT	Base nationale de données topographiques
EC	Environnement Canada
HQ21004	mât de mesure Kangiqsualujjuaq
IT	intensité de turbulence
J	joule
K	kelvin
kg	kilogramme
kPa	kilopascal
m	mètre
m/s	mètres par seconde
N/A	non applicable
N/D	non disponible
R <sup>2</sup>	coefficient de détermination
SIG	systèmes d'information géographique
V3#1	vitesse du vent observée au niveau de mesure la plus proche de 30 m
V3#2	vitesse du vent observée au niveau de mesure la plus proche de 30 m
V4#1	vitesse du vent observée au niveau de mesure la plus proche de 40 m
V4#2	vitesse du vent observée au niveau de mesure la plus proche de 40 m
V5#1	vitesse du vent observée au niveau de mesure la plus proche de 50 m
V5#2	vitesse du vent observée au niveau de mesure la plus proche de 50 m
WAsP	Wind Atlas Analysis and Application Program
Wh	watt-heure
Z <sub>0</sub>	longueur de rugosité
$\alpha$	coefficient de cisaillement vertical
°	degré angulaire
°C	degré Celsius

## SOMMAIRE EXÉCUTIF

Un programme d'évaluation de la ressource éolienne bien conçu est indispensable pour prédire, avec le plus d'exactitude possible, le potentiel du gisement éolien sur un site donné. Dans ce contexte, Hydro-Québec (« Client ») a mis en œuvre une campagne de mesure des vents dans le périmètre d'un domaine de projet dont il cherche à évaluer la faisabilité de développement. Ce projet, connu sous le nom de Kangiqsualujjuaq, est situé dans la région du Nunavik. À la demande du Client, Hélimax Énergie inc. (« Hélimax ») a ensuite élaboré cette analyse météorologique, selon les standards de l'industrie, pour les données recueillies sur un mât de mesure qui fait partie d'une campagne de mesure des vents conçue pour le site.

En se fiant à son expertise professionnelle et aux méthodes d'usage dans l'industrie, Hélimax a combiné un contrôle de qualité rigoureux avec une analyse exhaustive des données pour réaliser une étude approfondie du gisement éolien sur le domaine du projet de Kangiqsualujjuaq. À l'issue de cette analyse, Hélimax conclut que la campagne d'évaluation de la ressource éolienne a fourni des observations valables. Les données ont ensuite fait l'objet d'un ajustement climatologique afin de valider la représentativité climatologique des vitesses et des directions des vents observées. Enfin, les vitesses annuelles moyennes à long terme sont présentées à 30 m et à 45 m (extrapolée), ce qui correspondent à des hauteurs de moyeu potentielles.

Il est cependant important de noter qu'un niveau d'incertitude est associé à ces valeurs bien que les données analysées soient issues d'une période d'observation de 12 mois. Cette incertitude a pour origine plusieurs facteurs (instruments, taux de recouvrement, extrapolation des vitesses de vent, variabilité inter-annuelle, etc.) et bien qu'elle n'ait pas été évaluée dans le présent rapport, pourrait faire l'objet d'une analyse lors d'une phase ultérieure du projet.

Le tableau ci-dessous montre les périodes d'observation météorologiques et le sommaire des résultats des vitesses du vent obtenues à la suite de l'analyse météorologique.

**Sommaire des résultats de l'analyse météorologique**

<b>Informations générales</b>	
Numéro d'identification de la station	HQ21004
Altitude (m au-dessus du niveau de la mer)	94
Période de l'analyse météorologique	2007-10-20 – 2008-10-31
<b>Vitesses moyennes du vent observées</b>	
30 m agl (m/s)	6,1
40 m agl (m/s)	6,2
50 m agl (m/s)	6,3
<b>Vitesses du vent, après ajustement climatologique et extrapolation</b>	
Vitesse du vent annuelle ajustée à long terme – 30 m (m/s)	6,2
Vitesse du vent annuelle ajustée à long terme – 40 m (m/s)	6,3
Vitesse du vent annuelle ajustée à long terme et extrapolée – 45 m (m/s)	6,3

## TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION.....	1
2	CARACTÉRISTIQUES DU SITE ET DE L'INSTRUMENTATION.....	3
2.1	DESCRIPTION GÉNÉRALE DU SITE.....	3
2.2	SPÉCIFICATIONS DU SYSTÈME D'ACQUISITION DE DONNÉES ET DES INSTRUMENTS.....	6
3	ANALYSE ET CONTRÔLE DE QUALITÉ DES DONNÉES.....	8
3.1	MÉTHODOLOGIE DU CONTRÔLE DE LA QUALITÉ DES DONNÉES.....	8
3.2	CORRÉLATION ENTRE LES VITESSES DE VENT.....	8
3.3	TAUX DE RECOUVREMENT DES DONNÉES.....	9
3.4	EFFET DE SILLAGE DE LA TOUR MÉTÉOROLOGIQUE.....	10
4	ANALYSE DU GISEMENT ÉOLIEN.....	12
4.1	ÉVOLUTION MENSUELLE DES OBSERVATIONS ET DES PARAMÈTRES DÉRIVÉS.....	12
4.1.1	<i>Variation mensuelle de la température ambiante.....</i>	<i>12</i>
4.1.2	<i>Évolution mensuelle des vitesses du vent.....</i>	<i>12</i>
4.1.3	<i>Évolution mensuelle du coefficient de cisaillement vertical du vent.....</i>	<i>12</i>
4.1.4	<i>Évolution mensuelle de l'intensité de turbulence.....</i>	<i>13</i>
4.2	ÉVOLUTION JOURNALIÈRE DES OBSERVATIONS ET DES PARAMÈTRES DÉRIVÉS.....	17
4.2.1	<i>Cycle journalier de la température ambiante.....</i>	<i>17</i>
4.2.2	<i>Cycle journalier de la vitesse du vent.....</i>	<i>17</i>
4.2.3	<i>Cycle journalier du coefficient de cisaillement vertical du vent.....</i>	<i>17</i>
4.2.4	<i>Cycle journalier de l'intensité de turbulence.....</i>	<i>17</i>
4.3	DISTRIBUTION DIRECTIONNELLE DES OBSERVATIONS ET DES PARAMÈTRES DÉRIVÉS.....	20
4.3.1	<i>Distribution directionnelle de la vitesse du vent.....</i>	<i>20</i>
4.3.2	<i>Distribution directionnelle de la densité d'énergie.....</i>	<i>20</i>
4.3.3	<i>Distribution directionnelle du coefficient de cisaillement du vent.....</i>	<i>20</i>
4.3.4	<i>Distribution directionnelle de l'intensité de turbulence.....</i>	<i>20</i>
4.4	DISTRIBUTION DES VITESSES DU VENT.....	24
4.5	VARIATION DE LA TURBULENCE AVEC LA VITESSE.....	25
5	AJUSTEMENT CLIMATOLOGIQUE ET EXTRAPOLATION VERTICALE.....	26
5.1	AJUSTEMENT CLIMATOLOGIQUE DES VITESSES DU VENT.....	26
5.2	PROFIL VERTICAL DE LA VITESSE DU VENT.....	27
6	CARTOGRAPHIE DE LA RESSOURCE ÉOLIENNE.....	30
7	DISCUSSION DES RÉSULTATS.....	37
ANNEXE A	TESTS DE CONTRÔLE DE QUALITÉ.....	39
ANNEXE B	DISTRIBUTION DE LA VITESSE DU VENT.....	40
ANNEXE C	CONCEPTS MÉTÉOROLOGIQUES.....	42
ANNEXE D	LE MODÈLE WASP.....	46

## LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Étapes de l'analyse météorologique et du calcul du productible .....	2
Figure 2-1 : Situation géographique et localisation du mât Kangiqsualujjuaq.....	4
Figure 2-2 : Photo du site de Kangiqsualujjuaq – Nord.....	5
Figure 2-3 : Photo du site de Kangiqsualujjuaq – Est .....	5
Figure 2-4 : Photo du site de Kangiqsualujjuaq – Sud .....	5
Figure 2-5 : Photo du site de Kangiqsualujjuaq – Ouest.....	5
Figure 2-6 : Configuration de l'instrumentation sur le mât Kangiqsualujjuaq .....	7
Figure 3-1 : Distribution directionnelle du rapport des vitesses de vent – 50 m.....	10
Figure 3-2 : Distribution directionnelle du rapport des vitesses de vent – 40 m.....	11
Figure 3-3 : Distribution directionnelle du rapport des vitesses de vent –30 m.....	11
Figure 4-1 : Évolution mensuelle de la température.....	15
Figure 4-2 : Évolution mensuelle des vitesses du vent .....	15
Figure 4-3 : Évolution mensuelle des coefficients de cisaillement vertical.....	16
Figure 4-4 : Évolution mensuelle des intensités de turbulence .....	16
Figure 4-5 : Cycle journalier de la température .....	18
Figure 4-6 : Cycle journalier de la vitesse des vents.....	18
Figure 4-7 : Cycle journalier du coefficient de cisaillement vertical.....	19
Figure 4-8 : Cycle journalier de l'intensité de turbulence .....	19
Figure 4-9 : Rose des vents observée à 50 m .....	21
Figure 4-10 : Distribution directionnelle des vitesses moyennes du vent (m/s) .....	22
Figure 4-11 : Distribution directionnelle de la densité d'énergie (%).....	22
Figure 4-12 : Distribution directionnelle du coefficient de cisaillement vertical .....	23
Figure 4-13 : Distribution directionnelle de l'intensité de turbulence .....	23
Figure 4-14 : Distribution de la fréquence des vents à 50 m.....	24
Figure 4-15 : Variation de l'intensité de turbulence classée par plage de vitesse .....	25
Figure 5-1 : Localisation des stations météorologiques et des points NCEP analysés et/ou utilisés pour l'ajustement climatologique des vitesses de vent.....	28
Figure 6-1 : Carte topographique du domaine .....	31
Figure 6-2 : Carte de la rugosité de surface du domaine .....	32
Figure 6-3 : Carte de la vitesse des vents du domaine, à 30 m au-dessus du sol .....	33
Figure 6-4 : Carte de la vitesse des vents du domaine, à 45 m au-dessus du sol .....	34
Figure 6-5 : Carte de la densité de puissance du domaine, à 30 m au-dessus du sol .....	35
Figure 6-6 : Carte de la densité de puissance du domaine, à 45 m au-dessus du sol .....	36



## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Identification, localisation du mât de mesure et caractéristiques du site .....	3
Tableau 2-2 : Spécifications des instruments.....	6
Tableau 3-1 : Coefficient de détermination entre les mesures à différents niveaux .....	8
Tableau 3-2 : Taux de recouvrement des données (%).....	9
Tableau 4-1 : Moyennes mensuelles des observations .....	14
Tableau 4-2 : Paramètres de Weibull .....	24
Tableau 5-1 : Tableau sommaire général.....	29
Tableau 6-1 : Données d'entrée du modèle WASP .....	30
Tableau 7-1 : Sommaire des résultats de l'analyse météorologique .....	37

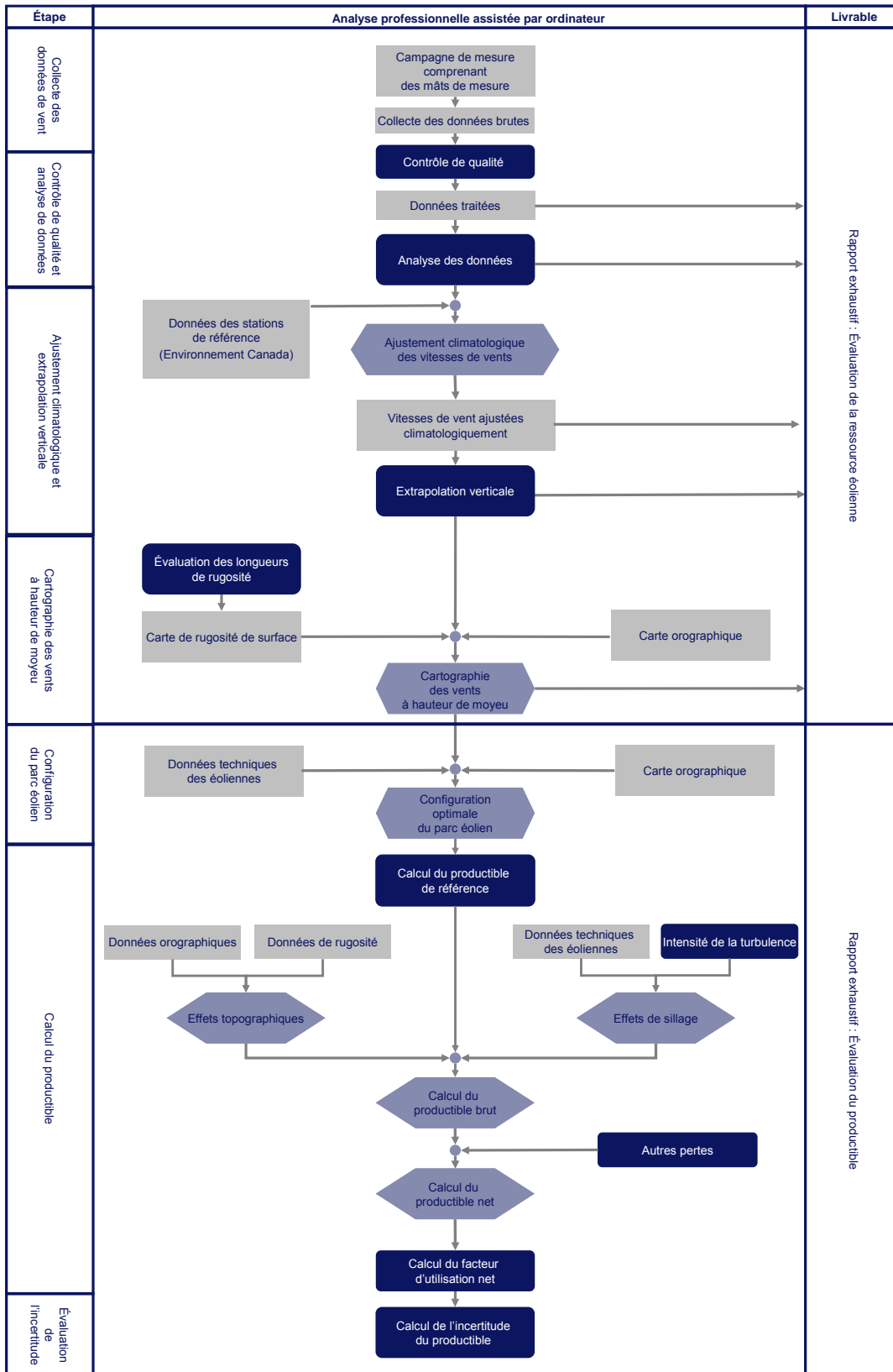
# 1 INTRODUCTION

Hydro-Québec vise à développer un projet de parc éolien dans la région administrative du Nunavik, à environ 1 km au nord-est de Kangiqsualujuaq. À la lumière de cet objectif, le Client a déployé une campagne de mesure du vent consistant en un mât anémométrique de 50 m dans le but de caractériser le gisement éolien sur l'ensemble du domaine de projet ciblé.

Dans ce contexte, Hélimax Énergie inc. « Hélimax » a effectué une analyse approfondie des données météorologiques recueillies sur la tour entre octobre 2007 et octobre 2008. Un diagramme décrivant l'approche utilisée par Hélimax pour exécuter ce travail est présenté à la Figure 1-1. Le volet énergétique illustré dans cet organigramme n'est pas inclus dans ce rapport, mais pourrait être réalisé dans des phases ultérieures du projet.

La section 2 du présent document contient une description du site étudié, de l'emplacement du mât de mesure et des spécifications des instruments utilisés pour recueillir les observations. La méthodologie utilisée pour le contrôle de qualité des données est expliquée à la section 3. L'analyse du gisement éolien observé est présentée à la section 4. La section 5 présente l'ajustement climatologique et l'extrapolation verticale des vitesses du vent, tandis que la section 6 présente la cartographie de la ressource éolienne sur le site. Une conclusion sur les observations et le gisement éolien est donnée à la section 7.

# ANALYSES MÉTÉOROLOGIQUE ET DE PRODUCTIBLE



3 juillet 2007

  Traitement à l'aide de logiciels

  Traitement majoritairement professionnel

  Données d'entrée et/ou de sortie



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

## 2 CARACTÉRISTIQUES DU SITE ET DE L'INSTRUMENTATION

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

### 2.1 Description générale du site

Le projet éolien de Kangiqsualujjuaq est situé à environ 20 km au sud-est de la Baie d'Ungava, à approximativement 3,3 km à l'ouest-sud-ouest de l'aéroport de Kangiqsualujjuaq et à environ 1,3 km au nord-est de la municipalité de Kangiqsualujjuaq. La topographie du site est généralement caractérisée par un terrain parsemé de collines rocailleuses avec très peu de végétation, mais avec quelques conifères dans les vallées.

Une campagne de mesure des vents a été mise en œuvre afin d'évaluer la faisabilité de développer un projet éolien dans les limites du domaine. En effet, un mât de mesure du vent de 50 m de hauteur, ci-après identifié comme « HQ21004 » ou « Kangiqsualujjuaq », a été installé dans le périmètre du projet. Ce mât est situé au sommet d'un cap rocheux dénudé de végétation. Il n'y a aucun obstacle dans la trajectoire du vent à proximité du mât de mesure.

Le Tableau 2-1 présente le numéro d'identification, le nom, les coordonnées géographiques ainsi que les principales caractéristiques de l'environnement immédiat des mâts de mesure. La Figure 2-1 présente l'emplacement géographique des mâts dans l'ensemble du domaine du projet. Des photos de l'emplacement du mât, prises dans les directions des quatre points cardinaux, sont présentées de la Figure 2-2 à la Figure 2-5.

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

Informations générales	
Numéro de la station	HQ21004
Nom de la station	Kangiqsualujjuaq
Ville la plus proche	Municipalité de Kangiqsualujjuaq (Québec)
Altitude (m au-dessus du niveau de la mer)	94
Coordonnées	
Nord	58° 42' 1,0"
Ouest	65° 56' 11,9"
Caractéristiques du terrain	
Propriétaire	Terres de la Catégorie 1 <sup>1</sup>
Utilisation	Chasse
Topographie et obstacles	Terrain parsemé de collines pratiquement exempt de végétation

<sup>1</sup> Source : Hydro-Québec

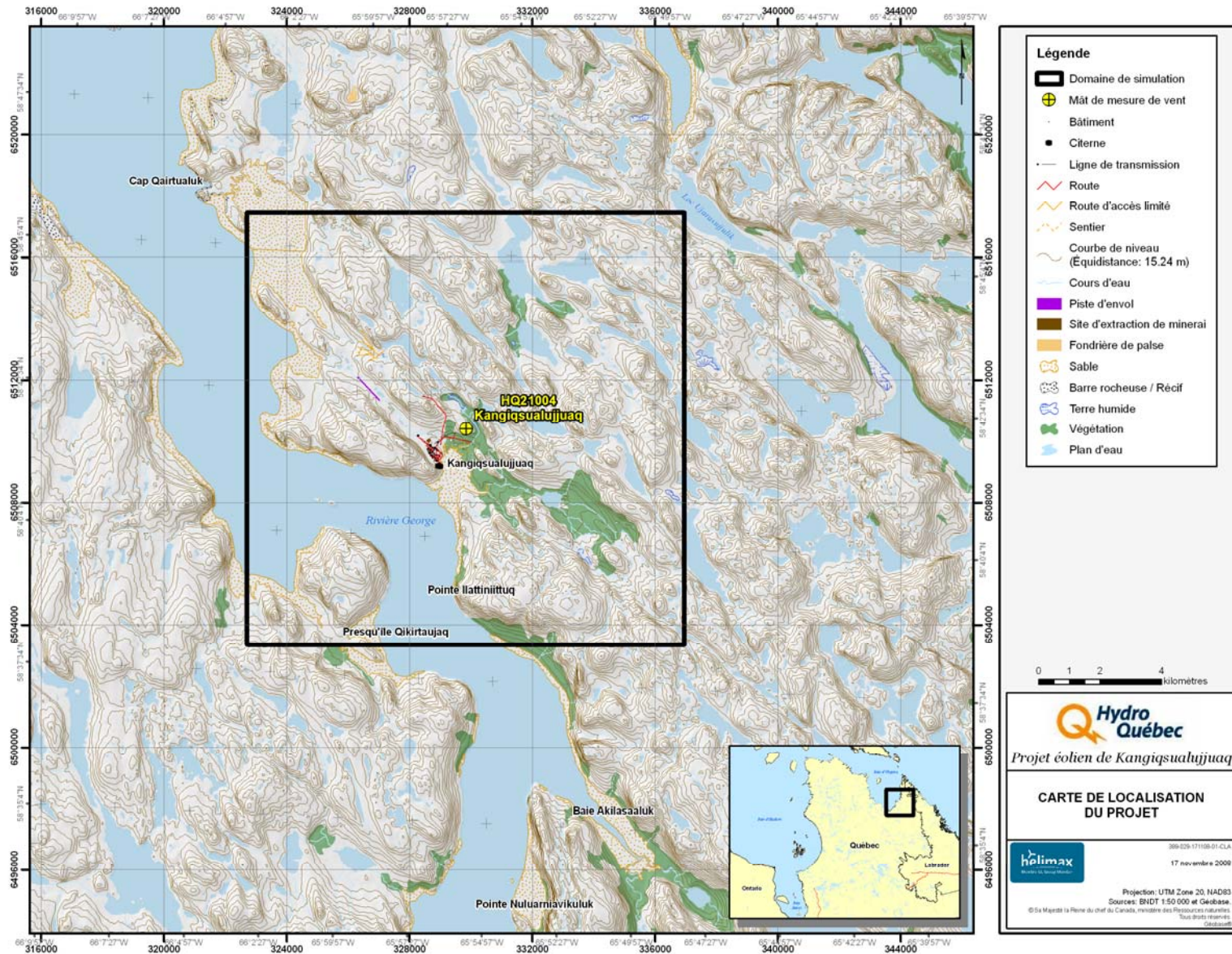


Figure 2-1 : Situation géographique et localisation du mât Kangiqsualujuaq



**Figure 2-2 : Photo du site de Kangiqsualujjuaq – Nord**



**Figure 2-3 : Photo du site de Kangiqsualujjuaq – Est**



**Figure 2-4 : Photo du site de Kangiqsualujjuaq – Sud**



**Figure 2-5 : Photo du site de Kangiqsualujjuaq – Ouest**

## 2.2 Spécifications du système d'acquisition de données et des instruments

Cette section fournit un rapport détaillé de l'instrumentation utilisée dans le cadre de la campagne de mesure du vent.

Le mât de Kangiqsualujuaq est une tour tubulaire maintenue en place à l'aide de haubans en acier galvanisé. Il est équipé d'instruments à trois niveaux, soit 30 m, 40 m et 50 m au-dessus du niveau du sol.

La liste des instruments de mesure installés sur ce mât est composée de 6 anémomètres calibrés, 2 girouettes et 1 thermomètre, tous de fabrication NRG. Les anémomètres primaires sont orientés vers le nord-ouest. Des anémomètres redondants sont installés aux trois niveaux dans le but d'assurer une continuité des observations. Tous les anémomètres et les girouettes sont des instruments non chauffés. Il est également à noter que toutes les données directionnelles du vent sont mesurées par rapport au nord géographique (0°).

Un système d'acquisition de données (SAD) de marque NRG a été utilisé pour la collecte des données. Celui-ci recueille, avec une période d'échantillonnage de deux secondes, les observations des vitesses et des directions du vent, ainsi que de la température ambiante. Toutes les 10 minutes, une moyenne de ces observations est enregistrée en temps réel en indiquant l'heure exacte de la fin de la période de 10 minutes. Les données sont transmises quotidiennement à la base de données d'Hélimax grâce à un système de télécommunication sans-fil. Une fois que les données brutes enregistrées par le SAD sont reçues, Hélimax effectue la conversion des observations en tenant compte des paramètres de conversion propres à chaque instrument.

L'information relative à l'instrumentation du mât Kangiqsualujuaq est présentée au Tableau 2-2 et à la Figure 2-6.

Tableau 2-2 : Spécifications des instruments

Canal sur le SAD	Type d'instrument	Manufacturier/ Modèle	Niveau de référence (m)	Hauteur réelle agl (m)	Orientation (°)	Intervalle de compilation (minutes)
-	Système d'acquisition de données	NRG Symphonie	3	3,0	N/A	N/A
-	iPack Satellite (transmission des données)	NRG Iridium	3	3,0	N/A	N/A
1	Anémomètre calibré	NRG #40C	50	48,5	315	10
2	Anémomètre calibré	NRG #40C	50	48,5	135	10
3	Anémomètre calibré	NRG #40C	40	40,2	315	10
4	Anémomètre calibré	NRG #40C	40	40,2	135	10
5	Anémomètre calibré	NRG #40C	30	30,2	315	10
6	Anémomètre calibré	NRG #40C	30	30,2	135	10
7	Girouette	NRG #200P	50	48,5	225	10
8	Girouette	NRG #200P	40	40,2	225	10
9	Thermomètre	NRG #110S	3	3,0	0	10
10	Voltmètre du iPack	NRG	3	3,0	N/A	N/A

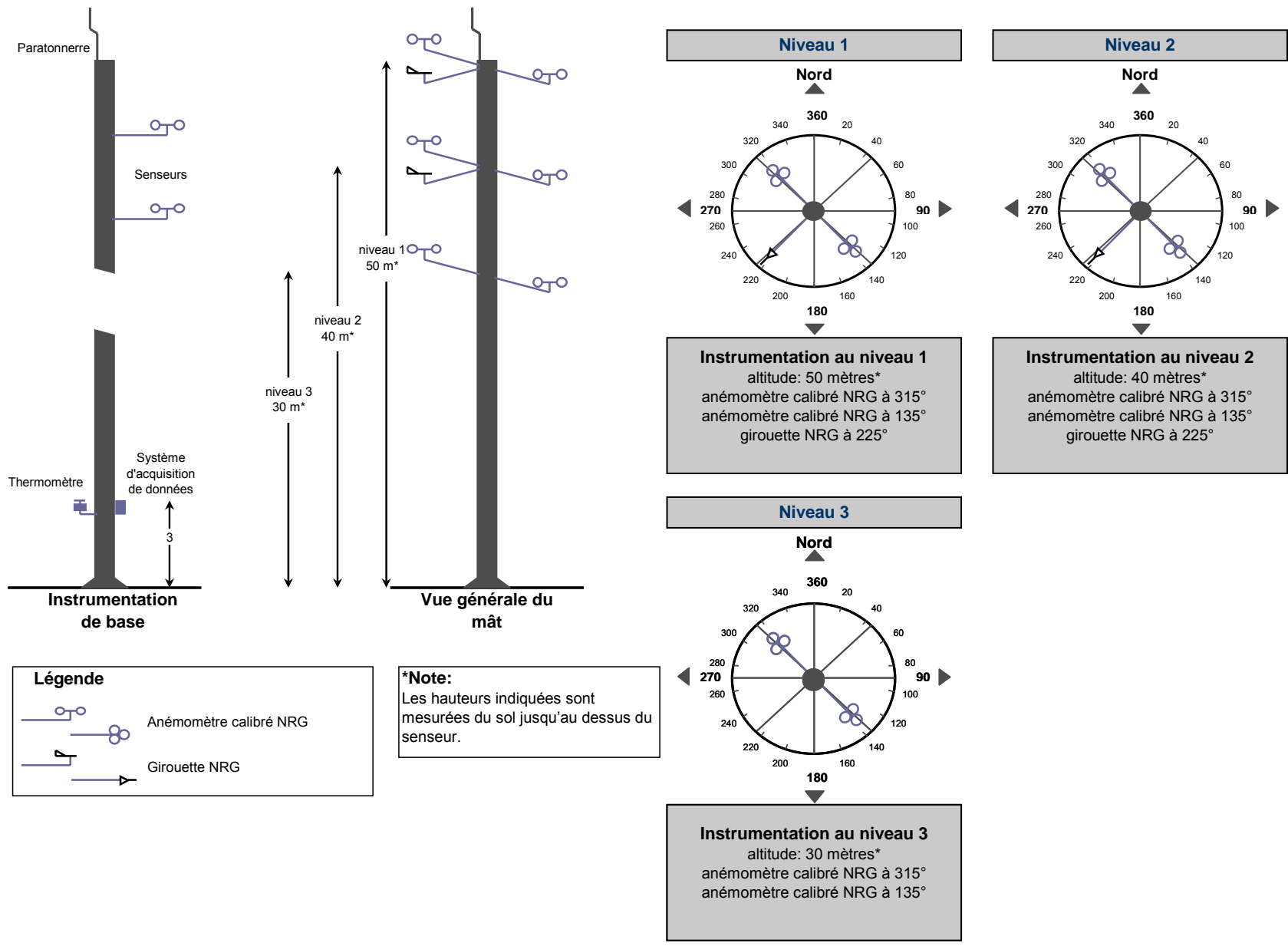


Figure 2-6 : Configuration de l'instrumentation sur le mât Kangiqsualujuaq



### 3 ANALYSE ET CONTRÔLE DE QUALITÉ DES DONNÉES

Hélimax a développé une procédure approfondie pour le contrôle de la qualité des données recueillies par des mâts de mesure du vent. Cette procédure est en conformité avec les pratiques en cours dans l'industrie. La présente section décrit la méthodologie utilisée par Hélimax pour le contrôle de qualité des données, fournit les résultats des corrélations entre les vitesses du vent à différents niveaux et présente un sommaire des taux de recouvrement des observations.

#### 3.1 Méthodologie du contrôle de la qualité des données

Une analyse rigoureuse des observations collectées sur le mât de mesure est réalisée en utilisant un logiciel développé à l'interne, chez Hélimax. Toutes les données sont soumises à une série de 15 tests dans le but de détecter toute observation douteuse due à un événement de gel ou à une panne d'instrument. Les données qui échouent ces tests sont analysées directement par un météorologue professionnel. Les données entachées d'erreurs sont éliminées de la base de données et de toute analyse future. Un tableau décrivant les tests effectués sur les données est présenté à l'Annexe A. Ceux-ci sont conçus de façon à vérifier les cinq principaux aspects des observations suivants :

- Continuité des enregistrements (pas de saut temporel);
- Observations comprises dans des limites météorologiques acceptables;
- Occurrence des vitesses du vent inférieures à 1 m/s;
- Variations temporelles des paramètres météorologiques;
- Variations verticales de la vitesse et de la direction du vent.

#### 3.2 Corrélation entre les vitesses de vent

Une première vérification de la qualité des observations est faite par l'analyse de la corrélation entre les vitesses et les directions du vent observées à différents niveaux de mesure. Cette approche permet une validation rapide de la qualité des mesures recueillies.

Le coefficient de détermination,  $R^2$ , représente le degré de corrélation qui existe entre les mesures de la vitesse du vent à différentes hauteurs. Les valeurs de  $R^2$  pour les instruments installés sur le mât sont présentées au Tableau 3-1.

Tableau 3-1 : Coefficient de détermination entre les mesures à différents niveaux

Vitesse	50 m	40 m	30 m
50 m	1,00	0,99	0,99
40 m	0,99	1,00	0,99
30 m	0,99	0,99	1,00

Direction	50 m	40 m
50 m	1,00	0,98
40 m	0,98	1,00

### 3.3 Taux de recouvrement des données

De façon générale, 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. Les observations valides sont définies comme celles qui répondent aux critères de contrôle de qualité et à l'analyse faite par un météorologue professionnel. Plus le nombre d'observations valides est grand, plus le taux de recouvrement des données est élevé, et par conséquent, plus l'échantillon des données est représentatif des conditions réelles du site.

Les taux de recouvrement mensuels pour le mât de Kangiqsualujuaq sont présentés au Tableau 3-2. De manière générale, les taux de recouvrement sont bons. Cependant, le mât a subi des périodes de gel, ce qui a diminué les taux de recouvrement de certains instruments pendant les mois d'hiver. Une période problématique est également survenue au mois de janvier 2008, probablement causée par du gel partiel des instruments. Il est également à noter que les taux de recouvrement du premier mois de la campagne sont affectés par la date du début de la période d'observation.

Tableau 3-2 : Taux de recouvrement des données (%)

Mois - Année	Vitesse à 50 m #1	Vitesse à 50 m #2	Vitesse à 40 m #1	Vitesse à 40 m #2	Vitesse à 30 m #1	Vitesse à 30 m #2	Direction à 50 m	Direction à 40 m	Température à 3 m
10-2007(du 2007-10-25)	37	37	37	37	37	37	37	37	37
11-2007	98	98	98	98	98	98	98	98	100
12-2007	100	100	100	100	100	100	100	99	100
01-2008	70	70	70	70	70	70	70	70	100
02-2008	100	100	100	100	100	100	96	97	100
03-2008	94	94	94	94	94	94	79	80	100
04-2008	100	100	100	100	100	100	100	98	100
05-2008	95	96	96	96	96	94	85	85	100
06-2008	100	100	100	100	100	100	99	100	100
07-2008	97	97	97	97	97	97	97	97	97
08-2008	100	100	100	100	100	100	100	100	100
09-2008	99	99	99	99	99	99	99	98	100
10-2008	100	100	100	100	100	100	99	98	100
<b>Moyenne<sup>2</sup></b>	<b>96</b>	<b>96</b>	<b>96</b>	<b>96</b>	<b>96</b>	<b>96</b>	<b>94</b>	<b>94</b>	<b>100</b>

<sup>2</sup> Les valeurs moyennes du recouvrement présentées ont été calculées à partir de l'ensemble des données valides aux 10 minutes.

### 3.4 Effet de sillage de la tour météorologique

Avant d'analyser les données météorologiques brutes, il est important de déterminer l'amplitude du sillage créé par la tour sur les mesures. Bien que l'effet espéré de la tour doive être minimal si les instruments sont installés sur des bras de montage de dimensions recommandées par l'industrie, il pourrait s'avérer assez important et avoir une influence sur l'intensité de turbulence des instruments en aval de l'obstacle. En installant deux anémomètres à la même hauteur de mesure, il est possible de quantifier et corriger l'effet de sillage.

Une analyse des données provenant des anémomètres redondants situés à chacun des niveaux de mesure du mât a été effectuée. Le rapport des vitesses du vent mesurées par les anémomètres principaux et les vitesses mesurées par les anémomètres redondants est illustré de la Figure 3-1 à la Figure 3-3. Comme on peut le remarquer, l'effet de sillage réduit les vitesses enregistrées par chaque anémomètre dans les secteurs obstrués par le mât.

Par conséquent, les données influencées par l'effet de sillage ont été corrigées en utilisant les observations de l'anémomètre exposé à l'écoulement non perturbé du vent.

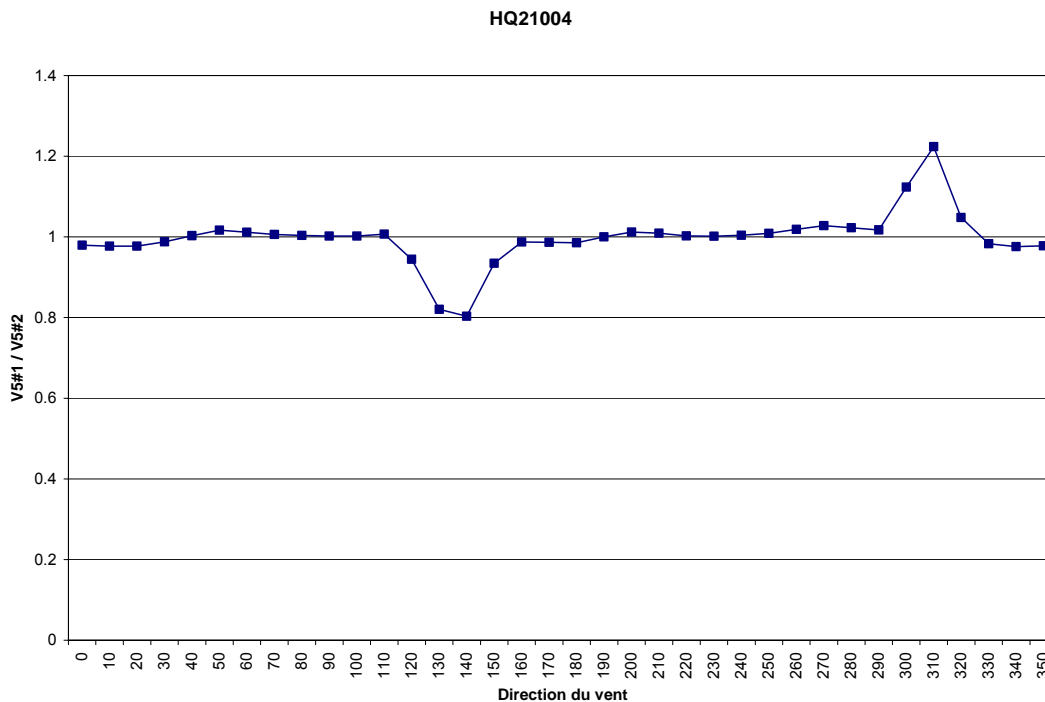


Figure 3-1 : Distribution directionnelle du rapport des vitesses de vent – 50 m

HQ21004

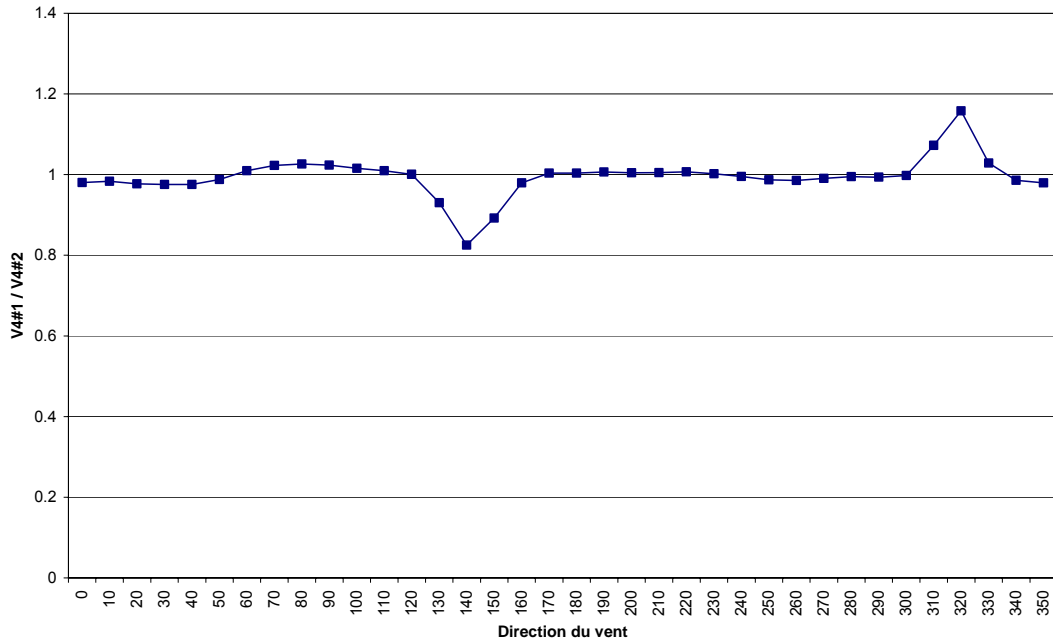


Figure 3-2 : Distribution directionnelle du rapport des vitesses de vent – 40 m

HQ21004

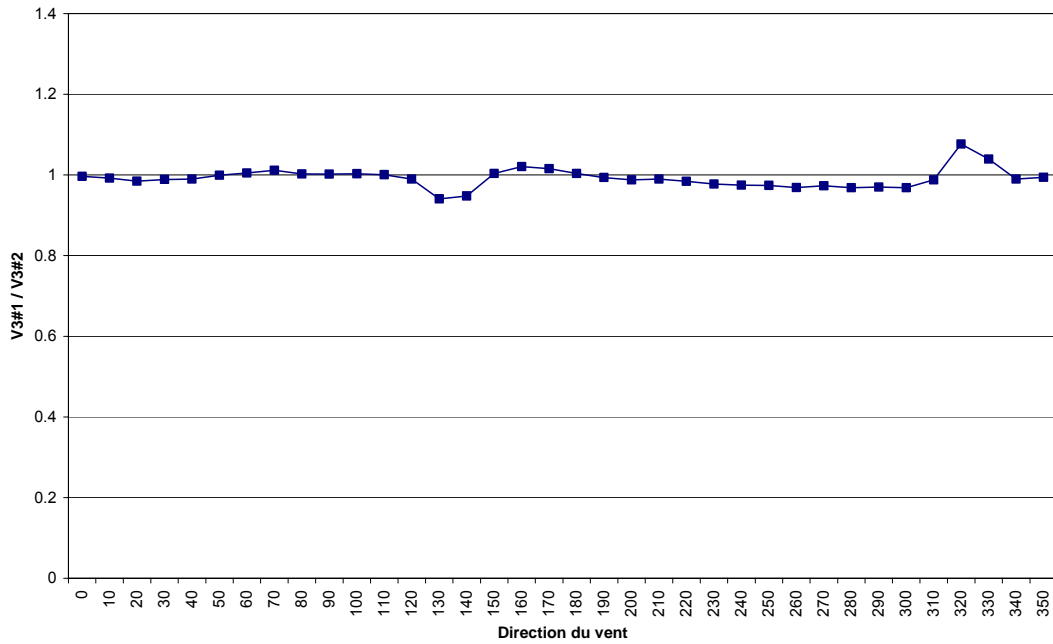


Figure 3-3 : Distribution directionnelle du rapport des vitesses de vent – 30 m

## 4 ANALYSE DU GISEMENT ÉOLIEN

Une analyse exhaustive est effectuée sur les observations recueillies par les capteurs du mât ainsi que sur les paramètres dérivés à partir de celles-ci. Les observations analysées sont la vitesse et la direction du vent ainsi que la température ambiante. Les paramètres dérivés sont le coefficient de cisaillement et l'intensité de turbulence. Les variations des observations et des paramètres dérivés peuvent affecter considérablement la puissance générée par une éolienne et devraient donc être bien connues. Les sections suivantes présentent l'évaluation détaillée des paramètres observés et dérivés, selon les règles de l'art de l'industrie, à savoir :

- l'évolution mensuelle des paramètres observés et dérivés (température ambiante, vitesses des vents, cisaillement du vent et intensité de turbulence);
- les variations journalières des paramètres observés et dérivés (température ambiante, vitesses des vents, cisaillement du vent et intensité de turbulence);
- les distributions directionnelles des paramètres observés et dérivés (vitesses des vents, densité de puissance la ressource, cisaillement du vent et intensité de turbulence); et
- les distributions des vitesses des vents (distribution de Weibull, paramètre de forme et paramètre d'échelle).

### 4.1 Évolution mensuelle des observations et des paramètres dérivés

Cette section présente l'évolution mensuelle des observations (température ambiante et vitesse du vent) et des paramètres dérivés (cisaillement du vent et intensité de turbulence).

Les moyennes mensuelles des observations et des paramètres dérivés pour le mât de mesure sont présentées au Tableau 4-1. Il est important de noter que ces valeurs n'ont pas subi d'ajustement climatologique.

Il faut noter que seuls les mois ayant un taux de recouvrement jugé acceptable ( $\geq 75\%$ ) sont présentés de la Figure 4-1 à la Figure 4-4.

#### 4.1.1 Variation mensuelle de la température ambiante

La température atmosphérique affecte la densité de l'air qui, à son tour, a une influence considérable sur le potentiel du gisement éolien. La relation liant la densité énergétique et la température atmosphérique est présentée à l'Annexe C.

La Figure 4-1 montre la variation mensuelle de la température au cours de la période d'observation. Les températures moyennes correspondent à une variation saisonnière typique.

#### 4.1.2 Évolution mensuelle des vitesses 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 4-2 présente l'évolution mensuelle des vitesses moyennes des vents pendant la période d'observation aux différents niveaux de mesure. Les moyennes des vitesses les plus élevées sont observées en janvier et les plus basses, en août.

#### 4.1.3 Évolution mensuelle du coefficient de cisaillement vertical du vent

Les vitesses du vent augmentent avec la hauteur par rapport au sol à cause de la diminution graduelle de la force de frottement (friction). La vitesse du vent est nulle au sol et, en principe, augmente ensuite avec l'altitude

jusqu'à la couche limite atmosphérique. Cette variation en fonction de l'altitude constitue ainsi le profil vertical du vent, tandis que le cisaillement vertical du vent fait référence à la variation des vitesses entre deux niveaux d'altitude donnés.

Dans l'industrie éolienne, deux lois mathématiques sont utilisées pour l'extrapolation verticale de la vitesse du vent aux hauteurs de moyeu d'éoliennes : la loi de puissance et la loi logarithmique (définies à l'Annexe C).

En se basant sur des études internes, il a été trouvé que la loi logarithmique représente mieux la variation verticale de la vitesse du vent. Cependant, le coefficient de cisaillement vertical «  $\alpha$  », est présenté ici pour fin d'illustration de la variation de la vitesse entre deux niveaux de mesure mais n'a pas été utilisé dans l'extrapolation verticale.

La Figure 4-3 montre l'évolution mensuelle des coefficients de cisaillement vertical du vent pendant la période de mesure. Pour le site de Kangiqsualujjuaq, les valeurs de cisaillement sont légèrement plus basses que ce à quoi on s'attendrait étant donnée le type de terrain sur lequel le mât est installé.

#### 4.1.4 Évolution mensuelle de l'intensité de turbulence

La turbulence correspond à la fluctuation de la vitesse du vent. Elle est générée par une combinaison de la rugosité du sol et des effets thermiques. De plus, puisque la turbulence dépend de la rugosité du sol, il est attendu que plus l'altitude de mesure par rapport au sol augmente, plus l'intensité de turbulence diminue. L'intensité de turbulence est définie comme la fluctuation de la vitesse du vent par rapport à la vitesse moyenne observée (calculée dans ce rapport sur des périodes de 10 minutes). La formule mathématique de ce paramètre est donnée à l'Annexe C.

Il est important de quantifier l'intensité de turbulence puisque des niveaux élevés de turbulence peuvent accélérer l'usure des composantes des éoliennes et ainsi réduire la durée de vie opérationnelle de celles-ci. Par ailleurs, l'intensité de la turbulence est utilisée, entre autres, afin de sélectionner une classe d'éolienne convenable pour un site donné. Elle est également considérée lors de la modélisation de l'effet de sillage dans le cadre du calcul du productible d'un parc éolien.

Les évolutions mensuelles de l'intensité de turbulence pour le mât de Kangiqsualujjuaq sont présentées à la Figure 4-4. On remarque que l'intensité de la turbulence est modérée<sup>3</sup> et diminue avec l'altitude.

---

<sup>3</sup> Selon les normes de l'industrie, la turbulence d'un site est considérée comme :

- basse quand son intensité est en dessous de 0,10;
- modérée quand son intensité est entre 0,10 et 0,25;
- haute quand son intensité est au-dessus de 0,25.

Tableau 4-1 : Moyennes mensuelles des observations

Mois-Année	Vitesse du vent à 50 m (m/s)	Vitesse du vent à 40 m (m/s)	Vitesse du vent à 30 m (m/s)	Température à 3 m (°C)	Coefficient de cisaillement vertical 50 m – 40 m	Intensité de turbulence à 50 m	Intensité de turbulence à 40 m	Intensité de turbulence à 30 m
10-2007 (du 2007-10-25)	6,6	6,6	6,5	-2,7	0,05	0,11	0,11	0,12
11-2007	7,4	7,3	7,2	-7,3	0,02	0,11	0,11	0,11
12-2007	7,2	7,2	7,1	-18,4	0,00	0,10	0,10	0,10
01-2008	8,0	7,9	7,7	-23,2	0,05	0,10	0,10	0,10
02-2008	6,8	6,7	6,6	-23,0	0,02	0,10	0,10	0,10
03-2008	6,3	6,2	6,0	-17,8	0,05	0,11	0,11	0,11
04-2008	6,0	5,9	5,9	-4,0	0,06	0,11	0,11	0,11
05-2008	4,9	4,8	4,7	5,3	0,08	0,13	0,13	0,14
06-2008	4,8	4,6	4,6	11,6	0,13	0,14	0,14	0,15
07-2008	5,4	5,2	5,1	13,4	0,15	0,14	0,14	0,14
08-2008	4,4	4,4	4,3	12,2	0,13	0,13	0,13	0,13
09-2008	7,2	7,0	6,9	5,2	0,17	0,12	0,12	0,13
10-2008	7,8	7,6	7,5	0,8	0,12	0,11	0,11	0,12
<b>Moyenne<sup>4</sup></b>	<b>6,3</b>	<b>6,2</b>	<b>6,1</b>	<b>-3,7</b>	<b>0,08</b>	<b>0,11</b>	<b>0,12</b>	<b>0,12</b>

<sup>4</sup> Les valeurs moyennes présentées ont été calculées à partir de l'ensemble des données (valides) aux 10 minutes.

HQ21004

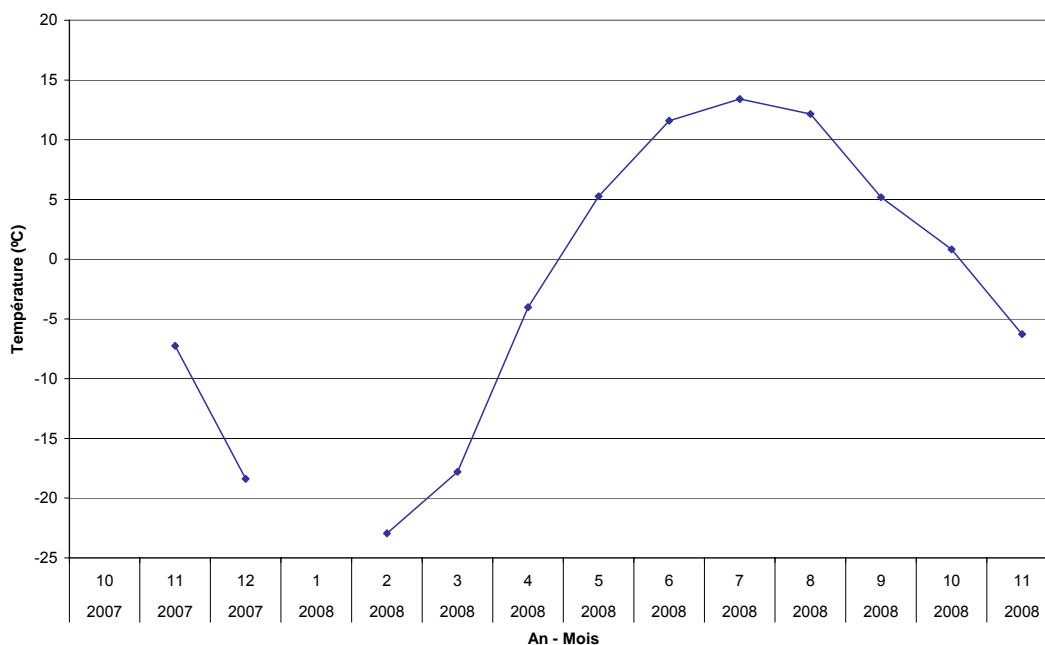


Figure 4-1 : Évolution mensuelle de la température

HQ21004

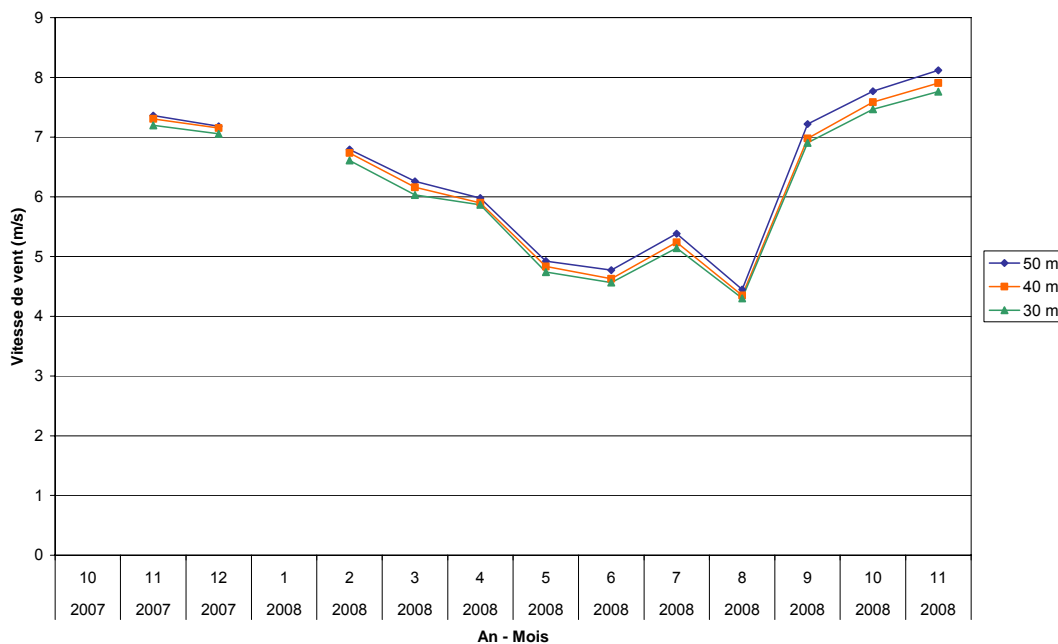
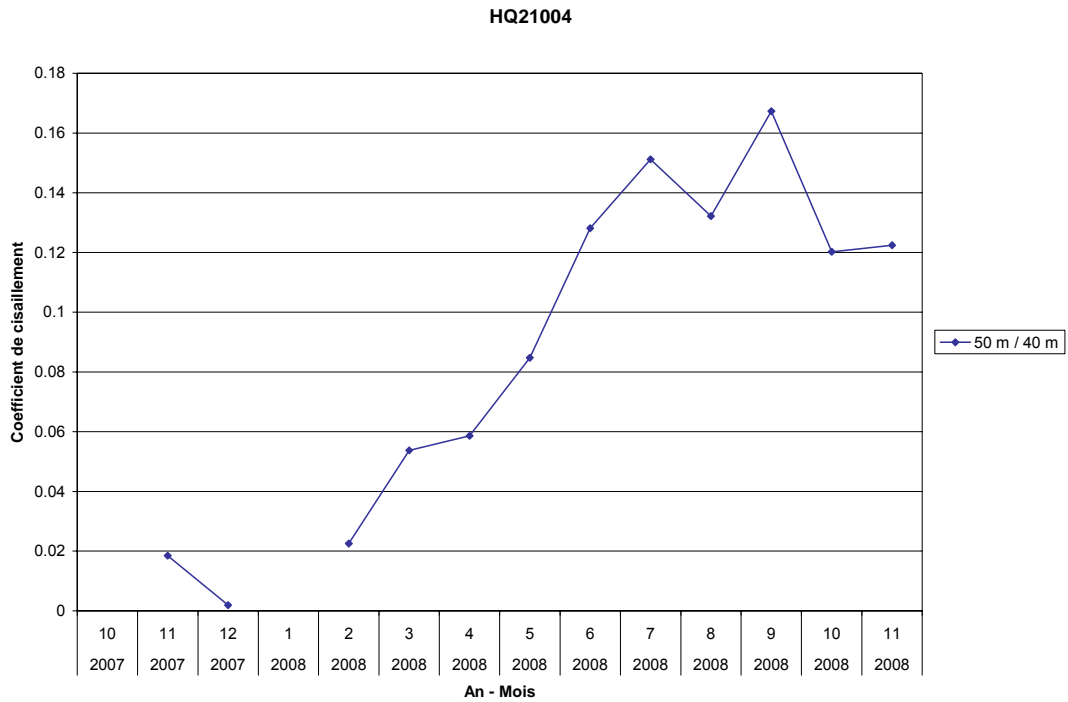
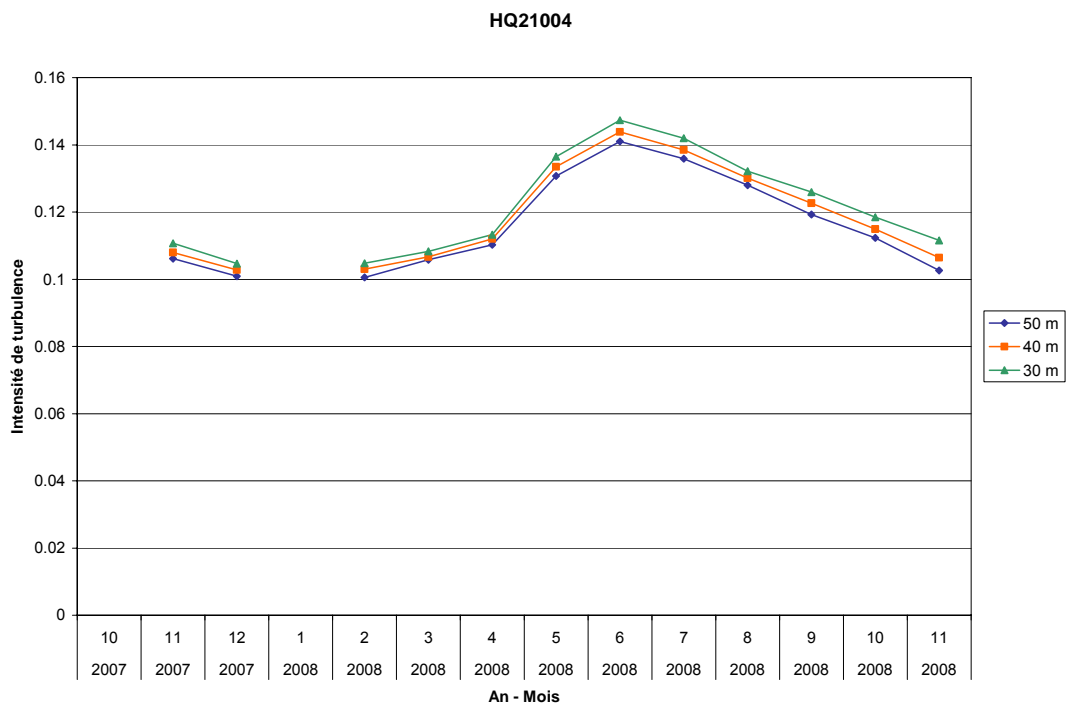


Figure 4-2 : Évolution mensuelle des vitesses du vent





**Figure 4-3 : Évolution mensuelle des coefficients de cisaillement vertical**



**Figure 4-4 : Évolution mensuelle des intensités de turbulence**

## 4.2 Évolution journalière des observations et des paramètres dérivés

Les observations météorologiques suivent souvent des cycles journaliers. Ces cycles sont principalement causés par la variation du rayonnement incident le jour et du rayonnement sortant la nuit. Le rayonnement incident augmente la température atmosphérique à la surface du sol, laquelle atteint son maximum vers l'après-midi, tandis que le rayonnement sortant tend à diminuer celle-ci pour atteindre un minimum avant le lever du soleil. 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. HéliMAX utilise également le cycle journalier comme méthode supplémentaire dans le processus de contrôle de qualité des données observées.

### 4.2.1 Cycle journalier de la température ambiante

Le cycle journalier de la température atmosphérique est le résultat direct du rayonnement solaire incident. Généralement, la température atteint un maximum en après-midi et un minimum juste avant le lever du soleil.

La Figure 4-5 montre le cycle journalier de la température pour le mât Kangiqsualujjuaq. Les observations suivent un cycle typique, c.-à-d. elles augmentent pendant la journée et diminuent en soirée.

### 4.2.2 Cycle journalier de la vitesse du vent

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 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. Ces phénomènes peuvent alors atténuer la différence observée entre le maximum et le minimum quotidiens ou même causer un minimum durant l'après-midi dans le cycle journalier.

La Figure 4-6 présente le cycle journalier de la vitesse du vent pour les sites étudiés. On remarquera que cette dernière est assez constante pendant la nuit. Cependant, elle augmente en fin d'avant-midi, pour atteindre son maximum en début d'après-midi et redescendre en fin de journée.

### 4.2.3 Cycle journalier du coefficient de cisaillement vertical du vent

À l'opposé des phénomènes cycliques observés dans les sections 4.2.1 et 4.2.2, le coefficient de cisaillement vertical du vent atteint habituellement un minimum au cours de la journée et un maximum pendant la nuit. Le cisaillement suit généralement ce type de cycle parce que, durant le jour, l'accroissement du mélange thermique vertical de l'atmosphère atténue la différence entre les vitesses du vent mesurées aux différents niveaux.

La Figure 4-7 montre le cycle journalier du coefficient de cisaillement du vent. Les valeurs sont généralement plus élevées pendant la nuit et plus basses pendant la journée.

### 4.2.4 Cycle journalier de l'intensité de turbulence

L'intensité de turbulence est également influencée par le cycle journalier du rayonnement solaire et donc par le mélange thermique vertical de l'atmosphère. Généralement, l'intensité de turbulence atteint un maximum en début d'après-midi.

La Figure 4-8 présente le cycle journalier de l'intensité de turbulence pour le site de Kangiqsualujjuaq. L'intensité de turbulence est modérée.

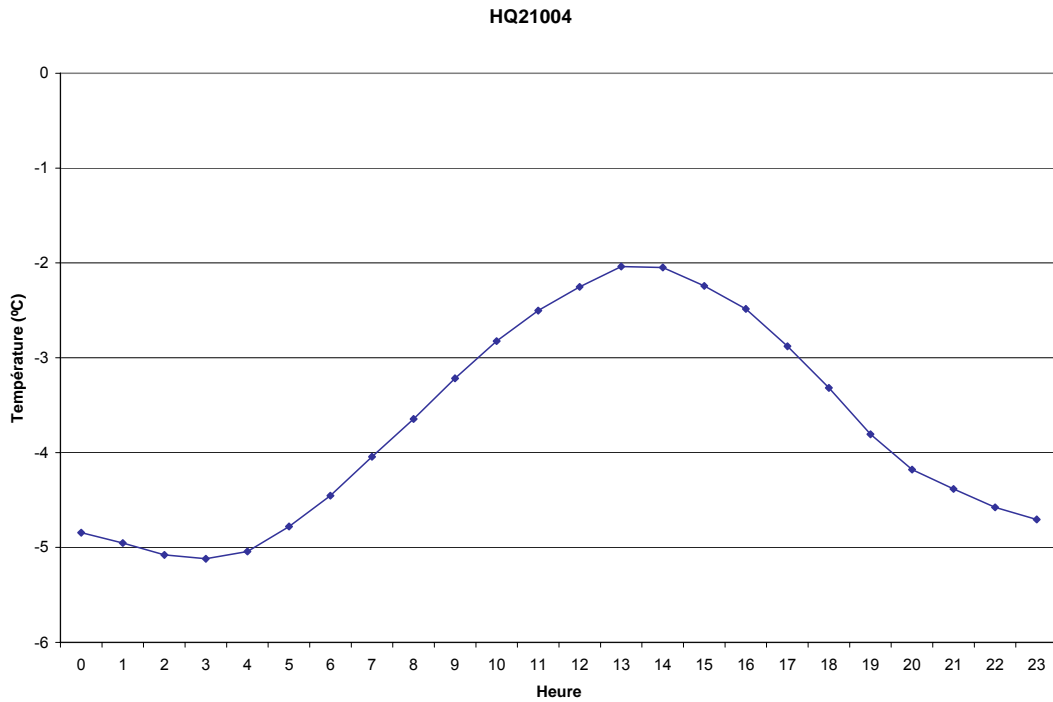


Figure 4-5 : Cycle journalier de la température

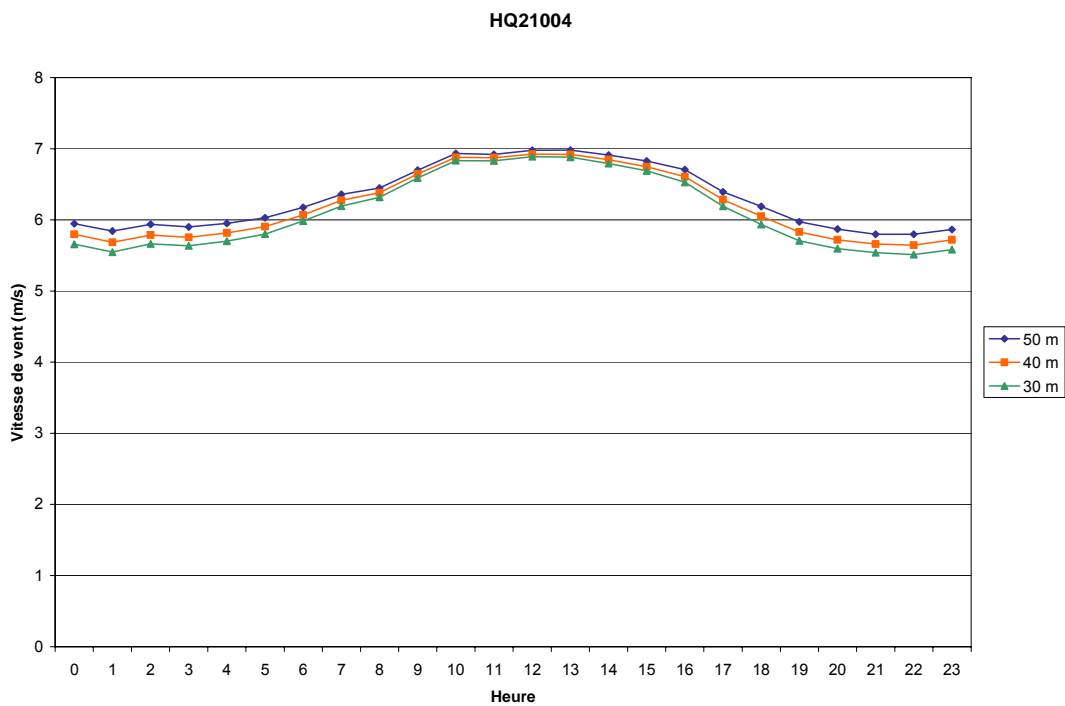


Figure 4-6 : Cycle journalier de la vitesse des vents

HQ21004

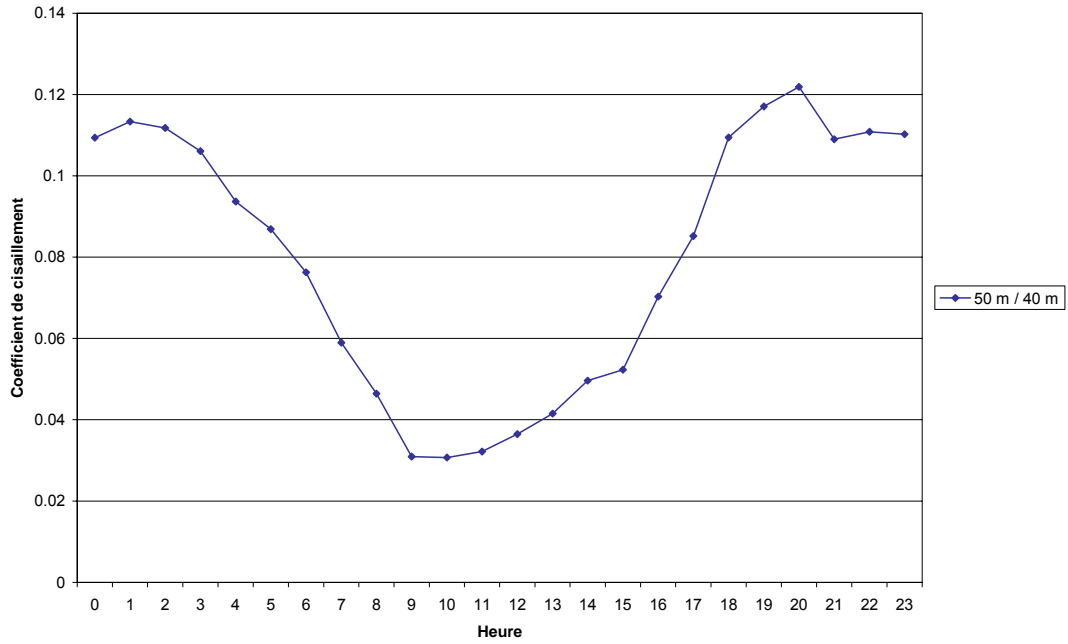


Figure 4-7 : Cycle journalier du coefficient de cisaillement vertical

HQ21004

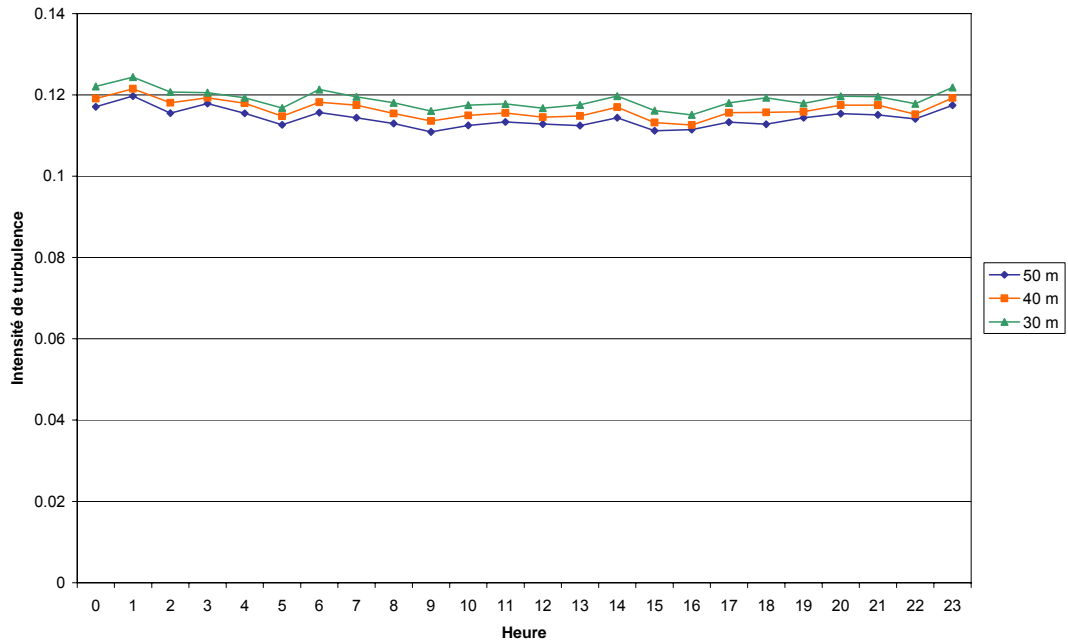


Figure 4-8 : Cycle journalier de l'intensité de turbulence

### 4.3 Distribution directionnelle des observations et des paramètres dérivés

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 ainsi que les paramètres dérivés peuvent varier en fonction de la provenance du vent. Il est donc important de quantifier la distribution directionnelle des observations et des paramètres dérivés.

#### 4.3.1 Distribution directionnelle de la vitesse 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.

La Figure 4-9 montre les roses des vents observées au mât Kangiqsualujuaq pour le niveau supérieur de mesure (50 m). La direction du vent prédominant est sud. Les tableaux de l'Annexe B montrent les données utilisées pour créer ces roses des vents.

En plus des roses des vents, la distribution directionnelle des vitesses moyennes observées au mât Kangiqsualujuaq est présentée à la Figure 4-10.

#### 4.3.2 Distribution directionnelle de la densité d'énergie

La densité d'énergie est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Par conséquent, même si la distribution directionnelle de la densité d'énergie est souvent similaire à celle de la vitesse du vent, elle présente parfois ses propres particularités.

La Figure 4-11 présente la distribution directionnelle de la densité d'énergie pour tous les niveaux d'observation de chaque mât de mesure installé à Kangiqsualujuaq. La distribution directionnelle de la densité d'énergie correspond largement à celle des vents prédominants.

#### 4.3.3 Distribution directionnelle du coefficient de cisaillement du vent

Le coefficient de cisaillement vertical du vent est influencé par l'environnement immédiat du mât de mesure ainsi que par l'environnement rencontré sur la trajectoire parcourue par le vent. Il dépend aussi de la vitesse du vent et est généralement plus élevé par vents faibles.

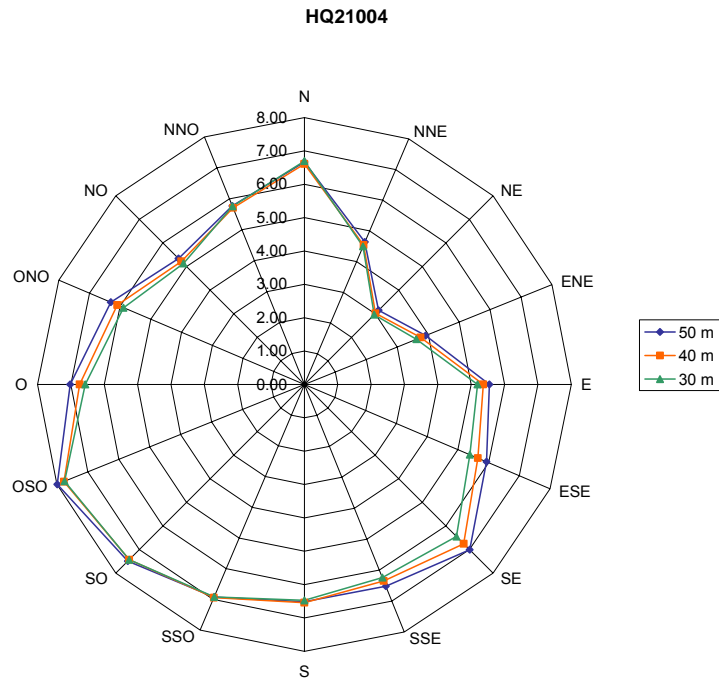
La Figure 4-12 montre la distribution directionnelle du coefficient de cisaillement vertical du vent pour le mât de mesure. Les valeurs du coefficient de cisaillement sont plus élevées dans les directions ouest et est, et plus basses dans les directions nord et sud que ce à quoi on s'attendrait pour le type de terrain sur lequel le mât est installé. Un creux est observé dans le secteur sud. Ce creux est probablement causé non par le sillage du mât mais plutôt par un changement en topographie ou en rugosité dans ce secteur.

#### 4.3.4 Distribution directionnelle de l'intensité de turbulence

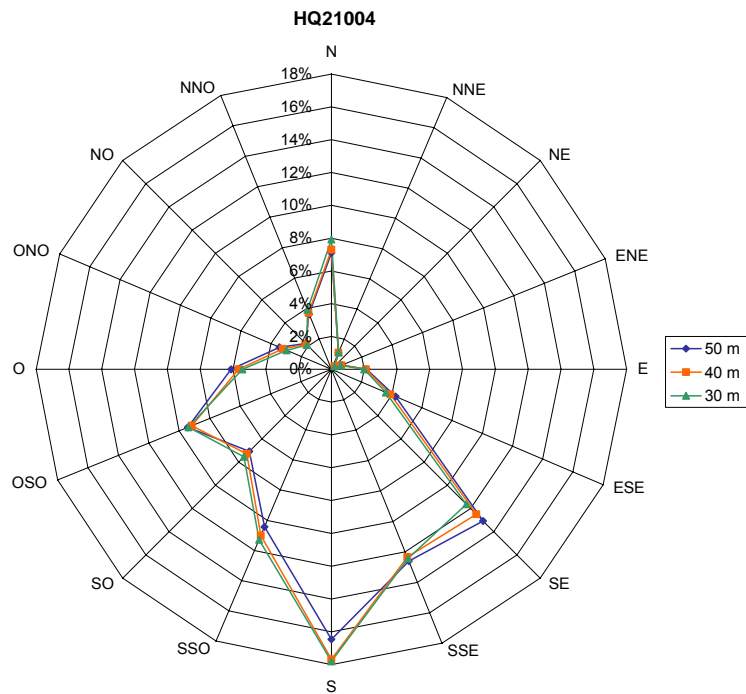
La distribution directionnelle de l'intensité de turbulence est également influencée par l'environnement immédiat autour d'un mât de mesure. Elle est généralement plus grande lorsque les vents passent au-dessus d'obstacles ou de surfaces ayant des valeurs de rugosité élevées. Cependant, l'intensité de turbulence diminue généralement avec l'altitude, puisque l'effet de la rugosité de la surface diminue avec la hauteur.

La Figure 4-13 présente les distributions directionnelles de l'intensité de turbulence. L'intensité de turbulence est modérée.





**Figure 4-10 : Distribution directionnelle des vitesses moyennes du vent (m/s)**



**Figure 4-11 : Distribution directionnelle de la densité d'énergie (%)**

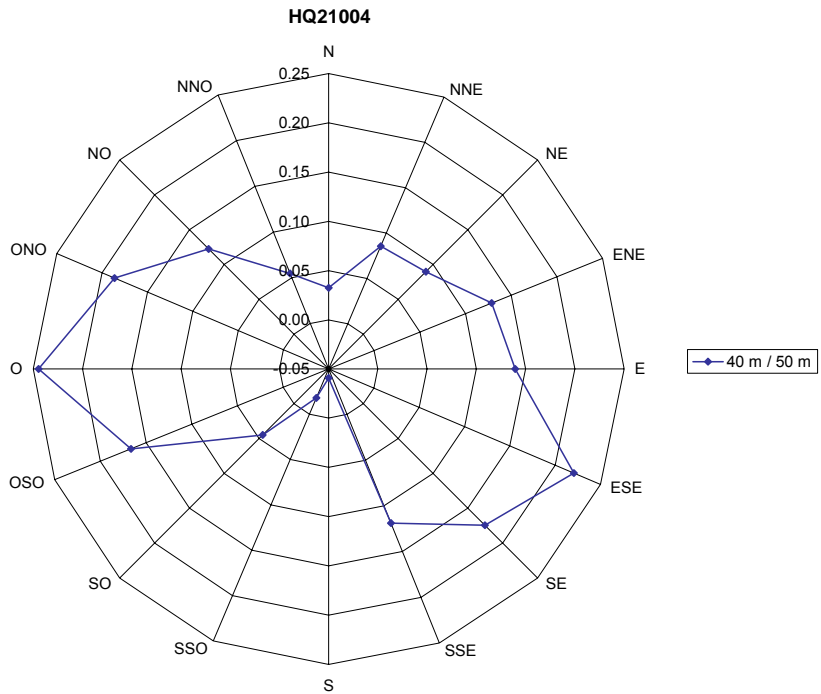


Figure 4-12 : Distribution directionnelle du coefficient de cisaillement vertical

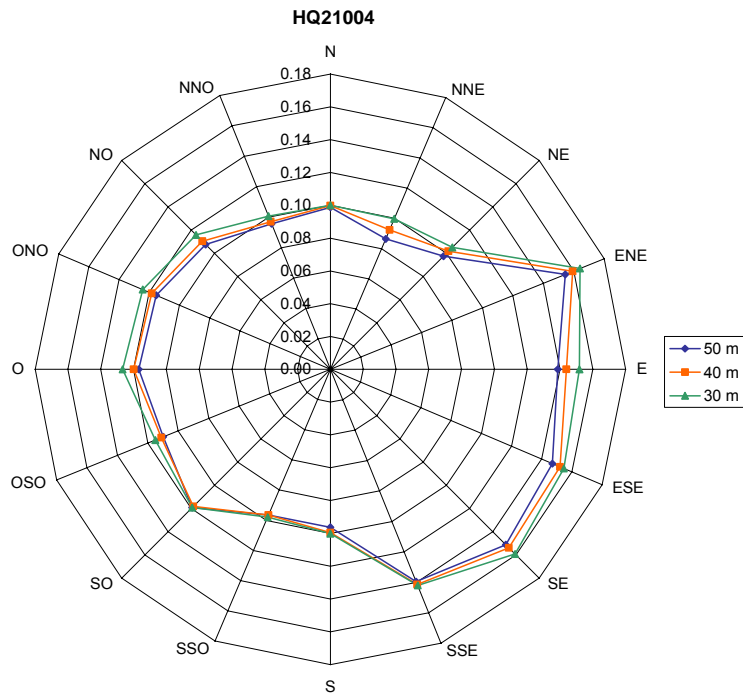


Figure 4-13 : Distribution directionnelle de l'intensité de turbulence



#### 4.4 Distribution des vitesses du vent

La distribution statistique des vitesses du vent peut varier d'un endroit à l'autre, car elle dépend des conditions climatiques locales, de la topographie et du type de terrain. Généralement, la distribution statistique de Weibull représente assez fidèlement la variation réelle des vitesses du vent observées. L'expression mathématique de la distribution de Weibull est présentée à l'Annexe C.

Les paramètres d'échelle (c) ainsi que les paramètres de forme (k) qui caractérisent la distribution des observations recueillies au niveau supérieur de mesure (50 m) du mât sont présentés au Tableau 4-2. Ces paramètres ont été calculés à partir d'un logiciel interne et validés avec WASP.

Tableau 4-2 : Paramètres de Weibull

Paramètre Weibull	Kangiqualujuaq
c	7,4
k	1,8

La Figure 4-14 présente les histogrammes des vitesses de vents observées pour le niveau supérieur de mesure (50 m). Les courbes de la fonction de distribution de Weibull sont superposées aux histogrammes. Les tableaux de l'Annexe B présentent les données utilisées pour créer les distributions statistiques de Weibull.

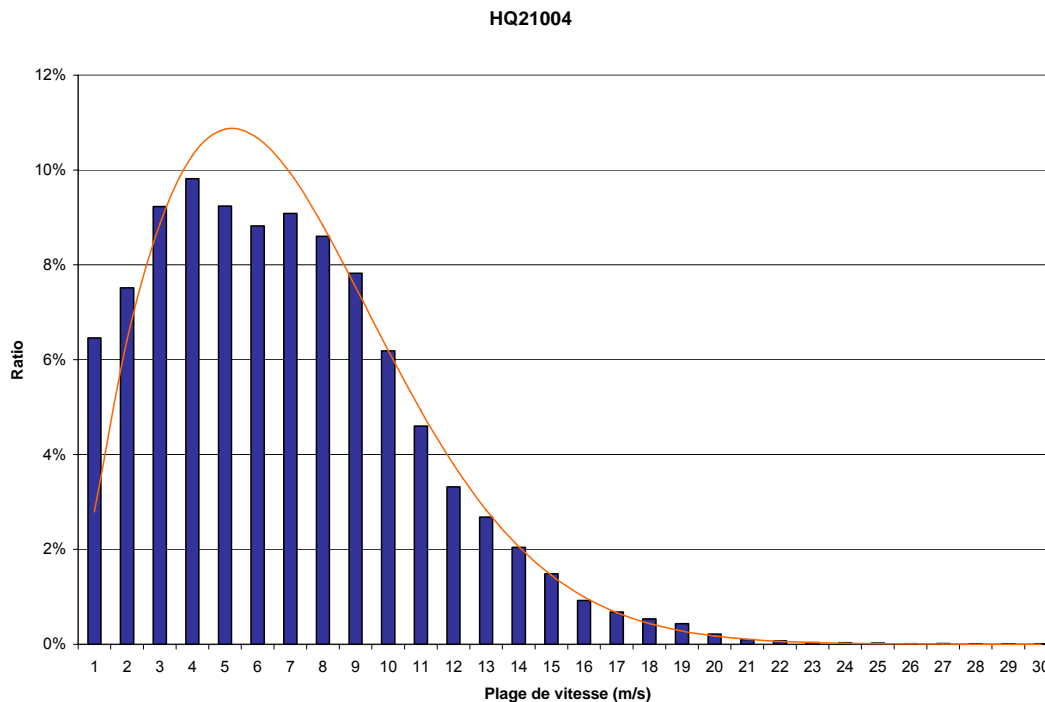


Figure 4-14 : Distribution de la fréquence des vents à 50 m

## 4.5 Variation de la turbulence avec la vitesse

Dans la couche limite atmosphérique, le vent est un écoulement d'air turbulent. De manière générale, l'intensité de turbulence est plus élevée lors des vents faibles. La caractérisation de la variation de la turbulence avec la vitesse du vent a un intérêt par le fait qu'elle permet de voir l'évolution de l'intensité de turbulence sur la plage d'opération des éoliennes.

La Figure 4-15 montre la variation de la turbulence en fonction de la vitesse du vent. La turbulence reste à peu près constante aux vitesses modérées entre 8 et 18 m/s, à une valeur située entre 0,10 et 0,12. Le mât de mesure présente des valeurs de turbulence très variables pour des vitesses supérieures à 18 m/s. Ceci est dû à une occurrence plus faible des vitesses du vent observées au-dessus de cette valeur au cours de la période de mesure.

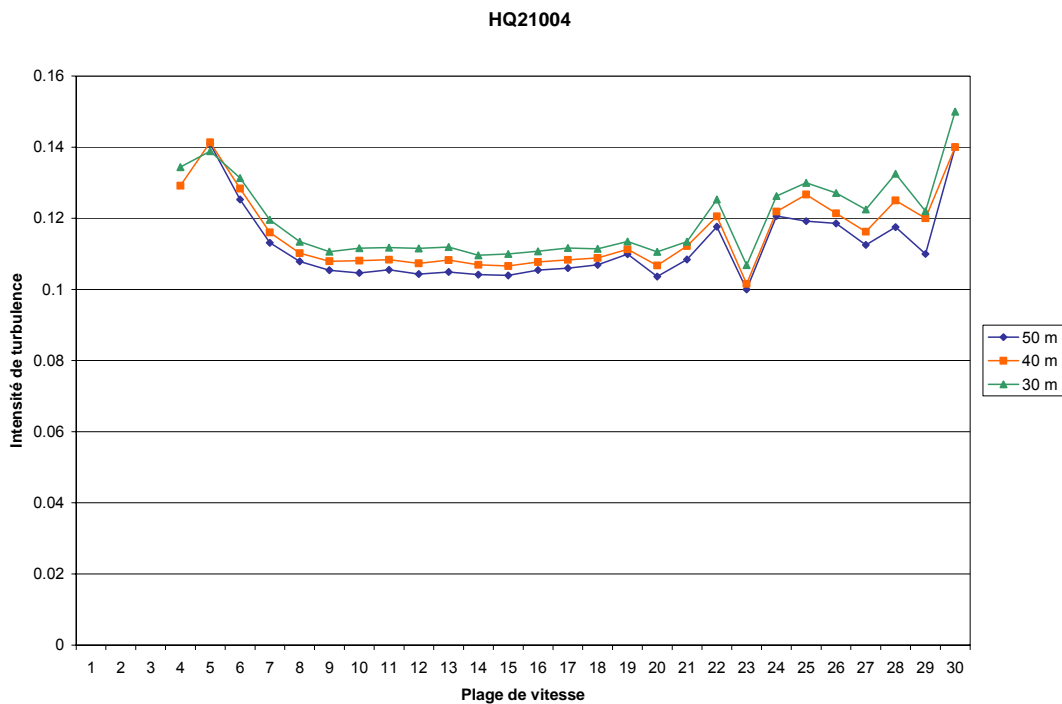


Figure 4-15 : Variation de l'intensité de turbulence classée par plage de vitesse

## 5 AJUSTEMENT CLIMATOLOGIQUE ET EXTRAPOLATION VERTICALE

Cette section décrit l'ajustement climatologique ainsi que l'extrapolation verticale à la hauteur de moyeu (pour une éolienne typique) de la vitesse du vent.

### 5.1 Ajustement climatologique des vitesses du vent

Les vitesses du vent peuvent varier significativement d'une année à l'autre en raison de la grande 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 de vent est généralement fait en recourant à plusieurs régressions linéaires multiples entre les moyennes mensuelles des vitesses observées par le mât de mesure et des vitesses observées par des stations météorologiques à proximité. Les coefficients de régression linéaire obtenus pour chacune de ces stations météorologiques sont ensuite utilisés afin de procéder à l'ajustement climatologique des vitesses observées sur le site.

L'ajustement climatologique des vitesses s'appuie sur l'équation suivante :

$$V_{\text{mât}}^{\text{climato}} = V_{\text{mât}}^{\text{courte\_période}} + \sum_{i=1}^n a_i (V_i^{\text{climato}} - V_i^{\text{courte\_période}})$$

où :

$V_i^{\text{climato}}$ :	Vitesse moyenne climatologique à une station météorologique de référence <sup>5</sup>
$V_i^{\text{courte\_période}}$ :	Vitesse moyenne d'une courte période à une station météorologique de référence
$V_{\text{mât}}^{\text{climato}}$ :	Vitesse moyenne climatologique au mât de mesure
$V_{\text{mât}}^{\text{courte\_période}}$ :	Vitesse moyenne d'une courte période au mât de mesure
1,2,...,n :	Index des stations météorologiques
$a_i$ :	Coefficients de régression linéaire

Les stations météorologiques servant à l'ajustement climatologique de la vitesse du vent sont sélectionnées en tenant compte de conditions et de critères stricts. Plusieurs stations d'Environnement Canada (EC) ont initialement été considérées, celles-ci étant à proximité du site. Des tests statistiques ont ensuite été effectués sur ces stations afin d'évaluer la corrélation entre les données des stations météorologiques et les observations de chaque mât de mesure.

Finalement, aucune station météorologique d'Environnement Canada ne présentait une corrélation adéquate avec le mât de mesure. L'ajustement climatologique a donc été fait à l'aide des points NCEP. L'emplacement du mât de Kangiqsualujuaq est situé directement au milieu d'un rectangle formé par quatre points NCEP.<sup>6</sup> C'est

<sup>5</sup> Station météorologique de référence telle que celle d'Environnement Canada

<sup>6</sup> Les données NCEP réanalysées utilisent des observations météorologiques provenant de plusieurs sources comme les radiosondes, les dropsondes, les ballons sondes, les stations météorologiques de surface, les observations marines de surface, les avions et les satellites et qui ont été introduites dans une grille tridimensionnelle globale qui utilise un modèle atmosphérique numérique (<http://www.cdc.noaa.gov>).

donc une combinaison de ces quatre points NCEP à un niveau de pression de 92,5 kPa qui a été utilisée pour faire l'ajustement climatologique de la vitesse du vent annuelle observée :

- 60°N, 67.5°O;
- 60°N, 65°O;
- 57.5°N, 67.5°O; et
- 57.5°N, 65°O.

La corrélation entre le mât de mesure et les points NCEP est présentée au Tableau 5-1. Puisqu'il y a un bon degré de corrélation, la régression linéaire est considérée comme étant satisfaisante.

## 5.2 Profil vertical de la vitesse du vent

Tel qu'indiqué à la section 4.1.3, l'industrie éolienne utilise deux lois mathématiques pour réaliser l'extrapolation verticale la vitesse du vent : la loi de la puissance et la loi logarithmique. La loi de la puissance est caractérisée par le coefficient de cisaillement vertical,  $\alpha$ , alors que la loi logarithmique est caractérisée par la longueur de rugosité  $Z_0$ <sup>7</sup>. Les expressions mathématiques de ces deux lois figurent à l'Annexe C.

La loi logarithmique est préférée puisqu'elle représente mieux le profil vertical réel du vent. Il est important de noter que de nombreux facteurs comme la topographie complexe, les obstacles, les forêts ou les rivages à proximité peuvent modifier significativement le profil du vent. De ce fait, une hauteur de déplacement est à l'occasion utilisée pour prendre en compte la présence de la végétation aux environs de la région étudiée. La hauteur de déplacement est équivalente à 2/3 de la hauteur moyenne de la végétation. Sa valeur est déterminée sur la base de données de la cartographie numérique du terrain, de photos et/ou d'informations recueillies lors de visites de site. Dans le cas présent, aucune hauteur de déplacement n'a été considérée puisque le mât est installé en terrain découvert.

La vitesse du vent extrapolée à une hauteur de moyeu d'éolienne potentielle (45 m) sont données au Tableau 5-1. Les calculs sont basés sur la loi logarithmique, tout en utilisant des valeurs horaires-mensuelles<sup>8</sup> de longueur de rugosité pour chacun des niveaux d'instrumentation.

---

<sup>7</sup> La longueur de rugosité  $Z_0$  est un paramètre utilisé lors de la modélisation des vitesses des vents. Elle est calculée à partir des données météorologiques recueillies sur site, tout en tenant compte des hauteurs de déplacement, le cas échéant.

<sup>8</sup> Moyennes horaires des longueurs de rugosité pour une journée moyenne de chaque mois

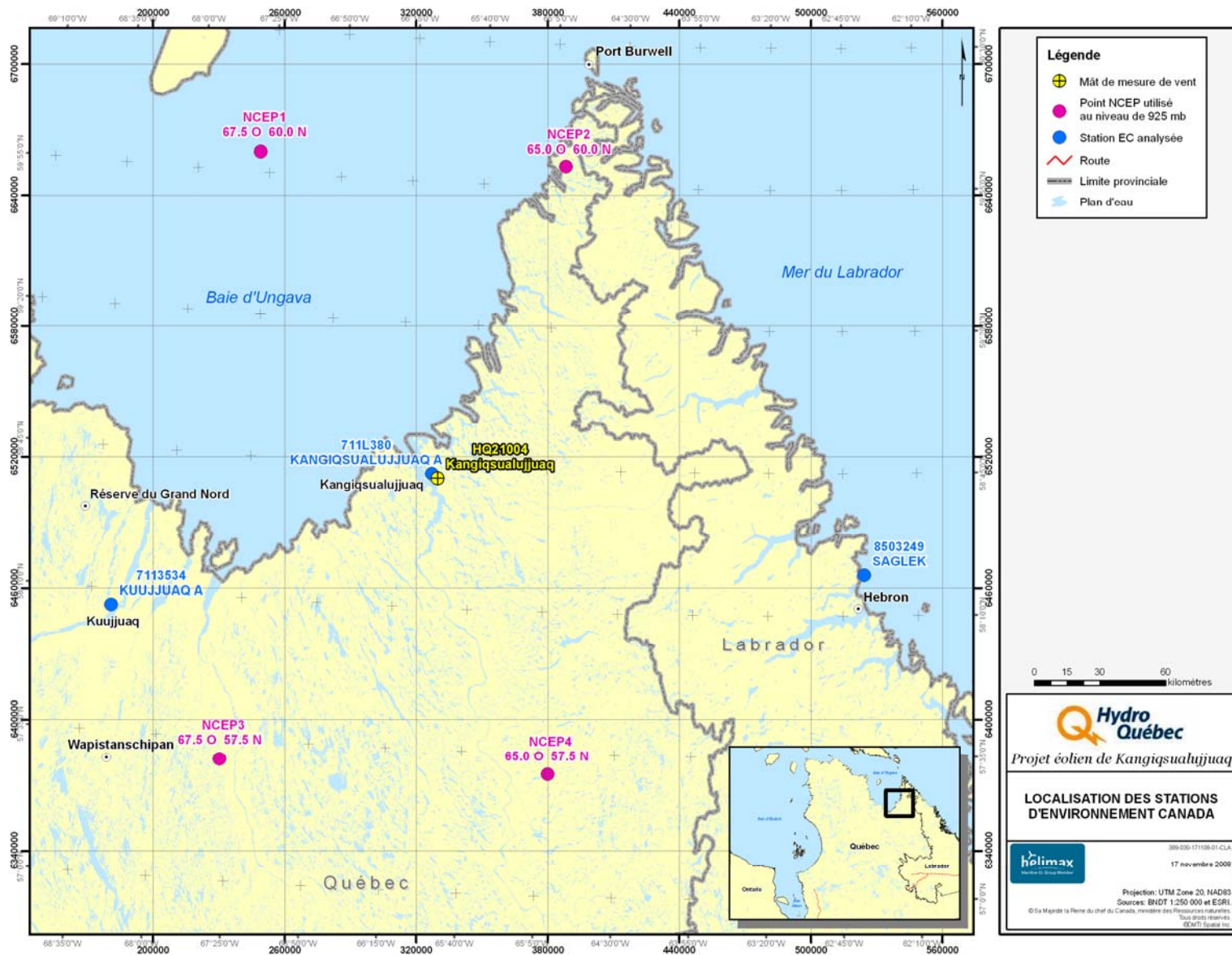


Figure 5-1 : Localisation des stations météorologiques et des points NCEP analysés et/ou utilisés pour l'ajustement climatique des vitesses de vent

**Tableau 5-1 : Tableau sommaire général**

<b>Informations générales</b>	
Nom de la station	Kangiqualujuaq
Numéro d'identification de la station	HQ21004
Élévation du terrain (m)	94
Période d'observation	2007-10-20 – 2008-10-31
Taux de recouvrement de la vitesse au niveau supérieur	voir le Tableau 3-2
<b>Vitesses du vent observées</b>	
30 m au-dessus du sol (m/s)	6,1
40 m au-dessus du sol (m/s)	6,2
50 m au-dessus du sol (m/s)	6,3
<b>Intensité de turbulence</b>	
Intensité de turbulence (IT)	0,11
Hauteur utilisée pour IT (m)	50
<b>Longueur de rugosité et coefficient de cisaillement</b>	
Longueur de rugosité de la surface $Z_0$ (m)	0,0000012
Hauteurs de référence pour $Z_0$	50 m – 40 m – 30 m
Coefficient de cisaillement vertical $\alpha$	0,08
Hauteurs de référence pour $\alpha$	50 m – 40 m
<b>Ajustement climatologique de la vitesse du vent</b>	
Points NCEP utilisés pour l'ajustement	60°N, 67,5°O; 60°N, 65°O; 57,5°N, 67,5°O; 57,5°N, 65°O (à 92,5 kPa)
Période utilisée pour l'ajustement	1998-2007
$R^2$	0,92
<b>Vitesse du vent, après ajustement climatologique</b>	
Vitesse à 30 m (m/s)	6,2
Vitesse à 40 m (m/s)	6,3
<b>Vitesse du vent, après ajustement climatologique et extrapolation verticale</b>	
Vitesse à 45 m (m/s)	6,3

## 6 CARTOGRAPHIE DE LA RESSOURCE ÉOLIENNE

Dans le cadre de cette analyse, la carte des vitesses du vent a été réalisée à l'aide du programme WASP<sup>9</sup>, dont une description générale est fournie à l'Annexe D. Ce programme calcule les valeurs des vitesses du vent et leurs distributions directionnelles à une hauteur déterminée au-dessus du niveau du sol; il produit ainsi un champ représentant la variation spatiale du gisement éolien. Pour réaliser ceci, le modèle a besoin des données suivantes :

- le champ de données altimétriques numériques du domaine à modéliser;
- les valeurs de rugosité de surface pour le domaine, y compris les obstacles;
- les données de vent mesurées et ajustées climatologiquement pour chaque mât de mesure anémométrique située dans le domaine du projet.

Les données d'entrée utilisées pour exécuter le programme WASP sont présentées au Tableau 6-1. La Figure 6-1 et la Figure 6-2 montrent respectivement la carte topographique et la carte de rugosité de surface du site qui ont servi à l'exécution du programme WASP. Les données météorologiques utilisées dans le modèle sont les observations recueillies au niveau de mesure de 30 m du mât Kangiqsualujuaq, après l'ajustement climatologique (première simulation) et les observations recueillies au niveau de 40 m du même mât, après l'ajustement climatologique et l'extrapolation à 45 m, à l'aide du  $Z_0$  mensuel horaire (deuxième simulation).

**Tableau 6-1 : Données d'entrée du modèle WASP**

Données d'entrée	Source des données	
<b>Données géographiques</b>		
Topographie	Carte 1 : 50 000, Géobase	
Rugosité de surface	Carte 1 : 50 000, Base nationale de données topographiques	
<b>Données météorologiques</b>		
Mât et niveau d'instrumentation	Kangiqsualujuaq (HQ21004) à 30 m	Kangiqsualujuaq (HQ21004) à 40 m et extrapolé à 45 m
Période des données utilisées pour la simulation	2007-11-01 – 2008-10-31	2007-11-01 – 2008-10-31

Ces données sont entrées dans le programme de modélisation WASP pour créer un champ de vitesses de 50 m de résolution, à deux hauteurs de moyeu potentielles (30 m et 45 m), sur le site correspondant à l'emplacement du futur parc éolien. Les dimensions du domaine du site sont choisies de manière à se conformer aux conditions de base requises par le modèle. Les cartes des vents produites par le programme WASP peuvent être utilisées pour réaliser l'analyse du productible énergétique.

Les cartes des vitesses du vent et des densités de puissance sont respectivement présentées de Figure 6-3 à Figure 6-6.

<sup>9</sup> Wind Atlas Analysis and Application Program du service Wind Energy Department du Risø National Laboratory.

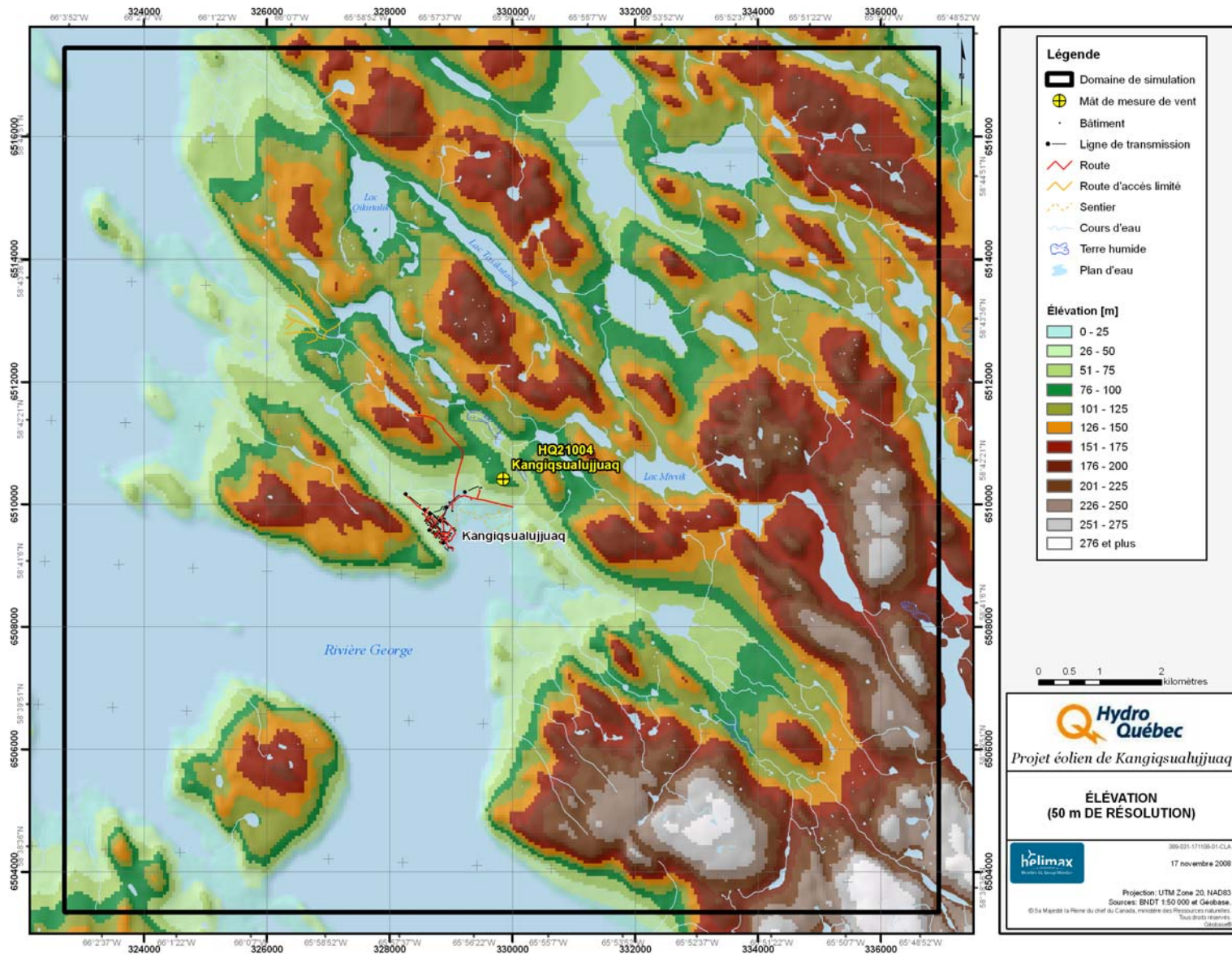


Figure 6-1 : Carte topographique du domaine



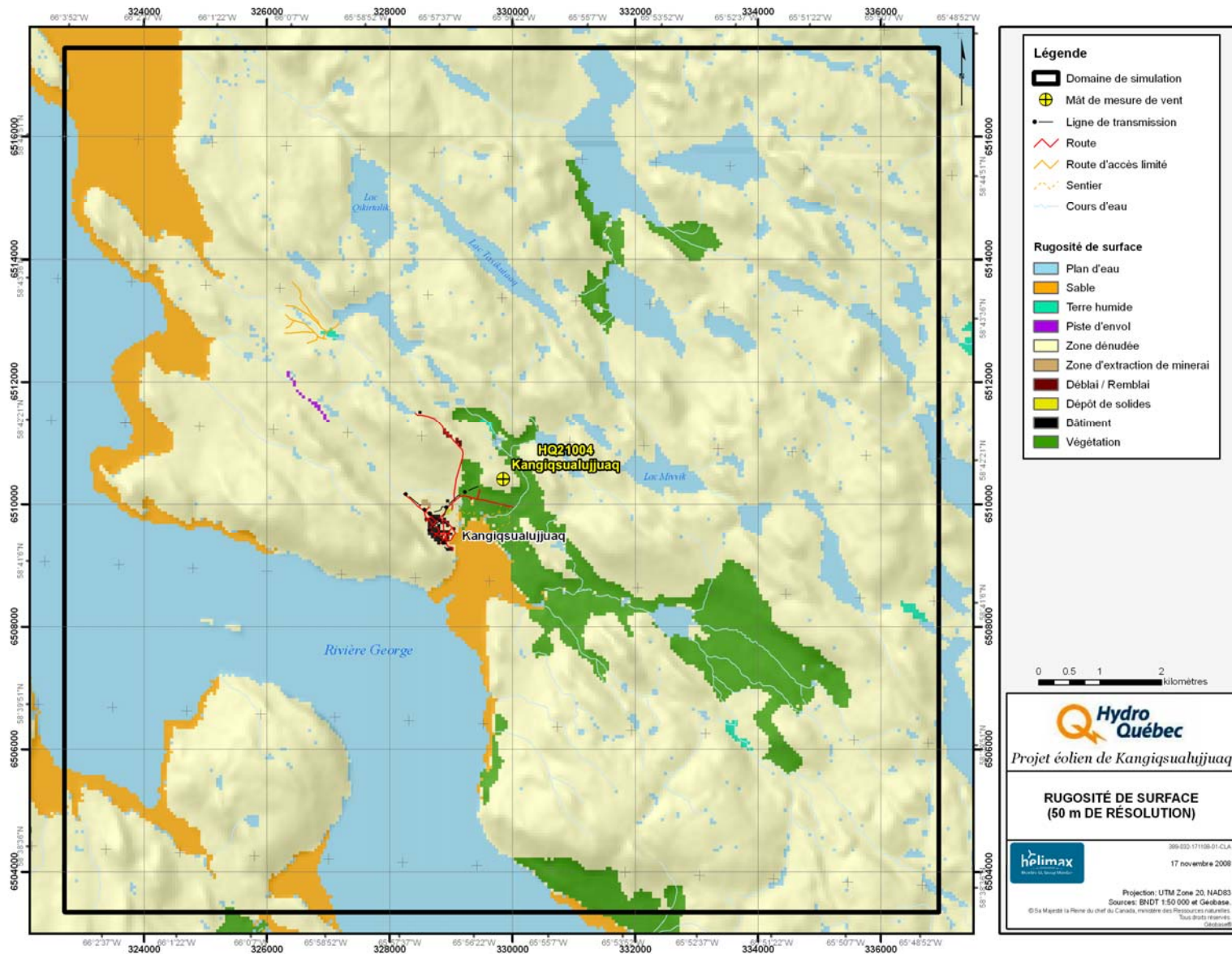


Figure 6-2 : Carte de la rugosité de surface du domaine

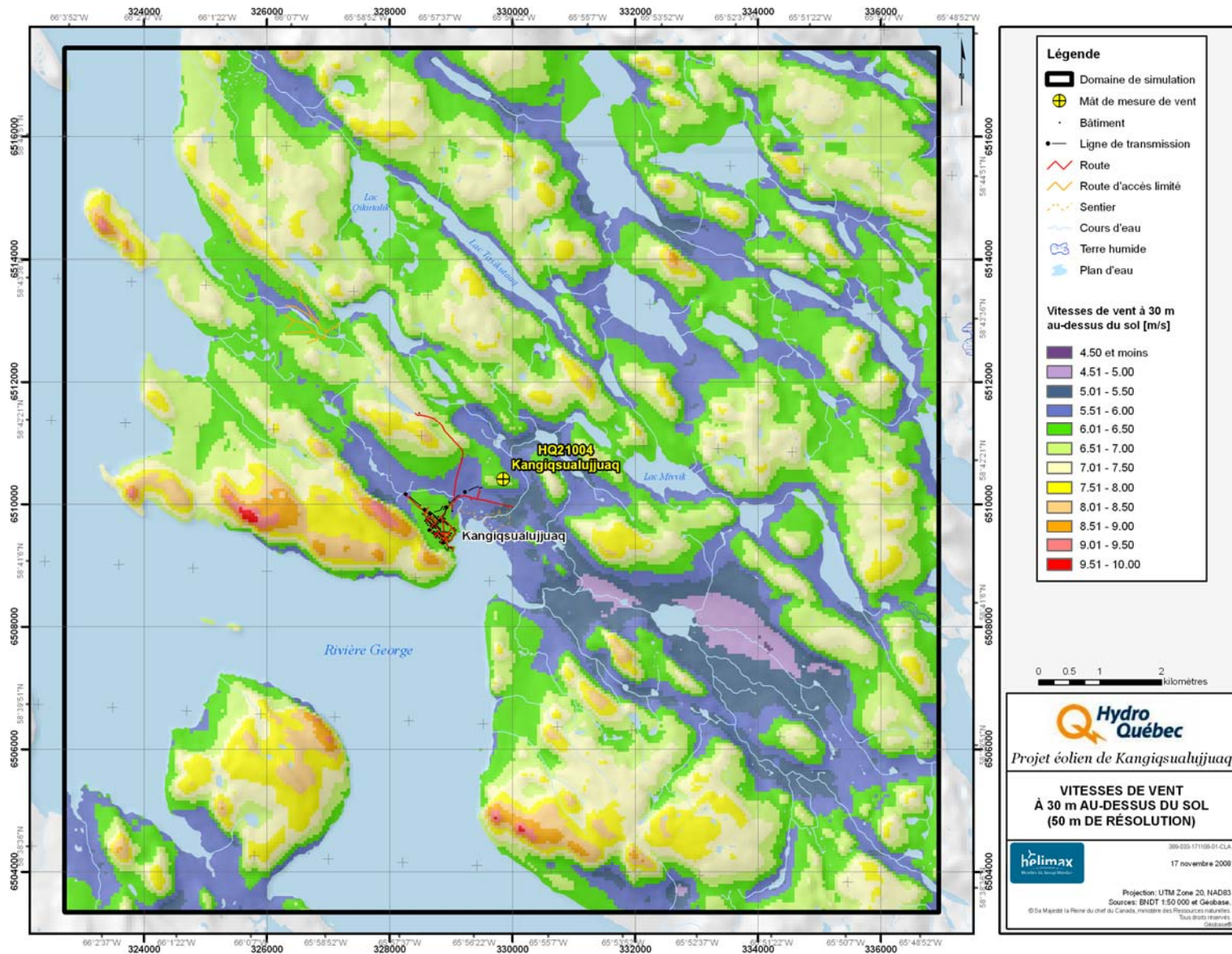


Figure 6-3 : Carte de la vitesse des vents du domaine, à 30 m au-dessus du sol

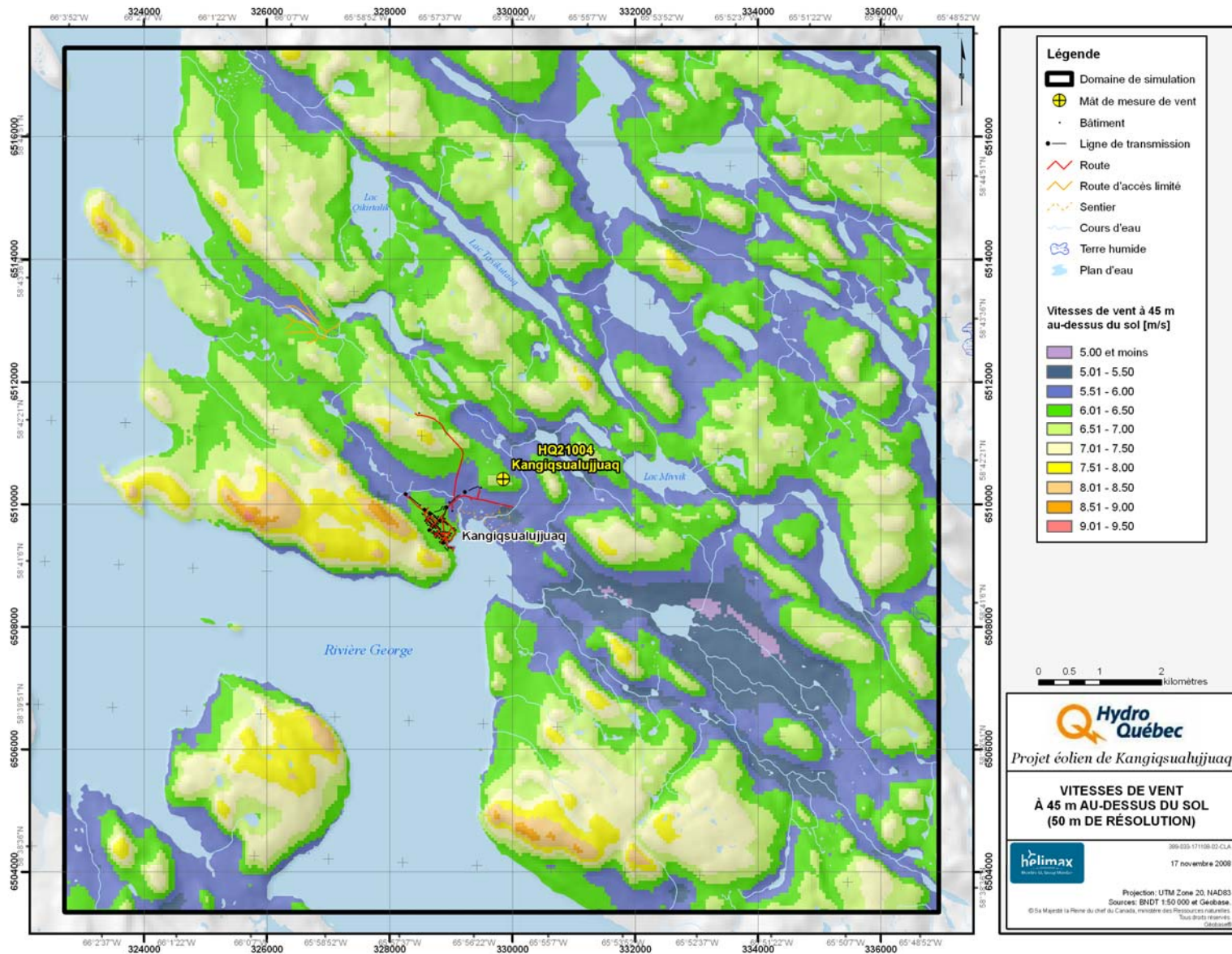


Figure 6-4 : Carte de la vitesse des vents du domaine, à 45 m au-dessus du sol

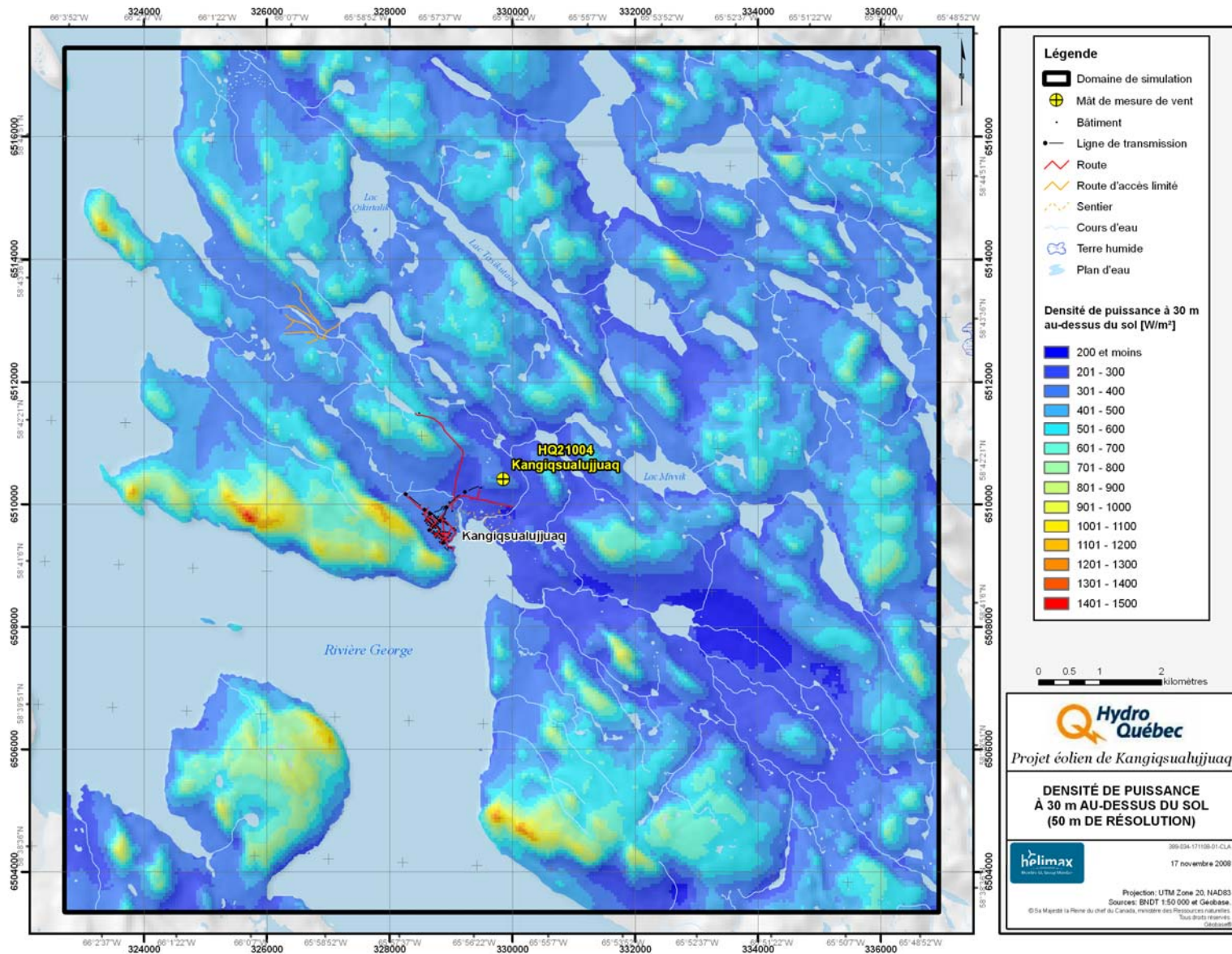


Figure 6-5 : Carte de la densité de puissance du domaine, à 30 m au-dessus du sol

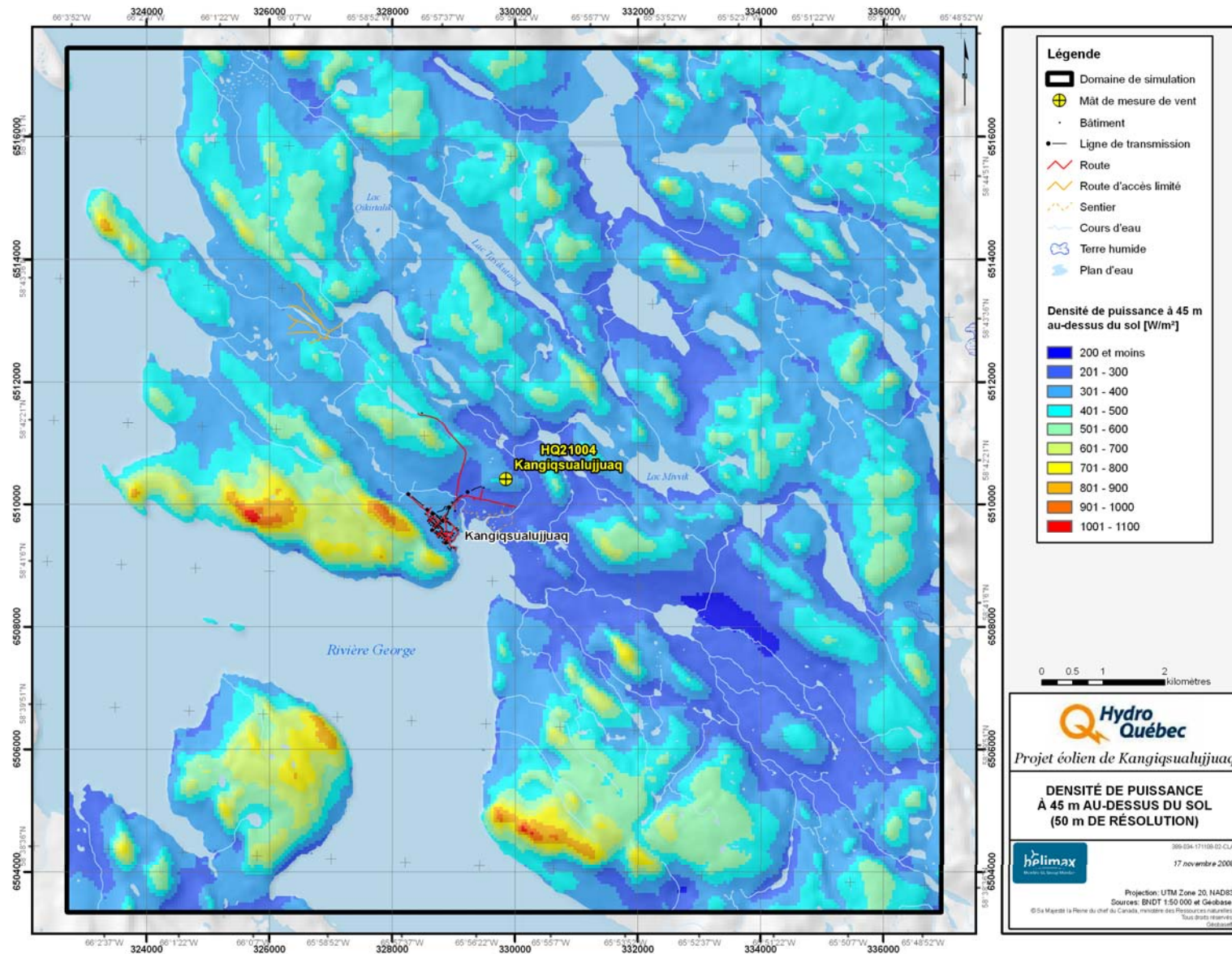


Figure 6-6 : Carte de la densité de puissance du domaine, à 45 m au-dessus du sol

## 7 DISCUSSION DES RÉSULTATS

En se fiant à son expertise professionnelle et aux méthodes d'usage dans l'industrie, Hélimax a combiné un contrôle de qualité rigoureux avec une analyse exhaustive des données pour réaliser une étude approfondie du gisement éolien sur le domaine du projet de Kangiqsualujjuaq, basée sur des observations recueillies sur une période de 12 mois. À l'issue de cette analyse, Hélimax conclut que la campagne d'évaluation de la ressource éolienne a fourni des observations valables. Cependant, le mât de mesure a subi des périodes de glace, qui a diminué les taux de recouvrement de certains instruments pendant les mois d'hiver.

Le Tableau 7-1 présente le sommaire des résultats obtenus à la suite de l'analyse météorologique. Ces résultats doivent être interprétés en tenant compte des taux de recouvrement présentés dans la Section 3.3.

Tableau 7-1 : Sommaire des résultats de l'analyse météorologique

	Kangiqsualujjuaq
Période de l'analyse météorologique	2007-10-20 – 2008-10-31
Vitesse moyenne du vent observée à 30 m (m/s)	6,1
Vitesse moyenne du vent observée à 40 m (m/s)	6,2
Vitesse moyenne du vent observée à 50 m (m/s)	6,3
Vitesse du vent annuelle ajustée à long terme – 30 m (m/s)	6,2
Vitesse du vent annuelle ajustée à long terme – 40 m (m/s)	6,3
Vitesse du vent annuelle, après ajustement climatologique et extrapolation à 45 m (m/s)	6,3

Il est important de noter qu'un niveau d'incertitude devra être associé aux valeurs présentées au Tableau 7-1 en raison des facteurs suivants :

- **la période de mesure** : Il est cependant important de noter qu'un niveau d'incertitude est associé à ces valeurs bien que les données analysées soient issues d'une période d'observation de 12 mois. L'incertitude associée à cette variable diminuera au fur et à mesure que davantage de données seront recueillies.
- **les mesures des vitesses des vents** : ce facteur comprend les incertitudes associées à l'installation, au calibrage, au vieillissement, à la survitesse, ainsi qu'à la verticalité des instruments, de même qu'à la distorsion engendrée par le mât ou les bras de montage.
- **l'ajustement climatologique** : même si la représentativité des vitesses enregistrées sur site a été vérifiée avec des points NCEP de référence, il demeure un certain degré d'incertitude associée à la vitesse après ajustement climatologique.
- **l'extrapolation verticale** : l'incertitude associée à la loi logarithmique utilisée pour caractériser le profil vertical du vent est principalement due aux paramètres d'extrapolation déduits.
- **l'extrapolation horizontale (modélisation WAsP)** sur le domaine du projet, y compris les incertitudes associées au modèle, à la complexité du terrain, à la qualité des données topographiques et de rugosité, ainsi qu'aux distances entre les éoliennes et le mât de mesure.
- **la variabilité interannuelle** est une caractéristique du vent qui ne peut pas être atténuée par l'allongement de la période d'observation. 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 climatique.

Bien qu'elle n'ait pas été évaluée dans le présent rapport, l'incertitude associée aux facteurs énumérés ci-haut pourrait faire l'objet d'une analyse lors d'une phase ultérieure du projet

Par ailleurs, il est important de noter que l'impact potentiel des changements climatiques sur la ressource éolienne n'a pas été pris en compte dans la présente analyse.

## ANNEXE A TESTS DE CONTRÔLE DE QUALITÉ

N°	Nom du test	Critères <sup>10</sup>	Description / Commentaires
1	Test sur la continuité des enregistrements		Ce test vérifie la continuité des enregistrements. Il est utilisé pour identifier les vides temporels.
2	Test des valeurs de la vitesse du vent (V)	$0 \leq V \leq 25$ (m/s)	Ces tests permettent de s'assurer que les valeurs mesurées sont comprises dans des intervalles météorologiques acceptables.
3	Test des valeurs de l'écart type de la vitesse du vent ( $\sigma$ )	$0 \leq \sigma_V \leq 3$ (m/s)	
4	Test des valeurs de la direction du vent (Dir)	$0 \leq Dir \leq 360$ (°)	
5	Test des valeurs de l'écart type de la direction du vent ( $\sigma$ )	$0 \leq \sigma_{Dir} \leq 75$ (°)	
6	Test des valeurs de la température (T)	$-40 \leq T \leq 40$ (°C)	
7	Test des vents calmes	$V \leq 1$ (m/s)	Lorsque la vitesse du vent est inférieure à un certain seuil minimal (habituellement de l'ordre de 1 m/s), la force du vent n'est pas suffisante pour activer la girouette. Les lectures de direction sont alors considérées comme indéfinies.
8	Test des variations temporelles de la vitesse du vent sur 3 heures	$ V_i - V_{i-1}  \geq 0.1$ (m/s) $\forall V$ plus de 3 heures	Les tests pour les variations temporelles permettent de s'assurer que les observations ont suffisamment évolué pendant une période de temps donnée.
9	Test des variations temporelles de la vitesse du vent sur 12 heures	$ V_i - V_{i-1}  \geq 0.5$ (m/s) $\forall V$ plus de 12 heures	
10	Test des variations temporelles de la direction du vent sur 3 heures	$ Dir_i - Dir_{i-1}  \geq 1$ (°) $\forall Dir$ plus de 3 heures	
11	Test des variations temporelles de la direction du vent sur 18 heures	$ Dir_i - Dir_{i-1}  \geq 10$ (°) $\forall Dir$ plus de 18 heures	
12	Test des variations temporelles de la température sur 12 heures	$ T_i - T_{i-1}  \geq 0.5$ (°C) $\forall Dir$ plus 12 heures	
13	Test de la variation temporelle en continue de la température	$ T_i - T_{i-1}  \leq 1.9$ (°C)	
14	Test de cisaillement vertical de la vitesse du vent	$-0.6 \leq V_B - V_A \leq 3$ (m/s)	Les tests de variation verticale permettent de s'assurer que la différence entre la lecture de deux instruments à des hauteurs différentes (soit A et B) est physiquement possible. Un test doit être fait pour chaque paire d'instruments.
15	Test de cisaillement vertical de la direction du vent	$ Dir_B - Dir_A  \leq 20$ (°)	

<sup>10</sup> Il est important de noter que les valeurs minimales et maximales spécifiées dans ce tableau représentent les valeurs standards couramment utilisées. Toutefois, le météorologue ajustera ces valeurs en fonction des conditions météorologiques particulières d'un site en se fiant à son jugement professionnel.



## ANNEXE B DISTRIBUTION DE LA VITESSE DU VENT

Distribution directionnelle de la vitesse du vent (%) à 50 m

Vitesse de vent (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSO	SO	OSO	O	ONO	NO	NNO	Total
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,01
2	0,42	0,35	0,44	0,40	0,37	0,46	0,60	0,91	1,03	0,62	0,27	0,28	0,28	0,29	0,37	0,32	7,41
3	0,44	0,37	0,50	0,32	0,36	0,57	0,89	1,13	1,38	0,72	0,32	0,39	0,43	0,48	0,51	0,42	9,22
4	0,50	0,33	0,47	0,34	0,23	0,49	0,79	1,11	1,64	0,81	0,30	0,41	0,54	0,53	0,68	0,65	9,83
5	0,61	0,33	0,23	0,21	0,21	0,44	0,70	1,00	1,68	0,73	0,32	0,27	0,41	0,44	0,99	0,69	9,27
6	0,57	0,38	0,21	0,17	0,16	0,33	0,64	0,99	2,12	0,58	0,42	0,23	0,42	0,36	0,80	0,56	8,94
7	0,62	0,35	0,11	0,13	0,17	0,29	0,69	1,14	2,68	0,64	0,41	0,26	0,40	0,28	0,54	0,44	9,15
8	0,40	0,22	0,05	0,14	0,19	0,30	0,66	1,09	2,57	0,87	0,54	0,39	0,41	0,18	0,31	0,37	8,68
9	0,30	0,17	0,02	0,07	0,17	0,35	0,61	0,87	2,09	1,08	0,73	0,39	0,37	0,24	0,32	0,16	7,92
10	0,21	0,12	0,01	0,05	0,20	0,30	0,60	0,80	1,24	0,96	0,60	0,36	0,33	0,24	0,17	0,11	6,28
11	0,24	0,04	0,01	0,03	0,16	0,19	0,48	0,67	0,84	0,72	0,41	0,30	0,25	0,16	0,06	0,10	4,65
12	0,13	0,06	0,00	0,02	0,10	0,20	0,46	0,46	0,50	0,49	0,30	0,21	0,22	0,09	0,04	0,08	3,36
13	0,12	0,01	0,00	0,02	0,07	0,15	0,28	0,33	0,54	0,32	0,20	0,20	0,25	0,10	0,03	0,06	2,68
14	0,08	0,00	0,00	0,02	0,04	0,10	0,15	0,28	0,51	0,19	0,16	0,18	0,15	0,07	0,02	0,06	2,00
15	0,07	0,00	0,00	0,00	0,03	0,06	0,15	0,20	0,26	0,15	0,12	0,20	0,10	0,06	0,01	0,05	1,47
16	0,09	0,00	0,00	0,01	0,03	0,05	0,11	0,12	0,07	0,11	0,04	0,14	0,09	0,03	0,01	0,03	0,92
17	0,07	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04	0,06	0,12	0,04	0,06	0,04	0,14	0,06	0,02	0,00	0,02	0,68
18	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,07	0,08	0,03	0,03	0,02	0,12	0,05	0,02	0,00	0,02	0,55
19	0,11	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,06	0,05	0,01	0,02	0,01	0,08	0,02	0,03	0,01	0,03	0,44
20	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,03	0,00	0,01	0,00	0,04	0,01	0,01	0,00	0,02	0,22
21	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,01	0,02	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,10
22	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08
23	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04
24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03
25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Total</b>	<b>5,12</b>	<b>2,73</b>	<b>2,05</b>	<b>1,93</b>	<b>2,50</b>	<b>4,35</b>	<b>8,18</b>	<b>11,39</b>	<b>19,21</b>	<b>9,12</b>	<b>5,26</b>	<b>4,62</b>	<b>4,80</b>	<b>3,64</b>	<b>4,88</b>	<b>4,20</b>	<b>100,00</b>

Distribution des fréquences de vent (%) réparties par plage de 1 m/s

Vitesse du vent (m/s)	Kangiqualujuaq – Distribution à 50 m (%)
1	6,46
2	7,52
3	9,23
4	9,82
5	9,24
6	8,82
7	9,08
8	8,61
9	7,82
10	6,19
11	4,60
12	3,32
13	2,68
14	2,04
15	1,49
16	0,92
17	0,68
18	0,53
19	0,43
20	0,21
21	0,10
22	0,07
23	0,04
24	0,03
25	0,02
26	0,01
27	0,02
28	0,01
29	0,01
30	0,00
<b>Total</b>	<b>100,00</b>
c	7,4
k	1,8

## ANNEXE C CONCEPTS MÉTÉOROLOGIQUES

### Partie A : Densité de l'air

La relation entre la densité de l'air et la température est donnée par :

$$\rho = \frac{1000 P}{R_d (T + 273.15)} \quad (\text{A.1})$$

où :

- $\rho$  : densité (kg/m<sup>3</sup>)
- $R_d$  : constante des gaz parfaits (287 J K<sup>-1</sup> kg<sup>-1</sup>)
- $T$  : température (°C)
- $P$  : pression atmosphérique (kPa)

Lorsque seulement la température est disponible pour un site, la densité de l'air peut être obtenue à l'aide de l'équation suivante :

$$\rho = \frac{1000 P_0}{R_d (T + 273.15)} \exp\left(-\frac{gZ}{R_d (T + 273.15)}\right) \quad (\text{A.2})$$

où :

- $\rho$  : densité (kg/m<sup>3</sup>)
- $P_0$  : densité de pression atmosphérique standard (101,33 kPa)
- $R_d$  : constante des gaz parfaits (287 J K<sup>-1</sup> kg<sup>-1</sup>)
- $T$  : température (°C)
- $g$  : constante gravitationnelle (9,81 m/s)
- $Z$  : hauteur au-dessus du niveau de la mer (m)

### Partie B : Densité de l'énergie

La densité de l'énergie dépend de la densité de l'air et de la vitesse du vent. La densité de l'énergie moyenne dans un intervalle de temps  $\Delta t$  est définie de la manière suivante :

$$\bar{e} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \rho V_i^3 \Delta t \quad (\text{B.1})$$

où :

- $\bar{e}$  : Densité de l'énergie moyenne (Wh/m<sup>2</sup>)
- $\rho$  : Densité de l'air (kg/m<sup>3</sup>)
- $V_i$  : Vitesse du vent horaire moyenne (m/s)
- $N$  : Nombre d'observations horaires dans une période de temps donnée
- $\Delta t$  : Intervalles d'observations ( $\Delta t = 1$  heure)

Lorsque la densité de l'énergie est calculée avec la vitesse moyenne du vent  $V$  (se référer à la Partie F concernant la distribution de Weibull), l'équation B.1 présentée ci-dessus est remplacée par la suivante :

$$\bar{e} = \frac{1}{2} \rho (c^3) \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (\text{B.2})$$

où :

- $\bar{e}$  : Densité de l'énergie moyenne (Wh/m<sup>2</sup>)
- $\rho$  : Densité de l'air (kg/m<sup>3</sup>)
- $c$  : Facteur d'échelle de la distribution de Weibull (m/s)
- $k$  : Facteur de forme de la distribution de Weibull
- $\Gamma$  : Fonction Gamma

### Partie C : Coefficient de cisaillement vertical – Loi de puissance

Le coefficient de cisaillement vertical est utilisé pour extrapoler les vitesses de vent à des hauteurs différentes. Il est défini comme suit :

$$\alpha = \frac{\ln \frac{V_2}{V_1}}{\ln \frac{Z_2}{Z_1}} \quad (\text{C.1})$$

où :

- $\alpha$  : coefficient de cisaillement
- $V_1$  : vitesse du vent à la 1<sup>ère</sup> hauteur (m/s)
- $V_2$  : vitesse du vent à la 2<sup>e</sup> hauteur (m/s)
- $Z_1$  : 1<sup>ère</sup> hauteur (m)
- $Z_2$  : 2<sup>e</sup> hauteur (m)

Des valeurs typiques de  $\alpha$  sont fournies dans le tableau ci-dessous<sup>11</sup>.

$\alpha$	Type de terrain
0,076 à 0,083	Mer ou lac, marécage boueux, plaine couverte de neige
0,081 à 0,093	Sablière et neige
0,093 à 0,12	Terrain simple, terre dénudée, herbe rase
0,12 à 0,14	Terrain avec une faible végétation, herbe haute, brousse et toundra
0,14 à 0,16	Terres agricoles étendues, herbe haute, haie basse
0,16 à 0,22	Terres agricoles avec boisés, haute récolte, brise-vent dense
0,22 à 0,26	Forêt et terrain boisé, banlieue
0,26 à 0,4	Centre de grandes villes

<sup>11</sup> Selon la documentation du logiciel WindFarm, utilisé pour le calcul de l'énergie productible par un parc éolien.

## Partie D : Profil vertical du vent – Loi logarithmique

Le profil logarithmique du vent est défini par l'équation ci-dessous :

$$V_Z = \frac{V_*}{K} \ln\left(\frac{Z-d}{Z_0}\right) \quad (\text{D.1})$$

où :

- $V_Z$  : vitesse du vent horizontal à la hauteur  $Z$  (m/s)
- $V_*$  : vélocité de friction (m/s)
- $Z$  : hauteur d'observation (m)
- $Z_0$  : longueur de rugosité de la surface (m)
- $K$  : constante de von Karman ( $\approx 0,4$ )
- $d$  : déplacement au-dessus du sol (m)

Des valeurs typiques pour  $Z_0$  sont fournies au tableau ci-dessous<sup>12</sup>.

$Z_0$	Type de terrain
0,0001 à 0,0003	Mer ou lac, marécage boueux, plaine couverte de neige
0,0003 à 0,001	Sablère et neige
0,001 à 0,01	Terrain simple, terre dénudée, herbe rase
0,01 à 0,04	Terrain avec une faible végétation, herbe haute, brousse et toundra
0,04 à 0,1	Terres agricoles étendues, herbe haute, haie basse
0,1 à 0,5	Terres agricoles avec boisés, haute récolte, brise-vent dense
0,5 à 1	Forêt et terrain boisé, banlieue
1 à 4	Centre de grandes villes

## Partie E : Intensité de turbulence ambiante

L'intensité de turbulence est définie comme suit :

$$IT = \frac{\sigma_V}{V} \quad (\text{E.1})$$

où :

- $IT$  : intensité de turbulence
- $\sigma_V$  : écart type de la vitesse du vent (m/s)
- $V$  : vitesse moyenne du vent (m/s)

<sup>12</sup> Selon la documentation du logiciel WindFarm, utilisé pour le calcul de l'énergie productible par un parc éolien.

## Part F : Fonction de la distribution des fréquences de Weibull

Mathématiquement, la distribution de Weibull est une fonction des fréquences relatives des vitesses du vent. Elle est définie comme suit :

$$f(V) = \frac{k}{c} \left( \frac{V}{c} \right)^{k-1} \exp \left( - \left( \frac{V}{c} \right)^k \right) \quad (\text{F.1})$$

où :

- $f(V)$  : distribution des fréquences du vent  $V$
- $V$  : vitesse du vent (m/s)
- $k$  : paramètre de forme de la distribution de Weibull  $f(V)$
- $c$  : paramètre d'échelle de la distribution de Weibull  $f(V)$  (m/s)

La moyenne des vitesses du vent calculée en utilisant la méthode de l'Atlas éolien européen est :

$$V = c \Gamma \left( 1 + \frac{1}{k} \right) \quad (\text{F.2})$$

où :

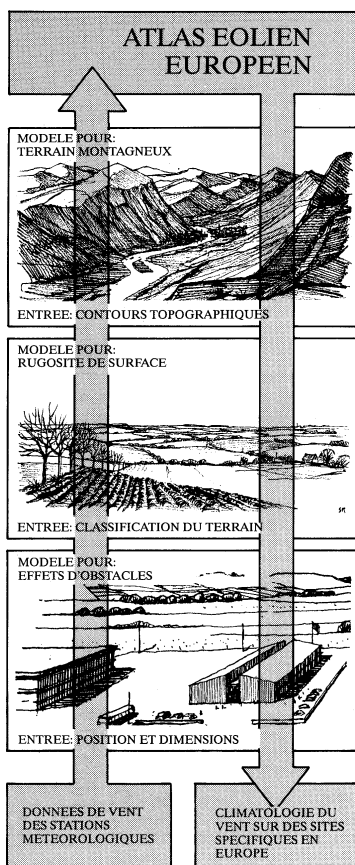
- $V$  : vitesse moyenne du vent (m/s)
- $k$  : paramètre de forme de la distribution de Weibull  $f(V)$
- $c$  : paramètre d'échelle de la distribution de Weibull  $f(V)$  (m/s)
- $\Gamma$  : fonction Gamma

## ANNEXE D LE MODÈLE WASP

WASP a été établi et commercialisé par le Laboratoire National Risø, au Danemark, en 1987<sup>13</sup>. Ce logiciel est un outil pour les analyses des données éoliennes, la création des cartes de vents, l'évaluation du climat éolien et la micro-localisation des éoliennes. À travers les années, le programme a été largement utilisé dans l'industrie éolienne pour l'évaluation du gisement éolien. Les données résultantes de WASP consistent en une grille, déterminée à une hauteur spécifique (normalement, à la hauteur du moyeu de l'éolienne), où la vitesse du vent et la distribution sont calculées pour chaque point de la grille.

WASP est un modèle d'état stable basé sur des principes physiques de flux dans la couche limite de l'atmosphère. Il prend en considération l'effet de différentes conditions de la rugosité et la modification du vent imposée par les variations de l'élévation du terrain autour du mât de mesure.

La méthodologie utilisée par WASP pour modéliser le gisement éolien est schématiquement représentée à la figure ci-dessous. La cartographie de la vitesse du vent à micro-échelle est basée sur des observations faites au mât de mesure du vent, la position et les dimensions du modèle WASP, ainsi que la rugosité de la surface et la topographie du domaine.



Méthodologie de la cartographie du vent<sup>14</sup>

<sup>13</sup> Wind Atlas Analysis and Application Program du Département de l'Énergie éolienne à Risø National Laboratory (<http://www.wasp.dk/>).

<sup>14</sup> Atlas éolien européen, Introduction de la carte éolienne, Risø National Laboratory, Danemark, 1989.





# ANALYSE MÉTÉOROLOGIQUE DE 36 MOIS DE DONNÉES

## Akulivik, Québec

Préparé pour  
Hydro-Québec

Par  
Hélimax Énergie inc.

Décembre 2010



## IDENTIFICATION DU DOCUMENT

Numéro du projet : 389-02

Date d'émission : 21 décembre 2010

Version : Finale

Statut du document : Privé et confidentiel

Liste de circulation : Hydro-Québec, copie interne d'Hélimax

## 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 basée 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

agl	au-dessus du niveau du sol
BNDT	Base nationale de données topographiques
EC	Environnement Canada
HQ21003	mât de mesure Akulivik
IT	intensité de turbulence
J	joule
K	kelvin
kg	kilogramme
kPa	kilopascal
m	mètre
m/s	mètres par seconde
N/A	non applicable
N/D	non disponible
R <sup>2</sup>	coefficient de détermination
SIG	systèmes d'information géographique
V3#1	vitesse du vent observée au niveau de mesure la plus proche de 30 m
V3#2	vitesse du vent observée au niveau de mesure la plus proche de 30 m
V4#1	vitesse du vent observée au niveau de mesure la plus proche de 40 m
V4#2	vitesse du vent observée au niveau de mesure la plus proche de 40 m
V5#1	vitesse du vent observée au niveau de mesure la plus proche de 50 m
V5#2	vitesse du vent observée au niveau de mesure la plus proche de 50 m
WAsP	Wind Atlas Analysis and Application Program
Wh	watt-heure
Z <sub>0</sub>	longueur de rugosité
$\alpha$	coefficient de cisaillement vertical
°	degré angulaire
°C	degré Celsius

## SOMMAIRE EXÉCUTIF

Un programme d'évaluation de la ressource éolienne bien conçu est indispensable pour prédire, avec le plus d'exactitude possible, le potentiel du gisement éolien sur un site donné. Dans ce contexte, Hydro-Québec (« Client ») a mis en œuvre une campagne de mesure des vents dans le périmètre d'un domaine de projet dont il cherche à évaluer la faisabilité de développement. Ce projet, connu sous le nom d'Akulivik, est situé dans la région du Nunavik. À la demande du Client, Hélimax Énergie inc. (« Hélimax ») a ensuite élaboré cette analyse météorologique, selon les standards de l'industrie, pour les données recueillies sur un mât de mesure qui fait partie d'une campagne de mesure des vents conçue pour le site.

En se fiant à son expertise professionnelle et aux méthodes d'usage dans l'industrie, Hélimax a combiné un contrôle de qualité rigoureux avec une analyse exhaustive des données pour réaliser une étude approfondie du gisement éolien sur le domaine du projet d'Akulivik. À l'issue de cette analyse, Hélimax conclut que la campagne d'évaluation de la ressource éolienne a fourni des observations valables. Les données ont ensuite fait l'objet d'un ajustement climatologique afin de valider la représentativité climatologique des vitesses et des directions des vents observées. Enfin, les vitesses annuelles moyennes à long terme sont présentées à 30 m et à 45 m (extrapolée), ce qui correspondent à des hauteurs de moyeu potentielles.

Il est cependant important de noter qu'un niveau d'incertitude est associé à ces valeurs bien que les données analysées soient issues d'une période d'observation de 36 mois. Cette incertitude a pour origine plusieurs facteurs (instruments, taux de recouvrement, extrapolation des vitesses de vent, variabilité inter-annuelle, etc.) et bien qu'elle n'ait pas été évaluée dans le présent rapport, pourrait faire l'objet d'une analyse lors d'une phase ultérieure du projet.

Le tableau ci-dessous montre les périodes d'observation météorologiques et le sommaire des résultats des vitesses du vent obtenues à la suite de l'analyse météorologique.

### Sommaire des résultats de l'analyse météorologique

Informations générales	
Numéro d'identification de la station	HQ21003
Altitude (m au-dessus du niveau de la mer)	84
Période de l'analyse météorologique	2007-10-25 – 2010-11-08
Vitesses observées	
Niveau 30 m (m/s)	8,0
Niveau 40 m (m/s)	8,2
Niveau 50 m (m/s)	8,4
Vitesses du vent, après ajustement climatologique et extrapolation	
Vitesse du vent annuelle ajustée à long terme – 30 m (m/s)	8,1
Vitesse du vent annuelle ajustée à long terme – 40 m (m/s)	8,3
Vitesse du vent annuelle ajustée à long terme et extrapolée – 45 m (m/s)	8,3

## TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION.....	1
2	CARACTÉRISTIQUES DU SITE ET DE L'INSTRUMENTATION.....	3
2.1	DESCRIPTION GÉNÉRALE DU SITE.....	3
2.2	SPÉCIFICATIONS DU SYSTÈME D'ACQUISITION DE DONNÉES ET DES INSTRUMENTS.....	6
3	ANALYSE ET CONTRÔLE DE QUALITÉ DES DONNÉES.....	11
3.1	MÉTHODOLOGIE DU CONTRÔLE DE LA QUALITÉ DES DONNÉES.....	11
3.2	CORRÉLATION ENTRE LES VITESSES DE VENT.....	11
3.3	TAUX DE RECOUVREMENT DES DONNÉES.....	12
3.4	EFFET DE SILLAGE DE LA TOUR MÉTÉOROLOGIQUE.....	14
4	ANALYSE DU GISEMENT ÉOLIEN.....	16
4.1	ÉVOLUTION MENSUELLE DES OBSERVATIONS ET DES PARAMÈTRES DÉRIVÉS.....	16
4.1.1	<i>Variation mensuelle de la température ambiante.....</i>	16
4.1.2	<i>Évolution mensuelle des vitesses du vent.....</i>	16
4.1.3	<i>Évolution mensuelle du coefficient de cisaillement vertical du vent.....</i>	17
4.1.4	<i>Évolution mensuelle de l'intensité de turbulence.....</i>	17
4.2	ÉVOLUTION JOURNALIÈRE DES OBSERVATIONS ET DES PARAMÈTRES DÉRIVÉS.....	21
4.2.1	<i>Cycle journalier de la température ambiante.....</i>	21
4.2.2	<i>Cycle journalier de la vitesse du vent.....</i>	21
4.2.3	<i>Cycle journalier du coefficient de cisaillement vertical du vent.....</i>	21
4.2.4	<i>Cycle journalier de l'intensité de turbulence.....</i>	21
4.3	DISTRIBUTION DIRECTIONNELLE DES OBSERVATIONS ET DES PARAMÈTRES DÉRIVÉS.....	24
4.3.1	<i>Distribution directionnelle de la vitesse du vent.....</i>	24
4.3.2	<i>Distribution directionnelle de la densité d'énergie.....</i>	24
4.3.3	<i>Distribution directionnelle du coefficient de cisaillement du vent.....</i>	24
4.3.4	<i>Distribution directionnelle de l'intensité de turbulence.....</i>	24
4.4	DISTRIBUTION DES VITESSES DU VENT.....	28
4.5	VARIATION DE LA TURBULENCE AVEC LA VITESSE.....	29
5	AJUSTEMENT CLIMATOLOGIQUE ET EXTRAPOLATION VERTICALE.....	30
5.1	AJUSTEMENT CLIMATOLOGIQUE DES VITESSES DU VENT.....	30
5.2	PROFIL VERTICAL DE LA VITESSE DU VENT.....	31
6	CARTOGRAPHIE DE LA RESSOURCE ÉOLIENNE.....	34
7	DISCUSSION DES RÉSULTATS.....	41
ANNEXE A	TESTS DE CONTRÔLE DE QUALITÉ.....	43
ANNEXE B	DISTRIBUTION DE LA VITESSE DU VENT.....	44
ANNEXE C	CONCEPTS MÉTÉOROLOGIQUES.....	47
ANNEXE D	LE MODÈLE WASP.....	51

## LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Étapes de l'analyse météorologique et du calcul du productible .....	2
Figure 2-2 : Photo du site – Nord .....	5
Figure 2-3 : Photo du site – Est .....	5
Figure 2-4 : Photo du site – Sud .....	5
Figure 2-5 : Photo du site – Ouest .....	5
Figure 2-6 : Configuration de l'instrumentation sur le mât Akulivik à la première installation .....	9
Figure 2-7 : Configuration de l'instrumentation sur le mât Akulivik à la réinstallation .....	10
Figure 3-2 : Distribution directionnelle du rapport des vitesses de vent – 40 m .....	15
Figure 3-3 : Distribution directionnelle du rapport des vitesses de vent –30 m .....	15
Figure 4-2 : Évolution mensuelle des vitesses du vent .....	19
Figure 4-3 : Évolution mensuelle des coefficients de cisaillement vertical .....	20
Figure 4-4 : Évolution mensuelle des intensités de turbulence .....	20
Figure 4-5 : Cycle journalier de la température .....	22
Figure 4-6 : Cycle journalier de la vitesse des vents .....	22
Figure 4-7 : Cycle journalier du coefficient de cisaillement vertical .....	23
Figure 4-8 : Cycle journalier de l'intensité de turbulence .....	23
Figure 4-9 : Rose des vents observée à 50 m .....	25
Figure 4-10 : Distribution directionnelle des vitesses moyennes du vent (m/s) .....	26
Figure 4-11 : Distribution directionnelle de la densité d'énergie (%) .....	26
Figure 4-12 : Distribution directionnelle du coefficient de cisaillement vertical .....	27
Figure 4-13 : Distribution directionnelle de l'intensité de turbulence .....	27
Figure 4-15 : Variation de l'intensité de turbulence classée par plage de vitesse .....	29
Figure 5-1 : Localisation des stations météorologiques et des points NCEP analysées et/ou utilisées pour l'ajustement climatologique des vitesses de vent .....	32
Figure 6-1 : Carte topographique du domaine .....	35
Figure 6-2 : Carte de la rugosité de surface du domaine .....	36
Figure 6-3 : Carte de la vitesse des vents du domaine, à 30 m au-dessus du sol .....	37
Figure 6-4 : Carte de la vitesse des vents du domaine, à 45 m au-dessus du sol .....	38
Figure 6-5 : Carte de la densité de puissance du domaine, à 30 m au-dessus du sol .....	39
Figure 6-6 : Carte de la densité de puissance du domaine, à 45 m au-dessus du sol .....	40

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Identification, localisation du mât de mesure et caractéristiques du site .....	3
Tableau 2-2 : Spécifications des instruments de la première installation .....	7
Tableau 2-3 : Spécifications des instruments de la réinstallation .....	8
Tableau 3-1 : Coefficient de détermination entre les mesures à différents niveaux .....	11
Tableau 3-2 : Taux de recouvrement des données (%) .....	13
Tableau 4-1 : Moyennes mensuelles des observations .....	18
Tableau 4-2 : Paramètres de Weibull .....	28
Tableau 5-1 : Tableau sommaire général .....	33
Tableau 6-1 : Données d'entrée du modèle WAsP .....	34
Tableau 7-1 : Sommaire des résultats de l'analyse météorologique .....	41

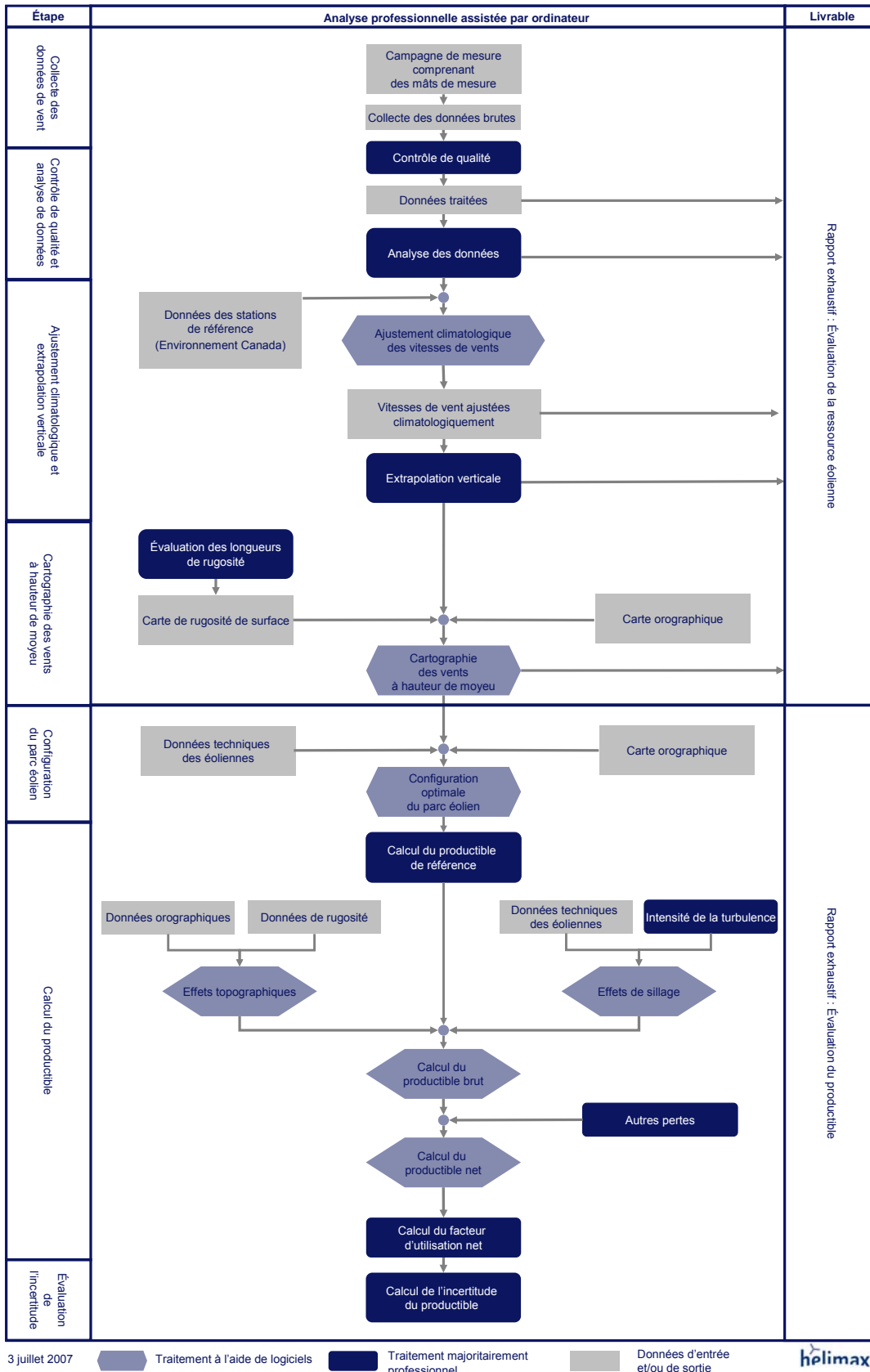
# 1 INTRODUCTION

Hydro-Québec (« Client ») vise à développer un projet de parc éolien dans la région du Nunavik à moins de 2 km à l'est de la Baie d'Hudson et à environ de 2,3 km au nord-nord-est de la municipalité d'Akulivik. À la lumière de cet objectif, le Client a déployé une campagne de mesure du vent consistant en un mât anémométrique de 50 m dans le but de caractériser le gisement éolien sur l'ensemble du domaine du projet ciblé.

Dans ce contexte, Hélimax Énergie inc. « Hélimax » a effectué une analyse approfondie des données météorologiques recueillies sur la tour pour une période comprise entre octobre 2007 et novembre 2010. Un diagramme décrivant l'approche utilisée par Hélimax pour exécuter ce travail est présenté à la Figure 1-1. Le volet énergétique illustré dans cet organigramme n'est pas inclus dans ce rapport, mais pourrait être réalisé dans des phases ultérieures du projet.

La section 2 du présent document contient une description du site étudié, de l'emplacement du mât de mesure et des spécifications des instruments utilisés pour recueillir les observations. La méthodologie utilisée pour le contrôle de qualité des données est expliquée à la section 3. L'analyse du gisement éolien observé est présentée à la section 4. La section 5 présente l'ajustement climatologique et l'extrapolation verticale des vitesses du vent, tandis que la section 6 présente la cartographie de la ressource éolienne sur le site. Une conclusion sur les observations et le gisement éolien est donnée à la section 7.

## ANALYSES MÉTÉOROLOGIQUE ET DE PRODUCTIBLE



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



## 2 CARACTÉRISTIQUES DU SITE ET DE L'INSTRUMENTATION

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

### 2.1 Description générale du site

Le projet éolien d'Akulivik est situé à moins de 2 km à l'est de la Baie d'Hudson et à environ 2,3 km au nord-nord-est de la municipalité d'Akulivik. La topographie du site est généralement caractérisée par du terrain parsemé de collines rocheuses avec peu de végétation.

Une campagne de mesure des vents a été mise en œuvre afin d'évaluer la faisabilité de développer un projet éolien dans les limites du domaine. En effet, un mât de mesure du vent de 50 m de hauteur, ci-après identifié comme « HQ21003 » ou « Akulivik », a été installé dans le périmètre du projet. Ce mât est situé au sommet d'un cap rocheux dénudé de végétation. Il n'y a aucun obstacle dans la trajectoire du vent à proximité du mât de mesure.

Le Tableau 2-1 présente le numéro d'identification, le nom, les coordonnées géographiques ainsi que les principales caractéristiques de l'environnement immédiat du mât de mesure. La Figure 2-1 présente l'emplacement géographique du mât dans l'ensemble du domaine du projet. Des photos de l'emplacement du mât, prises dans les directions des quatre points cardinaux, sont présentées de la Figure 2-2 à la Figure 2-5.

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

Informations générales	
Numéro de la station	HQ21003
Nom de la station	Akulivik
Ville la plus proche	Akulivik (Québec)
Altitude (m au-dessus du niveau de la mer)	84
Coordonnées	
Nord	60° 50' 4,2"
Ouest	78° 10' 6,7"
Caractéristiques du terrain	
Propriétaire	Terres de la Catégorie 1 <sup>1</sup>
Utilisation	Chasse
Topographie et obstacles	Terrain parsemé de collines pratiquement exempt de végétation

<sup>1</sup> Source : Hydro-Québec

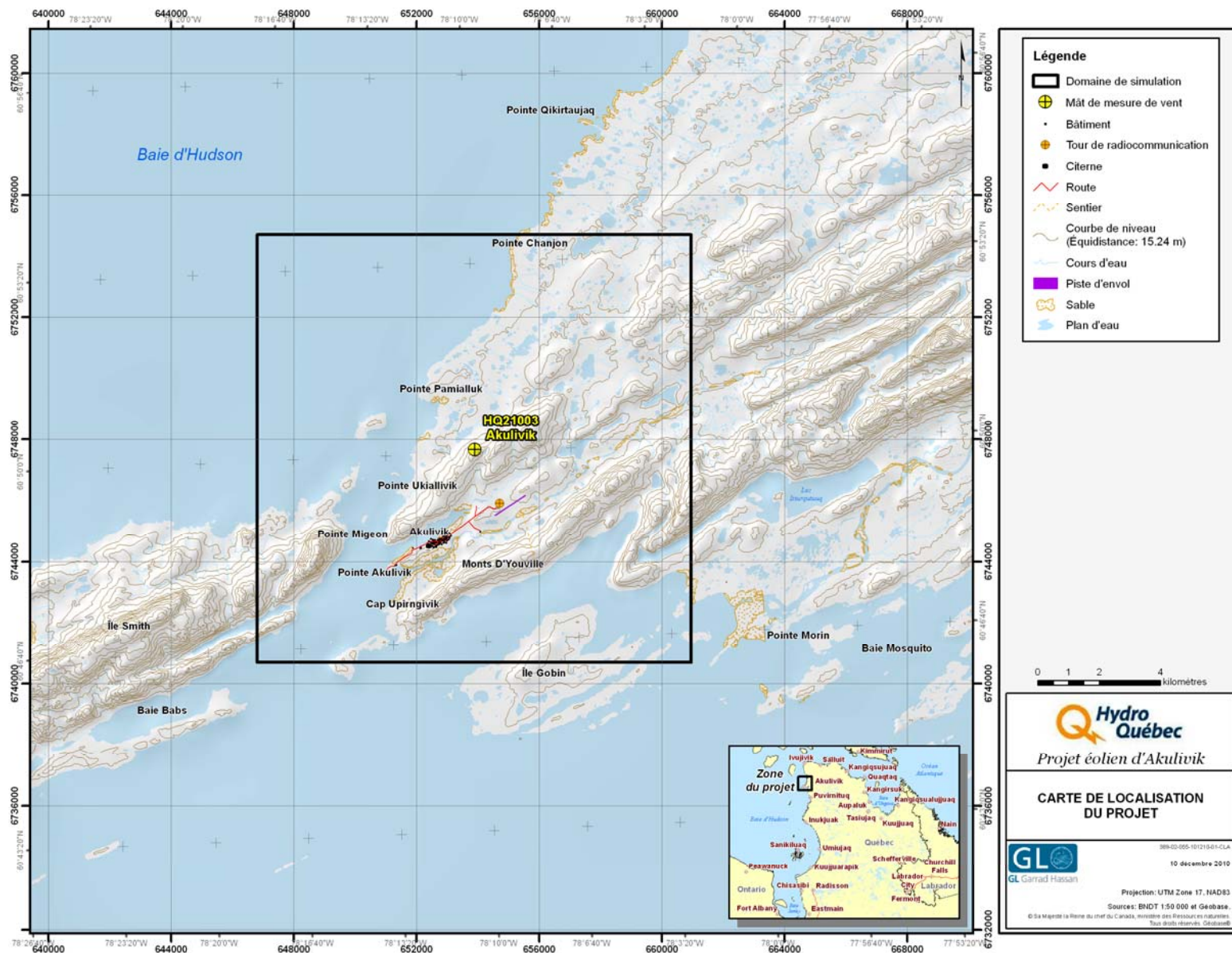


Figure 2-1 : Situation géographique et localisation du mât d'Akulivik



**Figure 2-2 : Photo du site – Nord**



**Figure 2-3 : Photo du site – Est**



**Figure 2-4 : Photo du site – Sud**



**Figure 2-5 : Photo du site – Ouest**

## 2.2 Spécifications du système d'acquisition de données et des instruments

Cette section fournit un rapport détaillé de l'instrumentation utilisée dans le cadre de la campagne de mesure du vent.

Le mât d'Akulivik est une tour tubulaire maintenue en place à l'aide de haubans en acier galvanisé. Il est équipé d'instruments à trois niveaux, soit 30 m, 40 m et 50 m au-dessus du niveau du sol. En octobre 2009, la tour fut ré-instrumentée (tous les instruments furent changés).

À la première instrumentation du mât il y avait : 6 anémomètres, 2 girouettes et 1 thermomètre. Les anémomètres primaires orientés vers le nord-ouest. Des anémomètres redondants installés en direction opposés et aux trois niveaux dans le but d'assurer une continuité des observations. Tous les anémomètres et les girouettes sont des instruments non chauffés. Il est également à noter que toutes les données directionnelles du vent sont mesurées par rapport au nord géographique (0°).

Un système d'acquisition de données (SAD) de marque NRG a été utilisé pour la collecte des données. Celui-ci recueille les observations des vitesses et des directions du vent, ainsi que de la température ambiante. Toutes les 10 minutes, une moyenne de ces observations est enregistrée en temps réel en indiquant l'heure exacte de la fin de la période de 10 minutes. Les données sont transmises hebdomadairement à la base de données d'Hélimax grâce à un système de télécommunication sans-fil. Une fois que les données brutes enregistrées par le SAD sont reçues, Hélimax effectue la conversion des observations en tenant compte des paramètres de conversion propres à chaque instrument.

L'information relative à l'instrumentation de la première configuration du mât d'Akulivik est présentée au Tableau 2-2 et à la Figure 2-6.

À la ré-instrumentation de la tour il y avait : 5 anémomètres, 3 girouettes, 2 thermomètres et 2 hygromètres. Les anémomètres primaires orientés vers le nord-ouest. Des anémomètres redondants installés en direction opposés et aux niveaux 40 m et 50 m. Tous les anémomètres et les girouettes sont des instruments non chauffés. Il est également à noter que toutes les données directionnelles du vent sont mesurées par rapport au nord géographique (0°).

Un système d'acquisition de données (SAD) de marque Campbell Scientific a été utilisé pour la collecte des données. Celui-ci recueille les observations des vitesses et des directions du vent, de la température, ainsi que de la l'humidité relative ambiante. Des moyennes, aux secondes, aux 10 secondes et aux dix minutes, de ces observations sont enregistrées en temps réel en indiquant l'heure exacte de la fin de la période. Les données sont transmises hebdomadairement à la base de données d'Hélimax grâce à un système de télécommunication sans-fil. Une fois que les données brutes enregistrées par le SAD sont reçues, Hélimax effectue la conversion des observations en tenant compte des paramètres de conversion propres à chaque instrument.

L'information relative à l'instrumentation des mâts est présentée au Tableau 2-3 et à la Figure 2-7.

**Tableau 2-2 : Spécifications des instruments de la première installation**

Canal sur le SAD	Type d'instrument	Manufacturier/ Modèle	Niveau de référence (m)	Hauteur réelle agl (m)	Orientation (°)	Intervalle de compilation (minutes)
-	Système d'acquisition de données	NRG Symphonie	3	3,0	N/A	N/A
-	iPack Satellite (transmission des données)	NRG Iridium	3	3,0	N/A	N/A
1	Anémomètre calibré	NRG #40C	50	48,2	315	10
2	Anémomètre calibré	NRG #40C	50	48,2	135	10
3	Anémomètre calibré	NRG #40C	40	40,9	315	10
4	Anémomètre calibré	NRG #40C	40	40,9	135	10
5	Anémomètre calibré	NRG #40C	30	30,2	315	10
6	Anémomètre calibré	NRG #40C	30	30,2	135	10
7	Girouette	NRG #200P	50	48,2	225	10
8	Girouette	NRG #200P	40	40,9	225	10
9	Thermomètre	NRG #110S	3	3,0	0	10
10	Voltmètre du iPack	NRG	3	3,0	N/A	N/A

Tableau 2-3 : Spécifications des instruments de la réinstallation

Canal sur le SAD	Type d'instrument	Manufacturier/ Modèle	Niveau de référence (m)	Hauteur réelle agl (m)	Orientation (°)	Intervalle de compilation (minutes)
-	Système d'acquisition de données	Campbell Scientifics CR1000	3	3,0	N/A	N/A
-	Transmission des données	Spread Spectrum Radio RF401	3	3,0	N/A	N/A
P1	Anémomètre	Vector #A100LM	50	49,3	318	10
C1	Anémomètre calibré	RM Young #05103-45	50	49,8	144	10
P2	Anemometer	Vector #A100LM	40	41,9	318	10
C2	Anémomètre calibré	RM Young #05103-45	40	42,6	136	10
C5	Anémomètre	Vector #A100LM	30	30,2	318	10
SE1	Girouette	RM Young #05103-45	50	49,8	144	10
SE3	Girouette	NRG #200P	50	48,8	225	10
SE2	Girouette	RM Young #05103-45	40	42,6	136	10
SE9	Thermomètre	Campbell #107	50	46,4	0	10
SE10	Thermomètre	Campbell #107	3	2,5	0	10
SE11	Humidité relative	NRG #RH-5	50	46,4	0	10
SE12	Humidité relative	NRG #RH-5	3	2,8	0	10

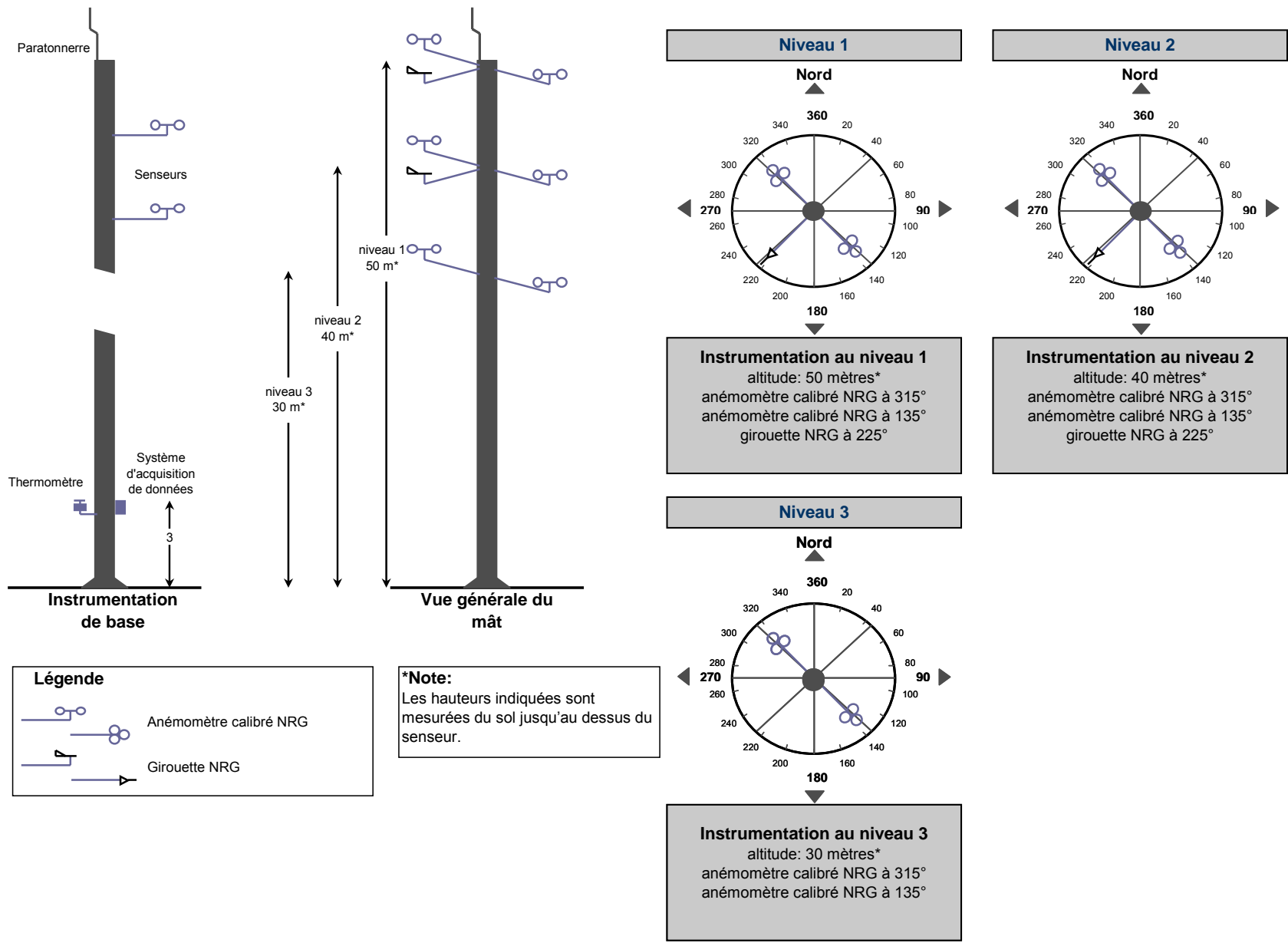
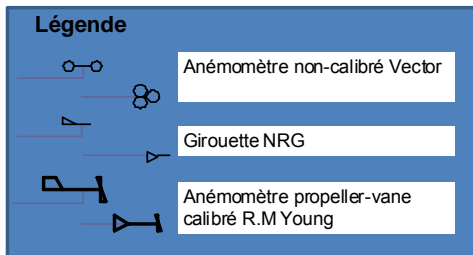
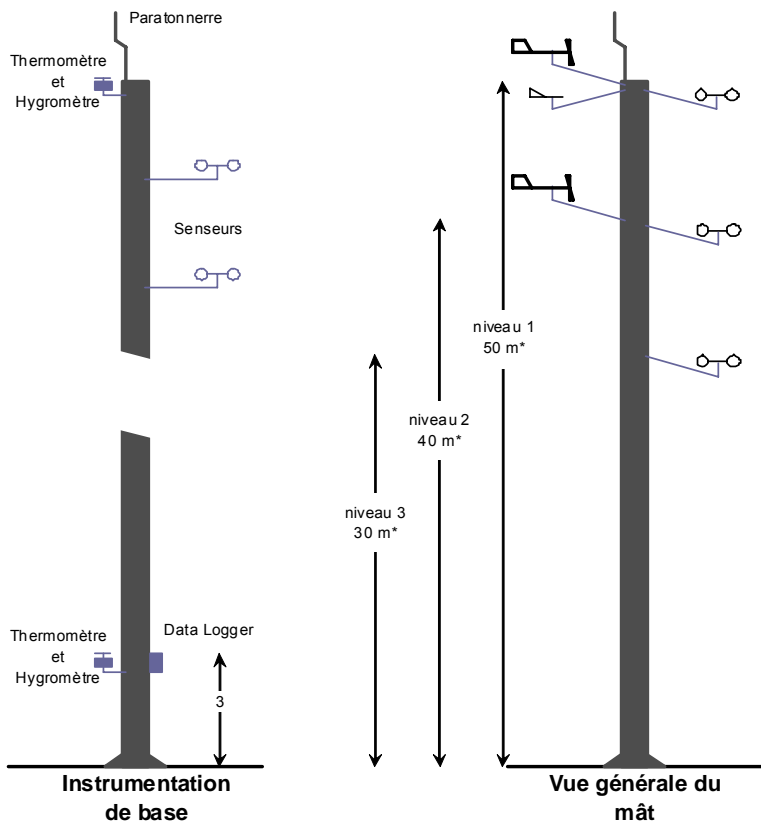
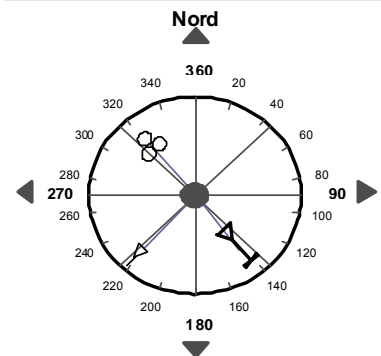


Figure 2-6 : Configuration de l'instrumentation sur le mât Akulivik à la première installation



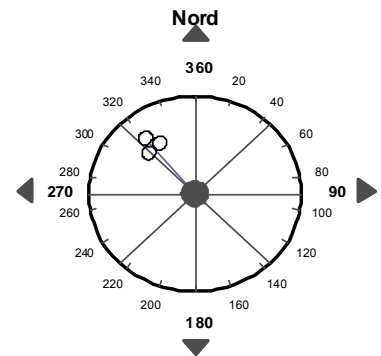
**\*Note:**  
Les hauteurs indiquées sont mesurées du sol jusqu'au dessus du capteur.

**Niveau 1**



**Instrumentation au niveau 1**  
altitude: 50 mètres\*  
anémomètre non-calibré  
Vector à 318°  
anémomètre propeller-vane calibré RM Young à 144°

**Niveau 2**



**Instrumentation au niveau 2**  
altitude: 40 mètres\*  
anémomètre non-calibré  
Vector à 318°  
a anémomètre propeller-vane calibré RM Young à 136°

**Niveau 3**



**Instrumentation au niveau 3**  
altitude: 30 mètres\*  
anémomètre non-calibré  
Vector à 318°

**Figure 2-7 : Configuration de l'instrumentation sur le mât Akulivik à la réinstallation**



### 3 ANALYSE ET CONTRÔLE DE QUALITÉ DES DONNÉES

Hélimax a développé une procédure approfondie pour le contrôle de la qualité des données recueillies par des mâts de mesure du vent. Cette procédure est en conformité avec les pratiques en cours dans l'industrie. La présente section décrit la méthodologie utilisée par Hélimax pour le contrôle de qualité des données, fournit les résultats des corrélations entre les vitesses du vent à différents niveaux et présente un sommaire des taux de recouvrement des observations.

#### 3.1 Méthodologie du contrôle de la qualité des données

Une analyse rigoureuse des observations collectées sur le mât de mesure est réalisée en utilisant un logiciel développé à l'interne, chez Hélimax. Toutes les données sont soumises à une série de 15 tests dans le but de détecter toute observation douteuse due à un événement de gel ou à une panne d'instrument. Les données qui échouent ces tests sont analysées directement par un météorologue professionnel. Les données entachées d'erreurs sont éliminées de la base de données et de toute analyse future. Un tableau décrivant les tests effectués sur les données est présenté à l'Annexe A. Ceux-ci sont conçus de façon à vérifier les cinq principaux aspects des observations suivants :

- Continuité des enregistrements (pas de saut temporel);
- Observations comprises dans des limites météorologiques acceptables;
- Occurrence des vitesses du vent inférieures à 1 m/s;
- Variations temporelles des paramètres météorologiques;
- Variations verticales de la vitesse et de la direction du vent.

#### 3.2 Corrélation entre les vitesses de vent

Une première vérification de la qualité des observations est faite par l'analyse de la corrélation entre les vitesses et les directions du vent observées à différents niveaux de mesure. Cette approche permet une validation rapide de la qualité des mesures recueillies.

Le coefficient de détermination,  $R^2$ , représente le degré de corrélation qui existe entre les mesures des vents à différentes hauteurs. Les valeurs de  $R^2$  pour les instruments installés sur les mâts sont présentées au Tableau 3-1.

Tableau 3-1 : Coefficient de détermination entre les mesures à différents niveaux

Vitesse	50 m	40 m	30 m
50 m	1,00	0,99	0,99
40 m	0,99	1,00	0,99
30 m	0,99	0,99	1,00

Direction	50 m	40 m
50 m	1,00	0,99
40 m	0,99	1,00

### 3.3 Taux de recouvrement des données

De façon générale, 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. Les observations valides sont définies comme celles qui répondent aux critères de contrôle de qualité et à l'analyse faite par un météorologue professionnel. Plus le nombre d'observations valides est grand, plus le taux de recouvrement des données est élevé, et par conséquent, plus l'échantillon des données est représentatif des conditions réelles du site.

Les taux de recouvrement mensuels pour le mât d'Akulivik sont présentés au Tableau 3-2. De manière générale, les taux de recouvrement sont bons. Cependant, le mât a subi des périodes de gel, ce qui a diminué les taux de recouvrement de certains instruments pendant les mois d'hiver, surtout en décembre 2007, en avril 2008, de décembre 2008 à février 2009, décembre 2009 et janvier 2010. Il est également à noter que les taux de recouvrement du premier et du dernier mois de la période de mesure sont affectés par les dates de début et de fin des observations.

**Tableau 3-2 : Taux de recouvrement des données (%)**

Mois – Année	Vitesse à 50 m #1	Vitesse à 50 m #2	Vitesse à 40 m #1	Vitesse à 40 m #2	Vitesse à 30 m #1	Vitesse à 30 m #2	Direction à 50 m #1	Direction à 50 m #2	Direction à 40 m	Température à 50 m	Température à 3 m	Humidité à 50 m	Humidité à 3 m
10-2007 (du 2007-10-25)	23	23	23	23	23	23	18	18	19	-	23	-	-
11-2007	97	97	97	97	97	97	98	98	98	-	100	-	-
12-2007	69	71	58	73	83	77	91	91	89	-	100	-	-
01-2008	81	85	82	81	90	79	83	83	99	-	100	-	-
02-2008	87	88	89	91	96	100	90	90	75	-	100	-	-
03-2008	99	100	100	100	100	98	83	83	97	-	100	-	-
04-2008	68	65	66	63	72	73	63	63	61	-	100	-	-
05-2008	90	89	90	89	95	89	76	76	72	-	100	-	-
06-2008	97	97	98	98	97	98	88	88	89	-	100	-	-
07-2008	100	100	100	100	100	100	100	100	100	-	100	-	-
08-2008	100	100	100	100	100	100	100	100	100	-	100	-	-
09-2008	100	100	100	100	100	100	98	98	98	-	100	-	-
10-2008	99	100	100	100	100	100	96	96	98	-	100	-	-
11-2008	100	100	100	100	100	100	96	96	95	-	100	-	-
12-2008	54	55	49	58	100	100	96	96	94	-	100	-	-
01-2009	22	24	35	38	80	50	98	98	63	-	100	-	-
02-2009	34	33	20	41	22	52	80	80	72	-	100	-	-
03-2009	78	75	66	80	89	91	81	81	85	-	100	-	-
04-2009	100	97	91	98	99	96	100	100	98	-	100	-	-
05-2009	95	91	94	98	98	96	95	96	-	-	100	-	-
06-2009	89	89	83	91	96	93	87	88	-	-	100	-	-
07-2009	99	90	91	100	99	99	100	100	-	-	100	-	-
08-2009	98	99	91	99	98	99	100	100	-	-	100	-	-
09-2009	99	99	94	99	100	99	100	100	-	-	100	-	-
10-2009	93	91	93	94	94	18	94	94	65	76	94	-	-
11-2009	77	96	80	95	92	-	98	98	82	98	98	25	25
12-2009	57	71	59	71	70	-	100	100	60	100	100	100	100
01-2010	11	50	13	84	11	-	94	98	42	100	100	100	100
02-2010	31	86	41	83	54	-	100	100	88	57	57	60	60
03-2010	17	93	21	96	15	-	100	100	83	100	100	100	98
04-2010	71	99	77	100	92	-	99	100	88	100	100	100	12
05-2010	73	96	74	98	81	-	98	100	79	100	100	100	49
06-2010	73	100	76	100	94	-	100	100	89	100	100	100	100
07-2010	89	100	93	100	100	-	100	100	100	100	100	100	100
08-2010	90	100	94	100	100	-	100	100	100	100	100	100	100
09-2010	91	100	95	100	100	-	100	100	100	100	100	100	100
10-2010	90	98	84	99	96	-	100	100	95	100	100	100	100
11-2010 (au 2010-11-08)	26	27		26	27	-	27	27	27	27	27	27	27
<b>Moyenne<sup>2</sup></b>	<b>79</b>	<b>87</b>	<b>77</b>	<b>90</b>	<b>87</b>	<b>58</b>	<b>94</b>	<b>93</b>	<b>30</b>	<b>35</b>	<b>99</b>	<b>31</b>	<b>27</b>

<sup>2</sup> Les valeurs moyennes de recouvrement présentées ont été calculées à partir de l'ensemble des données valides aux 10 minutes.

### 3.4 Effet de sillage de la tour météorologique

Avant d'analyser les données météorologiques brutes, il est important de déterminer l'amplitude du sillage créé par la tour sur les mesures. Bien que l'effet espéré de la tour doive être minimal si les instruments sont installés sur des bras de montage de dimensions recommandées par l'industrie, il pourrait s'avérer assez important et avoir une influence sur l'intensité de turbulence des instruments en aval de l'obstacle. En installant deux anémomètres à la même hauteur de mesure, il est possible de quantifier et corriger l'effet de sillage.

Une analyse des données provenant des anémomètres redondants situés à chacun des niveaux de mesure du mât a été effectuée. Le rapport des vitesses du vent mesurées par les anémomètres principaux et les vitesses mesurées par les anémomètres redondants est illustré de la Figure 3-1 à la Figure 3-3. Comme on peut le remarquer, l'effet de sillage réduit les vitesses enregistrées par chaque anémomètre dans les secteurs obstrués par le mât.

Par conséquent, les données influencées par l'effet de sillage ont été corrigées en utilisant les observations de l'anémomètre exposé à l'écoulement non perturbé du vent.

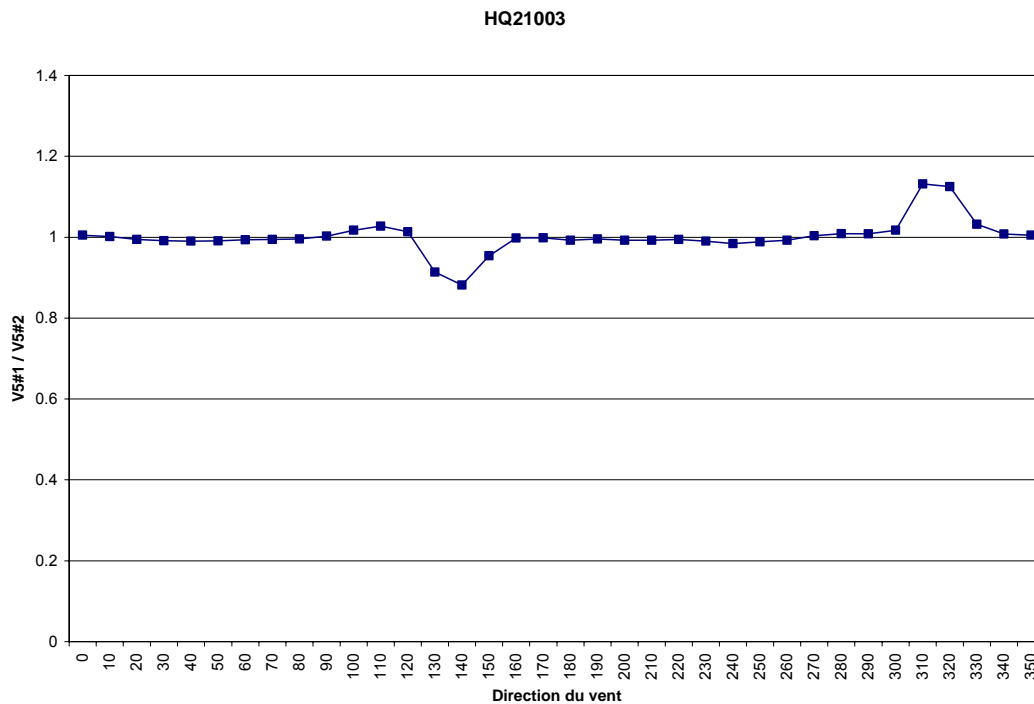


Figure 3-1 : Distribution directionnelle du rapport des vitesses de vent – 50 m

HQ21003

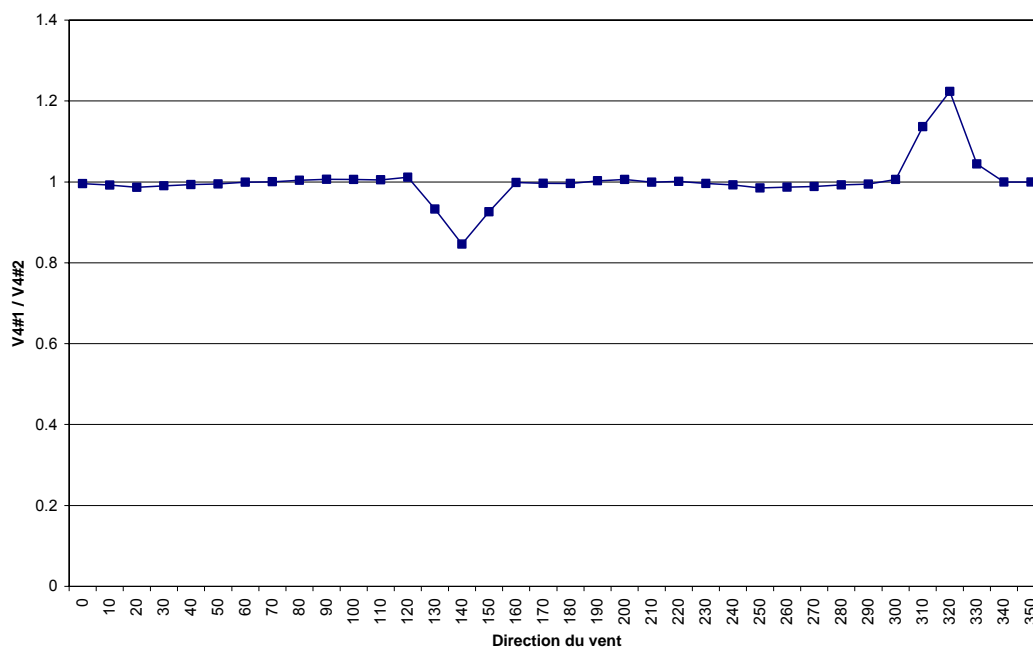


Figure 3-2 : Distribution directionnelle du rapport des vitesses de vent – 40 m

HQ21003

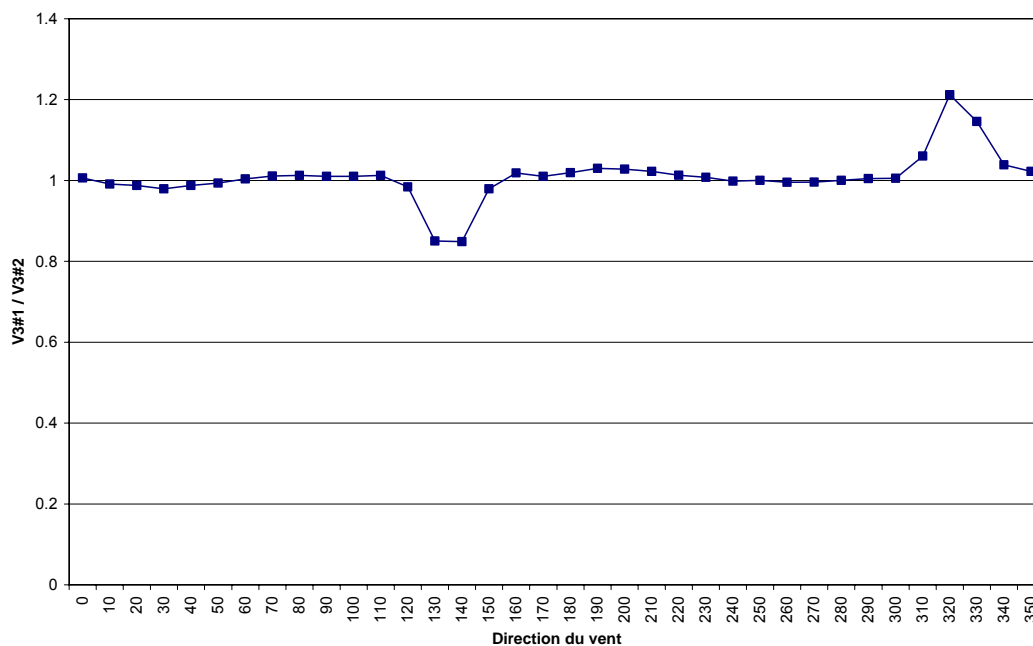


Figure 3-3 : Distribution directionnelle du rapport des vitesses de vent – 30 m

## 4 ANALYSE DU GISEMENT ÉOLIEN

Une analyse exhaustive est effectuée sur les observations recueillies par les capteurs du mât ainsi que sur les paramètres dérivés à partir de celles-ci. Les observations analysées sont la vitesse et la direction du vent ainsi que la température ambiante. Les paramètres dérivés sont le coefficient de cisaillement et l'intensité de turbulence. Les variations des observations et des paramètres dérivés peuvent affecter considérablement la puissance générée par une éolienne et devraient donc être bien connues. Les sections suivantes présentent l'évaluation détaillée des paramètres observés et dérivés, selon les règles de l'art de l'industrie, à savoir :

- l'évolution mensuelle des paramètres observés et dérivés (température ambiante, vitesses des vents, cisaillement du vent et intensité de turbulence);
- les variations journalières des paramètres observés et dérivés (température ambiante, vitesses des vents, cisaillement du vent et intensité de turbulence);
- les distributions directionnelles des paramètres observés et dérivés (vitesses des vents, densité de puissance la ressource, cisaillement du vent et intensité de turbulence); et
- les distributions des vitesses des vents (distribution de Weibull, paramètre de forme et paramètre d'échelle).

### 4.1 Évolution mensuelle des observations et des paramètres dérivés

Cette section présente l'évolution mensuelle des observations (température ambiante et vitesse du vent) et des paramètres dérivés (cisaillement du vent et intensité de turbulence).

Les moyennes mensuelles des observations et des paramètres dérivés pour le mât de mesure sont présentées au Tableau 4-1. Il est important de noter que ces valeurs n'ont pas fait l'objet d'un ajustement climatologique.

Il faut noter que seuls les mois ayant un taux de recouvrement jugé acceptable ( $\geq 75\%$ ) sont présentés de la Figure 4-1 à la Figure 4-4.

#### 4.1.1 Variation mensuelle de la température ambiante

La température atmosphérique affecte la densité de l'air qui, à son tour, a une influence considérable sur le potentiel du gisement éolien. La relation liant la densité énergétique et la température atmosphérique est présentée à l'Annexe C.

La Figure 4-1 montre la variation mensuelle de la température au cours de la période d'observation. Les températures moyennes correspondent à une variation saisonnière typique.

#### 4.1.2 Évolution mensuelle des vitesses du vent

En Amérique du Nord, les vitesses du vent sont généralement plus élevées pendant l'hiver, car les patrons synoptiques augmentent la présence de hauts gradients de pression durant cette saison.

La Figure 4-2 présente l'évolution mensuelle des vitesses moyennes des vents pendant la période d'observation aux différents niveaux de mesure. Les moyennes des vitesses les plus élevées sont observées en octobre 2010 et les plus basses, en décembre 2007. Les valeurs faibles du mois de décembre 2007 s'expliquent probablement par les périodes prolongées de gel qui ont réduit les taux de recouvrement pendant ce mois.

### 4.1.3 Évolution mensuelle du coefficient de cisaillement vertical du vent

Les vitesses du vent augmentent avec la hauteur par rapport au sol à cause de la diminution graduelle de la force de frottement (friction). La vitesse du vent est nulle au sol et augmente ensuite avec l'altitude jusqu'à la couche limite atmosphérique. Cette variation en fonction de l'altitude constitue ainsi le profil vertical du vent, tandis que le cisaillement vertical du vent fait référence à la variation des vitesses entre deux niveaux d'altitude donnés.

Dans l'industrie éolienne, deux lois mathématiques sont utilisées pour l'extrapolation verticale de la vitesse du vent aux hauteurs de moyeu d'éoliennes : la loi de puissance et la loi logarithmique (définies à l'Annexe C).

À la suite des études internes, il a été trouvé que la loi logarithmique représente mieux la variation verticale de la vitesse du vent. Cependant, le coefficient de cisaillement vertical «  $\alpha$  », est présenté ici pour fin d'illustration de la variation de la vitesse entre deux niveaux de mesure mais n'a pas été utilisé dans l'extrapolation verticale.

La Figure 4-3 montre l'évolution mensuelle des coefficients de cisaillement vertical du vent pendant la période de mesure. Pour le site d'Akulivik, les valeurs de cisaillement correspondent généralement à ce à quoi on s'attendrait étant donné le type de terrain sur lequel le mât est installé.

### 4.1.4 Évolution mensuelle de l'intensité de turbulence

L'intensité de turbulence correspond à l'intensité de la fluctuation de la vitesse du vent. La turbulence est générée par la rugosité du sol ou par des effets thermiques. De plus, puisque la turbulence dépend de la rugosité de la surface, il est attendu que plus l'altitude de mesure par rapport au sol augmente, plus l'intensité de turbulence diminue. Il est important de quantifier l'intensité de turbulence parce qu'elle constitue un paramètre de conception des éoliennes.

L'intensité de turbulence est définie comme la fluctuation de la vitesse du vent par rapport à la vitesse moyenne observée. La formule mathématique de ce paramètre est donnée à l'Annexe C. L'intensité de la turbulence est utilisée, entre autres, lors de la modélisation de l'effet de sillage pour le calcul du productible d'un parc éolien.

L'évolution mensuelle de l'intensité de turbulence pour le mât d'Akulivik est présentée à la Figure 4-4. On remarque que l'intensité de la turbulence est basse<sup>3</sup> et diminue avec l'altitude.

---

<sup>3</sup> Selon les normes de l'industrie, la turbulence d'un site est considérée comme :

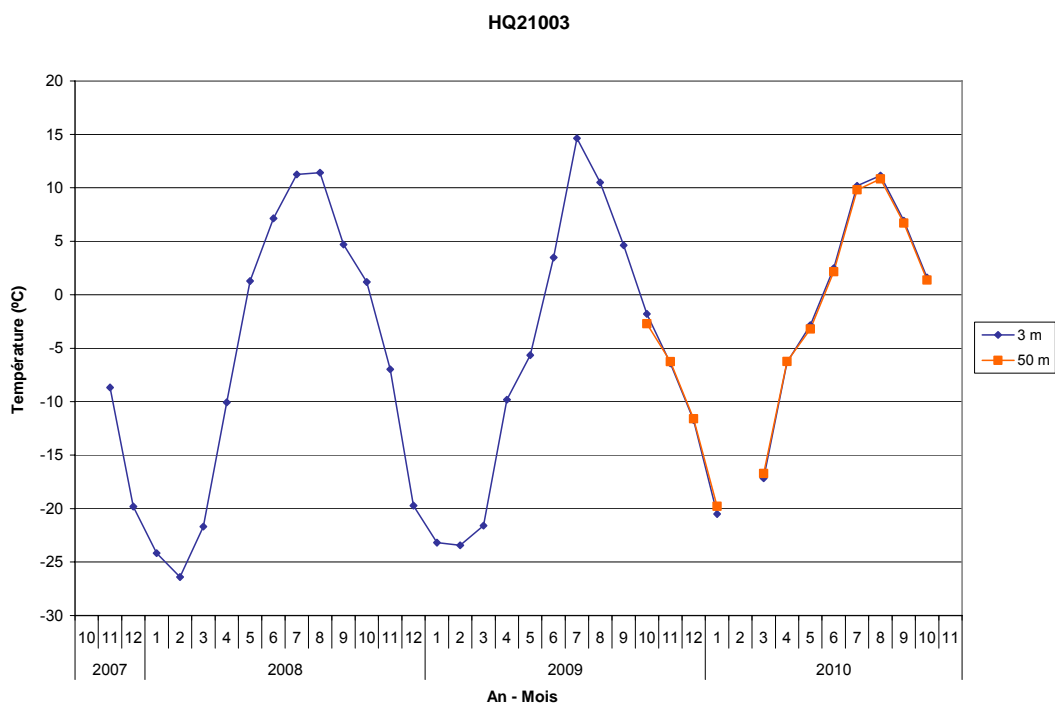
- basse quand son intensité est en dessous de 0,10;
- modérée quand son intensité est entre 0,10 et 0,25;
- haute quand son intensité est au-dessus de 0,25.

Tableau 4-1 : Moyennes mensuelles des observations

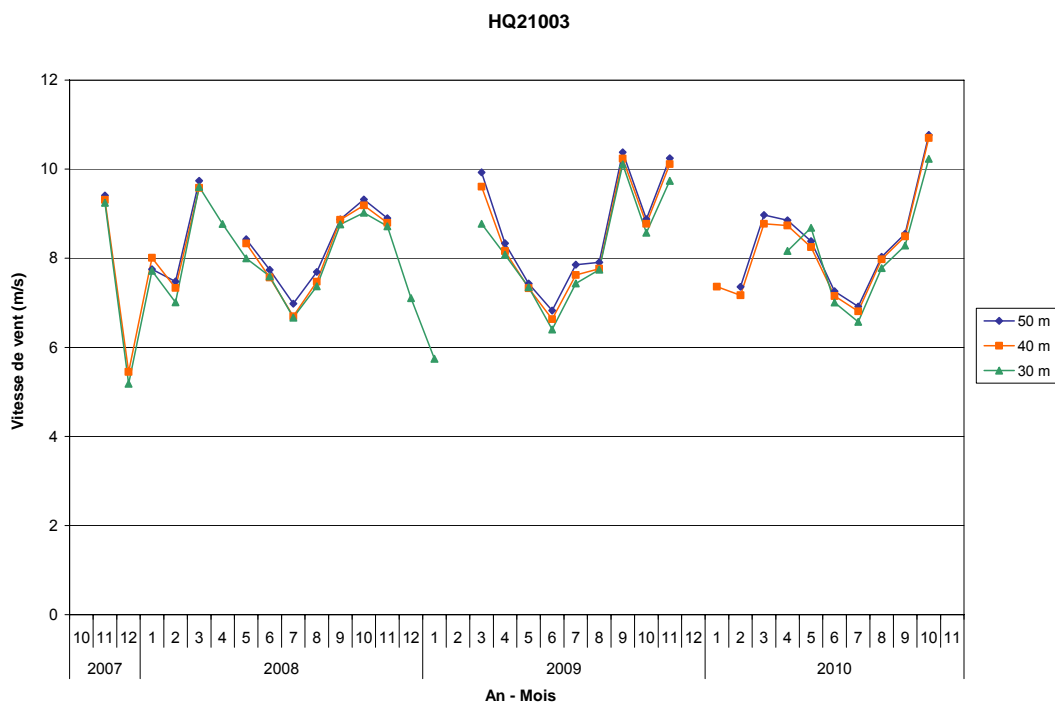
Mois-Année	Vitesse du vent à 50 m (m/s)	Vitesse du vent à 40 m (m/s)	Vitesse du vent à 30 m (m/s)	Température à 50 m (°C)	Température à 3 m (°C)	Humidité à 50 m (%)	Humidité à 3 m (%)	Coefficient de cisaillement vertical 50 m – 30 m	Intensité de turbulence à 50 m	Intensité de turbulence à 40 m	Intensité de turbulence à 30 m
10-2007 (du 2007-10-25)	10,5	10,4	10,4	-	-1,9	-	-	0,02	0,08	0,08	0,09
11-2007	9,4	9,3	9,2	-	-8,7	-	-	0,04	0,06	0,07	0,07
12-2007	5,7	5,4	5,2	-	-19,8	-	-	0,09	0,06	0,07	0,07
01-2008	7,8	8,0	7,7	-	-24,2	-	-	0,00	0,06	0,06	0,06
02-2008	7,5	7,3	7,0	-	-26,4	-	-	0,00	0,06	0,06	0,06
03-2008	9,7	9,6	9,6	-	-21,7	-	-	0,03	0,05	0,05	0,06
04-2008	8,5	8,4	8,8	-	-10,1	-	-	0,06	0,05	0,06	0,06
05-2008	8,4	8,3	8,0	-	1,3	-	-	0,06	0,07	0,07	0,08
06-2008	7,7	7,6	7,6	-	7,1	-	-	0,03	0,07	0,08	0,08
07-2008	7,0	6,7	6,7	-	11,3	-	-	0,09	0,08	0,08	0,08
08-2008	7,7	7,5	7,4	-	11,4	-	-	0,09	0,07	0,07	0,07
09-2008	8,9	8,9	8,8	-	4,7	-	-	0,02	0,08	0,08	0,09
10-2008	9,3	9,2	9,0	-	1,2	-	-	0,07	0,08	0,08	0,08
11-2008	8,9	8,8	8,7	-	-7,0	-	-	0,04	0,07	0,07	0,07
12-2008	8,1	7,8	7,1	-	-19,7	-	-	0,06	0,06	0,06	0,07
01-2009	9,4	6,7	5,7	-	-23,2	-	-	0,09	0,05	0,06	0,06
02-2009	6,2	5,5	6,5	-	-23,4	-	-	0,14	0,05	0,05	0,05
03-2009	9,9	9,6	8,8	-	-21,6	-	-	0,06	0,05	0,05	0,05
04-2009	8,3	8,2	8,1	-	-9,8	-	-	0,06	0,06	0,06	0,06
05-2009	7,4	7,3	7,3	-	-5,7	-	-	0,02	0,07	0,07	0,07
06-2009	6,8	6,6	6,4	-	3,5	-	-	0,10	0,07	0,08	0,08
07-2009	7,9	7,6	7,4	-	14,6	-	-	0,11	0,08	0,08	0,09
08-2009	7,9	7,8	7,7	-	10,5	-	-	0,04	0,07	0,08	0,08
09-2009	10,4	10,2	10,1	-	4,6	-	-	0,06	0,08	0,08	0,08
10-2009	8,9	8,8	8,6	-2,7	-1,8	-	-	0,07	0,07	0,08	0,08
11-2009	10,2	10,1	9,7	-6,3	-6,4	82,7	95,3	0,10	0,07	0,07	0,08
12-2009	9,0	8,9	8,8	-11,6	-11,7	89,8	96,1	0,10	0,06	0,06	0,07
01-2010	8,6	7,4	8,9	-19,8	-20,5	85,2	86,8	0,01	0,05	0,05	0,07
02-2010	7,4	7,2	7,1	-19,3	-19,5	86,2	87,5	0,17	0,04	0,04	0,05
03-2010	9,0	8,8	12,2	-16,7	-17,2	87,8	88,3	0,11	0,05	0,05	0,06
04-2010	8,9	8,7	8,2	-6,2	-6,3	89,6	96,6	0,12	0,06	0,06	0,07
05-2010	8,4	8,3	8,7	-3,2	-2,8	92,1	96,8	0,03	0,06	0,06	0,07
06-2010	7,3	7,2	7,0	2,2	2,5	90,5	85,8	0,10	0,07	0,08	0,08
07-2010	6,9	6,8	6,6	9,8	10,2	82,1	74,1	0,10	0,07	0,07	0,08
08-2010	8,0	8,0	7,8	10,8	11,1	88,5	84,2	0,06	0,07	0,07	0,08
09-2010	8,6	8,5	8,3	6,7	6,9	74,2	64,0	0,06	0,08	0,08	0,09
10-2010	10,8	10,7	10,2	1,4	1,6	86,6	90,1	0,07	0,07	0,08	0,09
11-2010 (au 2010-11-08)	11,2	11,0	10,9	-0,3	-0,1	83,5	78,2	0,06	0,08	0,08	0,09
<b>Moyenne<sup>4</sup></b>	<b>8,4</b>	<b>8,2</b>	<b>8,0</b>	<b>-3,6</b>	<b>-5,4</b>	<b>86,5</b>	<b>84,9</b>	<b>0,07</b>	<b>0,07</b>	<b>0,07</b>	<b>0,07</b>

<sup>4</sup> Les valeurs moyennes présentées ont été calculées à partir de l'ensemble des données (valides) aux 10 minutes.

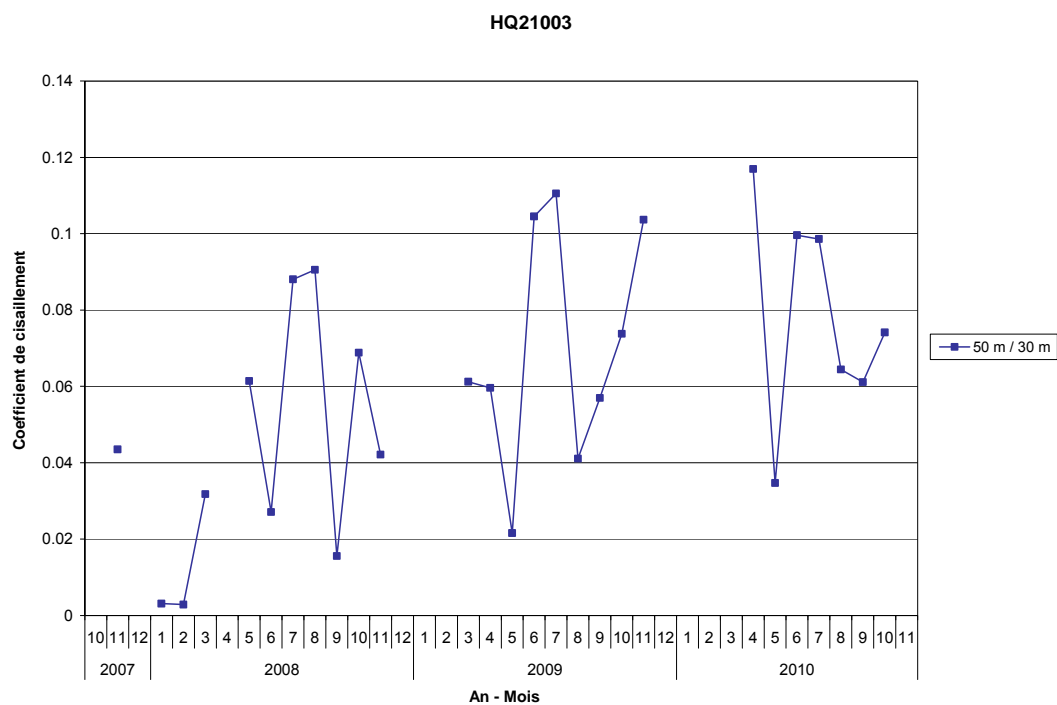




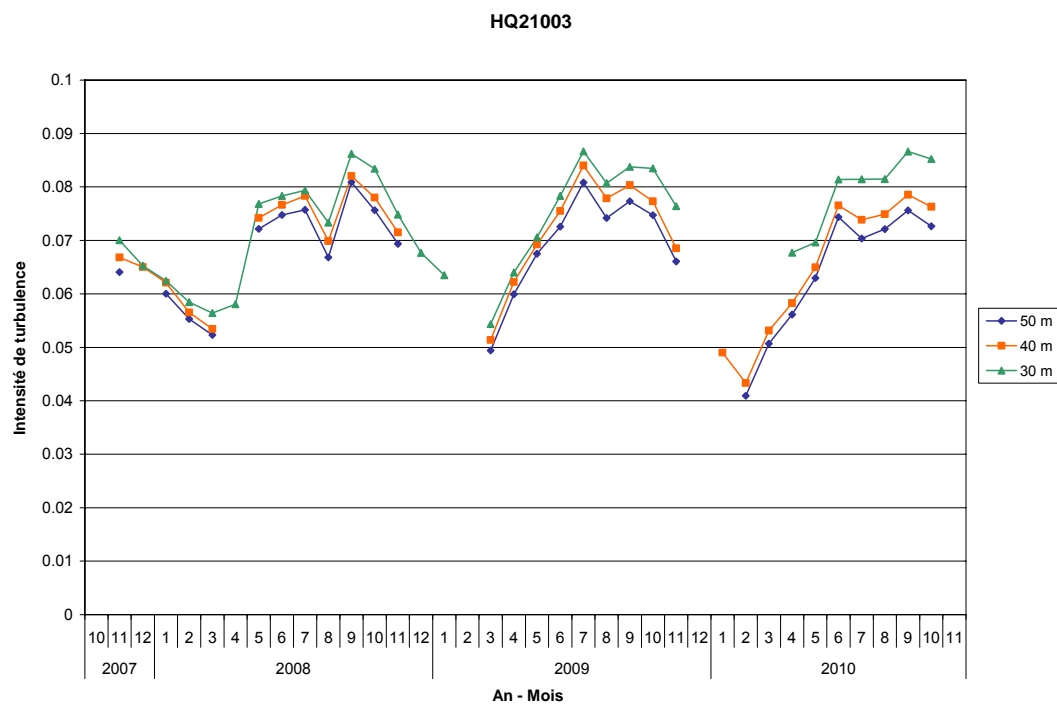
**Figure 4-1 : Évolution mensuelle de la température**



**Figure 4-2 : Évolution mensuelle des vitesses du vent**



**Figure 4-3 : Évolution mensuelle des coefficients de cisaillement vertical**



**Figure 4-4 : Évolution mensuelle des intensités de turbulence**

## 4.2 Évolution journalière des observations et des paramètres dérivés

Les observations météorologiques suivent souvent des cycles journaliers. Ces cycles sont principalement causés par la variation du rayonnement incident le jour et du rayonnement sortant la nuit. Le rayonnement incident augmente la température atmosphérique à la surface du sol, laquelle atteint son maximum vers l'après-midi, tandis que le rayonnement sortant tend à diminuer celle-ci pour atteindre un minimum avant le lever du soleil. 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. HéliMAX utilise également le cycle journalier comme méthode supplémentaire dans le processus de contrôle de qualité des données observées.

### 4.2.1 Cycle journalier de la température ambiante

Le cycle journalier de la température atmosphérique est le résultat direct du rayonnement solaire incident. Généralement, la température atteint un maximum en après-midi et un minimum juste avant le lever du soleil.

La Figure 4-5 montre le cycle journalier de la température pour le mât d'Akulivik. Les observations suivent un cycle typique, c.-à-d. elles augmentent pendant la journée et diminuent en soirée. Il est à noter que la variation horaire offre une amplitude très faible (moins de 2°C).

### 4.2.2 Cycle journalier de la vitesse du vent

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 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. Ces phénomènes peuvent alors atténuer la différence observée entre le maximum et le minimum quotidiens ou même causer un minimum durant l'après-midi dans le cycle journalier.

La Figure 4-6 présente le cycle journalier de la vitesse du vent pour le site étudié. On remarquera que les vitesses sont assez constantes durant toute la journée avec des hausses en après-midi et au milieu de la nuit, le maximum atteint est vers le début de soirée. On observe également les vitesses très semblables pour les niveaux 30 m, 40 m et 50 m (moins de 1 m/s) ce qui porte à croire que de légères inversions soient fréquentes.

### 4.2.3 Cycle journalier du coefficient de cisaillement vertical du vent

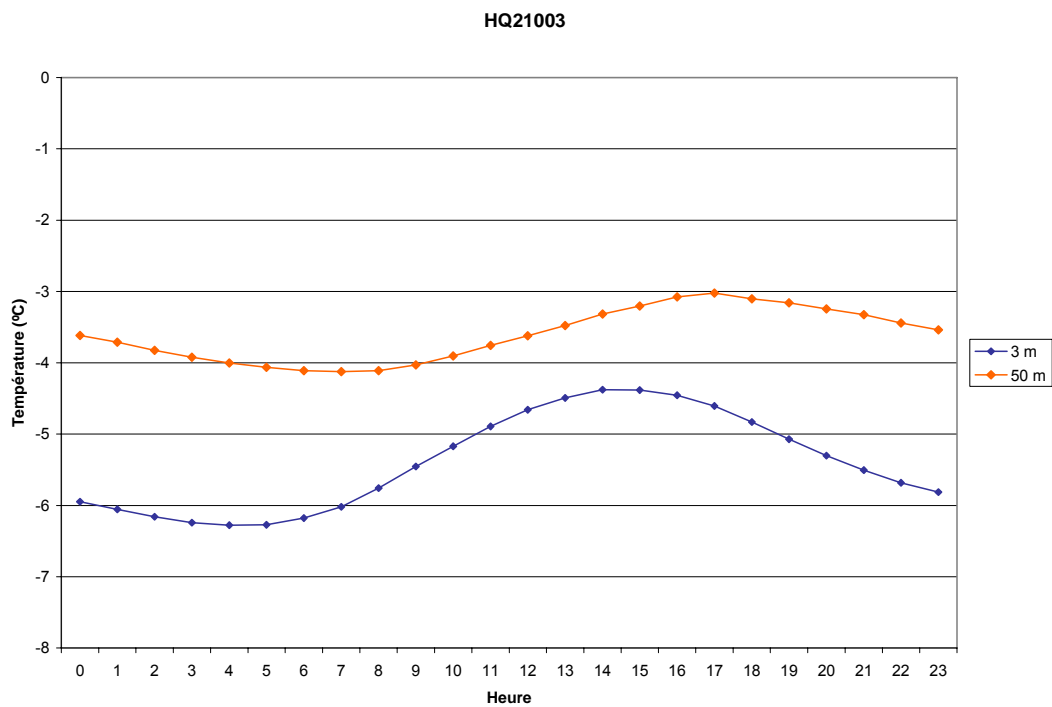
À l'opposé des phénomènes cycliques observés dans les sections 4.2.1 et 4.2.2, le coefficient de cisaillement vertical du vent atteint habituellement un minimum au cours de la journée et un maximum pendant la nuit. Le cisaillement suit généralement ce type de cycle parce que, durant le jour, l'accroissement du mélange thermique vertical de l'atmosphère atténue la différence entre les vitesses du vent mesurées aux différents niveaux.

La Figure 4-7 montre le cycle journalier du coefficient de cisaillement du vent. Les valeurs sont généralement plus élevées pendant la nuit et plus basses pendant la journée.

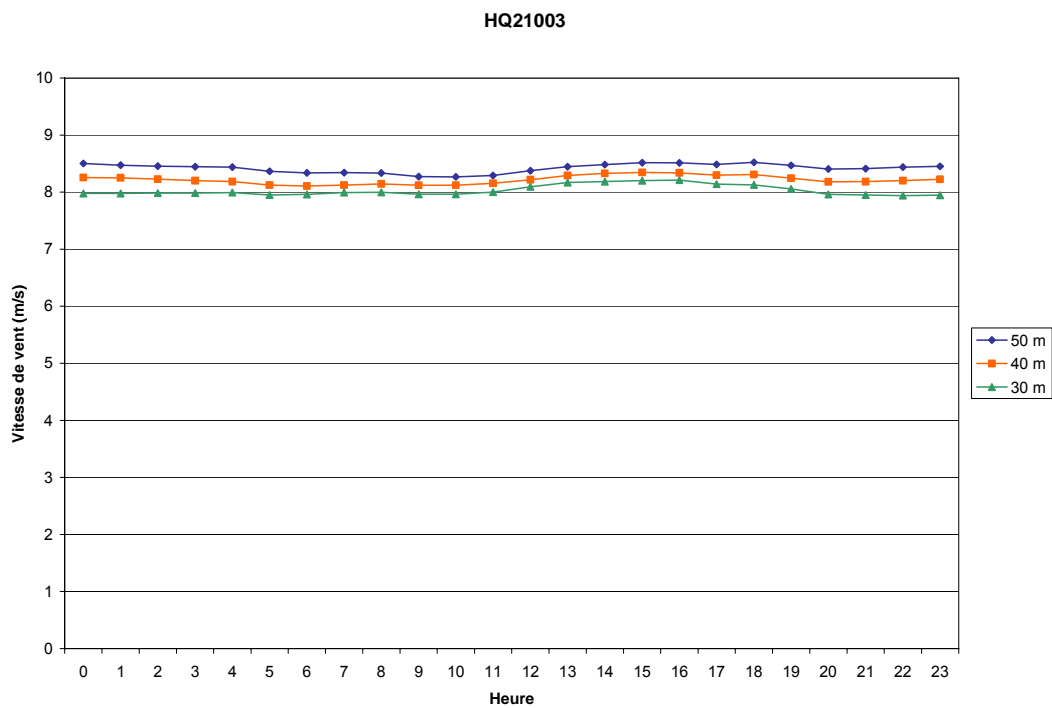
### 4.2.4 Cycle journalier de l'intensité de turbulence

L'intensité de turbulence est également influencée par le cycle journalier du rayonnement solaire et donc par le mélange thermique vertical de l'atmosphère. Généralement, l'intensité de turbulence atteint un maximum en début d'après-midi.

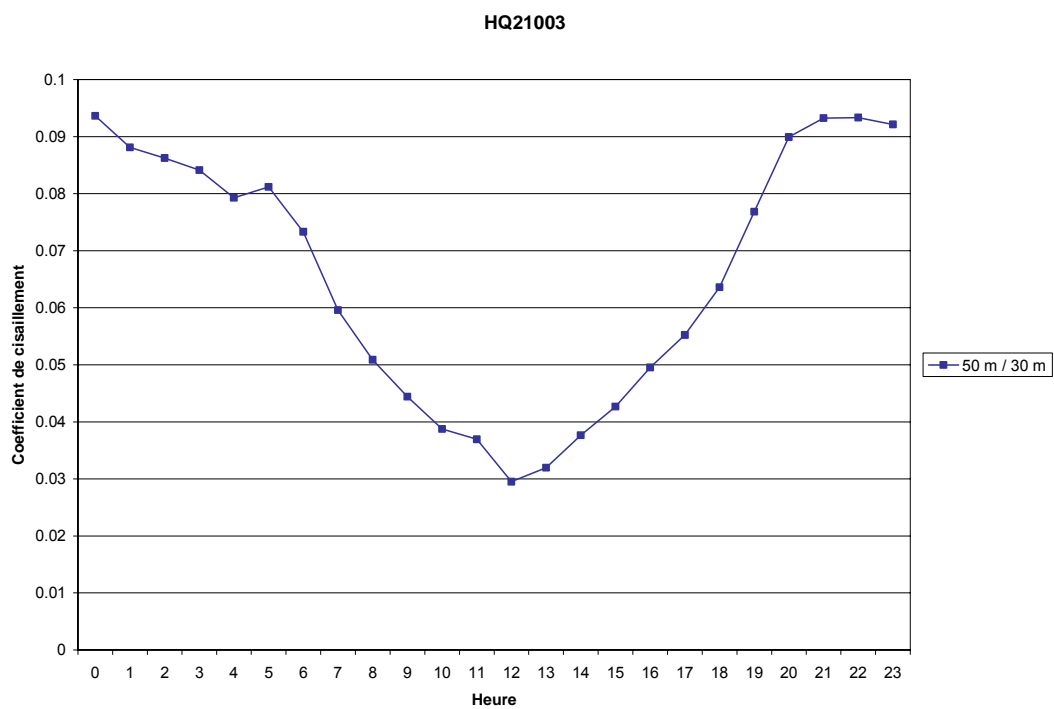
La Figure 4-8 présente le cycle journalier de l'intensité de turbulence pour le site d'Akulivik. L'intensité de turbulence est faible pour le mât.



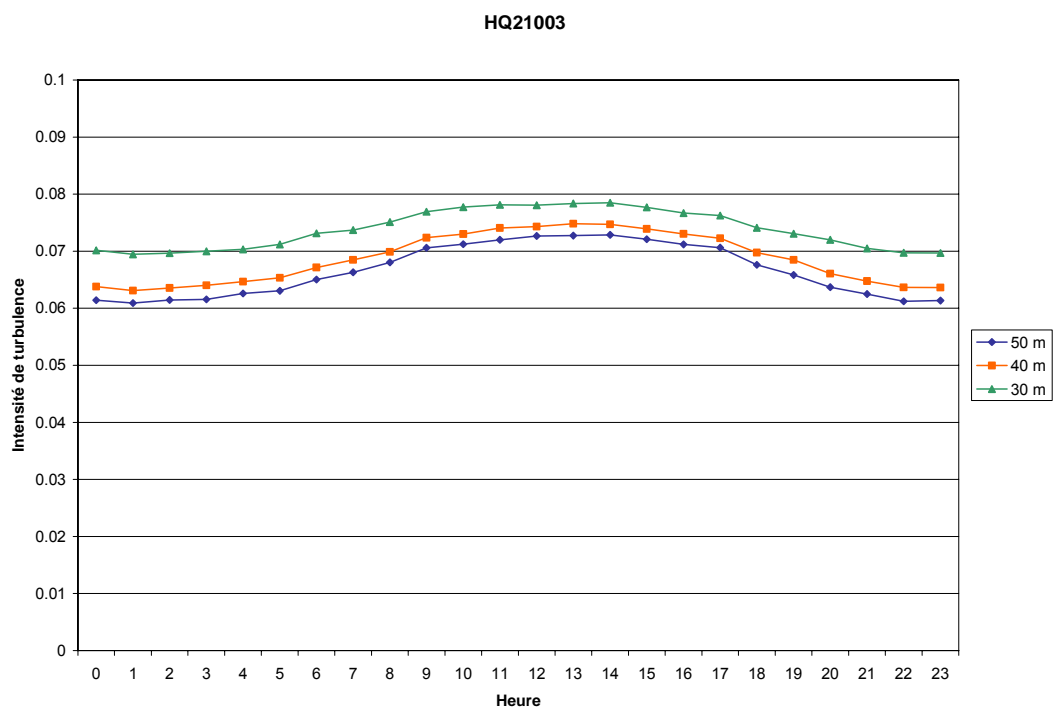
**Figure 4-5 : Cycle journalier de la température**



**Figure 4-6 : Cycle journalier de la vitesse des vents**



**Figure 4-7 : Cycle journalier du coefficient de cisaillement vertical**



**Figure 4-8 : Cycle journalier de l'intensité de turbulence**

### 4.3 Distribution directionnelle des observations et des paramètres dérivés

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 ainsi que les paramètres dérivés peuvent varier en fonction de la provenance du vent. Il est donc important de quantifier la distribution directionnelle des observations et des paramètres dérivés.

#### 4.3.1 Distribution directionnelle de la vitesse 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 un 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.

La Figure 4-9 montre la rose des vents observée au mât d'Akulivik pour le niveau supérieur de mesure (50 m). La direction des vents prédominants est est-sud-est. Le tableau de l'Annexe B montre les données utilisées pour créer cette rose des vents.

En plus de cette rose des vents, la distribution directionnelle des vitesses moyennes observées pour le mât est présentée à la Figure 4-10.

#### 4.3.2 Distribution directionnelle de la densité d'énergie

La densité d'énergie est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Par conséquent, même si la distribution directionnelle de la densité d'énergie est souvent similaire à celle de la vitesse du vent, elle présente parfois ses propres particularités.

La Figure 4-11 présente la distribution directionnelle de la densité d'énergie pour tous les niveaux d'observation du mât de mesure installé à Akulivik. La distribution directionnelle de la densité d'énergie correspond largement à celle des vents prédominants.

#### 4.3.3 Distribution directionnelle du coefficient de cisaillement du vent

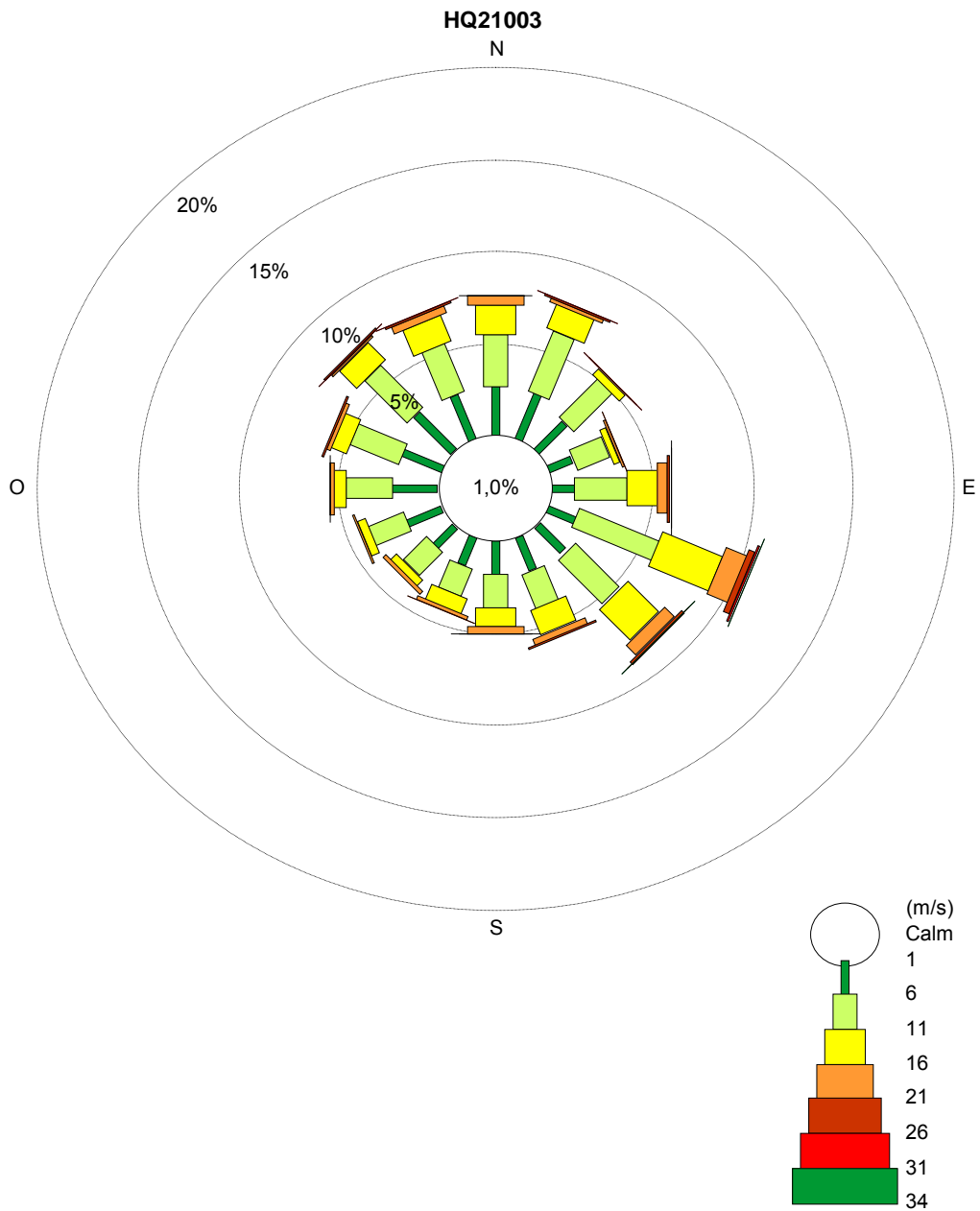
Le coefficient de cisaillement vertical du vent est influencé par l'environnement immédiat du mât de mesure ainsi que par l'environnement rencontré sur la trajectoire parcourue par le vent. Il dépend aussi de la vitesse du vent et est généralement plus élevé par vents faibles.

La Figure 4-12 montre la distribution directionnelle du coefficient de cisaillement vertical du vent au mât de mesure. Les valeurs du coefficient de cisaillement correspondent à ce à quoi on s'attendrait pour le type de terrain sur lequel le mât est installé. Les valeurs sont les plus élevées dans les secteurs nord-nord-est et nord-est alors qu'elles sont les plus faibles dans les secteurs allant du sud-sud-ouest à sud et de l'ouest-nord-ouest au nord-nord-ouest (sens horaire). Ces variations directionnelles sont vraisemblablement causées non pas par le sillage du mât mais plutôt par un changement de topographie ou de rugosité dans ces secteurs.

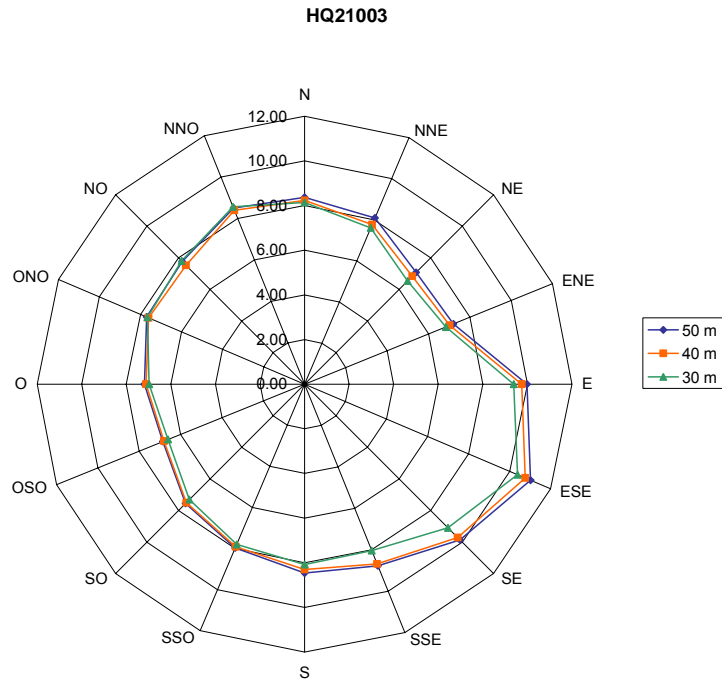
#### 4.3.4 Distribution directionnelle de l'intensité de turbulence

La distribution directionnelle de l'intensité de turbulence est également influencée par l'environnement immédiat autour d'un mât de mesure. Elle est généralement plus grande lorsque les vents passent au-dessus d'obstacles ou de surfaces ayant des valeurs de rugosité élevées. Cependant, l'intensité de turbulence diminue généralement avec l'altitude, puisque l'effet de la rugosité de la surface diminue avec la hauteur.

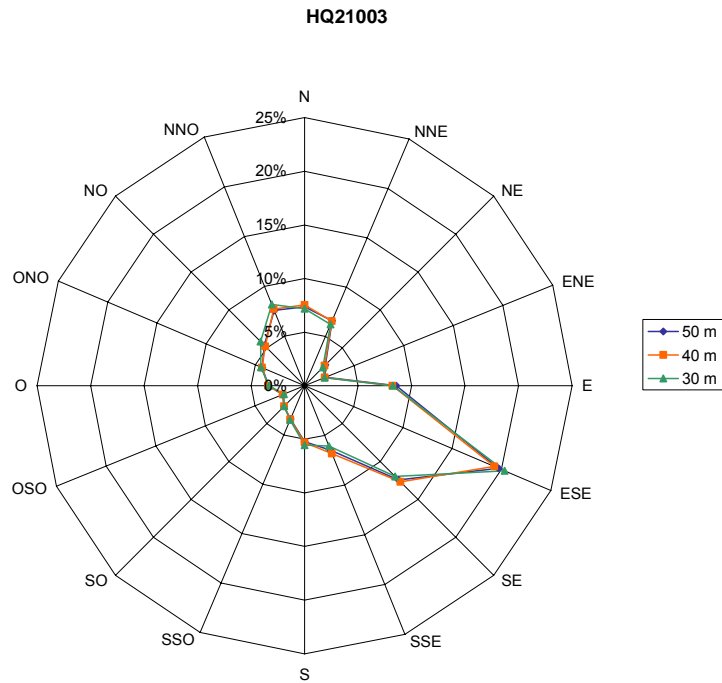
La Figure 4-13 présente les distributions directionnelles de l'intensité de turbulence pour le mât de mesure. L'intensité de turbulence est faible pour chaque secteur.



**Figure 4-9 : Rose des vents observée à 50 m**

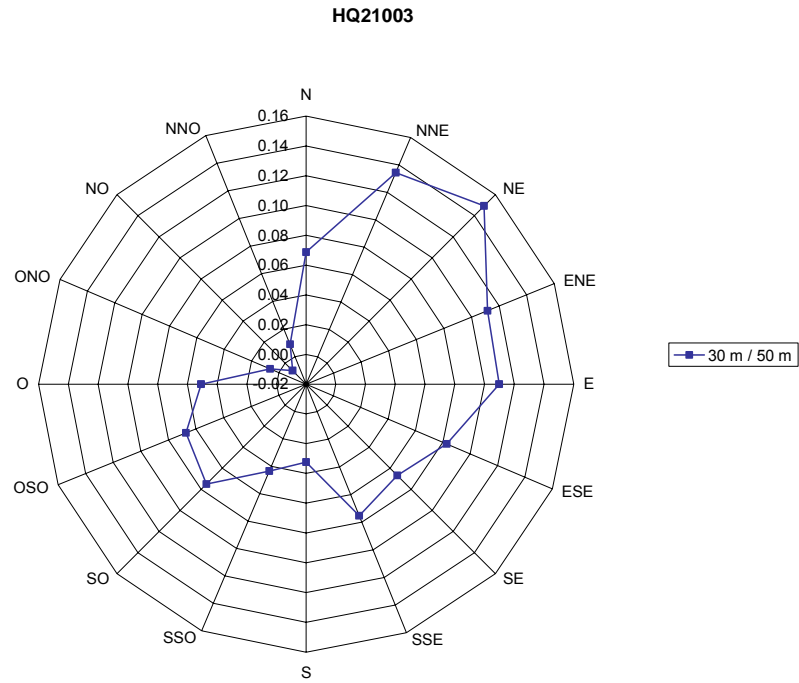


**Figure 4-10 : Distribution directionnelle des vitesses moyennes du vent (m/s)**

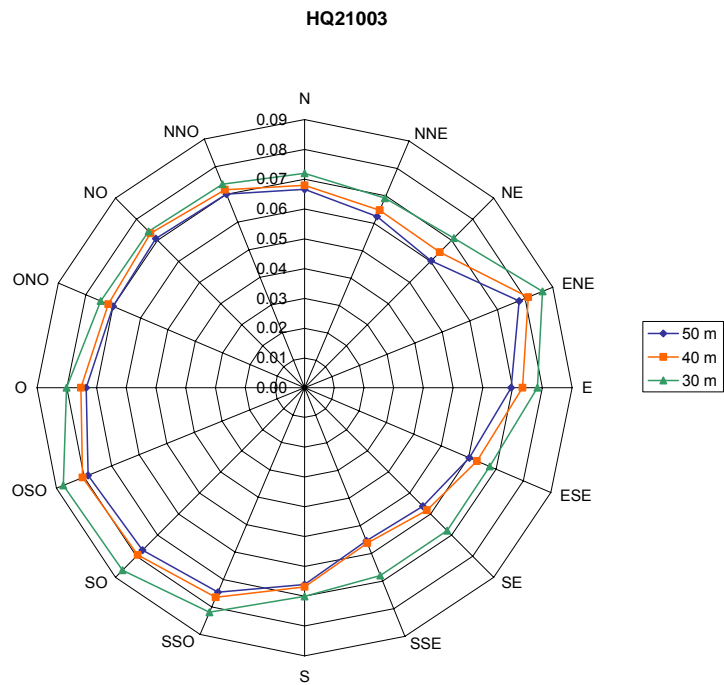


**Figure 4-11 : Distribution directionnelle de la densité d'énergie (%)**





**Figure 4-12 : Distribution directionnelle du coefficient de cisaillement vertical**



**Figure 4-13 : Distribution directionnelle de l'intensité de turbulence**

#### 4.4 Distribution des vitesses du vent

La distribution statistique des vitesses du vent peut varier d'un endroit à l'autre, car elle dépend des conditions climatiques locales, de la topographie et du type de terrain. Généralement, la distribution statistique de Weibull représente assez fidèlement la variation réelle des vitesses du vent observées. L'expression mathématique de la distribution de Weibull est présentée à l'Annexe C.

Les paramètres d'échelle (c) ainsi que les paramètres de forme (k) qui caractérisent la distribution des observations recueillies au niveau supérieur de mesure (50 m), sont présentés au Tableau 4-2. Ces paramètres ont été calculés à partir d'un logiciel interne et validés avec WASP.

Tableau 4-2 : Paramètres de Weibull

Paramètre de Weibull	
c	9,5
k	1,9

La Figure 4-14 présente l'histogramme des vitesses de vents observées pour le niveau supérieur de mesure (50 m) sur une période de 36 mois. La courbe de la fonction de distribution de Weibull est superposée à l'histogramme. Le tableau de l'Annexe B présente les données utilisées pour créer la distribution statistique de Weibull.

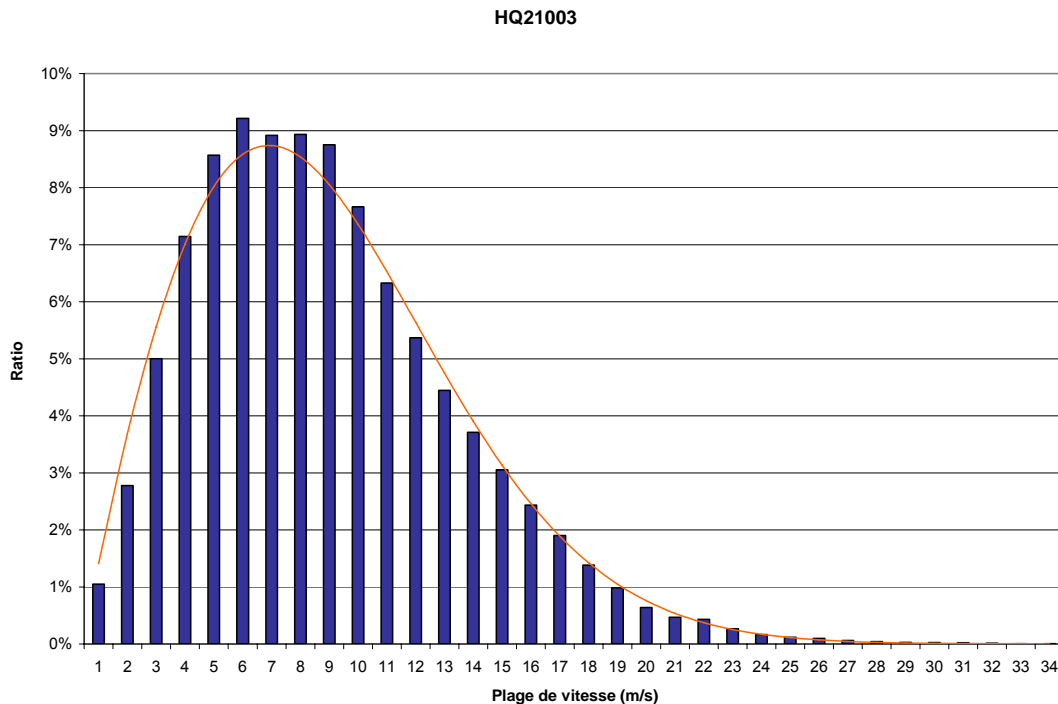


Figure 4-14 : Distribution de la fréquence des vents à 50 m

## 4.5 Variation de la turbulence avec la vitesse

Dans la couche limite atmosphérique, le vent est un écoulement d'air turbulent. De manière générale, l'intensité de turbulence est plus élevée lors des vents faibles. La caractérisation de la variation de la turbulence avec la vitesse du vent a un intérêt par le fait qu'elle permet de voir l'évolution de l'intensité de turbulence sur la plage d'opération des éoliennes.

La Figure 4-15 montre la variation de la turbulence en fonction de la vitesse du vent. La turbulence reste à peu près constante aux vitesses (8 m/s à 27 m/s), à une valeur située entre 0,05 et 0,07. Le mât de mesure présente des valeurs de turbulence quelque peu plus variables pour des vitesses supérieures à 27 m/s. Ceci est dû à une occurrence plus faible des vitesses du vent observées au-dessus de cette valeur au cours de la période de mesure.

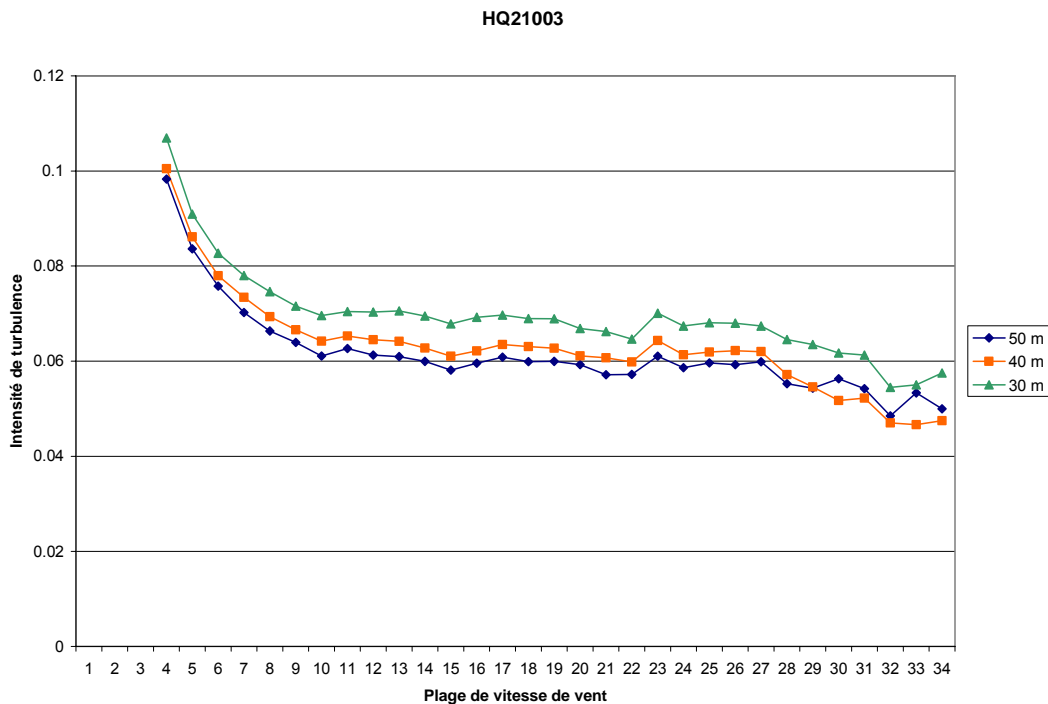


Figure 4-15 : Variation de l'intensité de turbulence classée par plage de vitesse

## 5 AJUSTEMENT CLIMATOLOGIQUE ET EXTRAPOLATION VERTICALE

Cette section décrit l'ajustement climatologique ainsi que l'extrapolation verticale à la hauteur de moyeu (pour une éolienne typique) de la vitesse du vent.

### 5.1 Ajustement climatologique des vitesses du vent

Les vitesses du vent peuvent varier significativement d'une année à l'autre en raison de la grande 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 de vent est généralement fait en recourant à plusieurs régressions linéaires multiples entre les moyennes mensuelles des vitesses observées par le mât de mesure et des vitesses observées par des stations météorologiques à proximité. Les coefficients de régression linéaire obtenus pour chacune de ces stations météorologiques sont alors utilisés afin de procéder à l'ajustement climatologique des vitesses observées sur le site.

L'ajustement climatologique des vitesses s'appuie sur l'équation suivante :

$$V_{\text{mât}}^{\text{climato}} = V_{\text{mât}}^{\text{courte\_période}} + \sum_{i=1}^n a_i (V_i^{\text{climato}} - V_i^{\text{courte\_période}})$$

où :

$V_i^{\text{climato}}$ :	Vitesse moyenne climatologique à une station météorologique de référence <sup>5</sup>
$V_i^{\text{courte\_période}}$ :	Vitesse moyenne d'une courte période à une station météorologique de référence
$V_{\text{mât}}^{\text{climato}}$ :	Vitesse moyenne climatologique au mât de mesure
$V_{\text{mât}}^{\text{courte\_période}}$ :	Vitesse moyenne d'une courte période au mât de mesure
1,2,...,n :	Index des stations météorologiques
$a_i$ :	Coefficients de régression linéaire

Les stations météorologiques servant à l'ajustement climatologique de la vitesse du vent sont sélectionnées en tenant compte de conditions et de critères stricts. Plusieurs stations d'Environnement Canada (EC) ont initialement été considérées, celles-ci étant à proximité du site. Des tests statistiques ont ensuite été effectués sur ces stations afin d'évaluer la corrélation entre les données des stations météorologiques et les observations de chaque mât de mesure.

Finalement, aucune station météorologique d'Environnement Canada ne présentait une corrélation adéquate avec le mât de mesure. L'ajustement climatologique a donc été fait à l'aide des points NCEP. L'emplacement du mât d'Akulivik est situé directement au milieu d'un rectangle formé par quatre points NCEP.<sup>6</sup>

<sup>5</sup> Station météorologique de référence telle que celle d'Environnement Canada

<sup>6</sup> Les données NCEP utilisent des observations météorologiques provenant de plusieurs sources comme les radiosondes, les catasondes, les ballons sondes, les stations météorologiques de surface, les observations marines de surface, les avions et les satellites et qui ont été introduites dans une grille tridimensionnelle globale qui utilise un modèle atmosphérique numérique (<http://www.cdc.noaa.gov>).

Une combinaison de ces quatre points NCEP à un niveau de pression de 92,5 kPa a été utilisée pour faire l'ajustement climatologique de la vitesse du vent:

- 60° N, 77,5° O;
- 62,50° N, 77,5° O;
- 60° N, 80° O; et
- 62,50° N, 80° O.

La Figure 5-1 montre les emplacements du mât, des stations météorologiques d'Environnement Canada étudiées et des points NCEP utilisés pour effectuer l'ajustement climatologique.

Les données de ces points NCEP ont été utilisées afin de réaliser l'ajustement climatologique de la vitesse du vent. La corrélation entre le mât de mesure et les points NCEP est présentée au Tableau 5-1. Puisqu'il y a un degré acceptable de corrélation, la régression linéaire est considérée comme étant satisfaisante.

## 5.2 Profil vertical de la vitesse du vent

Tel qu'indiqué à la section 4.1.3, l'industrie éolienne utilise deux lois mathématiques pour réaliser l'extrapolation verticale de la vitesse du vent : la loi de la puissance et la loi logarithmique. La loi de la puissance est caractérisée par le coefficient de cisaillement vertical,  $\alpha$ , alors que la loi logarithmique est caractérisée par la longueur de rugosité  $Z_0$ <sup>7</sup>. Les expressions mathématiques de ces deux lois figurent à l'Annexe C.

La loi logarithmique est préférée puisqu'elle représente mieux le profil vertical réel du vent. Il est important de noter que de nombreux facteurs comme la topographie complexe, les obstacles, les forêts ou les rivages à proximité peuvent modifier significativement le profil du vent. De ce fait, une hauteur de déplacement est à l'occasion utilisée pour prendre en compte la présence de la végétation aux environs de la région étudiée. La hauteur de déplacement est équivalente à 2/3 de la hauteur moyenne de la végétation. Sa valeur est déterminée sur la base de données de cartographie numérique du terrain, de photos et/ou d'informations recueillies lors de visites de site. Dans le cas présent, aucune hauteur de déplacement n'a été considérée puisque le mât est installé en terrain découvert.

La vitesse du vent extrapolée à une hauteur de moyeu d'éolienne potentielle (45 m) est donnée au Tableau 5-1. Les calculs sont basés sur la loi logarithmique, tout en utilisant des valeurs horaires-mensuelles<sup>8</sup> de longueur de rugosité pour chacun des niveaux d'instrumentation.

---

<sup>7</sup> La longueur de rugosité  $Z_0$  est un paramètre utilisé lors de la modélisation des vitesses des vents. Elle est calculée à partir des données météorologiques recueillies sur site, tout en tenant compte des hauteurs de déplacement, le cas échéant.

<sup>8</sup> Moyennes horaires des longueurs de rugosité pour une journée moyenne de chaque mois.

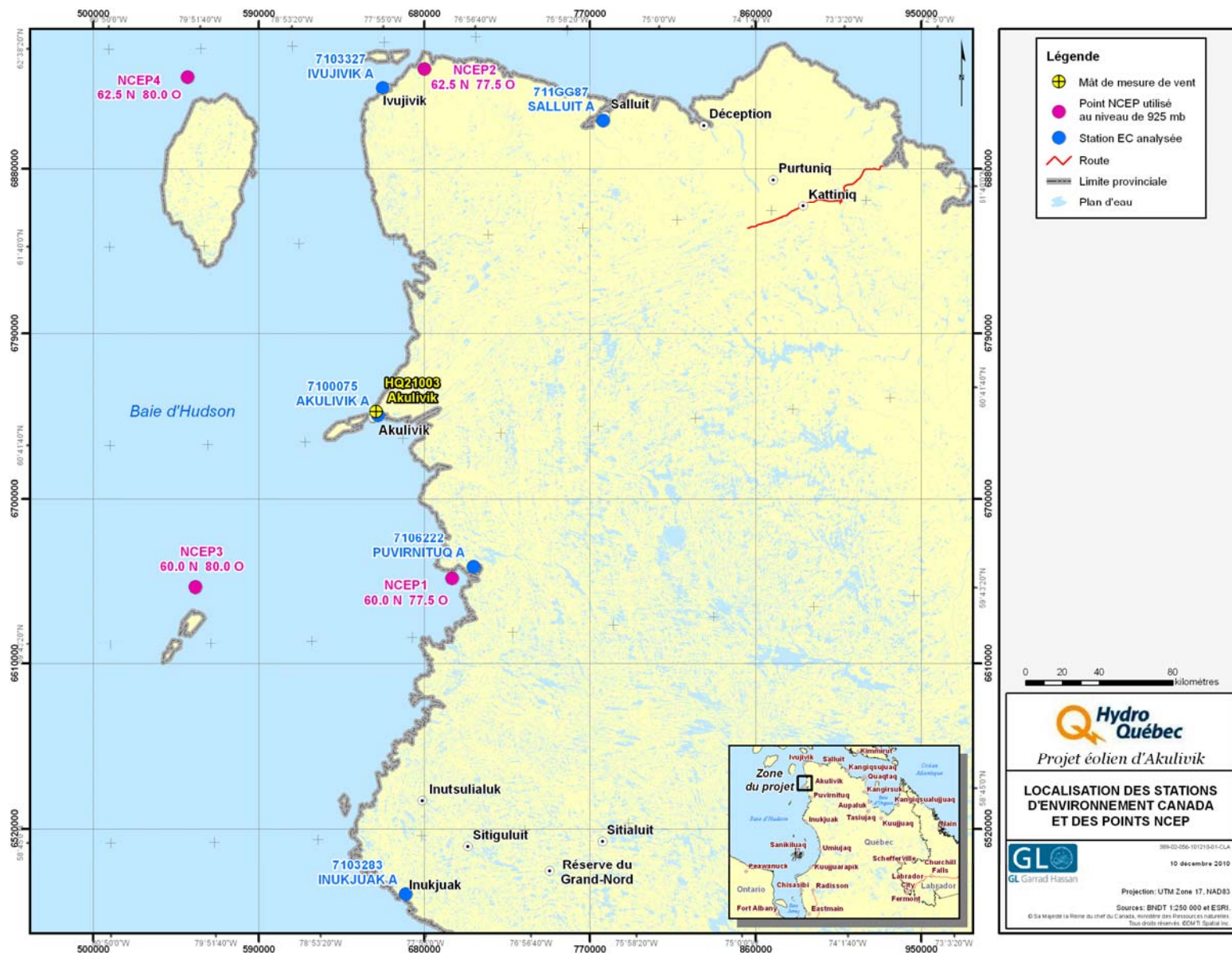


Figure 5-1 : Localisation des stations météorologiques et des points NCEP analysés et/ou utilisés pour l'ajustement climatologique des vitesses de vent

Tableau 5-1 : Tableau sommaire général

Informations générales	
Nom de la station	Akulivik
Numéro d'identification de la station	HQ21003
Élévation du terrain (m)	84
Période d'observation	2007-10-25 – 2010-11-08
Taux de recouvrement de la vitesse au niveau supérieur	voir le Tableau 3-2
Vitesses du vent observées	
Niveau 30 m (m/s)	8,0
Niveau 40 m (m/s)	8,2
Niveau 50 m (m/s)	8,4
Intensité de turbulence	
Intensité de turbulence (IT) à 50 m	0,07
Longueur de rugosité et coefficient de cisaillement	
Longueur de rugosité de la surface $Z_0$ (m)	0,000013
Hauteurs de référence pour $Z_0$	50 m – 40 m – 30 m
Coefficient de cisaillement vertical $\alpha$	0,07
Hauteurs de référence pour $\alpha$	50 m – 30 m
Ajustement climatologique de la vitesse du vent	
Points NCEP utilisés pour l'ajustement	60° N, 77,5° O; 62,5° N, 77,5° O; 60° N, 80° O; et 62,5° N, 80° O (à 92,5 kPa).
Période utilisée pour l'ajustement	1998-2007
$R^2$	0,61 (30 m); 0,62 (40 m); 0,60 (50 m)
Vitesse du vent, après ajustement climatologique	
Vitesse au niveau à 30 m (m/s)	8,1
Vitesse au niveau à 40 m (m/s)	8,3
Vitesse au niveau à 50 m (m/s)	8,4
Vitesse du vent, après ajustement climatologique et extrapolation verticale	
Vitesse à 45 m au-dessus du sol (m/s)	8,3

## 6 CARTOGRAPHIE DE LA RESSOURCE ÉOLIENNE

Dans le cadre de cette analyse, la carte des vitesses de vent a été réalisée à l'aide du programme WAsP<sup>9</sup>, dont une description générale est fournie à l'Annexe D. Ce programme calcule les valeurs des vitesses de vent et leurs distributions directionnelles à une hauteur déterminée au-dessus du niveau du sol; il produit ainsi un champ représentant la variation spatiale du gisement éolien. Pour réaliser ceci, le modèle a besoin des données suivantes :

- le champ de données altimétriques numériques du domaine à modéliser;
- les valeurs de rugosité de surface pour le domaine, y compris les obstacles;
- les données de vent mesurées et ajustées climatologiquement pour chaque mât de mesure anémométrique située dans le domaine du projet.

Les données d'entrée utilisées pour exécuter le programme WAsP sont présentées au Tableau 6-1. La Figure 6-1 et la Figure 6-2 montrent respectivement la carte topographique et la carte de rugosité de surface du site qui ont servi à l'exécution du programme WAsP. Les données météorologiques utilisées dans le modèle sont les observations recueillies aux niveaux de mesure 30 m du mât Akulivik, après l'ajustement climatologique pour la première simulation et les observations recueillies au niveau de 40 m du même mât, après l'ajustement climatologique et l'extrapolation à 45 m, à l'aide du  $Z_0$  mensuel horaire pour la deuxième simulation.

**Tableau 6-1 : Données d'entrée du modèle WAsP**

Données d'entrée	Source des données	
<b>Données géographiques</b>		
Topographie	BNDT 50k – carte 1:50 000, Base nationale de données topographiques	
Rugosité de surface	BNDT 50k – carte 1:50 000, Base nationale de données topographiques	
<b>Données météorologiques</b>		
Mât et niveau d'instrumentation	Akulivik (HQ21003) à 30 m	Akulivik (HQ21003) à 40 m et extrapolé à 45 m
Période des données utilisées pour la simulation	2007-10-25 – 2010-10-24 (3 ans)	

Ces données sont entrées dans le programme de modélisation WAsP pour créer un champ de vitesses de 50 m de résolution, à deux hauteurs de moyeu potentielles (30 m et 45 m), sur le site correspondant à l'emplacement du futur parc éolien. Les dimensions du domaine du site sont choisies de manière à se conformer aux conditions de base requises par le modèle. Les cartes des vents produites par le programme WAsP peuvent être utilisées pour réaliser l'analyse du productible énergétique.

Les cartes des vitesses de vent et des densités de puissance sont respectivement présentées aux Figure 6-3 et Figure 6-6.

<sup>9</sup> Wind Atlas Analysis and Application Program du service Wind Energy Department du Risø National Laboratory.



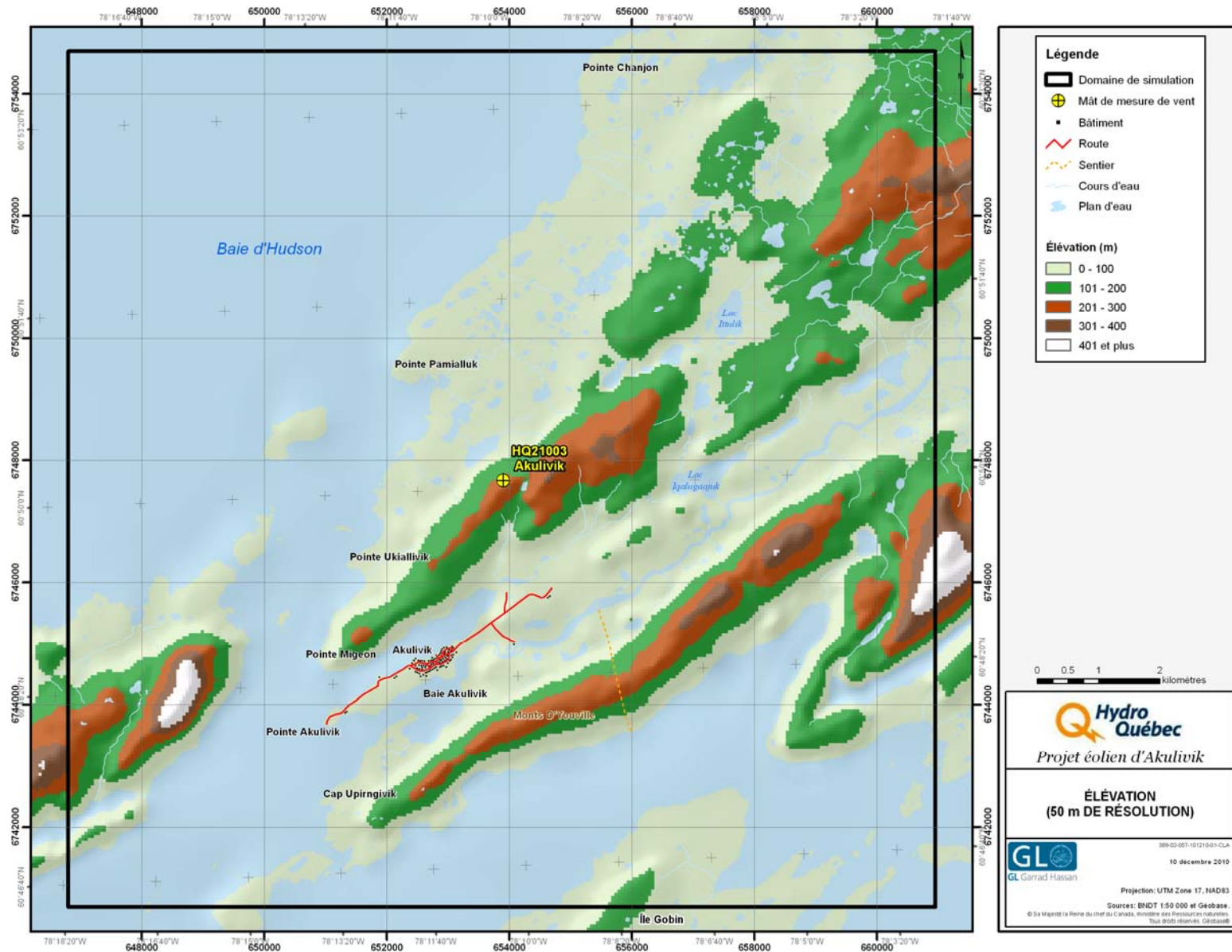


Figure 6-1 : Carte topographique du domaine

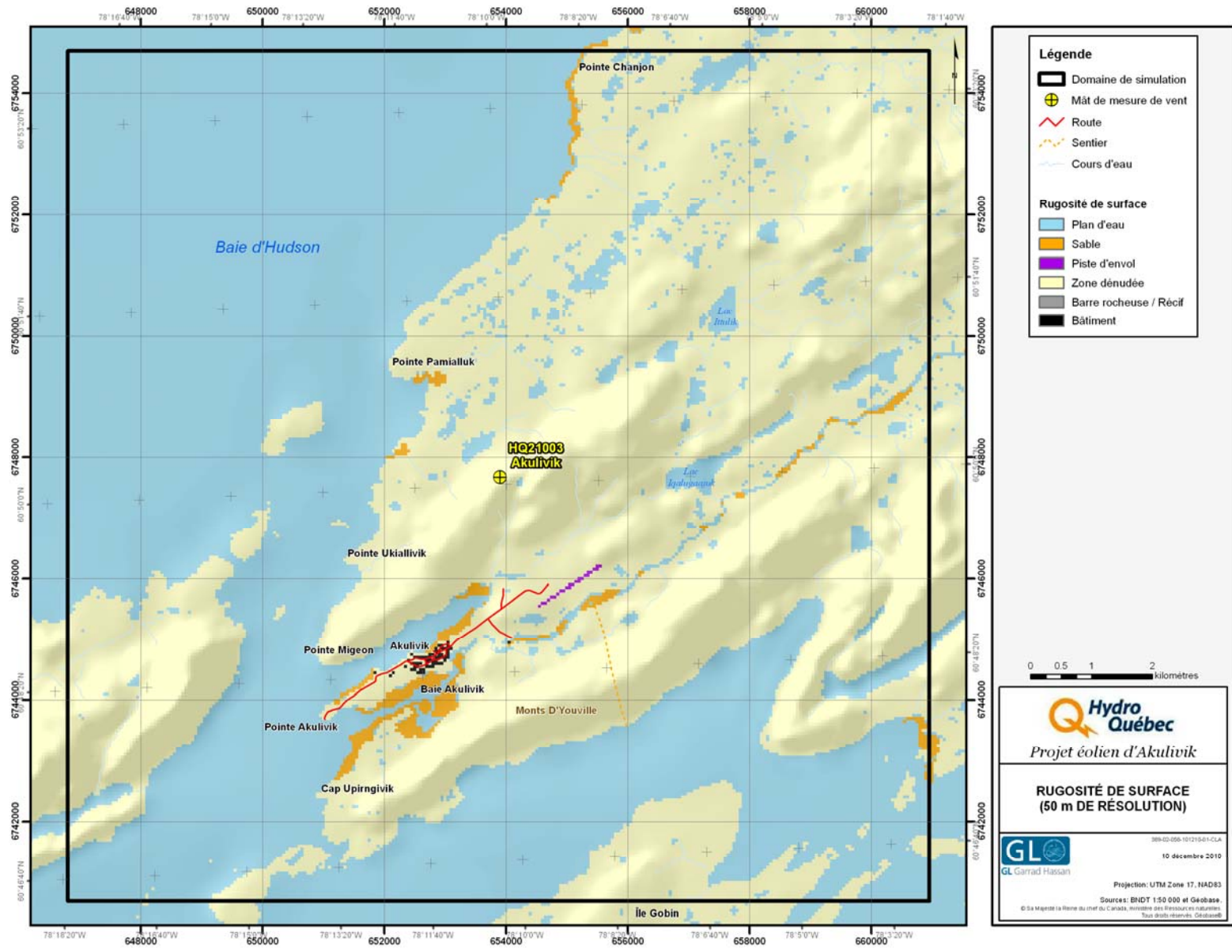


Figure 6-2 : Carte de la rugosité de surface du domaine

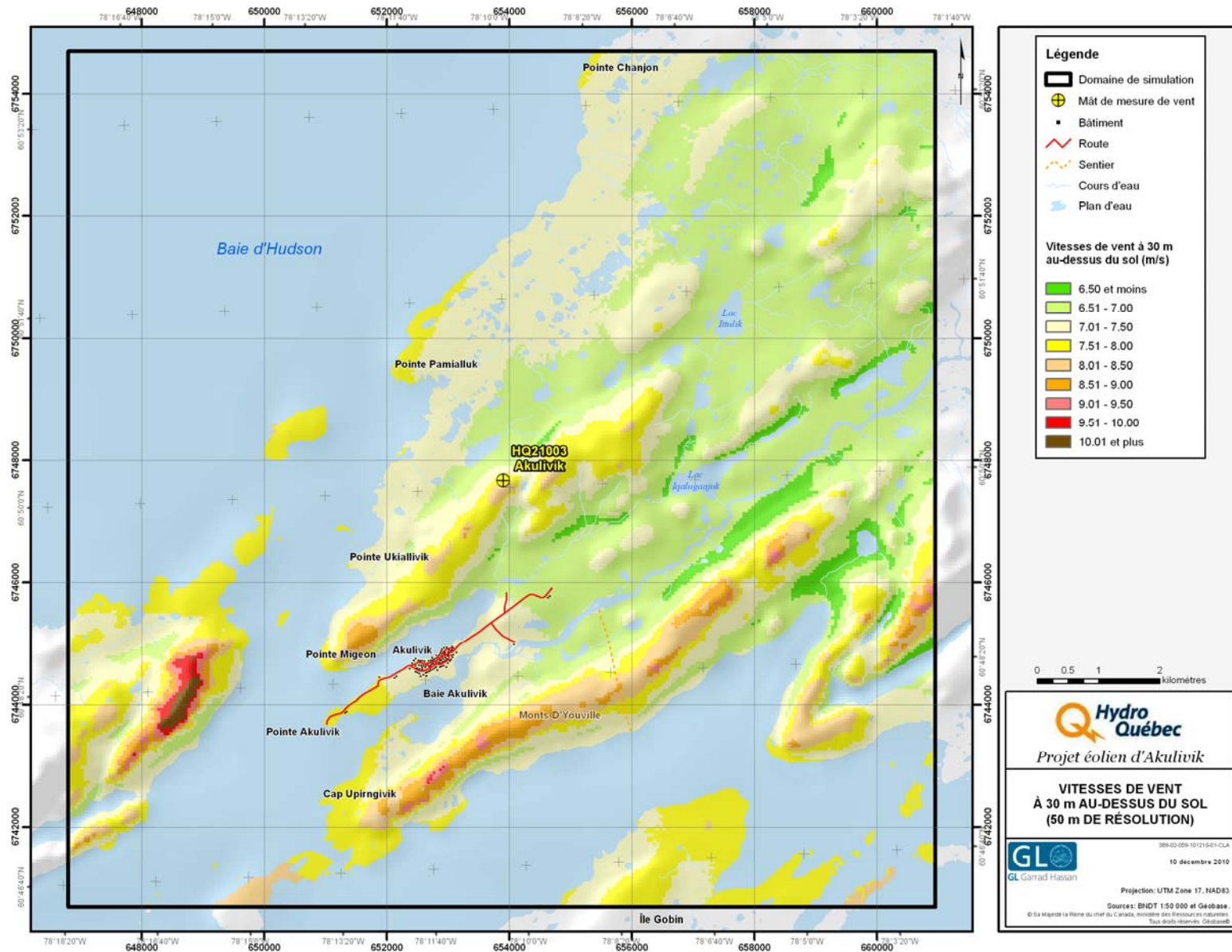


Figure 6-3 : Carte de la vitesse des vents du domaine, à 30 m au-dessus du sol

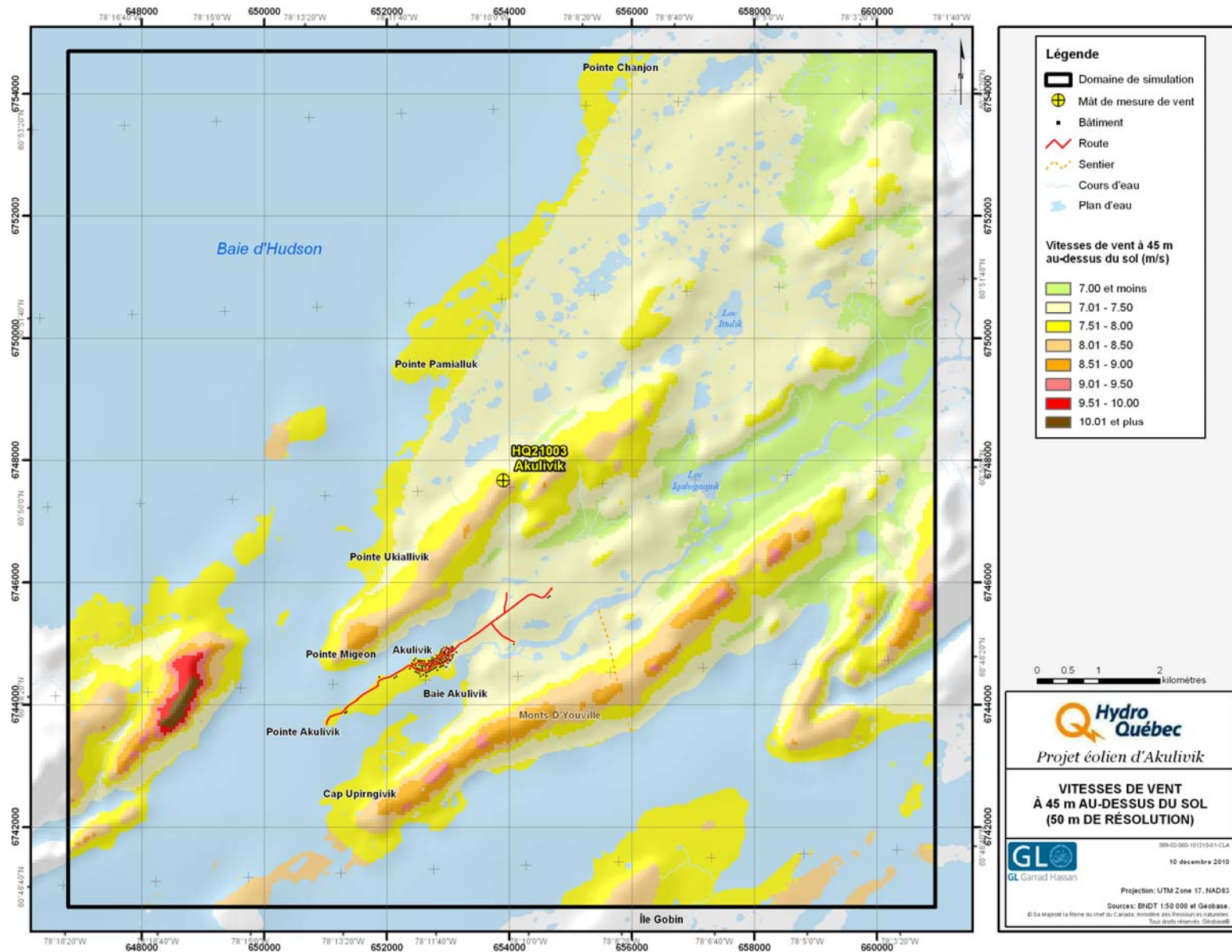


Figure 6-4 : Carte de la vitesse des vents du domaine, à 45 m au-dessus du sol

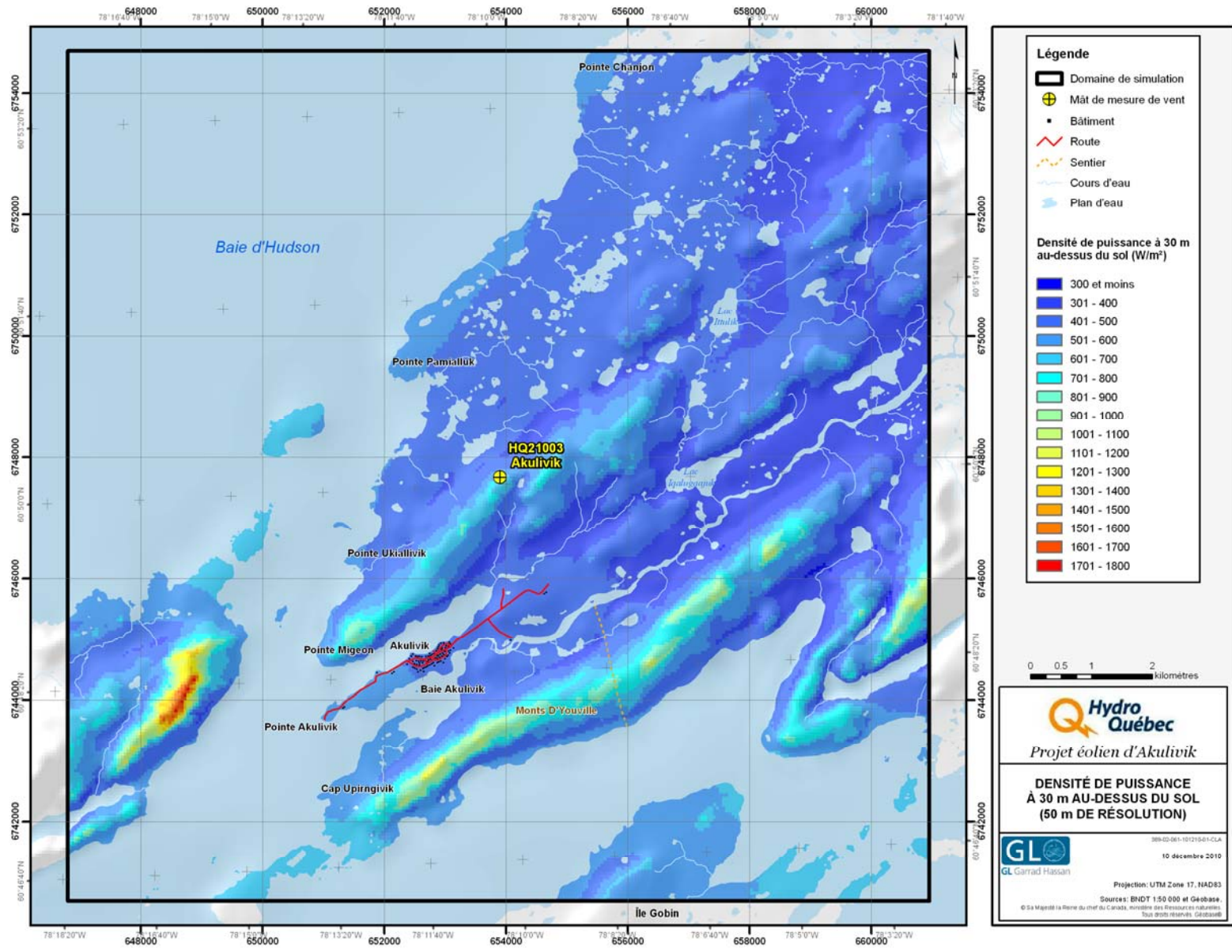


Figure 6-5 : Carte de la densité de puissance du domaine, à 30 m au-dessus du sol

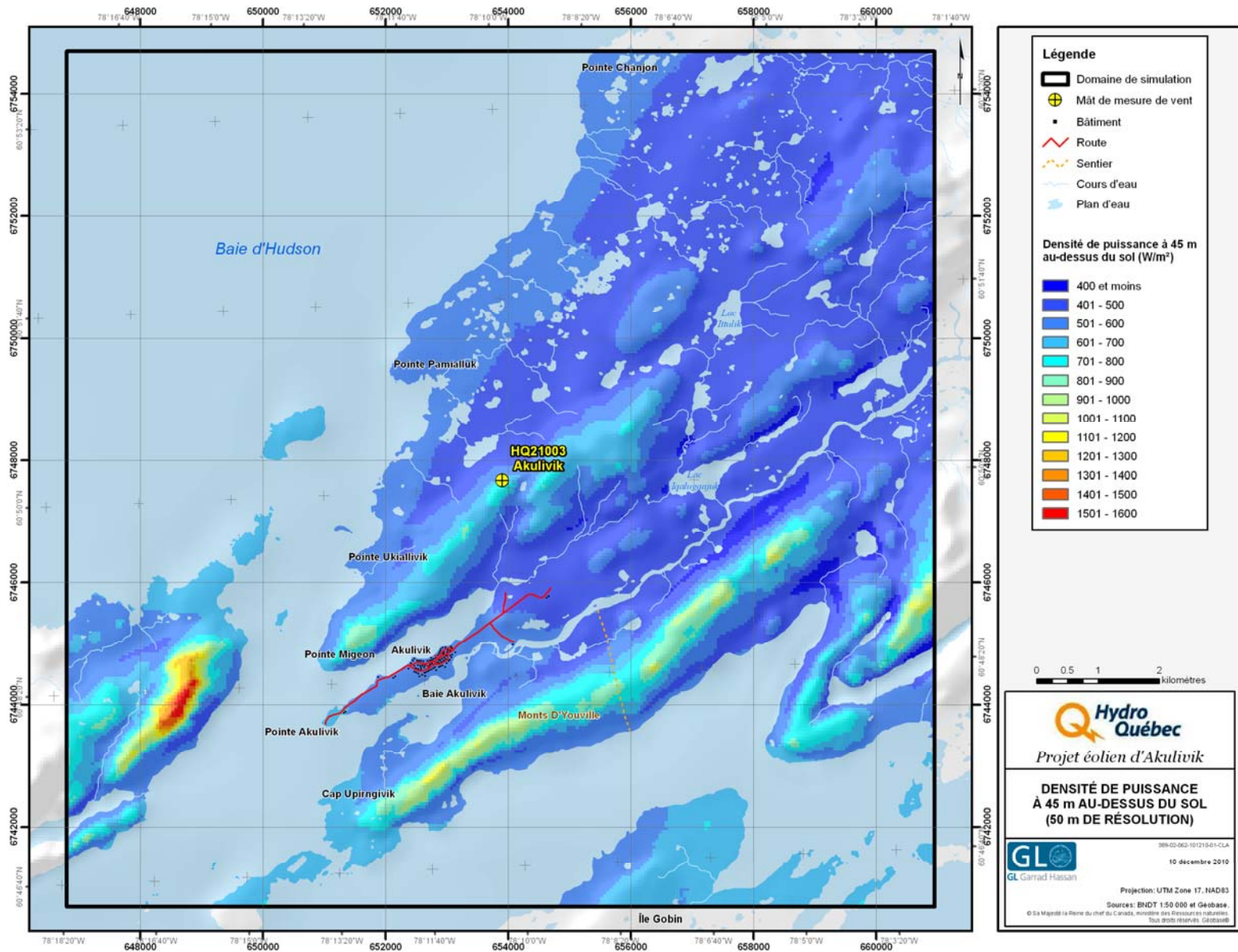


Figure 6-6 : Carte de la densité de puissance du domaine, à 45 m au-dessus du sol

## 7 DISCUSSION DES RÉSULTATS

En se fiant à son expertise professionnelle et aux méthodes d'usage dans l'industrie, Hélimax a combiné un contrôle de qualité rigoureux avec une analyse exhaustive des données pour réaliser une étude approfondie du gisement éolien sur le domaine du projet d'Akulivik, basée sur des observations recueillies sur une période de 36 mois. À l'issue de cette analyse, Hélimax conclut que la campagne d'évaluation de la ressource éolienne a fourni des observations valables. Cependant, le mât de mesure a subi des périodes importantes de glace, qui ont diminués les taux de recouvrement de certains instruments pendant les mois d'hiver, particulièrement en décembre 2007, en avril 2008, de décembre 2008 à février 2009 et de décembre 2009 à janvier 2010.

Le Tableau 7-1 présente le sommaire des résultats obtenus à la suite de l'analyse météorologique. Ces résultats doivent être interprétés en tenant compte des taux de recouvrement présentés dans la Section 3.3.

Tableau 7-1 : Sommaire des résultats de l'analyse météorologique

	Akulivik
Période de l'analyse météorologique	2007-10-25 – 2010-11-08
Vitesse moyenne du vent observée à 30 m (m/s)	8,0
Vitesse moyenne du vent observée à 40 m (m/s)	8,2
Vitesse moyenne du vent observée à 50 m (m/s)	8,4
Vitesse du vent annuelle ajustée à long terme – 30 m (m/s)	8,1
Vitesse du vent annuelle ajustée à long terme – 40 m (m/s)	8,3
Vitesse du vent annuelle ajustée à long terme – 50 m (m/s)	8,4
Vitesse du vent annuelle, après ajustement climatologique et extrapolation à 45 m (m/s)	8,3

Il est important de noter qu'un niveau d'incertitude devra être associé aux valeurs présentées au Tableau 7-1 en raison des facteurs suivants :

- **la période de mesure** : Il est cependant important de noter qu'un niveau d'incertitude est associé à ces valeurs bien que les données analysées soient issues d'une période d'observation de 36 mois. L'incertitude associée à cette variable diminuera au fur et à mesure que davantage de données seront recueillies.
- **les mesures des vitesses des vents** : ce facteur comprend les incertitudes associées à l'installation, au calibrage, au vieillissement, à la survitesse, ainsi qu'à la verticalité des instruments, de même qu'à la distorsion engendrée par le mât ou les bras de montage.
- **l'ajustement climatologique** : même si la représentativité des vitesses enregistrées au site a été vérifiée avec les données des points de référence NCEP, il demeure un certain degré d'incertitude associée à la vitesse après ajustement climatologique.
- **l'extrapolation verticale** : l'incertitude associée à la loi logarithmique utilisée pour caractériser le profil vertical du vent est principalement due aux paramètres d'extrapolation déduits.
- **l'extrapolation horizontale (modélisation WAsP)** sur le domaine du projet, y compris les incertitudes associées au modèle, à la complexité du terrain, à la qualité des données topographiques et de rugosité, ainsi qu'aux distances entre les éoliennes et le mât de mesure.
- **la variabilité interannuelle** est une caractéristique du vent qui ne peut pas être atténuée par l'allongement de la période d'observation. Pour une année et un site donnés, il arrive régulièrement que les vitesses de vent varient de plus de 10 %, et plus rarement de plus de 20 %, par rapport à la moyenne climatique.

Bien qu'elle n'ait pas été évaluée dans le présent rapport, l'incertitude associée aux facteurs énumérés ci-haut pourrait faire l'objet d'une analyse lors d'une phase ultérieure du projet.

Par ailleurs, il est important de noter que l'impact potentiel des changements climatiques sur la ressource éolienne n'a pas été pris en compte dans la présente analyse.



## ANNEXE A TESTS DE CONTRÔLE DE QUALITÉ

N°	Nom du test	Critères <sup>10</sup>	Description / Commentaires
1	Test sur la continuité des enregistrements		Ce test vérifie la continuité des enregistrements. Il est utilisé pour identifier les vides temporels.
2	Test des valeurs de la vitesse du vent (V)	$0 \leq V \leq 25$ (m/s)	Ces tests permettent de s'assurer que les valeurs mesurées sont comprises dans des intervalles météorologiques acceptables.
3	Test des valeurs de l'écart type de la vitesse du vent ( $\sigma$ )	$0 \leq \sigma_V \leq 3$ (m/s)	
4	Test des valeurs de la direction du vent (Dir)	$0 \leq Dir \leq 360$ (°)	
5	Test des valeurs de l'écart type de la direction du vent ( $\sigma$ )	$0 \leq \sigma_{Dir} \leq 75$ (°)	
6	Test des valeurs de la température (T)	$-40 \leq T \leq 40$ (°C)	
7	Test des vents calmes	$V \leq 1$ (m/s)	Lorsque la vitesse du vent est inférieure à un certain seuil minimal (habituellement de l'ordre de 1 m/s), la force du vent n'est pas suffisante pour activer la girouette. Les lectures de direction sont alors considérées comme indéfinies.
8	Test des variations temporelles de la vitesse du vent sur 3 heures	$ V_i - V_{i-1}  \geq 0.1$ (m/s) $\forall V$ plus de 3 heures	Les tests pour les variations temporelles permettent de s'assurer que les observations ont suffisamment évolué pendant une période de temps donnée.
9	Test des variations temporelles de la vitesse du vent sur 12 heures	$ V_i - V_{i-1}  \geq 0.5$ (m/s) $\forall V$ plus de 12 heures	
10	Test des variations temporelles de la direction du vent sur 3 heures	$ Dir_i - Dir_{i-1}  \geq 1$ (°) $\forall Dir$ plus de 3 heures	
11	Test des variations temporelles de la direction du vent sur 18 heures	$ Dir_i - Dir_{i-1}  \geq 10$ (°) $\forall Dir$ plus de 18 heures	
12	Test des variations temporelles de la température sur 12 heures	$ T_i - T_{i-1}  \geq 0.5$ (°C) $\forall Dir$ plus 12 heures	
13	Test de la variation temporelle en continue de la température	$ T_i - T_{i-1}  \leq 1.9$ (°C)	
14	Test de cisaillement vertical de la vitesse du vent	$-0.6 \leq V_B - V_A \leq 3$ (m/s)	
15	Test de cisaillement vertical de la direction du vent	$ Dir_B - Dir_A  \leq 20$ (°)	

<sup>10</sup> Il est important de noter que les valeurs minimales et maximales spécifiées dans ce tableau représentent les valeurs standards couramment utilisées. Toutefois, le météorologue ajustera ces valeurs en fonction des conditions météorologiques particulières d'un site en se fiant à son jugement professionnel.

## ANNEXE B DISTRIBUTION DE LA VITESSE DU VENT

Distribution directionnelle de la vitesse du vent (%) à 50 m

Vitesse de vent (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSO	SO	OSO	O	ONO	NO	NNO	Total
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,98
2	0,17	0,17	0,17	0,14	0,12	0,12	0,14	0,18	0,19	0,13	0,17	0,18	0,17	0,15	0,15	0,18	2,54
3	0,34	0,29	0,28	0,18	0,19	0,23	0,35	0,35	0,34	0,27	0,26	0,29	0,36	0,29	0,35	0,38	4,77
4	0,64	0,57	0,39	0,30	0,27	0,28	0,41	0,48	0,42	0,40	0,31	0,36	0,52	0,50	0,61	0,54	7,00
5	0,77	0,78	0,58	0,35	0,25	0,37	0,49	0,45	0,39	0,37	0,40	0,52	0,61	0,59	0,79	0,73	8,43
6	0,77	0,85	0,66	0,37	0,28	0,46	0,56	0,45	0,46	0,42	0,41	0,61	0,64	0,65	0,85	0,70	9,16
7	0,71	0,86	0,62	0,43	0,39	0,56	0,64	0,43	0,41	0,32	0,37	0,50	0,64	0,65	0,74	0,66	8,92
8	0,62	0,75	0,57	0,48	0,55	0,74	0,77	0,41	0,38	0,35	0,30	0,46	0,68	0,61	0,69	0,61	8,97
9	0,53	0,70	0,60	0,41	0,55	1,00	0,75	0,42	0,39	0,35	0,36	0,44	0,52	0,57	0,66	0,60	8,84
10	0,48	0,60	0,57	0,31	0,57	1,01	0,69	0,39	0,36	0,34	0,34	0,25	0,30	0,41	0,59	0,52	7,76
11	0,46	0,53	0,43	0,16	0,53	0,98	0,53	0,34	0,29	0,28	0,23	0,19	0,17	0,34	0,50	0,47	6,42
12	0,45	0,47	0,24	0,11	0,41	0,99	0,52	0,29	0,26	0,27	0,11	0,13	0,12	0,29	0,42	0,38	5,46
13	0,42	0,40	0,11	0,07	0,36	0,73	0,49	0,35	0,23	0,23	0,11	0,12	0,13	0,15	0,32	0,30	4,53
14	0,33	0,23	0,07	0,06	0,28	0,57	0,50	0,29	0,21	0,14	0,11	0,08	0,13	0,17	0,26	0,34	3,76
15	0,25	0,15	0,04	0,05	0,22	0,50	0,47	0,28	0,19	0,11	0,08	0,04	0,11	0,15	0,19	0,29	3,11
16	0,16	0,14	0,01	0,06	0,21	0,47	0,35	0,21	0,15	0,09	0,09	0,06	0,10	0,11	0,10	0,19	2,50
17	0,15	0,10	0,01	0,04	0,18	0,36	0,28	0,10	0,15	0,07	0,09	0,06	0,12	0,08	0,05	0,12	1,96
18	0,13	0,05	0,01	0,03	0,15	0,31	0,18	0,09	0,08	0,05	0,07	0,03	0,07	0,04	0,06	0,08	1,43
19	0,08	0,05	0,01	0,01	0,12	0,21	0,12	0,10	0,05	0,05	0,03	0,01	0,03	0,02	0,03	0,09	1,02
20	0,06	0,04	0,01	0,01	0,06	0,17	0,09	0,06	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,07	0,65
21	0,05	0,02	0,01	0,01	0,05	0,13	0,09	0,04	0,03	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,04	0,48
22	0,05	0,02	0,01	0,01	0,04	0,13	0,07	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,03	0,45
23	0,01	0,02	0,00	0,00	0,02	0,07	0,05	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,02	0,27
24	0,00	0,02	0,00	0,00	0,02	0,04	0,04	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,01	0,17
25	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,03	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,12
26	0,00	0,02	0,01	0,00	0,01	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,10
27	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,06
28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01

Vitesse de vent (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSO	SO	OSO	O	ONO	NO	NNO	Total
<b>33</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>34</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Total</b>	<b>7,64</b>	<b>7,83</b>	<b>5,41</b>	<b>3,58</b>	<b>5,87</b>	<b>10,63</b>	<b>8,64</b>	<b>5,79</b>	<b>5,07</b>	<b>4,26</b>	<b>3,84</b>	<b>4,33</b>	<b>5,44</b>	<b>5,86</b>	<b>7,44</b>	<b>7,39</b>	<b>100,00</b>

**Distribution des fréquences de vent (%) réparties par plage de 1 m/s**

<b>Vitesse du vent (m/s)</b>	<b>Distribution à 50 m (%)</b>
1	1,05
2	2,77
3	5,00
4	7,14
5	8,57
6	9,21
7	8,92
8	8,93
9	8,75
10	7,66
11	6,33
12	5,37
13	4,44
14	3,71
15	3,05
16	2,43
17	1,90
18	1,38
19	0,99
20	0,64
21	0,47
22	0,43
23	0,26
24	0,17
25	0,12
26	0,10
27	0,06
28	0,04
29	0,03
30	0,02
31	0,02
32	0,01
33	0,00
34	0,00
<b>Total</b>	<b>100,00</b>
c	9,5
k	1,9

## ANNEXE C CONCEPTS MÉTÉOROLOGIQUES

### Partie A : Densité de l'air

La relation entre la densité de l'air et la température est donnée par :

$$\rho = \frac{1000 P}{R_d (T + 273.15)} \quad (\text{A.1})$$

où :

- $\rho$  : densité (kg/m<sup>3</sup>)
- $R_d$  : constante des gaz parfaits (287 J K<sup>-1</sup> kg<sup>-1</sup>)
- $T$  : température (°C)
- $P$  : pression atmosphérique (kPa)

Lorsque seulement la température est disponible pour un site, la densité de l'air peut être obtenue à l'aide de l'équation suivante :

$$\rho = \frac{1000 P_0}{R_d (T + 273.15)} \exp\left(-\frac{gZ}{R_d (T + 273.15)}\right) \quad (\text{A.2})$$

où :

- $\rho$  : densité (kg/m<sup>3</sup>)
- $P_0$  : densité de pression atmosphérique standard (101,33 kPa)
- $R_d$  : constante des gaz parfaits (287 J K<sup>-1</sup> kg<sup>-1</sup>)
- $T$  : température (°C)
- $g$  : constante gravitationnelle (9,81 m/s)
- $Z$  : hauteur au-dessus du niveau de la mer (m)

### Partie B : Densité de l'énergie

La densité de l'énergie dépend de la densité de l'air et de la vitesse du vent. La densité de l'énergie moyenne dans un intervalle de temps  $\Delta t$  est définie de la manière suivante :

$$\bar{e} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \rho V_i^3 \Delta t \quad (\text{B.1})$$

où :

- $\bar{e}$  : Densité de l'énergie moyenne (Wh/m<sup>2</sup>)
- $\rho$  : Densité de l'air (kg/m<sup>3</sup>)
- $V_i$  : Vitesse du vent horaire moyenne (m/s)
- $N$  : Nombre d'observations horaires dans une période de temps donnée
- $\Delta t$  : Intervalles d'observations ( $\Delta t = 1$  heure)

Lorsque la densité de l'énergie est calculée avec la vitesse moyenne du vent  $V$  (se référer à la Partie F concernant la distribution de Weibull), l'équation B.1 présentée ci-dessus est remplacée par la suivante :

$$\bar{e} = \frac{1}{2} \rho (c^3) \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (\text{B.2})$$

où :

- $\bar{e}$  : Densité de l'énergie moyenne (Wh/m<sup>2</sup>)
- $\rho$  : Densité de l'air (kg/m<sup>3</sup>)
- $c$  : Facteur d'échelle de la distribution de Weibull (m/s)
- $k$  : Facteur de forme de la distribution de Weibull
- $\Gamma$  : Fonction Gamma

### Partie C : Coefficient de cisaillement vertical – Loi de puissance

Le coefficient de cisaillement vertical est utilisé pour extrapoler les vitesses de vent à des hauteurs différentes. Il est défini comme suit :

$$\alpha = \frac{\ln \frac{V_2}{V_1}}{\ln \frac{Z_2}{Z_1}} \quad (\text{C.1})$$

où :

- $\alpha$  : coefficient de cisaillement
- $V_1$  : vitesse du vent à la 1<sup>ère</sup> hauteur (m/s)
- $V_2$  : vitesse du vent à la 2<sup>e</sup> hauteur (m/s)
- $Z_1$  : 1<sup>ère</sup> hauteur (m)
- $Z_2$  : 2<sup>e</sup> hauteur (m)

Des valeurs typiques de  $\alpha$  sont fournies dans le tableau ci-dessous<sup>11</sup>.

$\alpha$	Type de terrain
0,076 à 0,083	Mer ou lac, marécage boueux, plaine couverte de neige
0,081 à 0,093	Sablière et neige
0,093 à 0,12	Terrain simple, terre dénudée, herbe rase
0,12 à 0,14	Terrain avec une faible végétation, herbe haute, brousse et toundra
0,14 à 0,16	Terres agricoles étendues, herbe haute, haie basse
0,16 à 0,22	Terres agricoles avec boisés, haute récolte, brise-vent dense
0,22 à 0,26	Forêt et terrain boisé, banlieue
0,26 à 0,4	Centre de grandes villes

<sup>11</sup> Selon la documentation du logiciel WindFarm, utilisé pour le calcul de l'énergie productible par un parc éolien.

## Partie D : Profil vertical du vent – Loi logarithmique

Le profil logarithmique du vent est défini par l'équation ci-dessous :

$$V_z = \frac{V_*}{K} \ln\left(\frac{Z-d}{Z_0}\right) \quad (\text{D.1})$$

où :

- $V_z$  : vitesse du vent horizontal à la hauteur  $Z$  (m/s)
- $V_*$  : vélocité de friction (m/s)
- $Z$  : hauteur d'observation (m)
- $Z_0$  : longueur de rugosité de la surface (m)
- $K$  : constante de von Karman ( $\approx 0,4$ )
- $d$  : déplacement au-dessus du sol (m)

Des valeurs typiques pour  $Z_0$  sont fournies au tableau ci-dessous<sup>12</sup>.

$Z_0$	Type de terrain
0,0001 à 0,0003	Mer ou lac, marécage boueux, plaine couverte de neige
0,0003 à 0,001	Sablère et neige
0,001 à 0,01	Terrain simple, terre dénudée, herbe rase
0,01 à 0,04	Terrain avec une faible végétation, herbe haute, brousse et toundra
0,04 à 0,1	Terres agricoles étendues, herbe haute, haie basse
0,1 à 0,5	Terres agricoles avec boisés, haute récolte, brise-vent dense
0,5 à 1	Forêt et terrain boisé, banlieue
1 à 4	Centre de grandes villes

## Partie E : Intensité de turbulence ambiante

L'intensité de turbulence est définie comme suit :

$$IT = \frac{\sigma_V}{V} \quad (\text{E.1})$$

où :

- $IT$  : intensité de turbulence
- $\sigma_V$  : écart type de la vitesse du vent (m/s)
- $V$  : vitesse moyenne du vent (m/s)

<sup>12</sup> Selon la documentation du logiciel WindFarm, utilisé pour le calcul de l'énergie productible par un parc éolien.

## Part F : Fonction de la distribution des fréquences de Weibull

Mathématiquement, la distribution de Weibull est une fonction des fréquences relatives des vitesses du vent. Elle est définie comme suit :

$$f(V) = \frac{k}{c} \left( \frac{V}{c} \right)^{k-1} \exp \left( - \left( \frac{V}{c} \right)^k \right) \quad (\text{F.1})$$

où :

- $f(V)$  : distribution des fréquences du vent  $V$
- $V$  : vitesse du vent (m/s)
- $k$  : paramètre de forme de la distribution de Weibull  $f(V)$
- $c$  : paramètre d'échelle de la distribution de Weibull  $f(V)$  (m/s)

La moyenne des vitesses du vent calculée en utilisant la méthode de l'Atlas éolien européen est :

$$V = c \Gamma \left( 1 + \frac{1}{k} \right) \quad (\text{F.2})$$

où :

- $V$  : vitesse moyenne du vent (m/s)
- $k$  : paramètre de forme de la distribution de Weibull  $f(V)$
- $c$  : paramètre d'échelle de la distribution de Weibull  $f(V)$  (m/s)
- $\Gamma$  : fonction Gamma

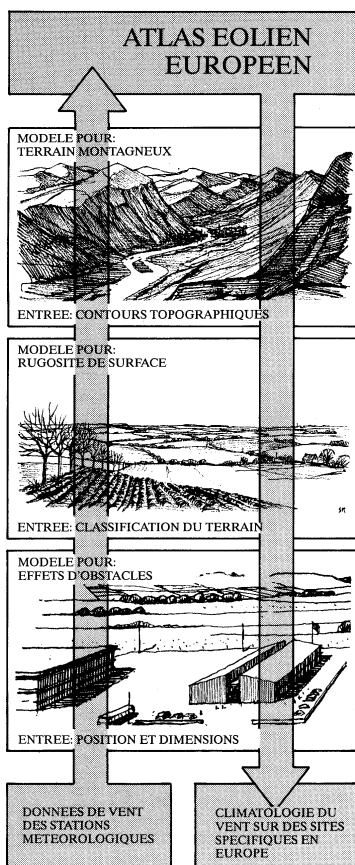


## ANNEXE D LE MODÈLE WASP

WASP a été établi et commercialisé par le Laboratoire National Risø, au Danemark, en 1987<sup>13</sup>. Ce logiciel est un outil pour les analyses des données éoliennes, la création des cartes de vents, l'évaluation du climat éolien et la micro-localisation des éoliennes. À travers les années, le programme a été largement utilisé dans l'industrie éolienne pour l'évaluation du gisement éolien. Les données résultantes de WASP consistent en une grille, déterminée à une hauteur spécifique (normalement, à la hauteur du moyeu de l'éolienne), où la vitesse du vent et la distribution sont calculées pour chaque point de la grille.

WASP est un modèle d'état stable basé sur des principes physiques de flux dans la couche limite de l'atmosphère. Il prend en considération l'effet de différentes conditions de la rugosité et la modification du vent imposée par les variations de l'élévation du terrain autour du mât de mesure.

La méthodologie utilisée par WASP pour modéliser le gisement éolien est schématiquement représentée à la figure ci-dessous. La cartographie de la vitesse du vent à micro-échelle est basée sur des observations faites au mât de mesure du vent, la position et les dimensions du modèle WASP, ainsi que la rugosité de la surface et la topographie du domaine.



Méthodologie de la cartographie du vent<sup>14</sup>

<sup>13</sup> Wind Atlas Analysis and Application Program du Département de l'Énergie éolienne à Risø National Laboratory (<http://www.wasp.dk/>).

<sup>14</sup> Atlas éolien européen, Introduction de la carte éolienne, Risø National Laboratory, Danemark, 1989.