

**ANNEXE 2**



# RAPPORT MÉTÉOROLOGIQUE (18 MOIS)

## Kuujuarapik, Québec

Préparé pour  
Hydro-Québec

Par  
Hélimax Énergie inc.

Montréal, janvier 2007



Consultant en énergie éolienne pour le monde

## IDENTIFICATION DU DOCUMENT

Numéro de projet	357
Date d'émission :	25 janvier 2007
Version du document :	Finale
Statut du document :	Discretion du client
Liste de circulation :	Hydro-Québec, copie interne d'Hélimax
Historique :	11 janvier 2007 – Première publication 25 janvier 2007 – Révision 1 (modifications mineures)
Note :	Document également disponible en anglais

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

## DÉFINITIONS ET SYMBOLES

m/s	mètres par seconde
m	mètre
°	degré
°C	degré Celsius
EC	Environnement Canada
$\alpha$	coefficient de cisaillement vertical
$Z_0$	longueur de rugosité
N/A	non applicable
N/D	non disponible

## 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 donnée. Ce rapport fournit une 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 conçu pour le site de Kuujuarapik, dans le Nunavik. Le Groupe Ohméga Inc. (« Ohméga ») a été mandaté pour l'implantation de cette tour anémométrique et ce, pour le compte d'Hydro-Québec.

Jugeant la qualité des observations rassemblées à la fin de la période de 18 mois pour le site en question, Hélimax conclut que la campagne de mesure des vents sur ce site a été réussie et a fournit des observations valables. En utilisant une combinaison de contrôle de qualité rigoureux avec une analyse des données exhaustives selon les normes de l'industrie, Hélimax a démontré, de façon générale, le bon fonctionnement du mât de mesure de vent pour la pleine période d'analyse.

Les données météorologiques ont ensuite fait l'objet d'un ajustement climatologique en vue de valider la représentativité des vitesses et directions de vent observées. Enfin, la moyenne annuelle ajustée de la vitesse de vent fut ensuite extrapolée à une hauteur correspondent à une hauteur de moyeu typique de 80 m.

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 18 mois. Cette incertitude a pour origine plusieurs facteurs (instruments, taux de recouvrement, extrapolation des vitesses de vent, variabilité interannuelle, 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.

De surcroît, il faut noter qu'Hélimax n'a pas effectué de visite de site. En conséquence, toute information propre au site (description du site, spécifications du mât de mesure, description des instruments et leurs orientations, etc.) a été fournie par le Client.

Le tableau ci-dessous présente un sommaire des résultats importants suite à l'analyse météorologique.

**Sommaire de l'analyse météorologique**

	<b>Kuujuarapik</b>
Vitesse des vents observée à une hauteur de 30 m (m/s)	7,0
Vitesse des vents observée à une hauteur de 40 m (m/s)	7,3
Vitesse des vents observée à une hauteur de 50 m (m/s)	7,5
Vitesse des vents annuelle à une hauteur de 50 m après ajustement climatologique (m/s)	7,3
Vitesse des vents annuelle après ajustement climatologique et extrapolation à une hauteur de 80 m (m/s)	7,8

# TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION .....	3
2	CARACTÉRISTIQUES DU SITE ET DE L'INSTRUMENTATION .....	5
2.1	DESCRIPTION GÉNÉRALE DU SITE .....	5
2.2	SYSTÈME D'ACQUISITION DE DONNÉES ET SPÉCIFICATION DES INSTRUMENTS.....	8
2.2.1	<i>Mât de mesure du vent Kuujuarapik .....</i>	<i>8</i>
3	ANALYSE DES DONNÉES ET CONTRÔLE DE QUALITÉ .....	10
3.1	MÉTHODOLOGIE DU CONTRÔLE DE LA QUALITÉ DES DONNÉES .....	10
3.2	CORRÉLATION ENTRE LES VITESSES DE VENT À DIFFÉRENTS NIVEAUX .....	10
3.3	TAUX DE RECOUVREMENT DES DONNÉES .....	11
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 atmosphérique .....</i>	<i>12</i>
4.1.2	<i>Évolution mensuelle des vitesses de 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.....	17
4.2.1	<i>Cycle journalier de la température atmosphérique.....</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 DE VENT .....	24
5	AJUSTEMENT CLIMATOLOGIQUE ET EXTRAPOLATION VERTICALE.....	25
5.1	AJUSTEMENT CLIMATOLOGIQUE DES VITESSES DE VENT.....	25
5.2	PROFIL VERTICAL DE LA VITESSE DU VENT.....	26
6	CARTOGRAPHIE DE LA RESSOURCE ÉOLIENNE .....	27
7	DISCUSSION DES RÉSULTATS .....	32
ANNEXE A	TESTS DE CONTRÔLE DE QUALITÉ .....	33
ANNEXE B	CONCEPTS MÉTÉOROLOGIQUES .....	34
ANNEXE C	DISTRIBUTION DE LA VITESSE DU VENT .....	38
ANNEXE D	LE MODÈLE WASP .....	40

## LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Étapes de l'analyse météorologique .....	4
Figure 2-1 : Situation géographique et localisation du mât de mesure Kuujjuarapik .....	6
Figure 2-2 : Photo du site – Direction Ouest .....	7
Figure 2-3 : Photo du site – Direction Nord .....	7
Figure 2-4 : Photo du site – Direction Est.....	7
Figure 2-5 : Photo du site – Direction Sud .....	7
Figure 2-6 : Instrumentation sur le mât Kuujjuarapik.....	9
Figure 4-1 : Évolution mensuelle de la température.....	15
Figure 4-2 : Évolution mensuelle des vitesses .....	15
Figure 4-3 : Évolution mensuelle des coefficients de cisaillement vertical.....	16
Figure 4-4 : Évolution mensuelle de l'intensité 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 (m/s) à 50 m .....	21
Figure 4-10 : Distribution directionnelle de la densité énergétique (%).....	22
Figure 4-11 : Distribution directionnelle du coefficient de cisaillement vertical .....	22
Figure 4-12 : Distribution directionnelle de l'intensité de turbulence .....	23
Figure 4-13 : Distribution des vitesses de vent à 50 m .....	24
Figure 6-1 : Carte topographique du domaine .....	28
Figure 6-2 : Carte de la rugosité de surface du domaine.....	29
Figure 6-3 : Carte de vitesse des vents du domaine à 80 m au-dessus du sol .....	30
Figure 6-4 : Carte de la densité de puissance du domaine à 80 m au-dessus du sol .....	31

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Identification, localisation du mât et caractéristiques du site .....	5
Tableau 2-2 : Spécifications des instruments.....	8
Tableau 3-1 : Coefficient de détermination entre les niveaux de mesure .....	10
Tableau 3-2 : Taux de recouvrement des données (%).....	11
Tableau 4-1 : Moyennes mensuelles des observations .....	14
Tableau 4-2 : Paramètres de Weibull à 50 m .....	24
Tableau 5-1 : Tableau du sommaire général .....	26
Tableau 6-1 : Données d'entrée du modèle WAsP .....	27
Tableau 7-1 : Sommaire de l'analyse météorologique .....	32

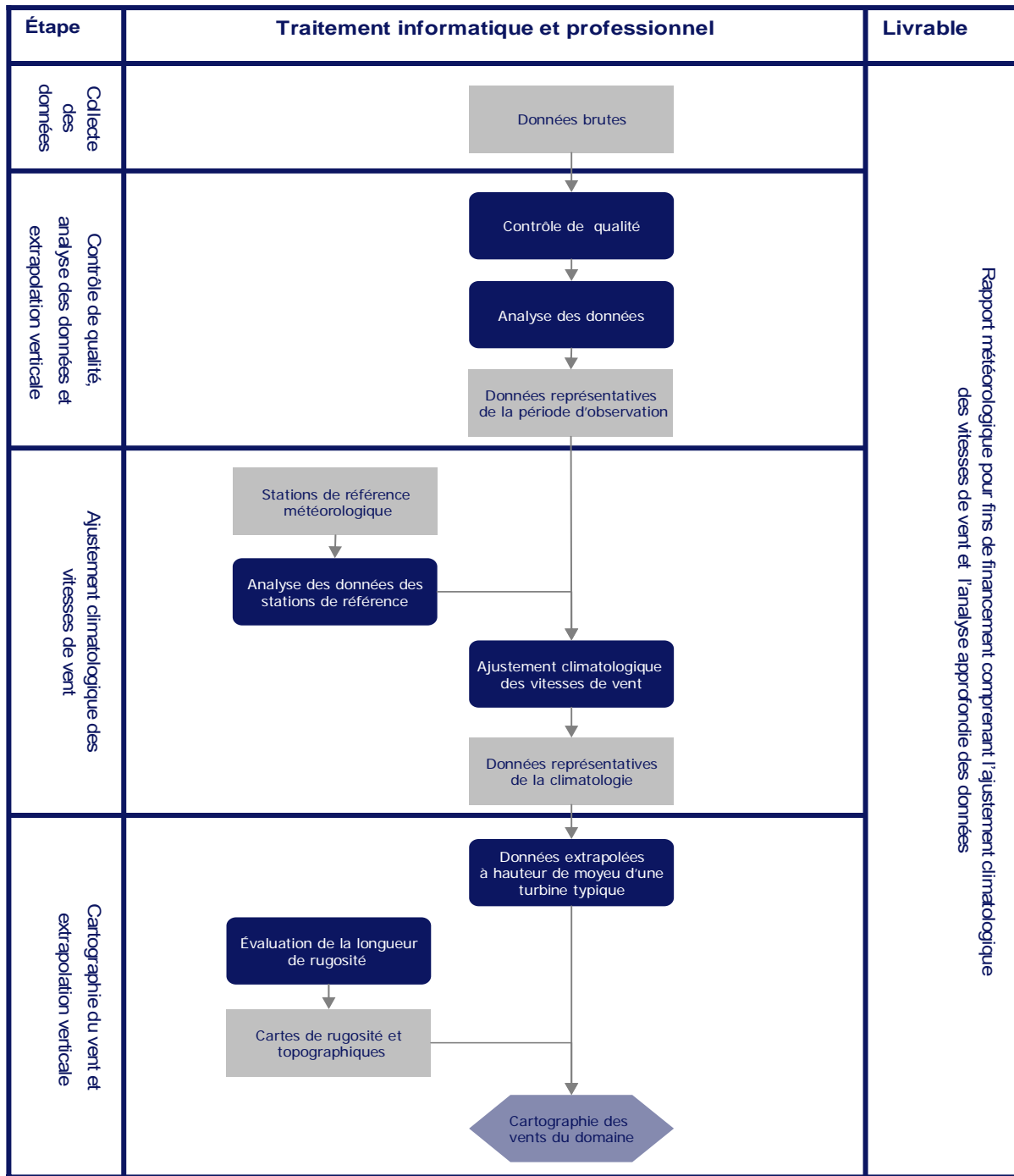
## 1 INTRODUCTION

Dans le cadre d'une étude sur le potentiel éolien dans le Grand Nord Québécois, le Groupe Ohméga Inc. « Ohméga » a implanté une tour anémométrique pour le compte d'Hydro-Québec. Le but de cette campagne de mesure des vents est de quantifier et d'analyser la ressource éolienne sur le territoire du projet afin de trouver des zones propices au développement de parcs éoliens. Ce territoire est situé à l'est de la Baie d'Hudson, le long de la côte ouest du Nord du Québec (Nunavik). Les observations de cette tour ont été collectées entre le 6 octobre 2004 et le 12 avril 2006.

Dans ce contexte, Hélimax Énergie inc. « Hélimax » a effectué une analyse en profondeur des données météorologiques collectées à partir du mât de mesure. Pour adéquatement évaluer la ressource éolienne selon les pratiques en cours dans l'industrie, les observations ont été analysées et les résultats statistiques présentés. Un schéma décrivant l'approche qu'Hélimax a utilisée pour exécuter ce travail est présenté à la Figure 1-1.

La Section 2 du présent document contient une description du site à l'étude, de l'emplacement du mât de mesure et les spécifications sur les 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 est présentée à la Section 4. La Section 5 présente l'ajustement climatologique et l'extrapolation des vitesses de vent. La cartographie des vents est discutée à la Section 6. Une conclusion sur l'analyse météorologique est donnée à la Section 7.

# ANALYSE MÉTÉOROLOGIQUE



Traitement principalement fait par ordinateur



Analyse professionnelle



Entrée et/ou sortie de données



Consultant en énergie éolienne pour le monde

10 janvier 2005

**Figure 1-1 : Étapes de l'analyse météorologique**

## 2 CARACTÉRISTIQUES DU SITE ET DE L'INSTRUMENTATION

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

### 2.1 Description générale du site

Il est à noter qu'Hélimax n'a pas visité le site et que les données spécifiques ont été fournies par le client.

Le sol sur le site de Kuujjuarapik est majoritairement constitué de roc et la végétation est presque inexistante. Il est situé à moins d'un kilomètre de plan d'eau, soit la Baie d'Hudson. La topographie est caractérisée par la présence de vallons ayant peu de pente et d'aspect lisse. Le site de Kuujjuarapik est situé à quelques kilomètres au nord-est du village de Kuujjuarapik, sur une élévation rocheuse, le village bordant la côte est de la Baie d'Hudson.

Une campagne de mesure des vents est en cours en vue d'estimer le gisement éolien de ce site pour le développement potentiel de projets éoliens. De ce fait, un mât de mesure des vents de 50 mètres y a été installé. Au Tableau 2-1, on retrouve le numéro d'identification du mât de mesure, le nom, les coordonnées géographiques ainsi que les principales caractéristiques de l'environnement immédiat du mât. La Figure 2-1 montre la situation géographique du site et la localisation du mât de mesure.

Le mât de mesure de Kuujjuarapik est situé au sommet d'une colline à 75 m d'altitude au dessus du niveau de la mer. Des photos du site avec vues dans les directions des quatre points cardinaux sont présentées à partir de la Figure 2-2 jusqu'à la Figure 2-5. Comme on peut le constater, il n'y a pas d'obstacles majeurs dans la trajectoire du vent autour du mât.

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

Information générale	
Numéro de la station	HQ21002
Nom de la station	Kuujjuarapik
Ville la plus proche	Kuujjuarapik
Coordonnées	
Nord	55° 17' 09,1"
Ouest	77° 44' 25,8"
Caractéristiques du terrain	
Propriétaire	Inconnu
Utilisation	Aucune
Topographie et obstacles	Vallon rocheux très peu élevé. Végétation clairsemée composée de conifères bas.

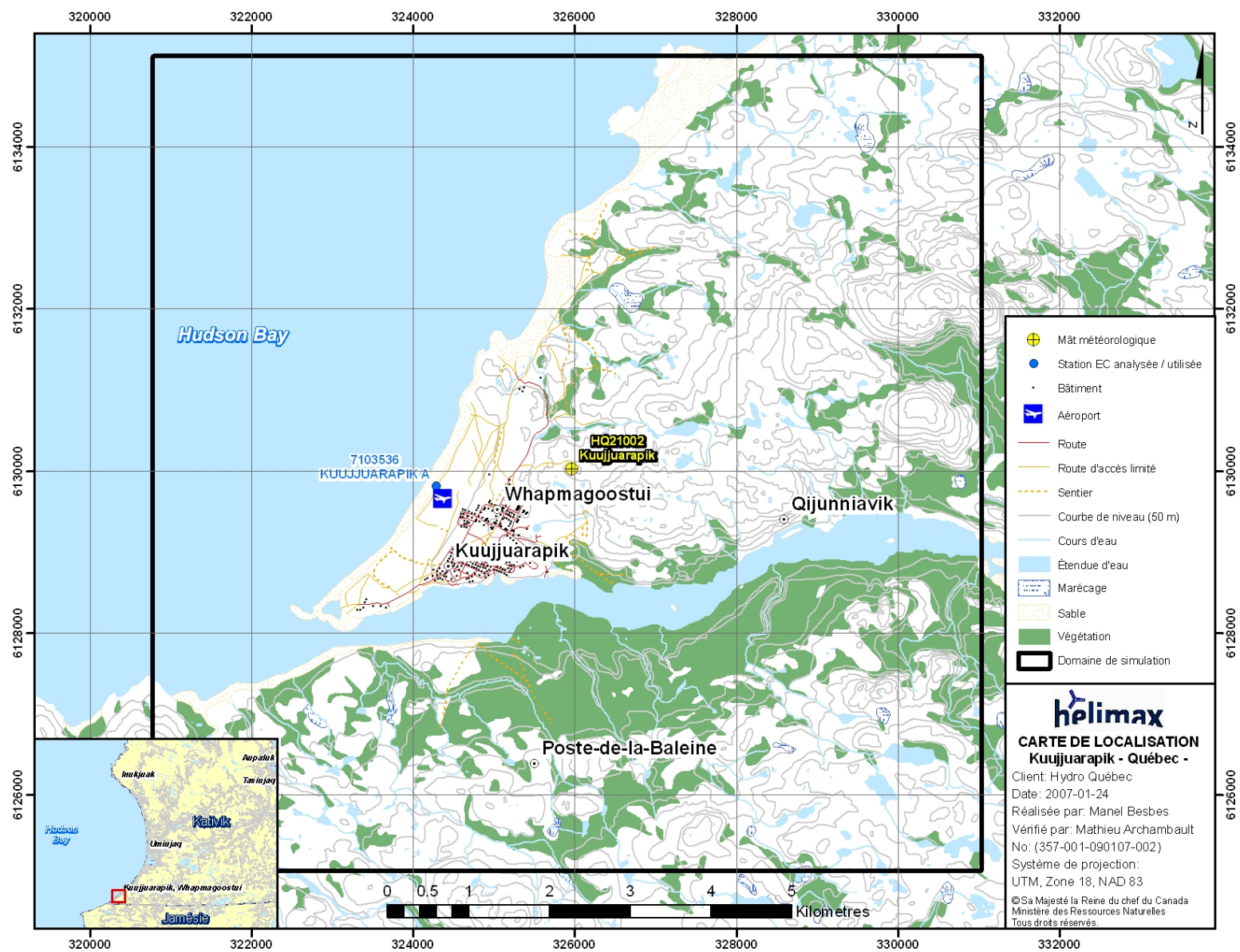


Figure 2-1 : Situation géographique et localisation du mât de mesure Kuujuaupik



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



**Figure 2-3 : Photo du site – Direction Nord**



**Figure 2-4 : Photo du site – Direction Est**



**Figure 2-5 : Photo du site – Direction Sud**

## 2.2 Système d'acquisition de données et spécification des instruments

La section suivante fournira un rapport détaillé des instrumentations utilisées dans le cadre de la présente campagne de mesure des vents. Il est à noter que toutes les données de direction du vent sont mesurées par rapport au nord géographique.

Hélimax n'a pas visité le mât de mesure et n'a donc pas pu vérifier le type d'instruments installés ou leurs orientations. Les informations présentées ici ont été fournies par le client.

### 2.2.1 Mât de mesure du vent Kuujjuarapik

Le mât Kuujjuarapik est une structure tubulaire maintenue en place à l'aide d'hauban. Il est équipé d'instruments à trois niveaux, soit 30 m, 40 m et 50 m.

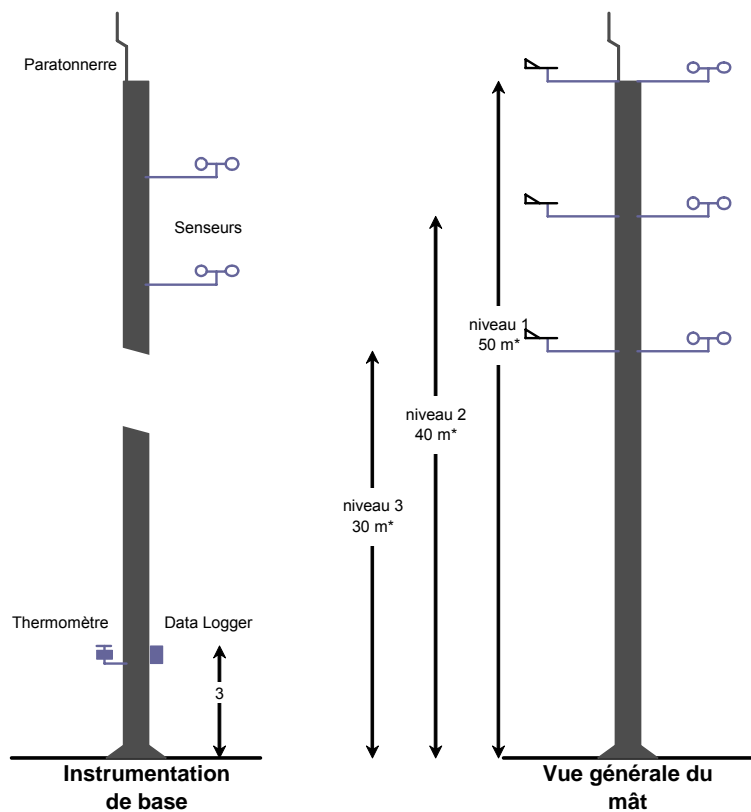
Il est équipé de 3 instruments RMYoung (combinaison anémomètre calibré et girouette) et de 1 thermomètre RTS-404. Un instrument RMYoung supplémentaire a été installé à chaque niveau dans le but d'assurer une continuité des observations si l'un des instruments principaux devenait défectueux. Les observations de ces instruments secondaires ne sont pas collectées. Tous les anémomètres et les girouettes sont des instruments non chauffés. Un système d'acquisition de données (SAD) GO-Logger a été utilisé pour la collecte des données. Celui-ci recueille, avec une période d'échantillonnage d'une seconde, les observations de vitesse du vent, de direction du vent et de température. Toutes les dix minutes, une moyenne de ces échantillons est calculée et le SAD enregistre alors les données moyennées en indiquant l'heure exacte de la fin de la période de dix minutes.

Il est à noter que les instruments et leurs orientations sont conformes aux standards de l'industrie. Cependant, les anémomètres principaux sont orientés vers le nord, ce qui correspond à une orientation opposée à la direction des vents dominants qui proviennent plus du sud.



Hélimax reçoit par courriel les données d'Ohméga. Celles-ci sont converties au préalable par Ohméga à l'aide des paramètres spécifiques à chaque senseur. Les informations concernant l'instrumentation du mât Kuujjuarapik sont présentées au Tableau 2-2 et à la Figure 2-6.

Tableau 2-2 : Spécifications des instruments

Niveau (m)	Orientation (°)	Type d'instrument	Calibration	Intervalle de compilation (minutes)	Manufacturier/Modèle
N/A	N/A	Système d'acquisition de données	N/A	N/A	GO Logger
5	270	Thermomètre	Oui	10	RTS - 404
30	360	Anémomètre	Oui	10	RM Young #5103M
40	360	Anémomètre	Oui	10	RM Young #5103M
50	360	Anémomètre	Oui	10	RM Young #5103M
30	360	Girouette	Oui	10	RM Young #5103M
40	360	Girouette	Oui	10	RM Young #5103M
50	360	Girouette	Oui	10	RM Young #5103M



**Légende**

-  Anémomètre calibré RMYoung
-  Girouette RMYoung

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

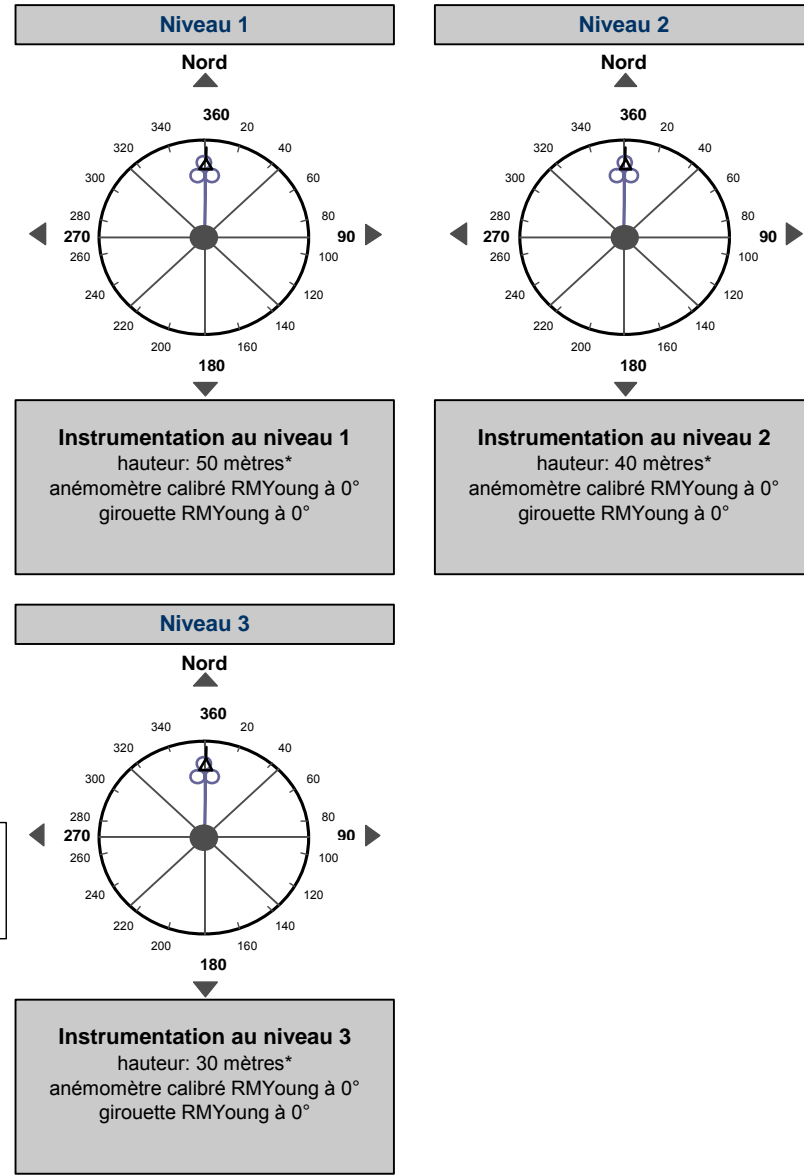


Figure 2-6 : Instrumentation sur le mât Kuujuarapik

### 3 ANALYSE DES DONNÉES ET CONTRÔLE DE QUALITÉ

Hélimax a développé une procédure approfondie pour le contrôle de la qualité des données recueillies par des mâts de mesure de vent. Cette procédure respecte 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 faite en utilisant un logiciel développé à l'interne. Toutes les données et les statistiques de vent sont soumises à une série de 15 tests dans le but de détecter toute observation douteuse due à un évènement de gel ou à une panne. Celles 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 à différents niveaux

Une première vérification de la qualité des observations est faite par l'analyse de la corrélation entre les vitesses de vent observées aux différents niveaux. 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 vitesse du vent à différentes hauteurs. Les valeurs de  $R^2$  pour les instruments du mât de Kuujjuarapik sont présentées au Tableau 3-1. De bonnes corrélations entre les différents niveaux indiquent que les instruments fonctionnent correctement.

Tableau 3-1 : Coefficient de détermination entre les niveaux de mesure

Kuujjuarapik	50 m	40 m	30 m
50 m	1,00	0,99	0,97
40 m	0,99	1,00	0,99
30 m	0,97	0,99	1,00

### 3.3 Taux de recouvrement des données

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 passent les tests de contrôle de qualité et 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.

Comme démontré dans le Tableau 3-2, les taux de recouvrement mensuels des données au mât de Kuujjuarapik sont bons. Cependant, les mois de janvier et mars 2006 présentent des taux de recouvrement légèrement moins élevés sur les vitesses à 50 m due à des conditions de gel.

Toutes ces données ont été considérées comme problématiques et ont été retirées dans le but de ne pas contaminer les observations valides.

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

Mois-Année	Vitesse à 50 m	Vitesse à 40 m	Vitesse à 30 m	Direction à 50 m	Direction à 40 m	Direction à 30 m	Température à 5 m
10-2004 (du 2004-10-06)	100	100	99	100	100	98	100
11-2004	100	100	100	100	100	100	100
12-2004	100	100	100	100	100	100	100
01-2005	100	100	100	100	100	100	100
02-2005	100	99	98	100	100	100	100
03-2005	100	100	100	100	100	100	100
04-2005	100	100	99	100	100	100	100
05-2005	100	100	100	100	100	100	100
06-2005	100	100	100	100	100	100	100
07-2005	100	100	100	100	100	100	100
08-2005	100	100	100	98	100	100	100
09-2005	100	100	100	100	100	100	100
10-2005	100	100	100	99	100	100	100
11-2005	100	100	100	100	100	100	100
12-2005	100	100	100	100	100	100	100
01-2006	91	100	100	99	99	100	100
02-2006	98	99	100	100	100	100	100
03-2006	96	97	99	100	100	100	100
04-2006 (au 2006-04-12)	100	100	100	100	100	100	100

## 4 ANALYSE DU GISEMENT ÉOLIEN

Une analyse exhaustive est effectuée sur les observations recueillies par le mât de mesure ainsi que sur les paramètres dérivés. Ces observations sont définies comme celles prises par les senseurs sur le mât de mesure, soit : la vitesse du vent, la direction du vent et la température. Les paramètres dérivés incluent 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, par conséquent, être bien connues. Les sections suivantes présentent l'évolution mensuelle et les variations journalières des observations, les distributions directionnelles des vitesses de vent et des paramètres dérivés ainsi que les distributions des vitesses de vent à chaque niveau de mesure.

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

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

Le Tableau 4-1 présente les moyennes mensuelles des observations et des paramètres dérivés pour le mât de Kuujjuarapik.

#### 4.1.1 Variation mensuelle de la température atmosphérique

En théorie, la température atmosphérique affecte la densité de l'air qui, à son tour, pourrait affecter considérablement le potentiel du gisement éolien. La relation entre la densité énergétique et la température atmosphérique est montrée à l'annexe B.

La Figure 4-1 montre la variation mensuelle de la température au cours de la période d'observation. Les températures moyennes varient entre  $-21,3^{\circ}\text{C}$  à  $14,5^{\circ}\text{C}$  pour Kuujjuarapik.

#### 4.1.2 Évolution mensuelle des vitesses de vent

Généralement, en Amérique du Nord, les vitesses de vent sont 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 de vent pendant la période d'observation aux différents niveaux de mesure. La moyenne mensuelle des vitesses de vent à 50 mètres pour Kuujjuarapik varie entre 6,3 et 9,4 m/s (ces valeurs n'ont pas subies d'ajustement climatologique).

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

Les vitesses de vent augmentent avec la hauteur par rapport au sol. Ceci est causé par la baisse graduelle de la force de frottement (friction). Théoriquement, la vitesse du vent devrait être nulle au sol et ensuite augmenter avec la hauteur jusqu'à la couche limite atmosphérique. La variation de la vitesse du vent avec la hauteur à partir du sol est définie comme étant le profil vertical de la vitesse du vent ou le cisaillement vertical du vent.

Dans l'industrie éolienne, deux lois mathématiques sont utilisées pour l'extrapolation verticale de la vitesse de vent aux hauteurs de moyeu d'éoliennes typiques : la loi de puissance et la loi logarithmique.

Basé 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 «  $\alpha$  », basé sur la loi de puissance (définie à l'annexe B), est présenté ici pour fin d'analyse météorologique.

La Figure 4-3 montre l'évolution mensuelle des coefficients de cisaillement vertical du vent pendant la période de mesure. Les valeurs de cisaillement dépendent du type de terrain sur lequel le mât est installé. Les valeurs sont légèrement plus grandes que celles anticipées pour ce type de site.

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

La turbulence est définie comme l'intensité de la fluctuation de la vitesse du vent. La turbulence est générée par la rugosité de surface du sol ou par des effets thermiques. De plus, puisque la turbulence dépend de la rugosité de surface, il est attendu que plus la hauteur par rapport au sol augmentera, plus l'intensité de turbulence diminuera. Il est important de quantifier l'intensité de turbulence parce qu'elle augmente l'usure des éoliennes et réduit leur durée d'opération.

L'intensité de turbulence est définie comme la fluctuation de la vitesse du vent par rapport à la vitesse moyenne observée qui, dans ce cas, est basée sur des intervalles de 10 minutes. La formule mathématique de l'intensité de turbulence est présentée à l'annexe B. L'intensité de turbulence est utilisée, en outre, lors de la modélisation de l'effet de sillage pendant le calcul du productible d'un parc éolien.

L'évolution mensuelle de l'intensité de turbulence est montrée à la et Figure 4-4. On remarque que l'intensité de la turbulence est basse<sup>1</sup> et, comme attendu, diminue avec la hauteur par rapport au sol.

---

<sup>1</sup> Selon les normes de l'industrie, la turbulence d'un site est considérée comme :

- Basse quand l'intensité de la turbulence est en dessous de 0,10;
- Modérée quand l'intensité de la turbulence est entre 0,10 et 0,25;
- Haute quand l'intensité de la turbulence est au-dessus de 0,25.

Tableau 4-1 : Moyennes mensuelles des observations

Mois-Année	Vitesse de vent à 50 m (m/s)	Vitesse de vent à 40 m (m/s)	Vitesse de vent à 30 m (m/s)	Température à 5 m (°C)	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
10-2004 (du 2004-10-06)	8,4	8,2	7,7	4,6	0,18	0,03	0,04	0,04
11-2004	9,4	9,2	8,7	-2,6	0,13	0,03	0,03	0,04
12-2004	8,4	8,3	7,9	-17,5	0,12	0,03	0,03	0,03
01-2005	8,3	8,1	7,7	-21,3	0,14	0,03	0,03	0,04
02-2005	6,4	6,4	6,0	-18,1	0,11	0,03	0,03	0,03
03-2005	6,6	6,5	6,2	-13,3	0,12	0,02	0,03	0,03
04-2005	7,5	7,4	7,0	-1,6	0,13	0,03	0,03	0,03
05-2005	6,3	6,2	6,0	6,7	0,11	0,03	0,03	0,04
06-2005	6,6	6,5	6,3	9,0	0,11	0,03	0,04	0,04
07-2005	7,4	7,3	6,9	14,5	0,14	0,03	0,04	0,04
08-2005	6,8	6,6	6,3	14,1	0,15	0,03	0,04	0,04
09-2005	7,3	7,1	6,8	9,9	0,12	0,03	0,03	0,04
10-2005	6,6	6,4	6,2	5,7	0,13	0,03	0,03	0,04
11-2005	8,9	8,7	8,4	-3,3	0,13	0,03	0,03	0,04
12-2005	8,6	8,5	8,3	-12,6	0,10	0,03	0,03	0,03
01-2006	7,2	7,1	6,9	-15,6	0,09	0,03	0,03	0,03
02-2006	6,6	6,4	6,1	-18,1	0,16	0,03	0,03	0,03
03-2006	7,3	7,1	6,7	-7,6	0,13	0,03	0,03	0,03
04-2006 (au 2006-04-12)	6,9	6,8	6,6	-2,6	0,08	0,03	0,03	0,03

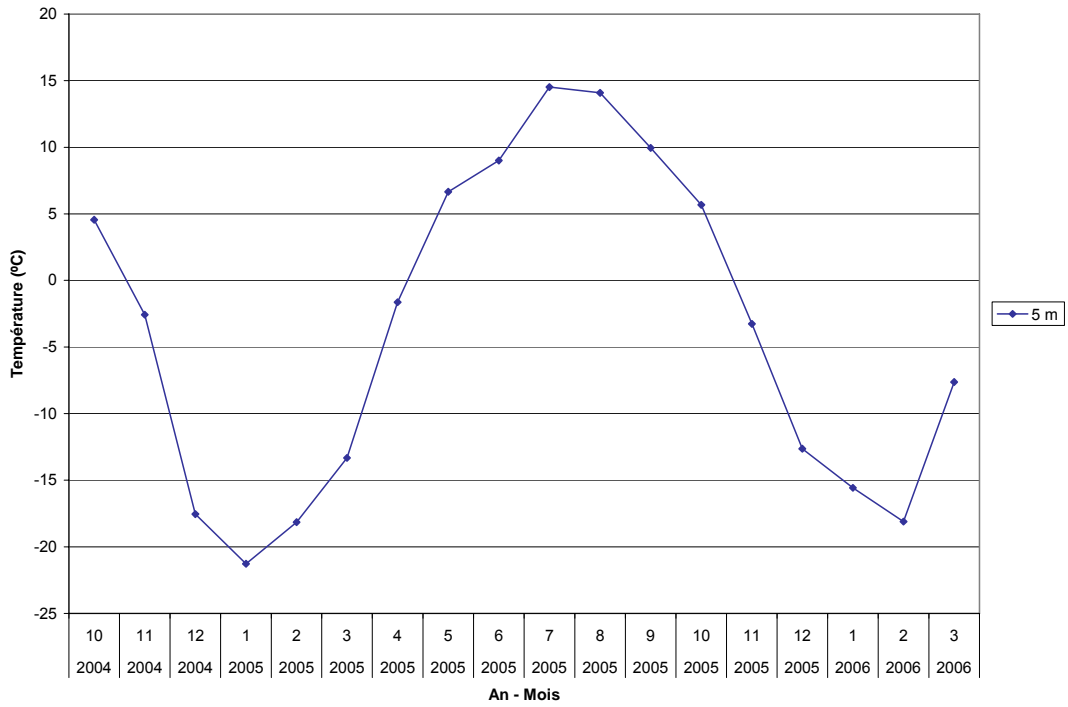


Figure 4-1 : Évolution mensuelle de la température

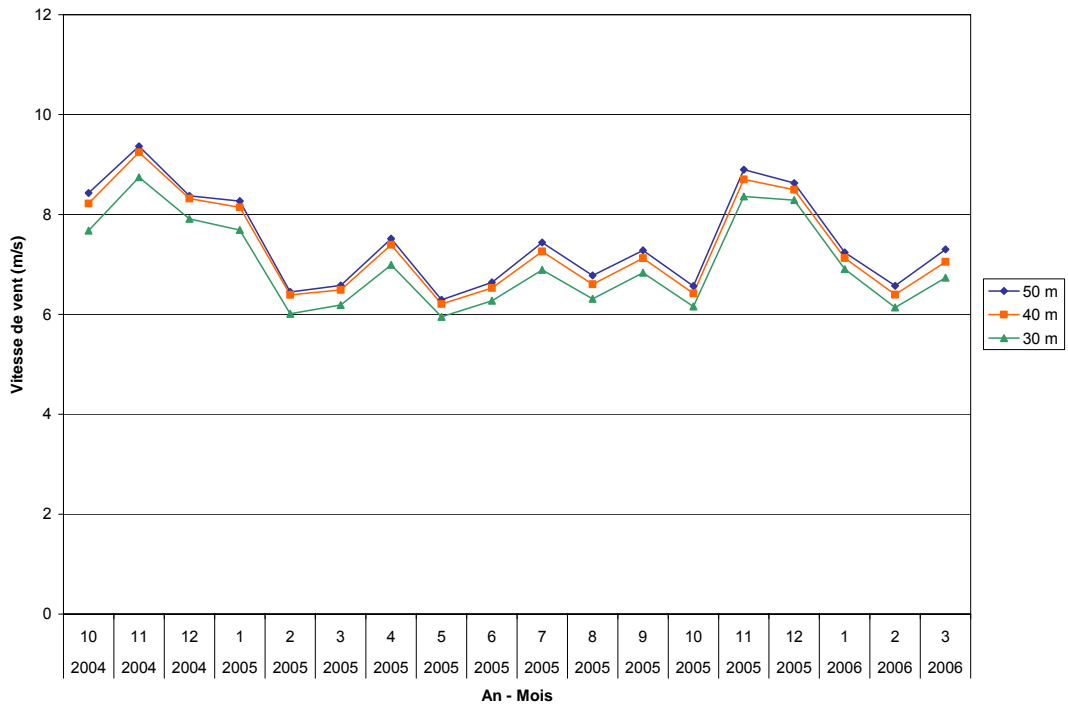


Figure 4-2 : Évolution mensuelle des vitesses

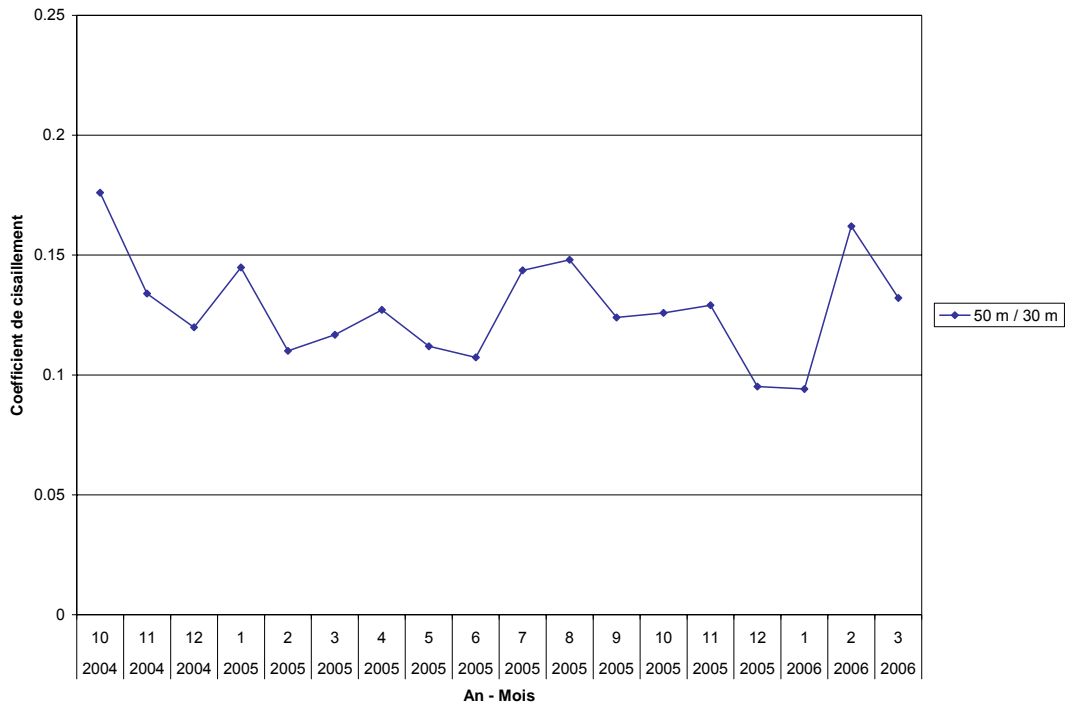


Figure 4-3 : Évolution mensuelle des coefficients de cisaillement vertical

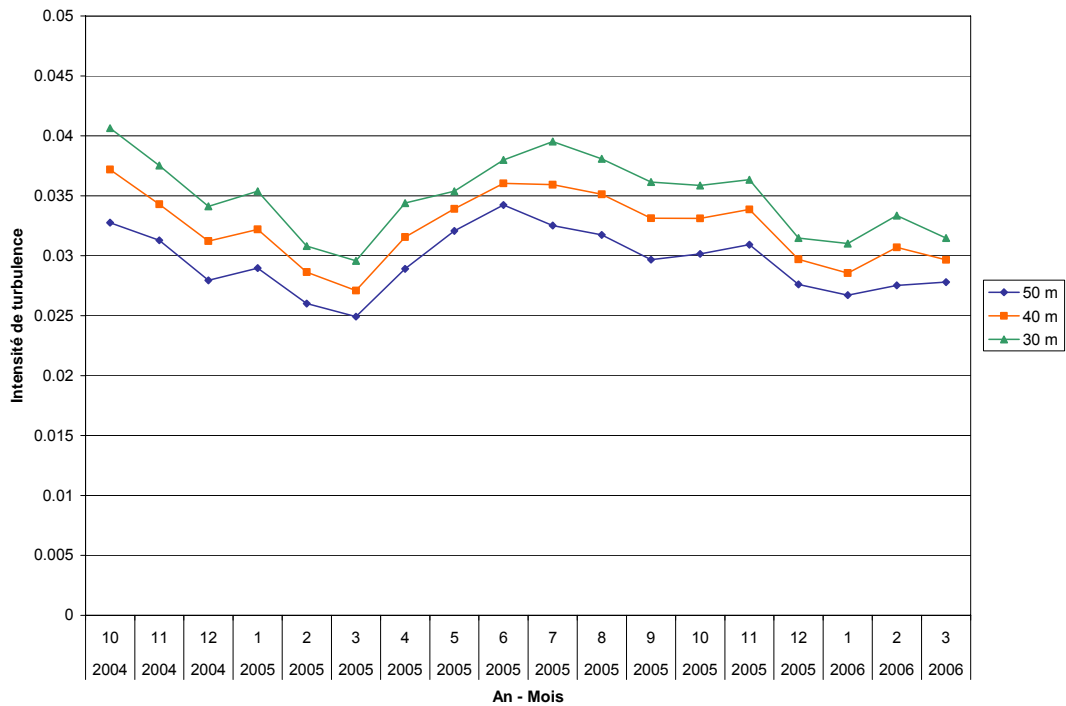


Figure 4-4 : Évolution mensuelle de l'intensité de turbulence

## 4.2 Évolution journalière des observations

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, 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 de vent et il est important, par conséquent, de le quantifier. HéliMAX utilise le cycle journalier comme méthode supplémentaire dans le processus de contrôle de qualité des données observées, ce qui sera discuté dans cette section.

### 4.2.1 Cycle journalier de la température atmosphérique

Le cycle journalier de la température atmosphérique est le résultat direct du rayonnement solaire incident. En général, la température atteindra 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 site à l'étude. Il est à noter que la mesure de la température s'effectue à une hauteur de 5 m.

### 4.2.2 Cycle journalier de la vitesse du vent

Le réchauffement de l'atmosphérique pendant la journée fait augmenter le gradient de température à l'intérieur de la couche limite atmosphérique et ainsi, celle-ci atteint un maximum en après-midi. Cette augmentation du gradient accroît le mélange thermique vertical de l'air, lequel expliquerait pourquoi les vitesses de vent sont généralement plus fortes dans l'après-midi. Cependant, des phénomènes locaux ou à grande échelle influencent occasionnellement le cycle journalier de la vitesse du vent, atténuant ainsi la différence observée entre le maximum et le minimum, ou même causant un minimum dans le cycle journalier durant l'après-midi.

La Figure 4-6 présente le cycle journalier de la vitesse du vent pour le site étudié. On remarquera que ces dernières sont assez constantes durant toute la journée avec une légère hausse en fin d'après-midi et en début de soirée, puis, elles atteignent un maximum vers la fin de la journée. On remarquera aussi que les vitesses sont à leur plus faibles en milieu avant-midi.

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

À l'opposé des cycles observés en 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 atténue la différence entre les vitesses de vent mesurées aux différents niveaux.

La et Figure 4-7 montre le cycle journalier du coefficient de cisaillement du vent. Ces valeurs dépendent du type de terrain sur lequel le mât est installé. Selon le type de terrain du site de Kuujuarapik, elles sont légèrement plus élevées que ce à quoi l'on devrait normalement s'attendre.

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

L'intensité de turbulence est aussi influencée par le cycle journalier du rayonnement solaire et, par le fait même, du 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. On y remarque que l'intensité de la turbulence est faible.

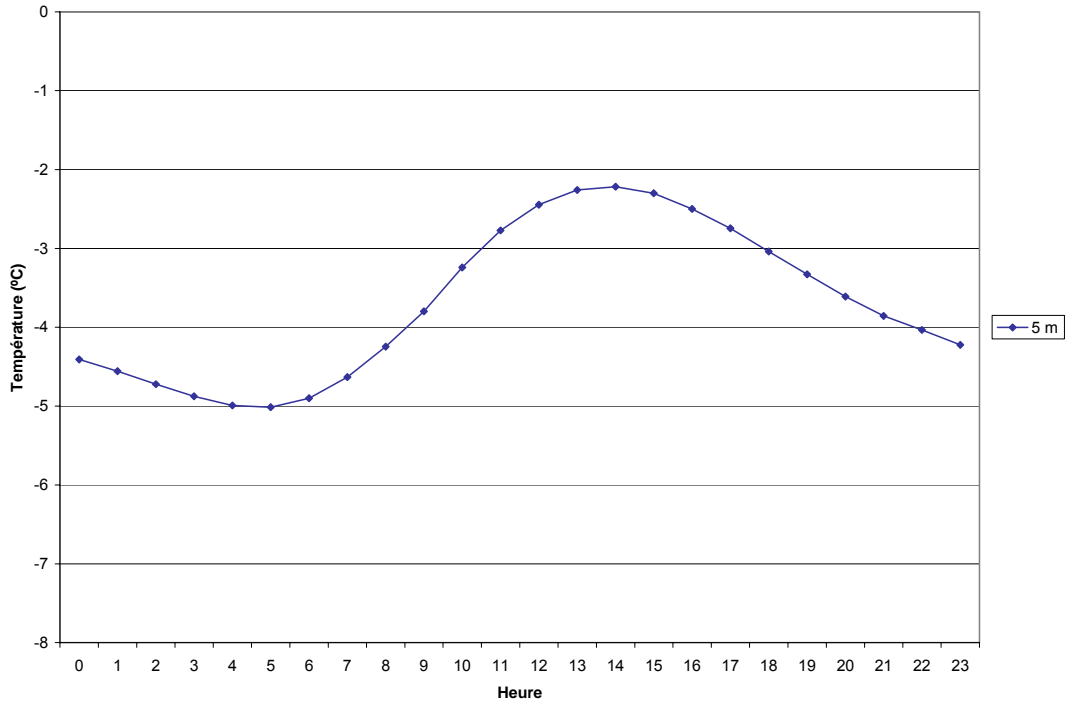


Figure 4-5 : Cycle journalier de la température

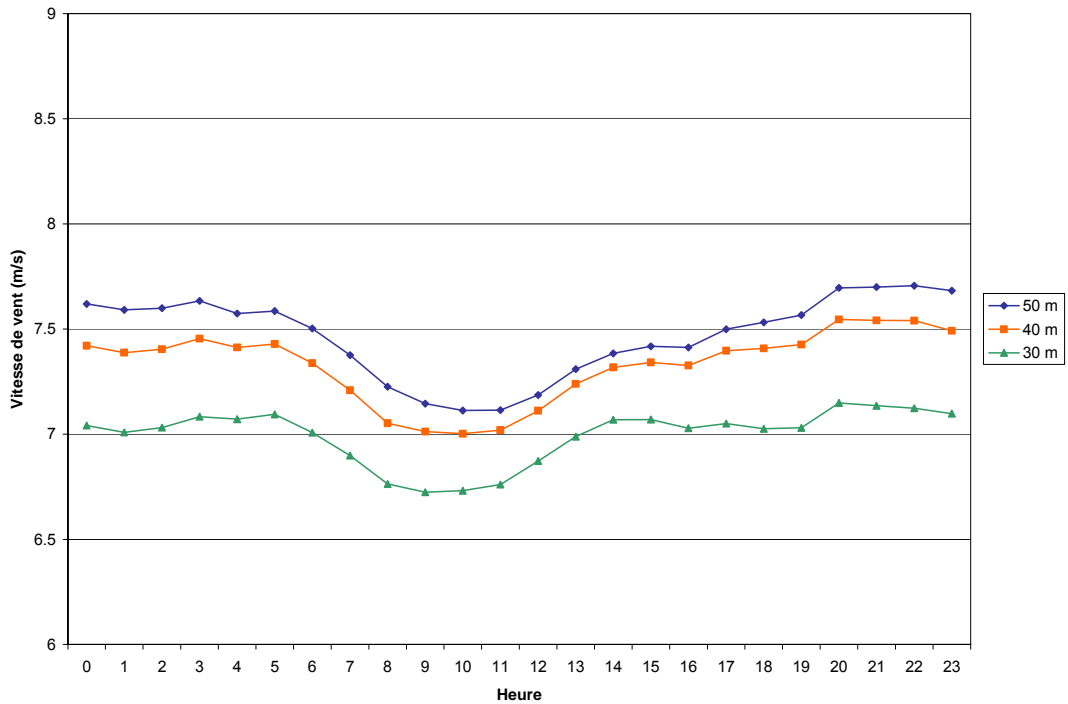


Figure 4-6 : Cycle journalier de la vitesse des vents

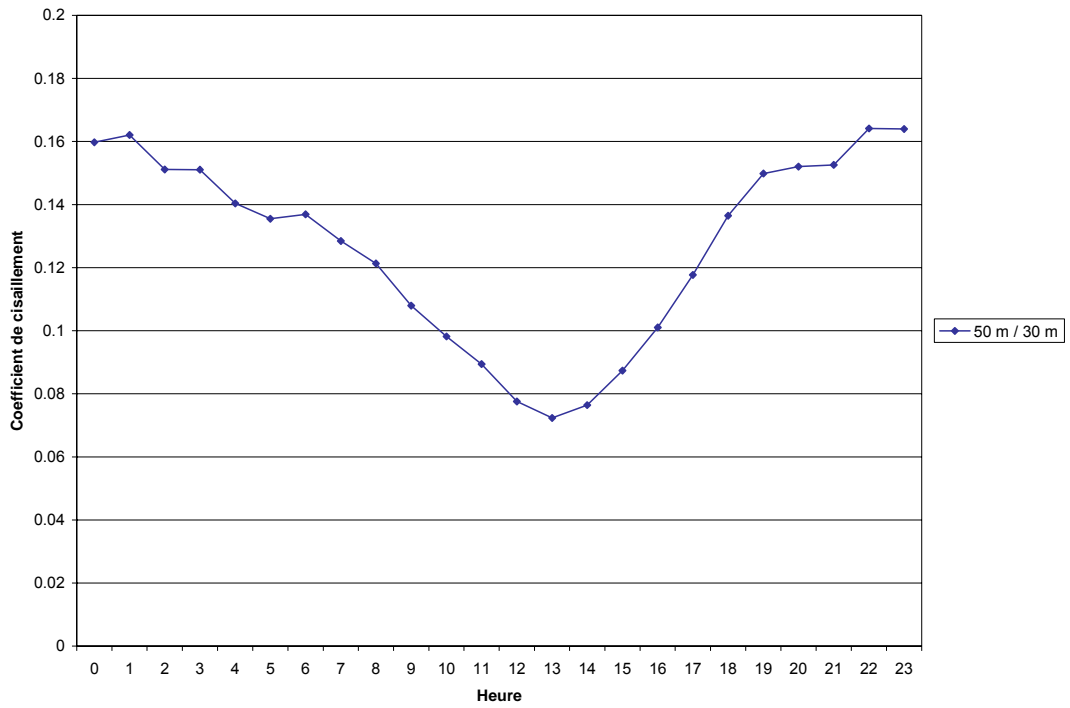


Figure 4-7 : Cycle journalier du coefficient de cisaillement vertical

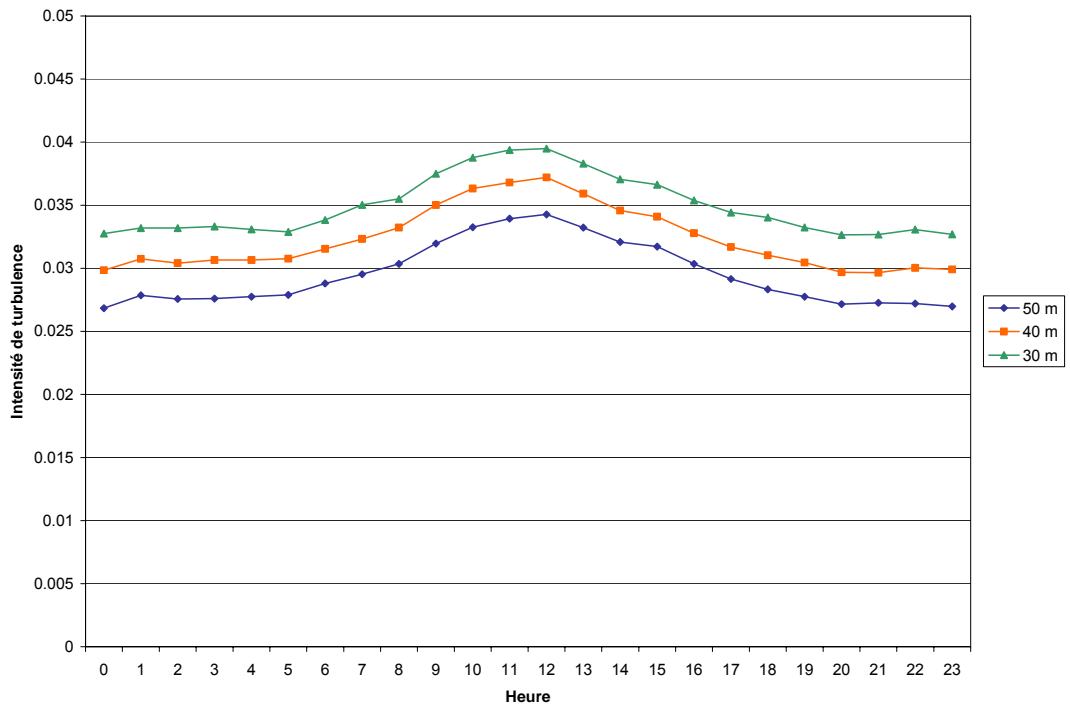


Figure 4-8 : Cycle journalier de l'intensité de turbulence

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

Les vitesses de vent sur un site particulier sont fortement influencées par les patrons synoptiques ainsi que par les effets locaux causés par la topographie et la rugosité de la surface. De ce fait, les vitesses de vent ainsi que les paramètres dérivés peuvent varier grandement selon 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 la méthode courante utilisée dans l'industrie pour décrire la distribution directionnelle de la vitesse du vent d'un site. Essentiellement, une rose des vents montre la distribution et l'occurrence des vitesses de vent par secteur. Les secteurs directionnels prédominants et ceux ayant une forte vitesse de vent peuvent alors être facilement identifiés. Les tableaux de l'annexe C montrent les données utilisées pour créer les roses des vents.

La Figure 4-9 montre la rose des vents au mât pour le niveau de mesure le plus haut (50 m). La provenance des vents dominants pour Kuujjuarapik est plutôt du secteur est-sud-est au secteur ouest-nord-ouest.

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

En théorie, 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 4-10 présente la distribution directionnelle de la densité d'énergie pour tous les niveaux d'observations du mât de mesure de Kuujjuarapik. On remarquera des pointes dans la densité d'énergie pour les secteurs ouest-nord-ouest et sud-est.

#### 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, étant généralement plus bas par vents forts.

La Figure 4-11 montre la distribution directionnelle du coefficient de cisaillement vertical du vent. Les valeurs sont légèrement plus élevées de ce que l'on s'attendrait pour le type de terrain sur lequel le mât est installé. De plus, ces figures révèlent des valeurs maximales dans le secteur sud pour Kuujjuarapik. Ceci semble plutôt dû à l'effet de sillage du mât de mesure.

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

L'intensité de turbulence est aussi 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 la hauteur parce que l'effet de la rugosité de la surface diminue aussi avec la hauteur.

La Figure 4-12 présente la distribution directionnelle de l'intensité de la turbulence. On y remarque que l'intensité de la turbulence est faible pour chaque secteur. Encore ici, le secteur sud pour Kuujjuarapik fait exception en montrant un maxima. L'effet de sillage du mât peut en être la cause.



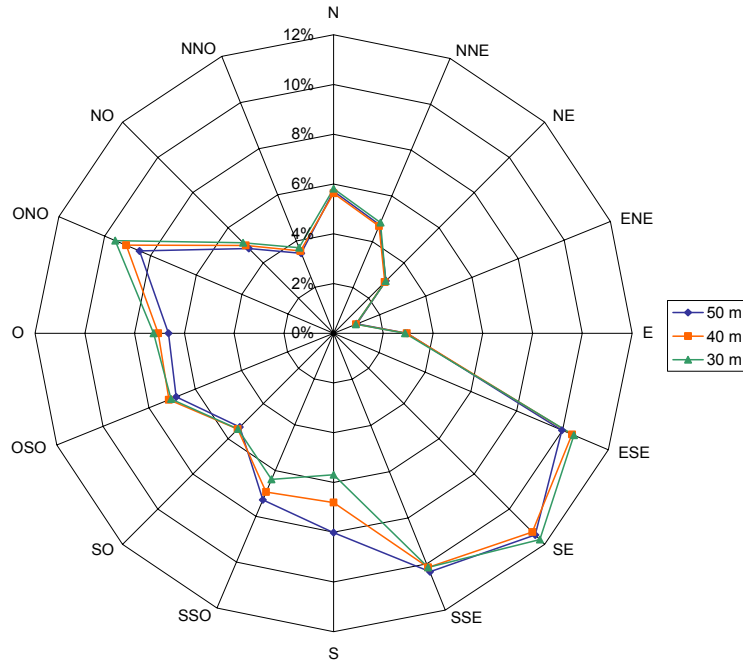


Figure 4-10 : Distribution directionnelle de la densité énergétique (%)

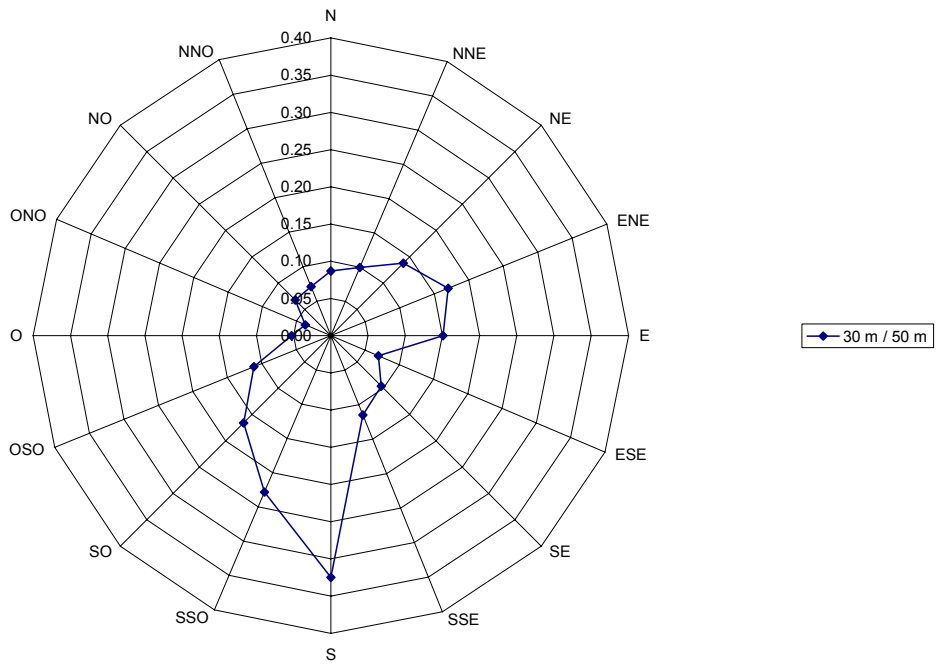
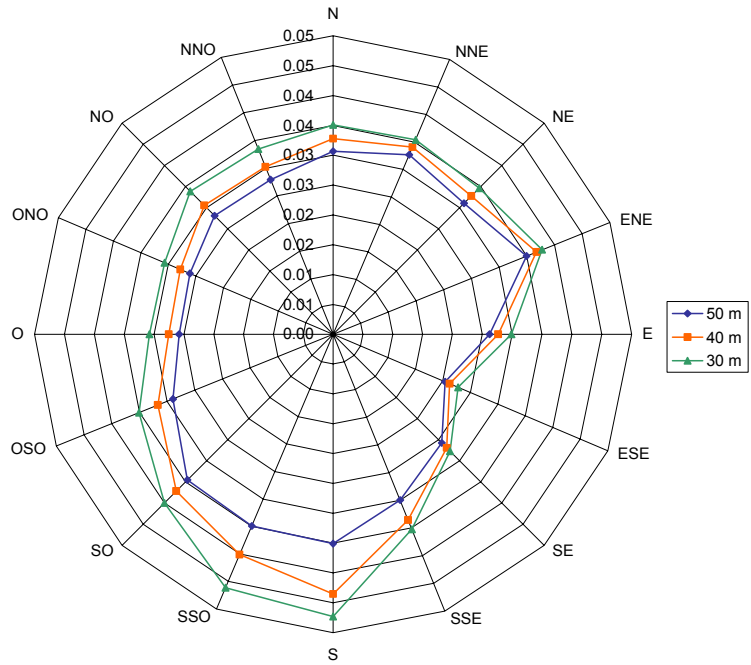


Figure 4-11 : Distribution directionnelle du coefficient de cisaillement vertical



**Figure 4-12 : Distribution directionnelle de l'intensité de turbulence**

#### 4.4 Distribution des vitesses de vent

Généralement, la distribution statistique de Weibull peut représenter assez fidèlement la réelle distribution de fréquence des vitesses de vent observées, particulièrement avec les fortes vitesses. L'expression mathématique de la distribution de Weibull est présentée à l'annexe B.

Les paramètres d'échelle (c) ainsi que les paramètres de forme (k), pour le niveau de mesure le plus haut (50 m), représentant le mieux les observations selon la distribution de Weibull sont montrés au Tableau 4-2.

Tableau 4-2 : Paramètres de Weibull à 50 m

Paramètre de Weibull	Kuujuarapik
c	8,24
k	2,00

La Figure 4-13 présente l'histogramme des vitesses de vent observées pour le niveau de mesure le plus haut (50 m). Superposée à l'histogramme se trouve la courbe de la fonction de distribution de Weibull. Les tableaux de l'annexe C montrent les données utilisées pour créer la distribution statistique de Weibull.

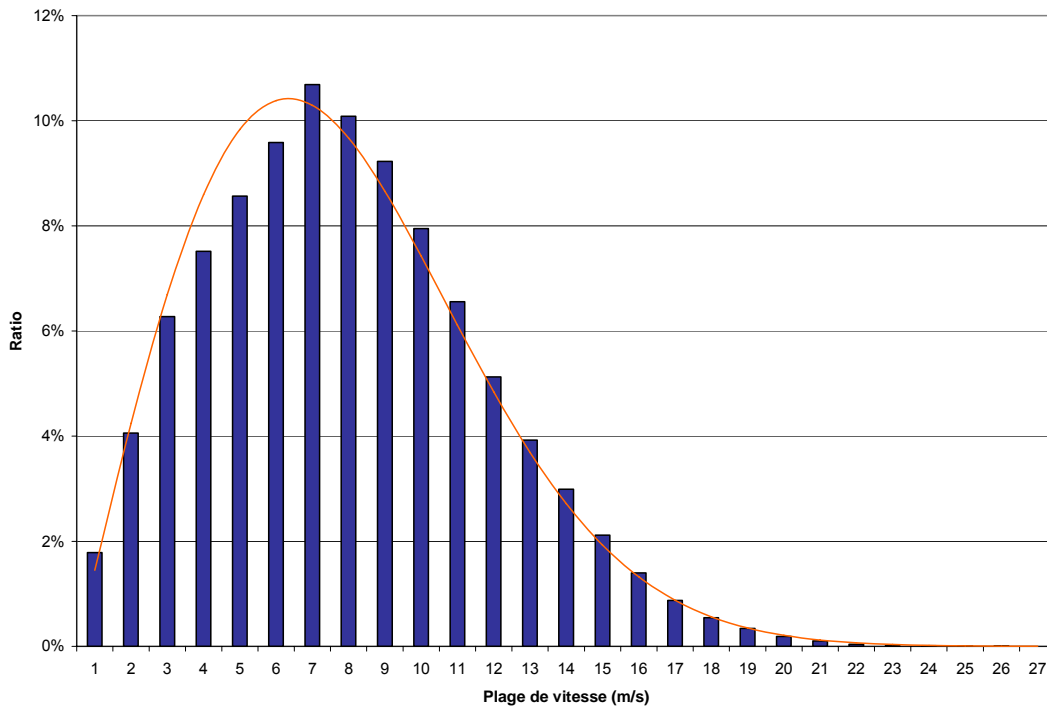


Figure 4-13 : Distribution des vitesses de vent à 50 m

## 5 AJUSTEMENT CLIMATOLOGIQUE ET EXTRAPOLATION VERTICALE

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

### 5.1 Ajustement climatologique des vitesses de vent

Les vitesses de vents peuvent varier significativement d'une année à l'autre à cause 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. Donc, dans un tel contexte d'évaluation de potentiel éolien, couvrant toute la durée de vie du parc éolien, des données climatologiques d'une station locale météorologique sont utilisées afin d'ajuster les observations recueillies durant le programme de mesure de vent. Ce processus est défini comme l'ajustement climatologique de la vitesse de vent climatologique.

L'ajustement climatologique des vitesses de vent s'est 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 des environs. Les coefficients de régression linéaires obtenus pour chacune de ces stations météorologiques ont ensuite été utilisés afin de procéder à un ajustement climatologique des vitesses de vent observées par le site.

L'ajustement climatologique des vitesses a été calculé en utilisant l'équation suivante :

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

où :

$V_i^{climato}$ :	Vitesse moyenne climatologique d'une station météorologique de référence
$V_i^{courte\_periode}$ :	Vitesse moyenne du vent d'une courte période d'une station météorologique de référence
$V_{mât}^{climato}$	Vitesse moyenne climatologique du mât de mesure
$V_{mât}^{courte\_periode}$	Vitesse moyenne d'une courte période du mât de mesure
1,2,...,n :	Index des stations météorologiques <sup>2</sup>
$a_i$ :	Coefficient de régression linéaire

Les stations météorologiques servant à l'ajustement climatologique de la vitesse de vent à long terme sont sélectionnées en utilisant des conditions et des critères stricts. Des tests statistiques sont ensuite effectués sur ces stations afin d'évaluer la corrélation entre les données de la station météorologique et les observations du mât de mesure<sup>3</sup>. Donc, la station sélectionnée pour le site de Kuujuarapik, montrée à la Figure 2-1 est :

- Kuujuarapik A (7103536).

Cette station a été utilisée afin de réaliser l'ajustement climatologique de la vitesse du vent. La corrélation entre le mât de mesure et la station météorologique est montrée au Tableau 5-1. Comme il y a un fort degré de corrélation, la régression linéaire est jugée bonne.

La moyenne de la vitesse de vent annuelle sur le site de Kuujuarapik a légèrement diminué (2,5%) après l'ajustement climatologique de la vitesse du vent.

<sup>2</sup> Station météorologique de référence telle que Station Environnement Canada

<sup>3</sup> Se référer au document interne d'Hélimax : TetF-7103536(Kuujuarapik)-ED00.xls.

Parallèlement à l'ajustement climatologique de la vitesse du vent, la représentativité climatologique de la rose des vents observée sur une période annuelle donnée est aussi validée avec les données des stations d'EC<sup>4</sup>.

## 5.2 Profil vertical de la vitesse du vent

Tel que cité précédemment, l'industrie éolienne utilise deux lois mathématiques pour extrapoler verticalement 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  $Z_0$ . Les expressions mathématiques de ces deux lois sont montrées à la section 4.1.3.

Une hauteur de déplacement est généralement utilisée pour prendre en compte la présence de la végétation aux environs de la région étudiée. Aucune hauteur de déplacement n'a été utilisée dans cette analyse puisque l'environnement immédiat et du site ne présente aucune végétation importante

Les calculs sont basés sur la loi logarithmique avec une longueur de rugosité et une hauteur de déplacement spécifique au site.

Tableau 5-1 : Tableau du sommaire général

Information générale	
Numéro d'identification de la station	HQ21002
Altitude (m)	75
Période d'observation	2004-10-06 – 2006-04-12
Taux de recouvrement des données (%)	99
Information technique	
Période utilisée pour la simulation	2004-11-01 – 2005-10-31
Vitesse de vent observée	
30 m au-dessus du sol (m/s)	7,0
40 m au-dessus du sol (m/s)	7,3
50 m au-dessus du sol (m/s)	7,5
Intensité de turbulence	
Intensité de turbulence (IT)	0,030
Hauteur utilisée pour IT (m)	50
Rugosité de la surface et coefficient de cisaillement	
Longueur de rugosité de la surface – $Z_0$	0,0242
Hauteurs de référence pour $Z_0$	50 m – 40 m – 30 m
Coefficient de cisaillement vertical $\alpha$	0,07
Hauteurs de référence $\alpha$	50 m – 40 m
Ajustement climatologique de la vitesse du vent	
Station météorologique utilisée pour l'ajustement	Kuujuarapik A (7103536)
Période utilisée pour l'ajustement	1998-2005
$R^2$	0,91
Vitesse du vent après ajustement climatologique	
50 m au-dessus du sol (m/s)	7,3
Vitesse du vent après ajustement climatologique et extrapolation	
80 m au-dessus du sol (m/s)	7,8

4 Se référer au document interne d'Hélimax : RV\_7103536(Kuujuarapik)\_200611-16s-ED00.xls.

## 6 CARTOGRAPHIE DE LA RESSOURCE ÉOLIENNE

Les cartes de vitesse des vents pour cette analyse ont été réalisées grâce au programme WAsP,<sup>5</sup> dont une description générale est fournie à l'annexe D. Le programme WAsP calcule les valeurs de vitesse des vents et la distribution directionnelle à une hauteur déterminée au-dessus du sol; il produit un champ représentant la variation spatiale du gisement éolien. Pour réaliser ce champ de vitesses, le modèle a besoin des trois données suivantes :

- Le champ de données numériques altimétriques du site modélisé;
- Les valeurs de rugosité de surface pour le site, y compris les obstacles;
- Les données en matière de vent enregistrées par une tour de mesure anémométrique située dans le domaine ciblé.

Les données d'entrée précises dont Hélimax s'est servi pour exécuter le programme WAsP sont présentées dans le Tableau 6-1. Les Figure 6-1 et Figure 6-2 montrent, respectivement, la carte topographique et la carte de rugosité de surface du site qui ont servi de données d'entrée pour le programme WAsP. Les données météorologiques entrées dans le modèle sont les données de mesure collectées au niveau le plus élevé sur le mât de mesure, après ajustement climatologique.

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

Données d'entrée	Source des données
Topographie	Carte 1 : 50 000, BNDT
Rugosité de surface	Carte 1 : 50 000, BNDT
Données météorologiques	Kuujuarapik HQ21002 – Mât de mesure de 50 m

Ces données sont utilisées dans le programme WAsP pour créer un champ de vitesses de 50 m de résolution à une hauteur de 80 m au-dessus du sol sur le site correspondant à l'emplacement du futur parc éolien. La taille du domaine du site a été choisie de manière à conserver les conditions de base requises par le modèle.

Le programme WAsP a été roulé en utilisant les données de la tour afin de produire un champ de ressource éolienne.

La carte de vitesse des vents et la carte de densité de puissance produites sont indiquées, respectivement, aux Figure 6-3 et Figure 6-4.

<sup>5</sup> Wind Atlas Analysis and Application Program du service Wind Energy Department du Risø National Laboratory, au Danemark.

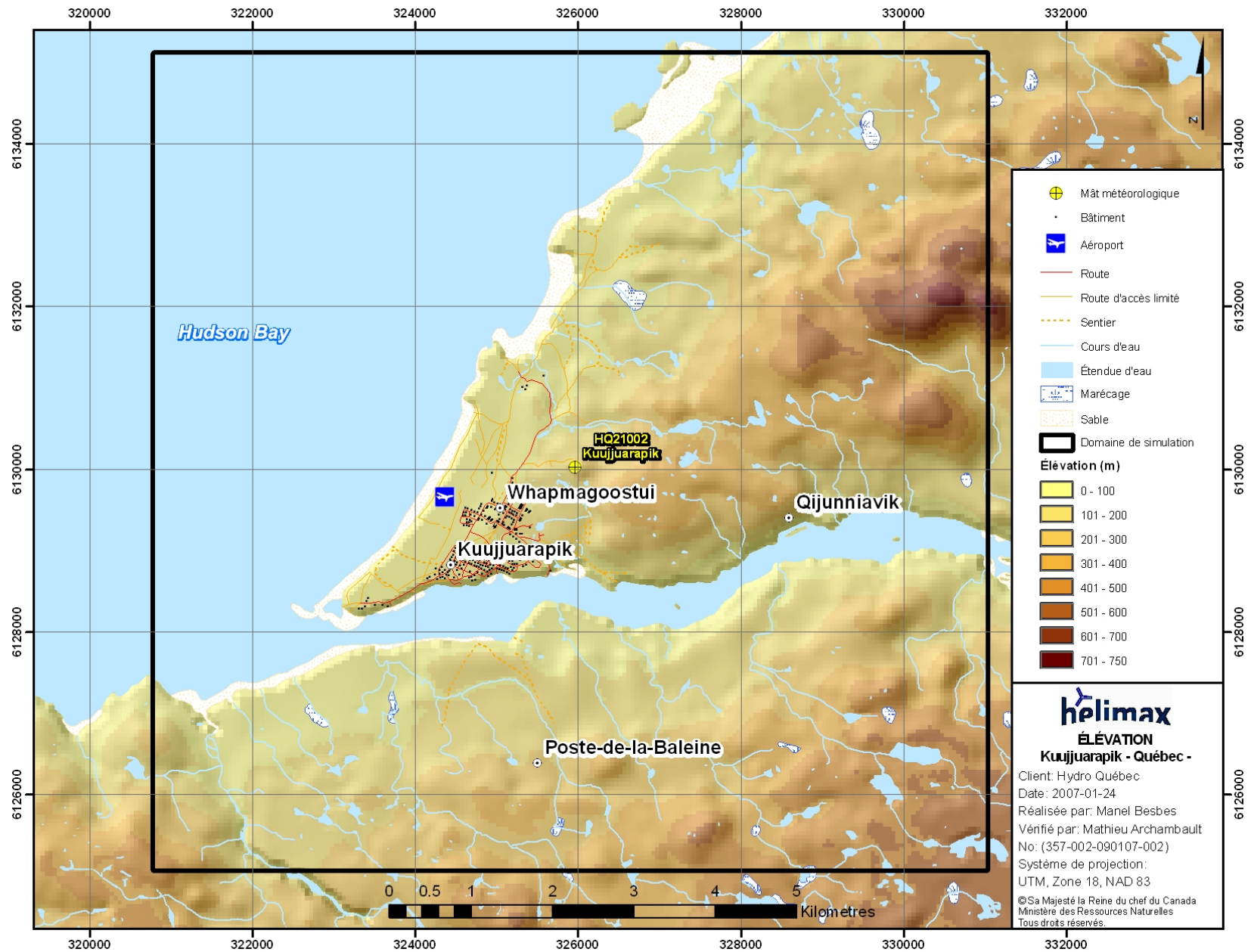


Figure 6-1 : Carte topographique du domaine

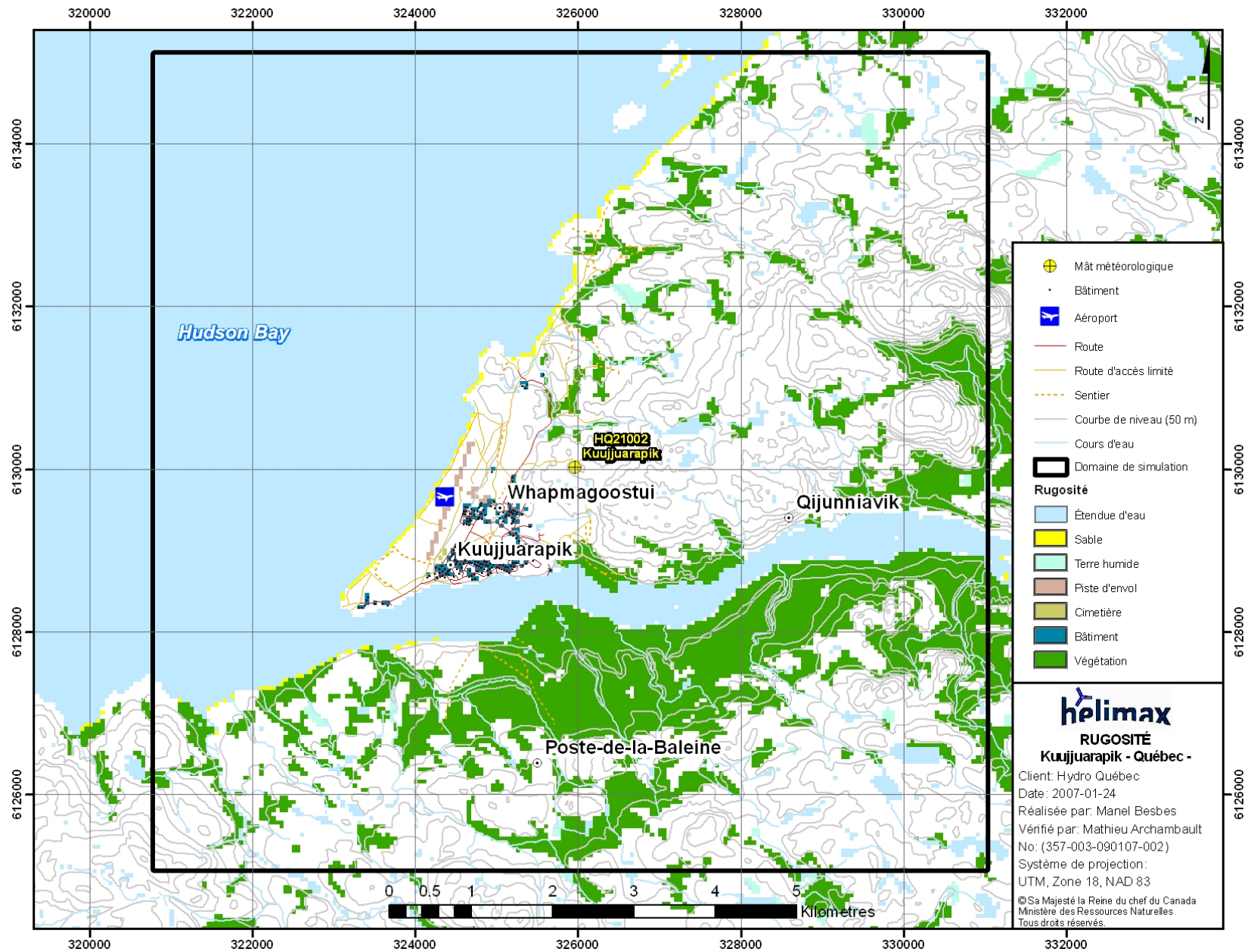


Figure 6-2 : Carte de la rugosité de surface du domaine

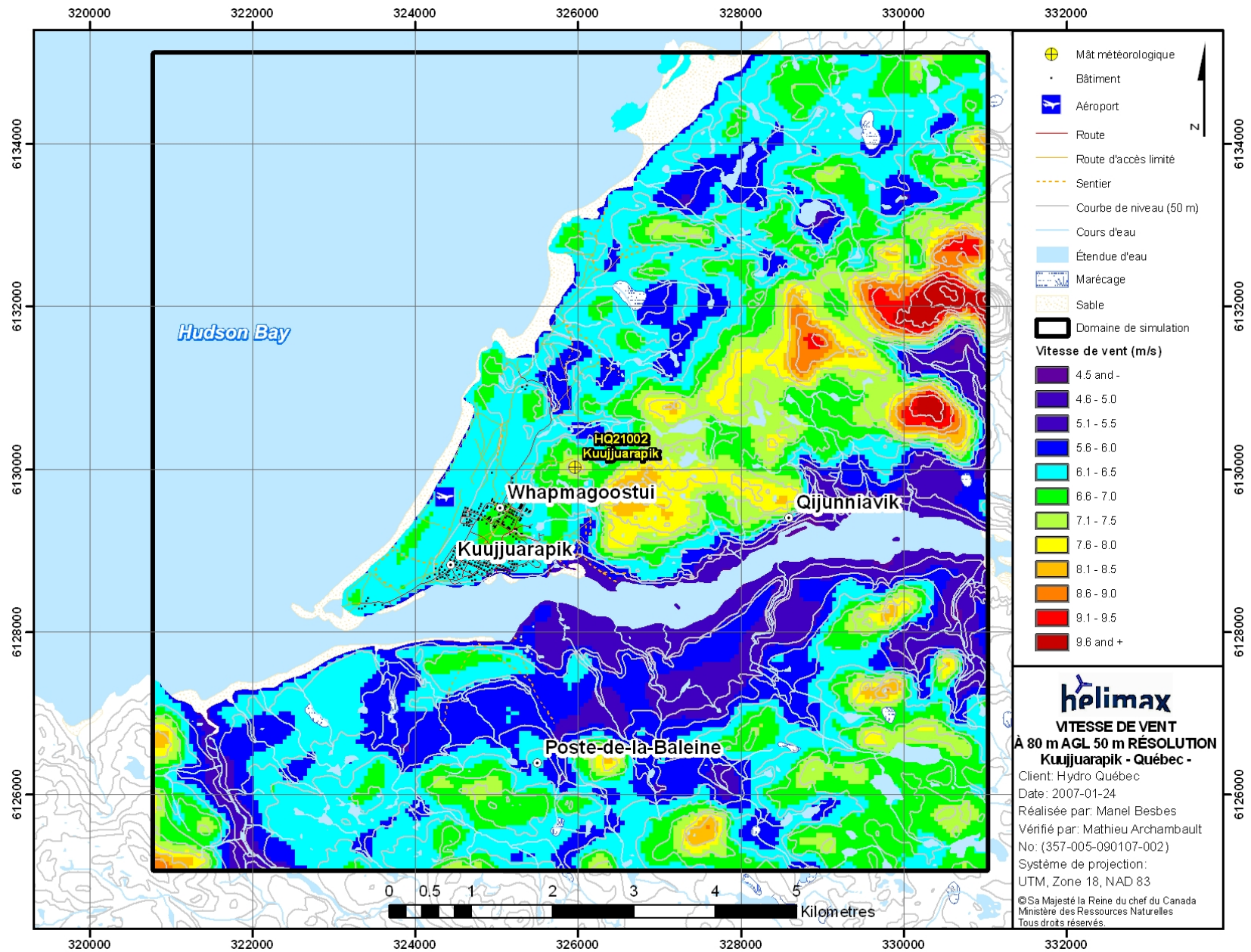


Figure 6-3 : Carte de vitesse des vents du domaine à 80 m au-dessus du sol

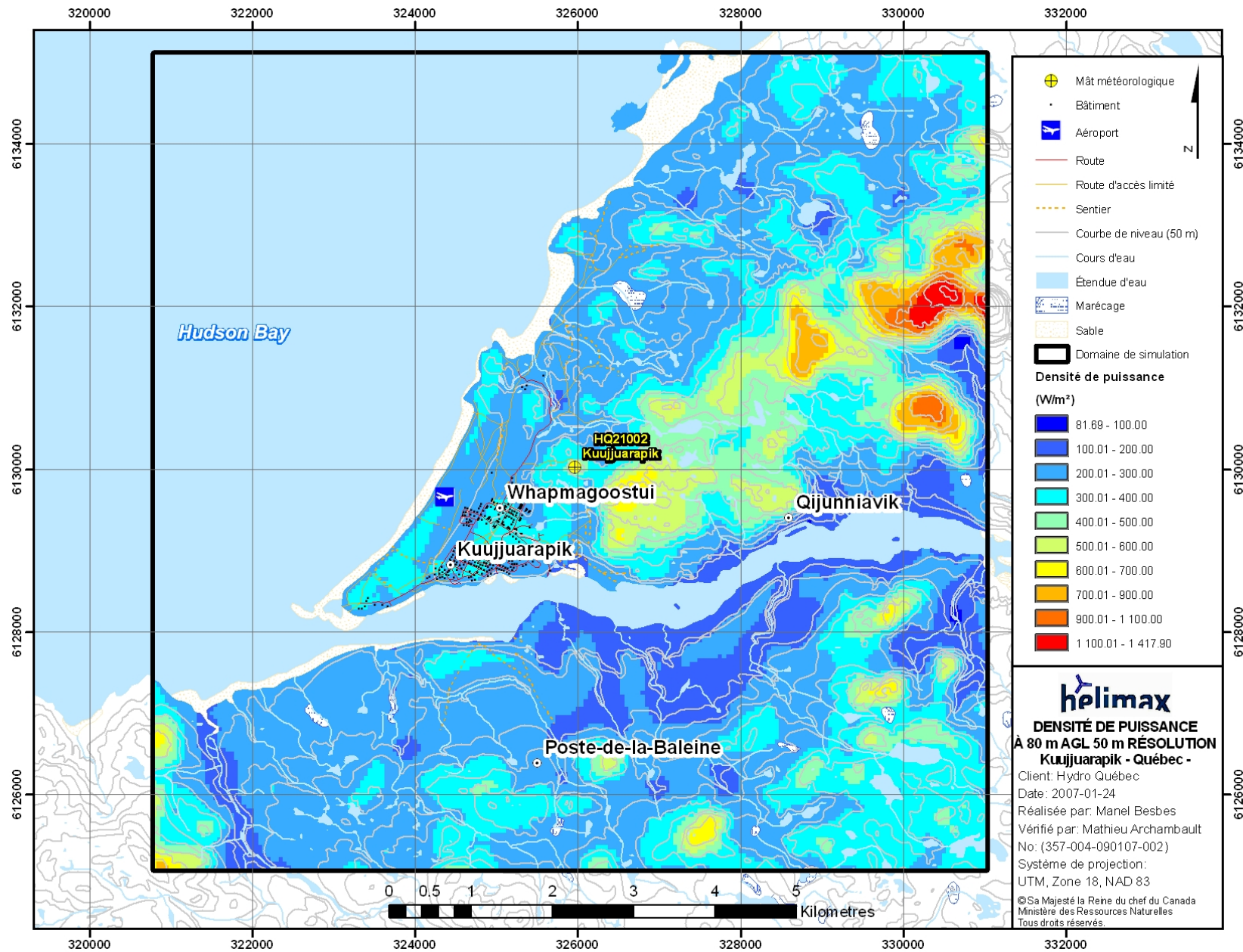


Figure 6-4 : Carte de la densité de puissance du domaine à 80 m au-dessus du sol

## 7 DISCUSSION DES RÉSULTATS

Jugeant la qualité des observations rassemblées à la fin de la période de 18 mois pour le site de Kuujjuarapik, Hélimax conclut que la campagne de mesure des vents sur ce site a été réussie et a fourni des observations valables. En utilisant une combinaison de contrôle de qualité rigoureux avec une analyse des données exhaustives selon les normes de l'industrie, Hélimax a démontré, de façon générale, le bon fonctionnement du mât de mesure de vent pour la pleine période d'analyse.

Le mât de Kuujjuarapik présente un taux de recouvrement de 99 %.

Le Tableau 7-1 présente le sommaire des résultats obtenus suite à l'analyse météorologique.

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 18 mois. Cette incertitude a pour origine plusieurs facteurs (instruments, taux de recouvrement, extrapolation des vitesses de vent, variabilité interannuelle, 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.

**Tableau 7-1 : Sommaire de l'analyse météorologique**

	<b>Kuujjuarapik</b>
Vitesse des vents observée à une hauteur de 30 m (m/s)	7,0
Vitesse des vents observée à une hauteur de 40 m (m/s)	7,3
Vitesse des vents observée à une hauteur de 50 m (m/s)	7,5
Vitesse des vents annuelle à une hauteur de 50 m après ajustement climatologique (m/s)	7,3
Vitesse des vents annuelle après ajustement climatologique et extrapolation à une hauteur de 80 m (m/s)	7,8

## ANNEXE A TESTS DE CONTRÔLE DE QUALITÉ

N°	Nom du test	Critères <sup>6</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)	Les tests sur ces valeurs s'assurent que les valeurs sont comprises dans les intervalles météorologiques acceptables.
3	Test des valeurs de la déviation standard 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 la déviation standard 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 s'assurent que les observations ont évolué suffisamment 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$ (°)	Les tests de variation verticale s'assurent que la différence entre la lecture de deux instruments de hauteurs différentes (soit A et B) est physiquement possible. Un test doit être fait pour chaque paire d'instruments.

<sup>6</sup> Il est important de noter que les valeurs minimales et maximales spécifiées dans ce tableau représentent les valeurs standards couramment utilisées. Le météorologue ajustera toutefois ces valeurs en fonction des conditions météorologiques particulières d'un site.

## ANNEXE B CONCEPTS MÉTÉOROLOGIQUES

### Partie A- Densité de l'air

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

$$\rho = \frac{100 P}{R_d (T + 273.15)}$$

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 (mb)

Quand seulement la température est disponible pour un site, la densité de l'air peut être obtenue avec la relation suivante :

$$\rho = \frac{100 P_0}{R_d (T + 273.15)} \exp\left(-\frac{g Z}{R_d (T + 273.15)}\right)$$

où :

- $\rho$  : densité (kg/m<sup>3</sup>)
- $P_0$  : densité de pression atmosphérique standard (1013,25 mb)
- $R_d$  : 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 – Dépendance de la densité énergétique de la température

La relation entre la densité énergétique du vent et la densité de l'air est définie de la façon suivante :

$$E = \frac{1}{N} \sum_1^N \frac{1}{2} \rho U^3$$

où :

- $E$  : densité énergétique (Wh/m<sup>2</sup>)
- $\rho$  : densité de l'air (kg/m<sup>3</sup>)
- $U$  : vitesse du vent (m/s)
- $N$  : nombre d'heures d'observation pour une période de temps donnée (heures)

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

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

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{U_2}{U_1}\right)}{\ln\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)}$$

où :

- $\alpha$  : coefficient de cisaillement
- $U_1$  : vitesse du vent à la 1<sup>ère</sup> hauteur (m/s)
- $U_2$  : 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>7</sup>

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

<sup>7</sup> Selon la documentation de WindFarm.

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

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

$$U_z = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{Z-d}{z_0}\right)$$

où :

- $U_z$  : vitesse du vent horizontal à la hauteur  $Z$  (m/s)
- $u_*$  : vitesse 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>8</sup>

$z_0$	Type de terrain
0,0001 to 0,0003	Mer ou lac, marécages boueux, plaine couverte de neige
0,0003 to 0,001	Sablère et neige
0,001 to 0,01	Terrain simple, terre dénudée, herbe rase
0,01 to 0,04	Terrain avec une faible végétation, herbe haute, brousse et toundra
0,04 to 0,1	Terres agricoles étendues, herbe haute, haie basse
0,1 to 0,5	Terres agricoles avec boisées, haute récolte, brise-vent dense
0,5 to 1	Forêt et terrain boisé, banlieue
1 to 4	Centres des grandes villes

<sup>8</sup> Selon la documentation de WindFarm.

## Partie E – Intensité de turbulence ambiante

L'intensité de turbulence est définie comme suit :

$$I = \frac{\sigma_U}{U}$$

où :

- $I$  : intensité de turbulence
- $\sigma_U$  : déviation standard de la vitesse du vent (m/s)
- $U$  : vitesse du vent (m/s)

## Part F – Fonction de la distribution de fréquence de Weibull

Mathématiquement, la distribution de Weibull est une fonction de fréquence relative des vitesses de vent. Elle est définie comme suit :

$$f(U) = \frac{K}{C} \left( \frac{U}{K} \right)^{K-1} \exp \left( - \left( \frac{U}{C} \right)^K \right)$$

où :

- $f(U)$  : distribution du vent  $U$
- $U$  : vitesse du vent (m/s)
- $K$  : paramètre de forme
- $C$  : paramètre d'échelle (m/s)

La moyenne de vitesse de vent calculée en utilisant la méthode de l'Atlas Éolien Européen est :

$$U = C \Gamma \left( 1 + \frac{1}{K} \right)$$

où :

- $U$  : vitesse moyenne de vent (m/s)
- $K$  : paramètre de forme
- $C$  : paramètre d'échelle (m/s)
- $\Gamma$  : fonction Gamma

## ANNEXE C

## DISTRIBUTION DE LA VITESSE DU VENT

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

Vitesse de vent (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSO	SO	OSO	O	ONO	NO	NNO	Total
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,78
2	0,38	0,34	0,22	0,21	0,21	0,15	0,13	0,15	0,21	0,24	0,23	0,21	0,43	0,30	0,28	0,36	4,06
3	0,70	0,38	0,33	0,33	0,27	0,17	0,18	0,23	0,42	0,39	0,39	0,37	0,54	0,51	0,49	0,58	6,28
4	0,72	0,56	0,42	0,26	0,30	0,24	0,28	0,38	0,51	0,47	0,54	0,66	0,67	0,58	0,48	0,48	7,53
5	0,70	0,63	0,49	0,26	0,31	0,30	0,35	0,51	0,68	0,51	0,72	0,89	0,79	0,52	0,46	0,47	8,58
6	0,62	0,87	0,59	0,22	0,36	0,36	0,47	0,63	0,80	0,81	0,77	0,80	0,76	0,62	0,51	0,41	9,60
7	0,54	0,87	0,54	0,24	0,31	0,58	0,85	0,74	0,95	0,97	0,92	0,76	0,76	0,78	0,52	0,37	10,70
8	0,51	0,56	0,52	0,22	0,23	0,55	0,87	0,80	0,96	1,06	0,79	0,65	0,68	0,87	0,55	0,29	10,10
9	0,46	0,44	0,50	0,19	0,20	0,53	0,79	0,89	0,89	0,97	0,55	0,59	0,70	0,66	0,55	0,32	9,22
10	0,45	0,28	0,34	0,15	0,23	0,55	0,79	0,77	0,75	0,72	0,42	0,57	0,55	0,67	0,44	0,24	7,92
11	0,47	0,17	0,27	0,06	0,22	0,64	0,82	0,63	0,51	0,59	0,35	0,46	0,36	0,45	0,33	0,20	6,52
12	0,36	0,17	0,18	0,05	0,20	0,58	0,65	0,52	0,39	0,40	0,28	0,31	0,23	0,39	0,24	0,17	5,10
13	0,21	0,21	0,11	0,03	0,16	0,34	0,58	0,40	0,36	0,34	0,20	0,20	0,15	0,27	0,17	0,19	3,93
14	0,19	0,18	0,07	0,02	0,07	0,27	0,45	0,33	0,28	0,22	0,15	0,12	0,11	0,24	0,15	0,14	3,00
15	0,15	0,11	0,04	0,01	0,05	0,23	0,32	0,20	0,18	0,12	0,10	0,12	0,11	0,22	0,09	0,07	2,12
16	0,11	0,07	0,01	0,00	0,06	0,20	0,19	0,15	0,10	0,06	0,05	0,10	0,07	0,11	0,08	0,06	1,40
17	0,07	0,06	0,01	0,00	0,02	0,16	0,08	0,12	0,06	0,02	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,88
18	0,01	0,06	0,00	0,00	0,01	0,10	0,04	0,09	0,04	0,03	0,02	0,05	0,03	0,04	0,03	0,01	0,55
19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,07	0,03	0,06	0,01	0,01	0,02	0,05	0,03	0,03	0,01	0,00	0,34
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,04	0,01	0,01	0,01	0,04	0,04	0,02	0,00	0,00	0,19
21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,02	0,03	0,02	0,00	0,00	0,11
22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,04
23	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	0,01	0,00	0,00	0,01
24	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	0,01	0,00	0,00	0,02
25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01
26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01
27	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>6,66</b>	<b>5,94</b>	<b>4,64</b>	<b>2,27</b>	<b>3,22</b>	<b>6,00</b>	<b>7,89</b>	<b>7,67</b>	<b>8,11</b>	<b>7,93</b>	<b>6,57</b>	<b>7,02</b>	<b>7,15</b>	<b>7,37</b>	<b>5,40</b>	<b>4,40</b>	<b>100,00</b>

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

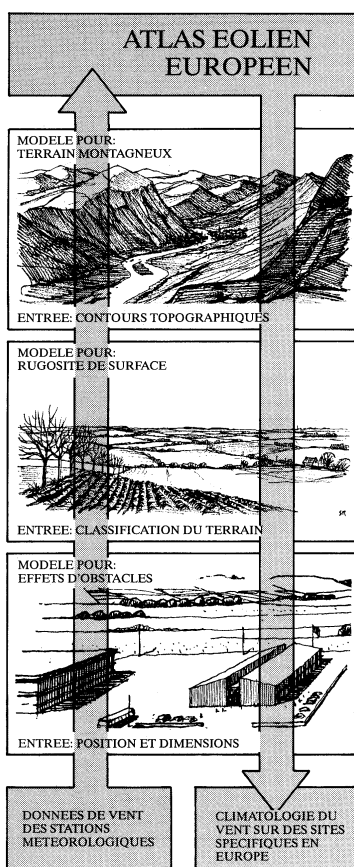
Vitesses de vent (m/s)	Distribution à 50 m (%)
1	1,78
2	4,06
3	6,27
4	7,52
5	8,57
6	9,59
7	10,69
8	10,09
9	9,23
10	7,95
11	6,56
12	5,13
13	3,92
14	2,99
15	2,11
16	1,40
17	0,87
18	0,55
19	0,34
20	0,19
21	0,11
22	0,04
23	0,01
24	0,02
25	0,01
26	0,01
27	0,00
<b>Total</b>	<b>100,00</b>
c	8,24
k	2,00

## ANNEXE D LE MODÈLE WASP

WASP a été établi et commercialisé par le Laboratoire National Risø au Danemark en 1987<sup>9</sup>. C'est un outil pour les analyses des données éoliennes, la création des cartes de vent, l'évaluation du climat éolien et le positionnement des turbines éoliennes. À travers les années, le programme a été largement utilisé dans l'industrie éolienne pour l'évaluation de la ressource éolienne. Les données résultantes de WASP consistent en une grille, calculée à une hauteur spécifique (normalement, à la hauteur du moyeu de la turbine), où la vitesse de 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 surface, les effets de sillage dus aux constructions et aux autres obstacles, et la modification du vent imposée par des variations spécifiques de la hauteur de la surface autour du mât de mesure de vent en question.

La méthodologie utilisée par WASP pour calculer les cartographies de la vitesse de vent est schématiquement présentée à la figure ci-dessous. La création de la cartographie de la vitesse de vent à mésoéchelle est basée sur des observations à partir du mât de mesure de vent, position et dimension du modèle dans WASP, à la rugosité de surface et à la topographie.



Méthodologie des cartes de vent<sup>10</sup>

9 Wind Atlas Analysis and Application Program du Département de l'Énergie éolienne à Risø National Laboratory.

10 Atlas éolien européen, Introduction de la carte éolienne, Risø National Laboratory, Danemark, 1989.