

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI

**ANALYSE DE DONNÉES EXPÉRIMENTALES
ET CONCEPTION D'UN GÉNÉRATEUR NUMÉRIQUE
DE VITESSES DE VENT**

MEMOIRE DE RECHERCHE

PRÉSENTÉ À

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI

comme exigence partielle

du programme de Maîtrise en ingénierie

pour l'obtention du grade de maître ès sciences appliquées (M.Sc.A.)

PAR

JEAN-LOUIS RÉTIVEAU

Janvier 2006



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVANT-PROPOS

Les travaux de recherche effectués dans ce mémoire ont été réalisés au département de Maths-Info et Génie de l'Université du Québec à Rimouski au sein d'un groupe de professeurs et d'étudiants ayant pour sujet commun de recherche l'énergie éolienne.

Je veux d'abord exprimer immense gratitude à l'endroit de Adrian ILINCA, professeur au département de Maths-Info et Génie de l'UQAR, qui, suite à mon stage de fin d'études de premier cycle, m'a offert la possibilité de poursuivre mes études en se proposant d'être mon directeur de maîtrise. Il a généreusement partagé ses connaissances afin que je développe les miennes sur un sujet qui m'était presque inconnu et a été, durant tout le déroulement de ces études, d'un appui financier et moral inestimable.

Je tiens à remercier également Amadou Doudou DIOP, professeur au département de Maths-Info et Génie de l'UQAR, qui s'est joint à mon travail en tant que co-directeur. Ses connaissances sur les simulateurs de turbines éoliennes et sa rigueur scientifique ont été d'une grande aide.

Je remercie Émil CEANGĂ, professeur de l'université « Dunărea de Jos » de Galați, pour avoir accepté d'être évaluateur externe de ce travail de maîtrise.

Je tiens également à remercier Monsieur Jean-Louis Chaumel, professeur en gestion de projets au département des Sciences de Gestion et véritable pionnier de l'énergie éolienne au Québec, qui à travers nos multiples déplacements sur le terrain et travaux a réussi à me transmettre sa passion pour cette cause.

Je ne pourrais oublier mes collègues et amis Richard Lepage, Laurent Desbarax, Philippe Venne et Charles Pelletier, tout le personnel du département de Maths-Info et Génie de l'UQAR pour leur aide inestimable, ainsi que mes amis de Rimouski pour tous les moments de qualité qu'on a partagés.

Je terminerais en remerciant ma famille, en France, pour son soutien indéfectible tout au long de mes études, et Laurence pour tout ce qu'elle m'apporte chaque jour.

RÉSUMÉ

Parallèlement à l'augmentation constante des coûts et l'épuisement des énergies fossiles et aux considérations environnementales, les progrès technologiques permettent maintenant de considérer l'énergie éolienne comme une alternative économique et fiable par rapport aux ressources conventionnelles. Le développement et la validation d'outils pour l'étude de sites d'implantation d'éoliennes, ainsi qu'une meilleure compréhension de la variabilité du vent est devenu un domaine de recherche en plein essor.

Le vent est un phénomène aléatoire qui a de grandes variabilités autant temporelles que spatiales. Il faut donc caractériser ces variations à l'aide de lois ou modèles et essayer de déterminer l'influence des caractéristiques extérieures. Différentes lois statistiques caractérisant ce phénomène ont été étudiées. On trouve, entre autres, une caractérisation temporelle de variabilité du vent à l'aide de la loi de Weibull qui décrit la distribution statistique des fréquences de vitesses de vent et une caractérisation spatiale à l'aide de la loi de cisaillement vertical qui décrit la variabilité du vent pour différentes hauteurs. Nous avons essayé, à travers cette recherche, de mettre en évidence des corrélations permettant de déterminer les caractéristiques d'un site ne possédant pas de données de vent en le comparant à un site de référence.

De plus, à l'aide de ces données et d'une étude de caractérisation topographique du site (hauteur, rugosité,...), un logiciel a été conçu. Celui-ci, fondé sur une étude des spectres de fréquence, permet de générer des vitesses numériques de vent à différentes fréquences, et même à des fréquences plus élevées que celles des données réelles issues du site étudié. Il permet également de générer des vitesses de vent pour un site pour lequel aucune donnée réelle n'est disponible, simplement à l'aide de ses caractéristiques physiques : latitude, hauteur et rugosité. Les données de vent générées pourront alors être utilisées comme entrée pour un banc d'essai éolien de 35kW. Celui-ci a pour principaux objectifs de mieux comprendre et identifier le fonctionnement d'une éolienne face à différents régimes de vent puis de dégager des améliorations en vue d'une meilleure performance des éoliennes en fonction du site sur lequel elles seront installées.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT PROPOS	II
RÉSUMÉ.....	III
TABLE DES MATIÈRES	IV
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES FIGURES.....	X
LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS	XVII
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1.....	7
ANALYSE DES DONNEES REELLES DE VENT	7
1.1. Problématique.....	7
1.1.1. Variabilité temporelle	7
1.1.2. Variabilité spatiale.....	10
1.2. Objectifs	10
1.3. Méthodologie	11
1.3.1. Étude temporelle.....	11
1.3.1.1 La loi de Weibull	11
1.3.1.2 La loi de Rayleigh	19
1.3.1.3 La turbulence.....	21
1.3.2. Étude spatiale.....	34
1.3.2.1 Les lois de cisaillement du vent	34
1.3.2.2 La rose des vents	37
1.4. Présentation des outils d'analyse	38
1.5. Résultats	41
1.5.1. Le choix des sites étudiés.....	41
1.5.2. Étude temporelle.....	47
1.5.2.1 Influence des années.....	47
1.5.2.2 Influence des saisons	52
1.5.2.3 Influence des mois.....	54
1.5.2.4 Influence de la localisation.....	58

1.5.2.5	Influence de la topographie	75
1.5.2.6	Variation de la densité spectrale de puissance.....	97
1.5.3.	Étude spatiale : Étude du cisaillement vertical.....	99
1.5.3.1	La loi de cisaillement : étude de la variation du coefficient de puissance α	99
1.5.3.2	Influence de la hauteur pour le paramètre k de la loi de Weibull	101
1.6.	Conclusions	102
1.6.1.	Le facteur de forme k de la loi de Weibull	102
1.6.2.	Le facteur d'échelle c de la loi de Weibull	103
1.6.3.	L'intensité de turbulence I.....	104
CHAPITRE 2.....	106	
LE GENERATEUR NUMERIQUE DE VITESSES DE VENT.....	106	
2.1.	Problématique.....	106
2.2.	Objectifs	107
2.3.	Méthode 1 : Utilisation de la loi de Weibull inverse.....	108
2.3.1.	Méthodologie	109
2.3.1.1	Description de la loi de Weibull inverse	109
2.3.1.2	Classement des nombres	109
2.3.2.	Résultats.....	111
2.4.	Méthode 2 : Utilisation des spectres.....	114
2.4.1.	Méthodologie	115
2.4.1.1	Caractérisation géographique du site	115
2.4.1.2	Calcul de l'intensité de turbulence	115
2.4.1.3	Calcul de la longueur de turbulence (<i>length scale</i>)	121
2.4.1.4	Génération numérique des spectres de Kaimal et de von Karman et des caractéristiques de fréquence non paramétriques de ces spectres	123
2.4.1.5	Obtention des filtres de formation rationnels	128
2.4.1.6	Principe de génération de la vitesse du vent comme processus aléatoire non stationnaire	141
2.4.1.7	Validation du principe	142
2.4.1.8	Développement des logiciels finaux pour la génération du vent non stationnaire selon le modèle de von Karman	148
2.4.1.9	Développement des logiciels finaux pour la génération du vent non stationnaire selon le modèle de Kaimal	159
2.4.2.	Conclusion : Comparaison von Karman – Kaimal.....	164
CONCLUSION.....	167	

BIBLIOGRAPHIE.....	169
ANNEXE I La loi de Betz	173
ANNEXE II Calcul de la puissance et de l'énergie associée à la loi de Weibull, définitions de vitesses particulières.....	178
ANNEXE III Calcul de la puissance et de l'énergie associée à la loi de Rayleigh, définitions de vitesses particulières.....	184
ANNEXE IV Autre exemple de calcul de la puissance éolienne.....	188
ANNEXE V Description des autres méthodes de détermination des paramètres de la loi de Weibull	191
ANNEXE VI Tableaux récapitulatifs représentant les pourcentages d'observation pour les différents types de données pour les phases I à IV	196
ANNEXE VII Tableaux d'évaluation des paramètres m_i pour chaque cas avec la méthode générale	208
ANNEXE VIII Les bloqueurs	213
ANNEXE IX Théorie sur les bruits blancs	220
ANNEXE X Cartes des emplacements des différentes tours de mesures du programme du MRN.....	223

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1-1 : Puissance éolienne disponible pour le site de Baie-Comeau en fonction de la densité de l'air - pour une humidité relative fixée à 50% et une surface balayée d'un rayon de 20 m - calculée à l'aide de la loi de Betz	8
Tableau 1.3-1 : Tableau des classes et longueurs de rugosité z_0	37
Tableau 1.5-1 : Pourcentages des nombres d'observations de vitesses à 20 m (Phases I à IV)	41
Tableau 1.5-2 : Tableau des stations sélectionnées avec les types de données valables et le plus grand nombre de mois de données	44
Tableau 1.5-3 : Stations et périodes utilisées pour les données de vitesses à 20 m et à 40 m	45
Tableau 1.5-4 : Tableau de présentation des paramètres étudiés	47
Tableau 1.5-5 : Tableau comparatif de l'influence des années sur k	49
Tableau 1.5-6 : Tableau comparatif de l'influence des années pour c	51
Tableau 1.5-7 : Tableau comparatif de l'influence des années pour l'intensité de turbulence	51
Tableau 1.5-8 : Comparaison des écarts relatifs mensuels du facteur k pour chaque station à 40 m lors de la phase III	62
Tableau 1.5-9 : Comparaison des écarts relatifs mensuels du facteur k pour chaque station à 40 m lors de la phase IV	63
Tableau 1.5-10 : Comparaison des écarts relatifs mensuels du facteur c pour chaque station à 40 m lors de la phase III	67
Tableau 1.5-11 : Comparaison des écarts relatifs mensuels du facteur c pour chaque station à 40 m lors de la phase IV	68
Tableau 1.5-12 : Comparaison des écarts relatifs mensuels de l'intensité de turbulence à 40 m pour chaque station lors de la phase III	71
Tableau 1.5-13 : Comparaison des écarts relatifs mensuels de l'intensité de turbulence à 40 m pour chaque station lors de la phase IV	74
Tableau 1.5-14 : Tableau des distances pour la région de Sainte-Félicité	75
Tableau 1.5-15 : Tableau des distances pour la région de Rivière-au-Renard	76
Tableau 1.5-16 : Comparaison des écarts relatifs mensuels du facteur k pour les stations de la région de Sainte-Félicité à 20 m	79

Tableau 1.5-17 : Comparaison des écarts relatifs mensuels du facteur k pour les stations de la région de Sainte-Félicité à 40 m.....	79
Tableau 1.5-18 : Comparaison des écarts relatifs mensuels du facteur k des stations de la région de Rivière-au-Renard à 20 m.....	83
Tableau 1.5-19 : Comparaison des écarts relatifs mensuels du facteur k des stations de la région de Rivière-au-Renard à 40 m.....	83
Tableau 1.5-20 : Comparaison des écarts relatifs mensuels du facteur c pour les stations de la région de Sainte-Félicité à 20 m.....	87
Tableau 1.5-21 : Comparaison des écarts relatifs mensuels du facteur c pour les stations de la région de Sainte-Félicité à 40 m.....	87
Tableau 1.5-22 : Comparaison des écarts relatifs mensuels du facteur c pour les stations de la région de Rivière-au-Renard à 20 m.....	90
Tableau 1.5-23 : Comparaison des écarts relatifs mensuels du facteur c pour les stations de la région de Rivière-au-Renard à 40 m.....	90
Tableau 1.5-24 : Comparaison des écarts relatifs mensuels de la valeur de l'intensité de turbulence à 20 m pour les stations de la région de Sainte-Félicité.....	94
Tableau 1.5-25 : Comparaison des écarts relatifs mensuels de la valeur de l'intensité de turbulence à 40 m pour les stations de la région de Sainte-Félicité.....	94
Tableau 1.5-26 : Comparaison des écarts relatifs mensuels de la valeur de l'intensité de turbulence à 20 m pour les stations de la région de Rivière-au-Renard.....	96
Tableau 1.5-27 : Comparaison des écarts relatifs mensuels de la valeur de l'intensité de turbulence à 40 m pour les stations de la région de Rivière-au-Renard.....	96
Tableau 2.3-1 : Qualification des profils.....	111
Tableau 2.3-2 : Résultats de l'analyse pour les valeurs réelles.....	111
Tableau 2.3-3 : Résultats de l'analyse pour les valeurs générées non triées.....	113
Tableau 2.3-4 : Résultats de l'analyse pour les valeurs générées triées.....	114
Tableau 2.3-5 : Comparaison des résultats obtenus pour l'analyse du profil entre les vitesses réelles et les vitesses générées et triées.....	114
Tableau 2.4-1 : Tableau de comparaison des valeurs des paramètres pour différentes conditions initiales pour le spectre de longitudinal de Kaimal avec la méthode générale (IS=1).....	135
Tableau 2.4-2 : Influence du choix de la méthode de calcul de la longueur de turbulence sur les paramètres m_i	136
Tableau Annexe VI.1 : Nombre d'observations de vitesses du vent à 40 m.....	197
Tableau Annexe VI.2 : Nombre d'observations d'écarts-types de la vitesse du vent à 20 m.....	198
Tableau Annexe VI.3 : Nombre d'observations d'écarts-types de la vitesse du vent à 40 m.....	200

Tableau Annexe VI.4 : Nombre d'observations de directions du vent à 20 m	201
Tableau Annexe VI.5 : Nombre d'observations de directions du vent à 40 m	203
Tableau Annexe VI.6 : Nombre d'observations d'écarts-types de la direction du vent à 20 m	204
Tableau Annexe VI.7 : Nombre d'observations d'écarts-types de la direction du vent à 40 m	205
Tableau Annexe VI.8 : Nombre d'observations de température.....	206
Tableau Annexe VII.1 : Tableau de comparaison des valeurs des paramètres pour différentes conditions initiales pour le spectre latéral de Kaimal avec la méthode générale ($IS=1$)	209
Tableau Annexe VII.2 : Tableau de comparaison des valeurs des paramètres pour différentes conditions initiales pour le spectre vertical de Kaimal avec la méthode générale ($IS=1$).....	210
Tableau Annexe VII.3 : Tableau de comparaison des valeurs des paramètres pour différentes conditions initiales pour le spectre longitudinal de von Karman avec la méthode générale ($IS=1$)	210
Tableau Annexe VII.4 : Tableau de comparaison des valeurs des paramètres pour différentes conditions initiales pour le spectre latéral de von Karman avec la méthode générale ($IS=1$) ..	211
Tableau Annexe VII.5 : Tableau de comparaison des valeurs des paramètres pour différentes conditions initiales pour le spectre vertical de von Karman avec la méthode générale ($IS=1$)	212
Tableau Annexe X.1 : Tableau des distances (km) pour les stations de Baie-des-Sables, Chics-chocs et Luceville	224
Tableau Annexe X.2 : Tableau des distances (km) avec la station de Cap-Saint-Ignace	225
Tableau Annexe X.3 : Tableau des distances (km) pour les stations de l'île d'Anticosti	225
Tableau Annexe X.4 : Tableau des distances (km) avec la station des Îles-de-la-Madeleine	226
Tableau Annexe X.5 : Tableau des distances (km) pour les stations de Canton-Power et de Pointe-Saint-Pierre	226
Tableau Annexe X.6 : Tableau des distances (km) avec la station de Sainte-Sophie.....	227
Tableau Annexe X.7 : Tableau des distances (km) avec la station de Montagne-Sèche	228
Tableau Annexe X.8 : Tableau des distances (km) pour les stations de Kamouraska, Saint-Athanase, Sainte-Rita et Trois-Pistoles	228

LISTE DES FIGURES

Figure 0.1 : Progression de la puissance installée dans le monde en MW, réalisée à l'aide de <i>Windpower Monthly</i> [1].....	3
Figure 0.2 : Parc éolien offshore de Horns Rev au Danemark (80 éoliennes, 160MW)	3
Figure 0.3 : Répartition de la production d'énergie éolienne dans le monde.....	4
Figure 1.3-1 : Comparaison de distributions de Weibull pour une même valeur de k	18
Figure 1.3-2 : Comparaison de distributions de Weibull pour une même valeur de c	18
Figure 1.3-3 : Densité de puissance éolienne calculée à l'aide des données réelles, de la loi de Weibull et de la loi de Rayleigh [8]	20
Figure 1.3-4 : Pourcentages d'erreurs sur la densité de puissance calculée à l'aide des données réelles de la loi de Weibull et de la loi de Rayleigh [8].....	21
Figure 1.3-5: Représentation de la densité de probabilité pour une loi normale	23
Figure 1.3-6 : Variation temporelle de la vitesse du vent	24
Figure 1.3-7 : Fonction de corrélation de la série de données de vent.....	25
Figure 1.3-8 : Densité spectrale de puissance à l'aide de la méthode 1	28
Figure 1.3-9 : Densité spectrale de puissance à l'aide de la méthode 2	29
Figure 1.3-10 : Fonction de transfert du filtre numérique	30
Figure 1.3-11 : Représentation dans le plan « z » de l'emplacement de a	31
Figure 1.3-12 : Schéma de génération de la série de temps.....	31
Figure 1.3-13 : Différence entre les densités spectrales calculées avec les méthodes 1 et 2.....	32
Figure 1.3-14 : Rose des vents pour la station de Desrosiers (directions à 20 m)	38
Figure 1.5-1 : Comparaison sur deux années de la variation de k à 40 m pour la station TV	48
Figure 1.5-2 : Comparaison sur deux années de la variation de c (m/s) à 40 m pour la station TV ...	49
Figure 1.5-3 : Comparaison sur deux années de la variation de l'intensité de turbulence à 40 m pour la station de Rivière-au-Renard – TV	51
Figure 1.5-4 : Influence des saisons sur la valeur de k	53
Figure 1.5-5 : Influence des saisons sur la valeur de c (m/s)	53
Figure 1.5-6 : Influence des saisons sur la valeur de l'intensité de turbulence.....	54

Figure 1.5-7 : Variations mensuelles de k	55
Figure 1.5-8 : Variations mensuelles de c (m/s) à 20 m et à 40 m	56
Figure 1.5-9 : Variations mensuelles de l'intensité de turbulence à 20 m et à 40 m.....	57
Figure 1.5-10 : Variations de k entre décembre 2000 et mars 2002 à 40 m (phase III).....	59
Figure 1.5-12 : Variations de c entre décembre 2000 et mars 2002 à 40 m (phase III).....	64
Figure 1.5-13 : Variations de c entre novembre 2001 et mars 2003 à 40 m (phase IV)	66
Figure 1.5-14 : Variations de l'intensité de turbulence entre décembre 2000 et mars 2002 à 40 m (phase III)	69
Figure 1.5-15 : Position des stations sur l'Île d'Anticosti	72
Figure 1.5-16 : Variations de l'intensité de turbulence entre novembre 2001 et mars 2003 à 40 m (phase IV).....	73
Figure 1.5-17 : Carte de la région de Sainte-Félicité.....	75
Figure 1.5-18 : Carte de la région de Rivière-au-Renard	76
Figure 1.5-19 : Comparaison des variations de k à 40 m pour la région de Sainte-Félicité.....	77
Figure 1.5-20 : Comparaison des variations de k à 20 m pour la région de Sainte-Félicité.....	78
Figure 1.5-21 : Comparaison de la valeur de k à 20 m et à 40 m pour la région de Sainte-Félicité ...	78
Figure 1.5-22 : Comparaison des variations de k à 40 m pour la région de Rivière-au-Renard	80
Figure 1.5-23 : Comparaison des variations de k à 20 m pour la région de Rivière-au-Renard	80
Figure 1.5-24 : Comparaison de la valeur de k à 20 m et à 40 m pour la région de Rivière-au-Renard	81
Figure 1.5-25 : Comparaison des variations de c (m/s) à 40 m pour la région de Sainte-Félicité	84
Figure 1.5-26 : Comparaison des variations de c (m/s) à 20 m pour la région de Sainte-Félicité	84
Figure 1.5-27 : Comparaison de la valeur de c (m/s) à 20 m et à 40 m pour la région de Ste-Félicité	86
Figure 1.5-28 : Comparaison des variations de c (m/s) à 40 m pour la région de Rivière-au-Renard	88
Figure 1.5-29 : Comparaison des variations de c (m/s) à 20 m pour la région de Rivière-au-Renard	88
Figure 1.5-30 : Comparaison de la valeur de c (m/s) à 20 m et à 40 m pour la région de Rivière-au- Renard	89
Figure 1.5-31 : Variations de l'intensité de turbulence à 20 m pour la région de Sainte-Félicité	91
Figure 1.5-32 : Variations de l'intensité de turbulence à 40 m pour la région de Sainte-Félicité	91
Figure 1.5-33 : Comparaison de l'intensité de turbulence à 20 m et à 40 m pour la région de Sainte- Félicité	93
Figure 1.5-34 : Variations de l'intensité de turbulence à 20 m pour la région de Rivière-au-Renard..	95

Figure 1.5-35 : Variations de l'intensité de turbulence à 40 m pour la région de Rivière-au-Renard..	95
Figure 1.5-36: Comparaison de l'intensité de turbulence entre 20 m et 40 m pour la région de Rivière-au-Renard	97
Figure 1.5-37 : Densité spectrale de puissance pour la station TV	98
Figure 1.5-38 : Densité spectrale de puissance pour la station Baie-des-Sables.....	99
Figure 1.5-39 : Densité spectrale de puissance pour la station Bernatchez.....	99
Figure 1.5-40 : Variation du coefficient de puissance α	100
Figure 1.5-41 : Comparaison de la valeur de k à 20 m et à 40 m.....	101
Figure 2.2-1 : Illustration du fonctionnement du banc d'essai éolien	108
Figure 2.3-1 : Type de profil	110
Figure 2.3-2 : Variation temporelle des données réelles	112
Figure 2.3-3 : Variation temporelle des données générées et non triées	112
Figure 2.3-4 : Variation temporelle des données générées et triées	113
Figure 2.4-1 : Courbes comparatives des intensités de turbulence suivant le standard utilisé pour $z=50$ m et une latitude de $48,4^\circ$	120
Figure 2.4-2 : « Spectres » de von Karman et de Kaimal $\frac{f \cdot S_u(f)}{\sigma_u^2}$, en échelle semi-logarithmique	127
Figure 2.4-3 : Caractéristiques spectrales de puissance de von Karman et de Kaimal $\frac{S_u(f)}{\sigma_u^2}$, en échelle semi-logarithmique.....	127
Figure 2.4-4 : Caractéristiques de fréquence des filtres de formation non-paramétriques, pour les spectres de von Karman et de Kaimal, $\frac{G_u(f)}{\sigma_u}$ en échelle double-logarithmique.....	128
Figure 2.4-5 : Représentation des caractéristiques pour $df=0,001$	130
Figure 2.4-6 : Représentation des caractéristiques pour $df=0,0002$	130
Figure 2.4-7 : Principe de réalisation d'une pente de -20α dB/décade, $\alpha < 1$	132
Figure 2.4-8 : Filtre de formation pour le spectre de Kaimal pour deux paramètres.....	134
Figure 2.4-9 : Filtre de formation pour le spectre de Kaimal pour trois paramètres avec une fonction de type $H_f(s) = \frac{\sqrt{4T_f}(m_1T_{f1}s+1)}{(T_{f1}s+1)(m_2T_{f1}s+1)(m_4T_{f1}s+1)}$	134

Figure 2.4-10 : Filtre de formation pour le spectre de Kaimal pour trois paramètres avec une fonction de type $H_{\tilde{\eta}}(s) = \frac{\sqrt{4T_{\tilde{\eta}}}(m_1 T_{f1}s + 1)(m_3 T_{f1}s + 1)}{(T_{f1}s + 1)(m_2 T_{f1}s + 1)}$	134
Figure 2.4-11 : Filtre de formation pour le spectre de Kaimal pour quatre paramètres	134
Figure 2.4-12 : Représentation du spectre de Kaimal et des filtres de formation pondéré (figure du haut) et non pondéré (figure du bas) en échelle loglog	135
Figure 2.4-13 : Comparaison des caractéristiques de fréquences du filtre d'ordre non entier et du filtre rationnel pour différentes valeurs de IS en échelle semilog	137
Figure 2.4-14 : Comparaison des caractéristiques de fréquences du filtre d'ordre non entier et du filtre rationnel pour différentes valeurs de IS en échelle loglog	137
Figure 2.4-15 : Représentation du spectre de von Karman sur la direction latérale et du filtre de formation non pondéré en échelle semilog (caractéristique de Bode) sans pondération.....	139
Figure 2.4-16 : Représentation du spectre de von Karman sur la direction latérale et du filtre de formation non pondéré en échelle loglog (caractéristique de Bode) sans pondération	139
Figure 2.4-17: Représentation du spectre de von Karman sur la direction latérale et du filtre de formation non pondéré en échelle semilog (caractéristique de Bode) pour différentes pondérations.....	140
Figure 2.4-18 : Représentation du spectre de von Karman sur la direction latérale et du filtre de formation non pondéré en échelle loglog (caractéristique de Bode) pour différentes pondérations.....	140
Figure 2.4-19 : Schéma présentant le principe du générateur de vitesses de vent.....	141
Figure 2.4-20 : Variation de la vitesse moyenne	146
Figure 2.4-21 : Variation de l'écart-type	146
Figure 2.4-22 : Variation de l'écart-type à la sortie du filtre de formation	147
Figure 2.4-23 : Variation de la vitesse totale et de la turbulence.....	147
Figure 2.4-24 : Variation de la vitesse totale et de la turbulence sur 600 secondes.....	147
Figure 2.4-25 : Variation des facteurs de corrections.....	147
Figure 2.4-26 : Validation de la méthode	148
Figure 2.4-27 : Erreur (%) entre le Y2 (la turbulence) et le signal généré par Isim.....	148
Figure 2.4-28 : Algorithme de génération de la vitesse du vent selon le modèle de von Karman	149
Figure 2.4-29 : Variation de la vitesse du vent pour IS=1 et IC=1	150
Figure 2.4-30 : Variation de l'écart-type pour IS=1 et IC=1	150
Figure 2.4-31 : Variation de l'écart-type à la sortie du filtre de formation pour IS=1 et IC=1	151

Figure 2.4-32 : Variation de la vitesse totale et de la turbulence pour IS=1 et IC=1.....	151
Figure 2.4-33 : Variation de la vitesse totale et de la turbulence sur 600s pour IS=1 et IC=1	151
Figure 2.4-34 : Variation de l'écart-type à la sortie du filtre de formation pour IS=1 et IC=2	151
Figure 2.4-35 : Variation de la vitesse totale et de la turbulence pour IS=1 et IC=2.....	151
Figure 2.4-36 : Variation de la vitesse totale et de la turbulence sur 600s pour IS=1 et IC=2	152
Figure 2.4-37 : Variation des paramètres m_i pour IS=1 et IC=2	152
Figure 2.4-38 : Variation de l'écart-type à la sortie du filtre de formation pour IS=1 et IC=3	152
Figure 2.4-39 : Variation de la vitesse totale et de la turbulence pour IS=1 et IC=3.....	152
Figure 2.4-40 : Variation de la vitesse totale et de la turbulence sur 600s pour IS=1 et IC=3	152
Figure 2.4-41 : Variation des paramètres m_i pour IS=1 et IC=3	152
Figure 2.4-42 : Variation de la vitesse moyenne et de la turbulence pour différents niveaux de moyennes de vitesse de vent, pour IS=3, $z_0=0,7$ m, $z=10$ m.....	154
Figure 2.4-43 : Variation de la vitesse moyenne et de la turbulence pour différents niveaux de moyennes de vitesse de vent, pour IS=2, $z_0=0,7$ m, $z=10$ m.....	154
Figure 2.4-44 : Variation de la vitesse moyenne et de la turbulence pour différents niveaux de moyennes de vitesse de vent, pour IS=1, $z_0=0,7$ m, $z=10$ m.....	155
Figure 2.4-45 : Variation de la vitesse moyenne et de la turbulence pour différents niveaux de moyennes de vitesse de vent, pour IS=3, $z_0=0,001$ m, $z=50$ m.....	155
Figure 2.4-46 : Variation de la vitesse moyenne et de la turbulence pour différents niveaux de moyennes de vitesse de vent, pour IS=1, $z_0=0,001$ m, $z=50$ m.....	156
Figure 2.4-47 : Variation de la vitesse moyenne et de la turbulence sur la durée totale et sur un segment de temps, pour IS=1, $z_0=0,001$ m, $z=50$ m	156
Figure 2.4-48 : Variation de la vitesse moyenne et de la turbulence sur la durée totale et sur un segment de temps, pour IS=1, $z_0=0,1$ m, $z=50$ m	157
Figure 2.4-49 : Variation de la vitesse moyenne et de la turbulence sur la durée totale et sur un segment de temps, pour IS=1, $z_0=0,001$ m, $z=10$ m	157
Figure 2.4-50 : Variation de l'écart-type σ_{y1} pour IS=2 et IC=1	158
Figure 2.4-51 : Variation de l'écart-type σ_{y1} pour IS=2 et IC=2.....	158
Figure 2.4-52 : Variation de l'écart-type à la sortie du filtre de formation pour IS=1 et IC=1 ($\sigma_{y1}=0,9686$).....	160
Figure 2.4-53 : Variation de la vitesse totale et de la turbulence pour IS=1 et IC=1.....	160
Figure 2.4-54 : Variation de la vitesse et de la turbulence sur 600s pour IS=1 et IC=1	161
Figure 2.4-55 : Variation des paramètres m_i pour IS=1 et IC=1	161

Figure 2.4-56 : Variation de l'écart-type à la sortie du filtre de formation pour IS=1 et IC=2 ($\sigma_{y1}=1,0245$).....	161
Figure 2.4-57 : Variation de la vitesse totale et de la turbulence pour IS=1 et IC=2.....	161
Figure 2.4-58 : Variation de la vitesse et de la turbulence sur 600s pour IS=1 et IC=2.....	161
Figure 2.4-59 : Variation des paramètres m_i pour IS=1 et IC=2	161
Figure 2.4-60 : Variation de l'écart-type à la sortie du filtre de formation pour IS=1 et IC=3 ($\sigma_{y1}=1,0186$).....	162
Figure 2.4-61 : Variation de la vitesse totale et de la turbulence pour IS=1 et IC=3.....	162
Figure 2.4-62 : Variation de la vitesse et de la turbulence sur 600s pour IS=1 et IC=3.....	162
Figure 2.4-63 : Variation des paramètres m_i pour IS=1 et IC=3	162
Figure 2.4-64 : Variation de la vitesse moyenne et de la turbulence pour une moyenne de vitesse de vent modérée pour IS=3, $z_0=0,7$ m, $z=10$ m.....	163
Figure 2.4-65 : Variation de la vitesse moyenne et de la turbulence pour une moyenne de vitesse de vent modérée pour IS=3, $z_0=0,001$ m, $z=50$ m.....	163
Figure 2.4-66 : Variation de la vitesse moyenne et de la turbulence pour une moyenne de vitesse de vent modérée pour IS=1, $z_0=0,7$ m, $z=10$ m.....	163
Figure 2.4-67 : Variation de la vitesse moyenne et de la turbulence pour une moyenne de vitesse de vent modérée pour IS=1, $z_0=0,001$ m, $z=50$ m.....	163
Figure 2.4-68 : Comparaison entre les vitesses et les turbulences avec l'utilisation du spectre von Karman (à gauche) et du spectre de Kaimal (à droite) pour IS=3, IC=1, $z_0=0,7$ m et $z=10$ m...	165
Figure 2.4-69 : Comparaison entre les vitesses et les turbulences avec l'utilisation du spectre von Karman (à gauche) et du spectre de Kaimal (à droite) pour IS=1, IC=1, $z_0=0,7$ m et $z=10$ m...	165
Figure 2.4-70 : Comparaison entre les vitesses et les turbulences avec l'utilisation du spectre von Karman (à gauche) et du spectre de Kaimal (à droite) pour IS=3, IC=1, $z_0=0,001$ m et $z=50$ m	165
Figure 2.4-71 : Comparaison entre les vitesses et les turbulences avec l'utilisation du spectre von Karman (à gauche) et du spectre de Kaimal (à droite) pour IS=1, IC=1, $z_0=0,001$ m et $z=50$ m	166
Figure Annexe I.1 : Représentation du vent traversant une turbine éolienne.....	174
Figure Annexe I.2 : Courbe de $\frac{P}{P_0}$ en fonction de $\frac{V_2}{V_1}$	176
Figure Annexe VIII.1 : Discrétisation d'un système à temps continu par un schéma qui contient l'ensemble échantillonneur – bloqueur	214
Figure Annexe VIII.2 : Réponse impulsionnelle du bloqueur d'ordre 0.....	215
Figure Annexe VIII.3 : Caractéristiques de fréquence du bloqueur d'ordre 0.....	216
Figure Annexe IX.1 : Représentation de la fonction de corrélation pour un bruit blanc.....	221

Figure Annexe IX.2 : Représentation des valeurs discrètes de la fonction de corrélation d'un bruit blanc.....	221
Figure Annexe IX.3 : Représentation des fonctions de corrélation $\tilde{R}_{ww}(\tau)$ et $\hat{R}_{ww}(\tau)$	222
Figure Annexe X.1 : Carte d'ensemble de toutes les stations sélectionnées.....	224
Figure Annexe X.2 : Localisation des stations de Baie-des-Sables, Chics-chocs et Luceville	224
Figure Annexe X.3 : Localisation de la station de Cap-Saint Ignace.....	225
Figure Annexe X.4 : Localisation des stations de l'île d'Anticosti.....	225
Figure Annexe X.5 : Localisation de la station des Îles-de-la-Madeleine	226
Figure Annexe X.6 : Localisation des stations de Canton-Power et de Pointe-Saint-Pierre.....	226
Figure Annexe X.7 : Localisation de la station de Sainte-Marguerite	227
Figure Annexe X.8 : Localisation de la station de Sainte-Sophie.....	227
Figure Annexe X.9 : Localisation de la station de Fermont.....	227
Figure Annexe X.10 : Localisation de la station de Montagne-Sèche	228
Figure Annexe X.11 : Localisation des stations de Kamouraska, Saint-Athanase, Sainte-Rita et Trois-Pistoles.....	228

LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

c : facteur d'échelle de la loi de Weibull

FFT : Fast Fourier Transform : transformée de Fourier rapide

Hz : Hertz

k : facteur de forme de la loi de Weibull

km : kilomètres

km/h : kilomètres par heure

kW : kilowatt

m : mètres

m/s : mètres par seconde

MLM : Maximum Likelihood Method : méthode du maximum de vraisemblance

MMLE : Modified Maximum Likelihood Estimation : variante de la méthode du maximum de vraisemblance

MMLM : Modified Maximum Likelihood Method : autre variante de la méthode du maximum de vraisemblance

MRN : Ministère des Ressources Naturelles

MW : Mégawatt

PMPE : Programme de Mesure du Potentiel Éolien

s : secondes

INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, les considérations environnementales, l'augmentation constante des coûts et l'épuisement des énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel, etc.) sont à l'origine de nombreux efforts effectués autant par les scientifiques, les ingénieurs que les politiciens [21].

La nécessité de trouver des alternatives fiables et durables a conduit à la fulgurante croissance des énergies renouvelables, notamment celle de l'énergie éolienne. Ces énergies ont pour source le vent, l'eau, les vagues, la marée, le soleil, la géothermie et la bio-énergie. Elles sont propres, abondantes et les différentes technologies déjà développées permettent de les considérer comme des alternatives économiques et fiables par rapport aux sources conventionnelles.

Utilisée pour remplacer l'énergie que produirait une centrale électrique fonctionnant au mazout, par exemple, l'énergie éolienne - et les énergies renouvelables en général - permet de réduire la pollution de l'air en évitant l'émission de dioxyde de soufre et d'oxydes d'azote ainsi que la libération de particules de suie. L'installation d'un mégawatt d'éolien éviterait, annuellement, l'émanation de plusieurs milliers de tonnes de ces produits (2 000 tonnes de CO₂, 13 tonnes de SO₂, 10 tonnes de NO_x et 1,3 tonne de particules de suies) et permettrait par conséquent de réduire l'émission des gaz à effet de serre [4].

C'est à la suite de la conférence de Kyoto de 1997, visant l'amélioration de la qualité de l'air sur la planète, que 38 pays industrialisés, parmi les plus pollueurs, se sont mis d'accord pour diminuer, d'ici 2008 à 2012, leurs émanations des gaz à effet de serre à des niveaux inférieurs de 5.2% à ceux de 1990. De son côté, à la fin de cette échéance, le Canada s'est engagé à avoir réduit

d'environ 6% ses émissions. Même si de par l'ampleur de ses ressources en eau, le Québec est le 3^{ème} plus important producteur d'hydroélectricité au monde avec plus de 40 000 MW de puissance installée représentant plus de 95% de l'énergie produite [4], le développement d'autres formes d'énergie renouvelable, dont l'éolien, figure parmi les priorités du gouvernement provincial pour les prochaines années, priorités répertoriées dans le *Plan d'action Québécois 2000-2002 sur les changements climatiques* [22] et dans le *Plan stratégique 2005-2008 du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs* [39]. En effet, l'énergie éolienne est notamment reconnue comme une bonne source d'appoint qui permet, entre autres, de mieux gérer le niveau d'eau des barrages. De plus, les deux types d'énergie semblent complémentaires du point de vue de leur disponibilité, car, alors que le vent est plus faible en été et plus fort en hiver [34], le niveau d'eau disponible diminue l'hiver et est plus important l'été.

D'ailleurs, la progression de l'exploitation de l'énergie éolienne sur les dix dernières années représente bien l'ampleur des efforts consentis de par le monde pour l'utilisation de cette énergie verte. En dix ans, le nombre de mégawatts (MW) installés a presque décuplé, comme l'illustre la Figure 0.1.

À la fin de l'année 2003, la capacité mondiale de 39 394 MW, permettait de combler les besoins de neuf millions de foyers américains moyens. De plus, durant chacune des deux dernières années, c'est plus de 8 000 MW qui ont été installés [1]. Cette progression est telle que l'énergie éolienne « onshore » (sur terre) génère plus de 10% de l'électricité de certaines régions du monde comme le Danemark, la région de Schleswig-Holstein en Allemagne et celle de Gotland en Suède. Cependant, cette formidable ascension a vite été confrontée au problème de manque d'espace, ce

qui a conduit dans certaines régions à l'émergence de parcs éoliens en pleine mer (« Offshore ») (cf. Figure 0.2, plus grand parc éolien offshore du monde en 2003 constitué de 80 éoliennes totalisant 160 MW) [14].

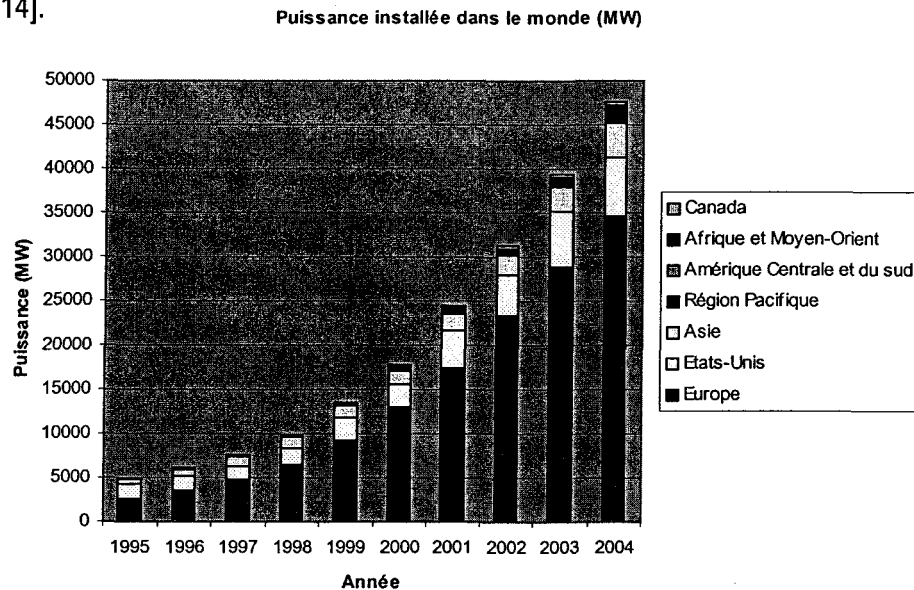


Figure 0.1 : Progression de la puissance installée dans le monde en MW, réalisée à l'aide de *Windpower Monthly* [1].



Source : www.hornsrev.dk

Figure 0.2 : Parc éolien offshore de Horns Rev au Danemark (80 éoliennes, 160MW)

Malgré cet état de choses, la production éolienne du Canada reste bien plus faible que celle de la plupart des pays industrialisés et particulièrement celle de l'Europe (Figure 0.3). En effet, avec ses 444 MW (0,93% de la production mondiale) de puissance installée sur son territoire au début de l'année 2005, le Canada arrive au 18^{ème} rang des pays producteurs d'énergie éolienne, loin derrière

l'Allemagne (16 628 MW, 34,95%), l'Espagne (8 263 MW, 17,37%), les États-Unis (6 752 MW, 14,19%), le Danemark (3 118 MW, 6,55%) et l'Inde (2 983 MW, 6,27%) [1]. À ce propos, l'objectif affiché par l'ACÉE (Association Canadienne de l'Énergie Éolienne) est « d'encourager les investissements dans l'énergie éolienne, pour obtenir 10 000 MW d'ici 2010, ce qui correspondrait à 5% de l'électricité produite au Canada » (citation site Web ACEE¹).

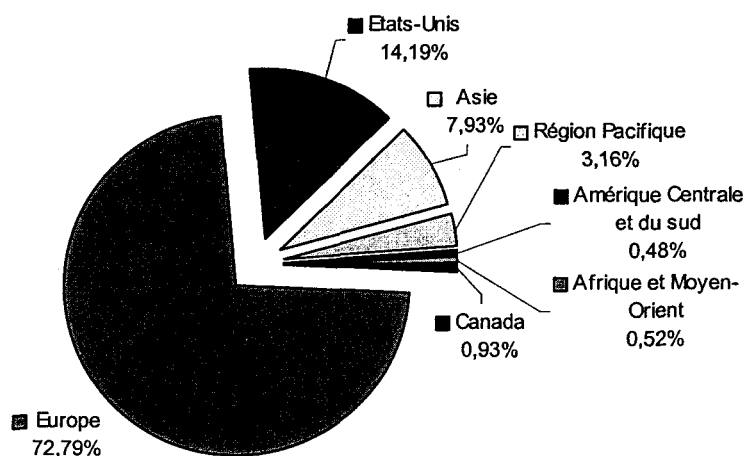


Figure 0.3 : Répartition de la production d'énergie éolienne dans le monde

Dans un monde de plus en plus conscient de l'état peu glorieux de son environnement, l'utilisation d'éoliennes et, par conséquent, l'installation de parcs éoliens sont donc devenues des réalités incontournables. Dans ce dernier cas, le choix du site et la caractérisation statistique de la vitesse de vent de ce site représentent les facteurs les plus importants dans le processus d'implantation d'un parc éolien. En effet, la valeur moyenne de la vitesse du vent sur une année et sa variation dans le temps sont les facteurs qui ont le plus grand impact sur la rentabilité économique d'un parc éolien. Ainsi l'analyse de la vitesse du vent sur un site représente la première étape de tout projet éolien, permettant d'estimer la capacité de production de ce dernier. Comme le vent présente

¹ <http://www.canwea.ca/fr/>

un caractère aléatoire, son analyse doit se baser sur des méthodes statistiques. Ainsi, les paramètres qui vont caractériser le régime des vents sur un site seront la valeur de la vitesse moyenne du vent et les lois statistiques permettant de représenter sa variation temporelle.

Parmi ces lois, on retrouve la loi de Weibull qui permet de caractériser la distribution des fréquences de vitesses de vent. L'analyse des deux paramètres qui caractérisent cette loi est à l'origine de nombreuses études ([2], [28], [29] et [33]). En effet, ces deux paramètres que sont le facteur de forme k et le facteur d'échelle c dictent la manière dont la vitesse du vent varie statistiquement durant une période donnée et sont caractéristiques de chaque site. Dans la présente étude, nous présentons une méthodologie de calcul de ces paramètres à partir des données de vent mesurées sur un site donné. Nous faisons ensuite une étude de la variabilité de ces paramètres d'un site à l'autre en tenant compte de caractéristiques physiques comme la localisation géographique et la topographie du sol.

Si la loi de Weibull nous permet de déterminer le comportement statistique de la vitesse du vent dans le temps, il existe d'autres lois qui nous permettent de mesurer la variabilité du vent au même endroit, au même moment mais à des hauteurs différentes. Cette variation verticale de la vitesse du vent est dictée par la variation typique de la couche limite atmosphérique dans le voisinage du sol. Des lois, dites de cisaillement vertical, permettent d'évaluer cette variabilité. Elle est d'une importance particulière et croissante car la nécessité de produire plus d'énergie implique une élévation de la hauteur des éoliennes devant celle des appareils de mesures qui est en général moindre.

D'autres méthodes (étude fréquentielle [3], ondelettes [16], chaînes de Markov de premier ordre [11]) et d'autres outils comme les radars (radar Doppler [30], radar à synthèse d'ouverture [12],

etc.) sont également explorés pour déterminer et qualifier le vent ainsi que le potentiel éolien d'un site donné.

Par ailleurs, l'amélioration de la technologie des éoliennes, et par conséquent de leur productivité, est aussi au cœur des recherches. L'utilisation de la modélisation et de la simulation par l'utilisation de bancs d'essai est de plus en plus répandue ([23], [25] et [17]). En effet, une telle approche permet de faire d'importantes économies et laisse la possibilité d'effectuer des séries de tests qui ne sont pas toujours réalisables sur un site réel. Dans le cas précis de l'énergie éolienne, le principal problème est la modélisation du vent puisqu'on ne peut utiliser le vent réel. La réalisation d'un générateur de vitesses de vent devrait être la première étape pour la mise en place d'un banc d'essai de simulation d'une turbine éolienne. Pour cela, il est donc nécessaire d'utiliser des lois caractérisant le vent. Parmi les différentes méthodes existantes ([11], [13], [16], [19], [20] et [24]), celle de l'utilisation des spectres de fréquence [25] a été retenue pour cette étude.

Le présent mémoire est divisé en deux parties distinctes ; les problématiques et objectifs de chacune sont présentés comme introduction à celles-ci. Le Chapitre 1 est donc consacré à l'analyse statistique des données de vent. Ces données proviennent d'une campagne de mesure réalisée par le Ministère des Ressources Naturelles (MRN) à l'aide de stations situées pour la plupart dans les régions du Bas-Saint-Laurent et de la Gaspésie – Les Îles-de-la-Madeleine entre mars 1998 et mars 2003. Le Chapitre 2 est, quant à lui, dédié à la génération numérique de vitesses de vent. Enfin, une conclusion générale fait une synthèse des deux aspects du mémoire et laisse place à des ouvertures pour le futur.

CHAPITRE 1

ANALYSE DES DONNEES REELLES DE VENT

1.1. Problématique

Le vent est un phénomène aléatoire qui présente de grandes variabilités qu'on peut classer en deux groupes : la variabilité temporelle et la variabilité spatiale.

La variabilité temporelle comprend trois sous-groupes :

- à basses fréquences : les variations annuelles, saisonnières, mensuelles ;
- à moyennes fréquences : les variations journalières, horaires ;
- à hautes fréquences : les variations à la seconde ou à plus haute fréquence (au-dessus de 1 Hz) caractéristiques de la turbulence du vent.

La variabilité spatiale concerne principalement la variation verticale et le champ des directions du vent.

1.1.1. Variabilité temporelle

Pour chaque type de variabilité temporelle des problématiques différentes sont rencontrées.

La variabilité annuelle est très importante dans l'estimation du potentiel éolien d'un site. Habituellement, pour caractériser un site, il est nécessaire de s'appuyer sur des données de vent qui ont été mesurées pendant une certaine période, en général un an. Mais la variation annuelle entraîne

un problème d'estimation pour une plus longue durée. En effet, il faut être capable d'évaluer si l'année de mesure peut servir de référence et si oui, jusqu'à quel point.

Les variabilités saisonnière et mensuelle, quant à elles, ont pour principaux impacts les problèmes de sous-production et surtout de surproduction durant des périodes spécifiques de l'année.

En se basant sur des données de température et de pression annuelle plutôt que sur des données saisonnières ou mensuelles, on ne prend pas en compte les différences de production causées par les variations de la densité de l'air qui peuvent être significatives. De plus, considérer une vitesse de vent moyenne annuelle plutôt qu'une vitesse moyenne saisonnière ou mensuelle modifie de façon significative la prédiction de production de puissance puisque celle-ci ne varie pas linéairement en fonction de la vitesse mais en fonction de son cube.

Par exemple, pour le site de Baie-Comeau, en utilisant les moyennes annuelles de densité de l'air et de vitesse de vent on obtient 90,41 kW alors qu'en utilisant les valeurs mensuelles la moyenne annuelle trouvée est de 98,76 kW (Tableau 1.1-1). Ceci donne 9% d'erreur sur la valeur calculée.

Tableau 1.1-1 : Puissance éolienne disponible pour le site de Baie-Comeau en fonction de la densité de l'air - pour une humidité relative fixée à 50% et une surface balayée d'un rayon de 20 m - calculée à l'aide de la loi de Betz

Mois	Vitesse moyenne (m/s)	Température moyenne (°C)	Densité calculée (kg/m ³)	Densité de puissance (kW)
Janvier	5,52	-8,52	1,331	82,99
Février	7,12	-8,92	1,336	178,76
Mars	6,9	-4,76	1,314	160,02
Avril	5,97	0,75	1,288	101,59
Mai	4,73	7,66	1,254	49,19
Juin	4,29	12,96	1,23	36
Juillet	4,84	14,49	1,223	51,40

Août	4,66	15,84	1,218	45,69
Septembre	5,53	11,24	1,238	77,61
Octobre	6,11	5,61	1,264	106,88
Novembre	6,81	0,88	1,287	150,68
Décembre	6,68	-3,36	1,306	144,31
Moyenne	5,76	3,66	1,274	98,76

Les variabilités journalière et horaire affectent le fonctionnement et plus particulièrement le taux d'utilisation quotidien de l'éolienne. En effet, l'éolienne subit toute une série de contraintes, aussi bien mécaniques qu'électriques, qui seront plus ou moins accentuées sur des périodes de longueur variable. Des journées ou des heures de fonctionnement à plein régime imposent de gros efforts sur les différentes structures et peuvent être la cause de bris non prévus par une étude de la valeur moyenne du vent.

Enfin, la variabilité à haute fréquence aussi désignée par le terme de turbulence, est la plus difficile à quantifier. Pour ce type de variation, il faut particulièrement considérer les phénomènes de charges électriques. En effet, les rafales de vent peuvent engendrer sur plus d'une seconde, des pics de puissance supérieurs à la puissance maximale théorique de l'éolienne et donc causer de graves répercussions sur les composants électriques et électroniques, comme par exemple déclencher un feu dans le tableau de puissance. Du côté des charges mécaniques, les rafales de vent peuvent engendrer d'importants couples dans le rotor de l'éolienne et ainsi causer des échauffements anormaux et même des bris dans l'arbre de transmission. On parle donc d'une problématique liée au contrôle de l'éolienne et à la régulation. Il s'agit alors de mettre en place des outils permettant de réagir aussi rapidement que possible à ces phénomènes de rafales.

1.1.2. Variabilité spatiale

La variation spatiale amène une dimension tout à fait différente au problème d'étude du vent. La problématique qui sera particulièrement abordée est celle de la variation verticale – le cisaillement vertical – du vent. En effet, la technologie évoluant, les tours éoliennes sont de plus en plus hautes pour capter le plus de vent possible. Elles atteignent maintenant 100 m dans certains cas et leur hauteur ne cesse d'augmenter. La plupart du temps, des longues périodes s'écoulent entre le moment des mesures de la vitesse du vent et celui de l'installation des éoliennes. Très souvent alors, les mesures sont prises à une hauteur différente de celle à laquelle sont installées les éoliennes. Il est donc nécessaire de déterminer une relation liant les vitesses de vent pour différentes hauteurs. Plusieurs relations existent ([10] et [21]) mais dépendent des paramètres caractéristiques des sites comme la topographie et la rugosité. Il est donc nécessaire d'étudier l'influence de ces différents paramètres afin de déterminer les types de mesures qui doivent être prises afin de mieux évaluer le potentiel du site.

L'étude de la rose des vents est dans la plupart des cas une étude essentielle lorsque l'on veut évaluer le potentiel d'un site. Plus que pour l'évaluation du potentiel, cette étude permettra d'optimiser le choix de l'emplacement des éoliennes sur le site afin qu'elles soient exposées au meilleur vent possible.

1.2. Objectifs

L'objectif principal de l'analyse des données de vent est une meilleure compréhension de sa variation temporelle et spatiale. Pour cela, plusieurs étapes spécifiques sont identifiées. Tout d'abord,

il faut mettre en place des algorithmes et un logiciel permettant de calculer les différents facteurs identifiés comme représentatifs de la variation du vent. Ceci fournira, pour toutes les stations de mesure du MRN, une caractérisation statistique de la variation de chacun de ces facteurs. Il sera alors possible de créer des résultats graphiques permettant d'analyser ces différentes variations. Cette analyse permettra d'identifier l'influence des paramètres physiques (emplacement géographique, topographie,...) et temporels (influence des années, des saisons, des mois,...) sur les différents facteurs qui caractérisent la variabilité de la vitesse du vent.

1.3. Méthodologie

La variabilité temporelle des vitesses de vent sera analysée à l'aide des paramètres de la loi de Weibull et de la turbulence. La variation verticale, quant à elle, sera analysée à l'aide de la loi de puissance tandis que des roses de vent seront utilisées pour caractériser la variation de la vitesse du vent entre deux sites différents.

1.3.1. Étude temporelle

1.3.1.1 La loi de Weibull

La fonction de Weibull permet de caractériser la distribution fréquentielle des vitesses de vent sur une période donnée : une année, un mois ou une journée par exemple. Cependant, dans la majorité des cas, cette distribution est utilisée pour une période d'un an. Elle est définie par l'équation suivante [18] :

$$f(U) = \frac{k}{c} \left(\frac{U}{c} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{U}{c} \right)^k \right) \quad (1.3.1)$$

- où :
- $f(U)$ est la fonction de densité de probabilité de Weibull : $f(V)$ est donc la probabilité d'observation d'une vitesse de vent V , en m/s ;
 - c , en m/s, est le facteur d'échelle de la loi de Weibull. Il est relié à la vitesse moyenne du vent par le facteur de forme k ;
 - k est le facteur de forme de la loi de Weibull, décrivant la distribution de la vitesse des vents.

La fonction de distribution cumulative associée est donc :

$$F(V) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right] \quad (1.3.2)$$

La relation entre le facteur d'échelle de la loi de Weibull et la vitesse moyenne des vents s'établit par la formule suivante:

$$c = \frac{\bar{U}}{\Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right)} \quad (1.3.3)$$

- avec :
- Γ , la fonction Gamma ;
 - \bar{U} , en m/s, la vitesse moyenne du vent ;
 - k , le facteur de forme de la loi de Weibull.

L'estimation des deux paramètres k et c permet de caractériser la distribution statistique des vitesses de vent sur une période donnée, et par conséquent, d'estimer la production d'énergie éolienne.

Il est alors nécessaire de calculer ces deux paramètres pour chaque site étudié. Il existe plusieurs méthodes ([2], [9], [15], [28], [29] et [33]) permettant de calculer les paramètres k et c de la loi de Weibull à partir des données brutes de vitesses de vent prises durant une période déterminée :

- méthode des moindres carrées (méthode graphique) ;
- utilisation de la valeur médiane du vent et des vitesses quartiles ;
- utilisation de la vitesse moyenne et de l'écart-type : méthode des moments ;
- utilisation de la tendance entre k et la vitesse moyenne ;
- utilisation du « facteur d'énergie » ;
- utilisation des estimateurs de centile ;
- méthode du maximum de vraisemblance (méthode itérative) : *Maximum Likelihood Method (MLM)* ;
- méthode du maximum de vraisemblance modifiée : *Modified Maximum Likelihood Estimation (MMLE)*.

Les deux méthodes principalement utilisées sont la méthode des moindres carrées et la méthode MLM. Les définitions de celles-ci sont détaillées ici tandis que les autres le sont en annexe V. La méthode MMLE sera aussi décrite afin de la comparer avec la méthode MLM.

Méthode des moindres carrés

C'est une méthode graphique basée sur la fonction cumulative de Weibull :

$$P(U < U_i) = P(U \geq 0) \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{U_i}{c} \right)^k \right] \right\} \quad (1.3.4)$$

En traçant la droite représentant le logarithme népérien de la fonction cumulative versus le logarithme népérien de la vitesse de vent, on obtient la relation :

$$\ln \left\{ -\ln \left[1 - P(U < U_i) \right] \right\} = k \ln U_i - k \ln c \quad (1.3.5)$$

On obtient donc le facteur k qui représente la pente de la droite et le produit $-k \ln c$ qui représente l'ordonnée à l'origine.

Méthode du maximum de vraisemblance (MLM)

C'est une méthode itérative de détermination du paramètre de forme k . Sa valeur est définie à l'aide de la formule suivante [28] :

$$k = n \left(\frac{\sum_{i=1}^n U_i^k \ln(U_i)}{\sum_{i=1}^n U_i^k} - \sum_{i=1}^n \ln(U_i) \right)^{-1} \quad (1.3.6)$$

- avec :
- k , paramètre de forme à déterminer par calcul itératif en prenant une valeur initiale de $k=2$ (cette valeur est prise comme point de départ car l'expérience a montré que la valeur finale varie entre 1.7 et 2.3 dans la plupart des cas) ;
 - U_i , en m/s, vitesse non nulle du vent à un instant i ;
 - n , nombre de données de vitesses de vent non nulles.

Ensuite, on détermine la valeur du paramètre d'échelle c à l'aide de la formule suivante :

$$c = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i^k \right)^{1/k} \quad (1.3.7)$$

Cette méthode est très utilisée mais elle a, cependant, un inconvénient majeur qui est la nécessité d'utiliser des vitesses de vent non nulles. En effet, pour les sites où la probabilité d'avoir des vitesses de vent nulles est importante, cette méthode risque de donner des résultats peu réalistes. Pour de tels sites, on utilisera la loi de Weibull modifiée présentée à la page 17.

Lorsque les données de vitesses de vent sont disponibles sous forme fréquentielle, une variante de la méthode MLM peut être utilisée. Cette méthode est nommée : *Modified Maximum Likelihood Method* (MMLM). Le principe de cette méthode est le même et il est basé sur les relations suivantes [28] :

$$k = \left(\frac{\sum_{i=1}^n V_i^k \ln(U_i) P(U_i)}{\sum_{i=1}^n U_i^k P(U_i)} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(U_i) P(U_i)}{P(U \geq 0)} \right)^{-1} \quad (1.3.8)$$

$$c = \left(\frac{1}{P(U \geq 0)} \sum_{i=1}^n V_i^k P(U_i) \right)^{1/k} \quad (1.3.9)$$

- où :
- k est le paramètre de forme à déterminer par calcul itératif en prenant une valeur initiale de k=2 ;
 - U_i , en m/s, est la vitesse du vent à un instant i ;
 - $P(U \geq 0) = 1$, est la probabilité que la vitesse de vent soit égale ou supérieure à zéro ;
 - $P(U_i)$, est la probabilité d'avoir la vitesse de vent U_i .

Comparaison des différentes méthodes

L'article [28] a comparé les différentes méthodes – moindres carrés, MLM et MMLM – et a testé leur performance. Les conclusions sont les suivantes :

- si les données de vitesses de vent sont disponibles sous forme de série temporelle alors la méthode MLM est recommandée pour le calcul des paramètres de la distribution de Weibull ;
- si les données de vitesses de vent sont disponibles sous forme de série fréquentielle alors la méthode MMLM est recommandée ;
- par rapport à la méthode MLM, la méthode des moindres carrés est moins précise et plus influencée par des paramètres extérieurs comme la taille du fichier de données.

Méthode du maximum de vraisemblance modifiée (MMLE)

Cette dernière méthode consiste en une modification de l'équation (1.3.8) utilisée pour le calcul du paramètre k par la méthode MLM [33] :

$$k = (n-2) \left(n \frac{\sum_{i=1}^n V_i^k \ln(U_i)}{\sum_{i=1}^n U_i^k} - \sum_{i=1}^n \ln(U_i) \right)^{-1} \quad (1.3.10)$$

Cette modification est très simple mais permet d'obtenir de meilleurs résultats dans la détermination de k , particulièrement dans le cas d'un nombre de valeurs assez faibles ([33]).

La loi de Weibull modifiée

La loi de Weibull modifiée est utilisée pour caractériser les stations pour lesquelles la proportion de vents nuls est très importante. Elle a donc une influence significative sur la répartition des vents et donc sur la caractérisation du site. En effet, la loi de Weibull classique ne permet pas de considérer les vents nuls et dans ce cas on la modifie alors suivant l'équation suivante :

$$f(U) = \begin{cases} s, & \text{à } U=0 \\ (1-s) \left(k U^{k-1} / c^k \right) \exp \left(- \left(U/c \right)^k \right), & \text{pour } U > 0 \end{cases} \quad (1.3.11)$$

avec s étant le pourcentage de vitesses de vent nulles ([5] et [27]).

Lors de l'analyse des données, le nombre de vitesses nulles a été calculé afin de mieux caractériser les sites étudiés.

Influence des paramètres k et c sur la distribution statistique des vitesses de vent

Les facteurs de forme k et d'échelle c de la loi de Weibull ont des influences différentes sur la distribution statistique des vitesses de vent.

Le facteur d'échelle c est directement relié à la vitesse moyenne du vent par la relation (1.3.3). Pour une même valeur de k , l'augmentation de la valeur de c représente une augmentation de la valeur moyenne, c'est-à-dire une augmentation du nombre de vitesses de vent élevées et une diminution du nombre de vitesses faibles. La courbe de distribution des vitesses de vent est alors plus aplatie et avec un maximum qui se décale vers la droite (Figure 1.3-1).

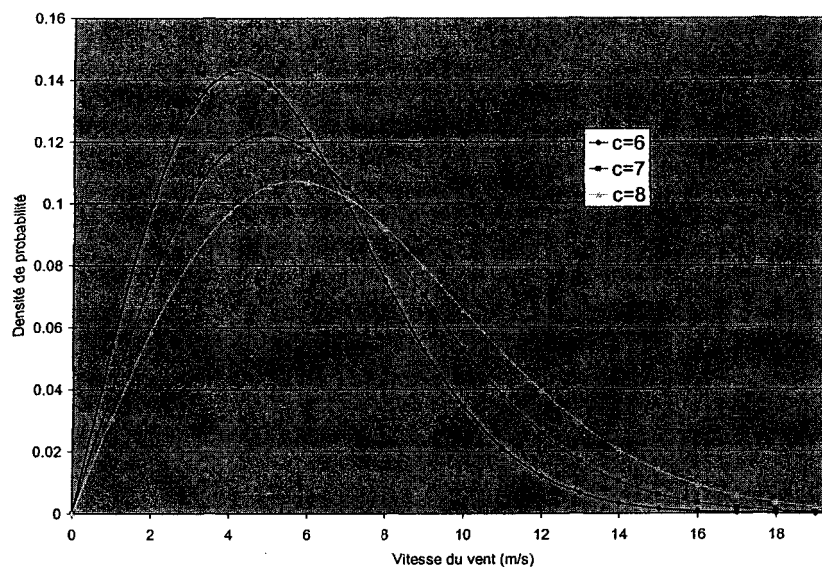


Figure 1.3-1 : Comparaison de distributions de Weibull pour une même valeur de k

Par contre, si l'on augmente la valeur du paramètre k en fixant celle de c , la courbe de distribution des vitesses de vent devient plus étroite, son maximum augmente et est décalé vers la droite : on a un plus grand nombre de vitesses de vent autour de la moyenne alors que le nombre de vitesses de vent faibles et élevées diminue (Figure 1.3-2).

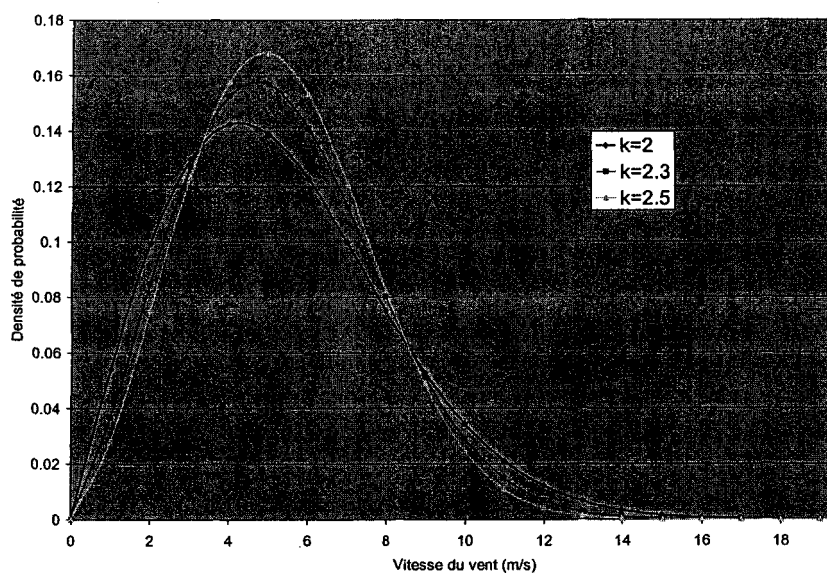


Figure 1.3-2 : Comparaison de distributions de Weibull pour une même valeur de c

1.3.1.2 La loi de Rayleigh

Certaines études de vent ne se basent pas sur la loi de Weibull mais sur une loi qui en découle directement en utilisant un paramètre de forme k égal à 2. Ce cas particulier de la loi de Weibull est appelé loi de Rayleigh.

La distribution cumulative de la loi de Rayleigh est :

$$F(U) = 1 - \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{U}{\bar{U}}\right)^2\right] \quad (1.3.12)$$

Et la fonction de densité de probabilité correspondante est :

$$f(U) = \frac{\pi}{2} \frac{U}{\bar{U}^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{U}{\bar{U}}\right)^2\right] \quad (1.3.13)$$

où \bar{U} désigne la vitesse moyenne du vent.

Le principal avantage de la loi de Rayleigh réside dans sa simplicité. En effet, de par sa définition – utilisation d'un paramètre de forme k égal à 2 – la loi de Rayleigh ne dépend plus que de la valeur moyenne du vent sur le site. Cette forme simplifiée de la loi de Weibull a été étudiée à partir de données enregistrées sur de longues périodes et correspond assez bien, selon certains résultats, aux vitesses de vent observées [47]. Elle est utilisée dans plusieurs études de sites comme alternative à la loi de Weibull ([8] et [21]).

Cependant, le principal désavantage de la loi de Rayleigh est aussi lié à l'utilisation du paramètre de forme k fixé à 2. En effet, si cette utilisation permet une simplification, elle ne permet pas de s'adapter au mieux au régime de vent rencontré sur le site étudié puisque seule la valeur de la moyenne du vent est prise en compte. Par conséquent, pour deux sites ayant des valeurs de

moyenne de vitesses de vent égales on obtiendrait deux distributions identiques alors que dans la réalité elles pourraient être significativement différentes, ce qui engendrerait des écarts importants sur le calcul de la valeur de puissance disponible (voir annexe II et annexe III).

Une comparaison des lois de Weibull et de Rayleigh a été réalisée [8]. Les valeurs des densités de puissance éolienne ainsi que les pourcentages d'erreurs sur les calculs sont présentés (figures 1.3-3 et 1.3-4). On remarque que l'erreur de calcul varie entre 0,1% et 11,4% avec une moyenne d'erreur de 4,9% en utilisant la loi de Weibull alors qu'elle varie entre 11,3 % et plus de 50 % avec une moyenne de 36,5% en utilisant la loi de Rayleigh. Donc, la loi de Weibull respecte beaucoup mieux les variations mensuelles et saisonnières que la loi de Rayleigh.

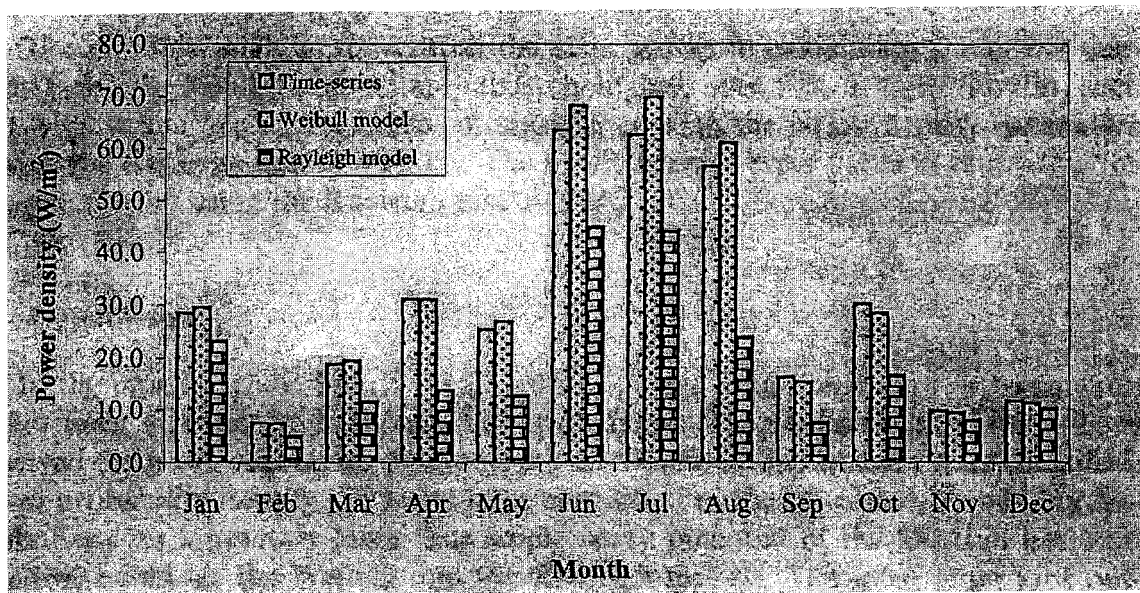


Figure 1.3-3 : Densité de puissance éolienne calculée à l'aide des données réelles, de la loi de Weibull et de la loi de Rayleigh [8]

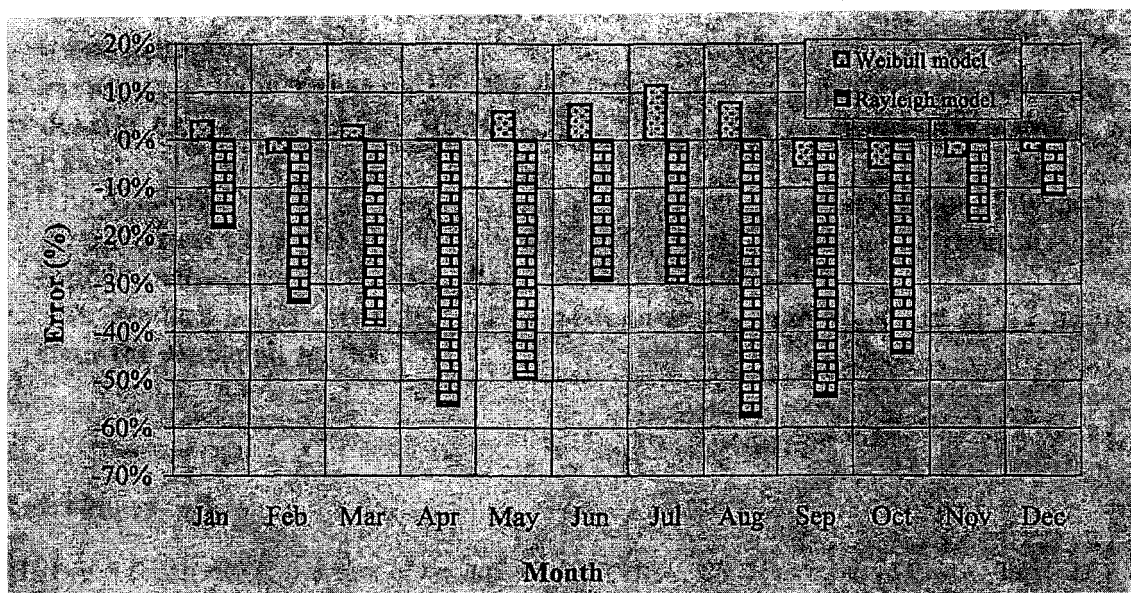


Figure 1.3-4 : Pourcentages d'erreurs sur la densité de puissance calculée à l'aide des données réelles de la loi de Weibull et de la loi de Rayleigh [8]

La loi de Rayleigh n'a pas été utilisée dans notre étude pour mettre en évidence les variations mensuelles et saisonnières du vent. En effet, cette loi qui ne repose que sur la valeur moyenne de la vitesse du vent ne permet pas de bien caractériser les variations des vitesses de vent au cours des mois, ce qui a pour impact des différences très importantes sur le calcul de la densité de puissance éolienne d'un site. De plus, les variations mensuelles et saisonnières du vent sont des caractéristiques principales qui n'y sont pas suffisamment mises en évidence.

1.3.1.3 La turbulence

La turbulence est évidemment la partie la plus difficile à modéliser puisqu'elle est très difficile à caractériser. En général, deux types de résultats sont utilisés à cette fin. Le premier, plus simple, donne le facteur d'intensité de turbulence / du site alors que le second est le tracé du spectre.

Le facteur d'intensité de turbulence

Le facteur d'intensité de turbulence est défini comme suit :

$$I = \sigma / \bar{U} \quad (1.3.14)$$

où σ et \bar{U} , en m/s, désignent respectivement l'écart-type et la moyenne de la vitesse du vent.

À partir de ces données on peut, en considérant que les valeurs des vitesses de vent varient autour d'une valeur moyenne suivant une loi normale, tracer la répartition des vitesses autour de cette vitesse moyenne et ainsi caractériser graphiquement la turbulence.

La loi normale est définie par l'équation suivante :

$$f(V) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{V-m}{\sigma}\right)^2\right) \quad (1.3.15)$$

où σ et m , en m/s, désignent respectivement l'écart-type et la moyenne de la vitesse du vent.

Pour exemple, la représentation de la courbe de densité de probabilité suivant une loi normale de moyenne $m=8$ et de d'écart-type $\sigma=2$ a été tracée à la Figure 1.3-5. Sur ce graphique, sont aussi représentées les zones suivantes :

- la zone bornée par $m-\sigma$ et $m+\sigma$, dans laquelle on retrouve 68% des valeurs ;
- la zone bornée par $m-2\sigma$ et $m+2\sigma$, dans laquelle on retrouve 95,5% des valeurs ;
- la zone bornée par $m-3\sigma$ et $m+3\sigma$, dans laquelle on retrouve 97,7% des valeurs.

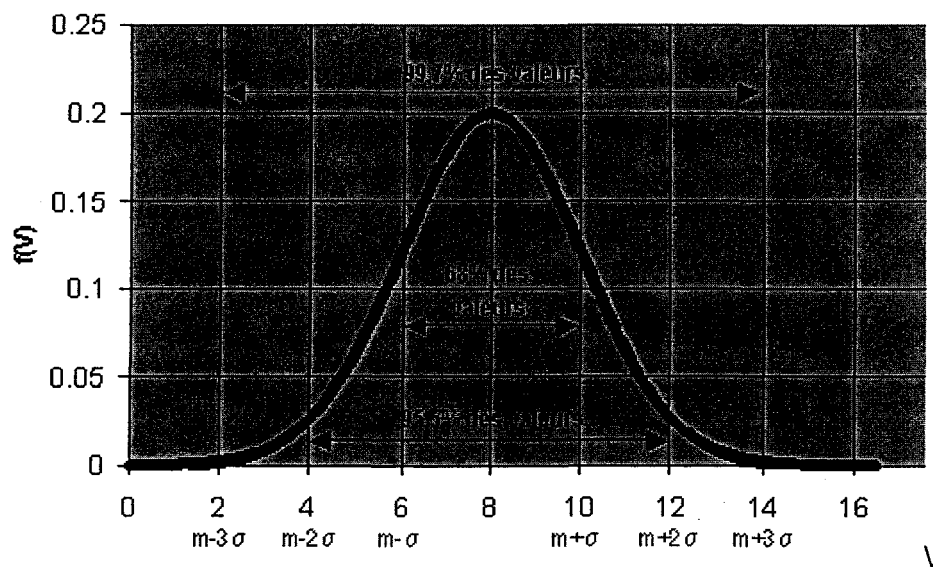


Figure 1.3-5: Représentation de la densité de probabilité pour une loi normale

L'étude du spectre fréquentiel

Détermination des caractéristiques spectrales du vent à partir d'un fichier de mesures

Soit un fichier de N données de la vitesse du vent, enregistrées avec une période d'échantillonnage T_E , ce qui correspond à une durée totale d'enregistrement $D = N \cdot T_E$. On fait l'hypothèse que la série de temps est considérée comme stationnaire.

Remarque : les valeurs peuvent être instantanées ou moyennées sur un intervalle de temps donné ; dans les deux cas, la méthodologie de traitement de la série de temps est la même et on obtient les caractéristiques spectrales pour différentes échelles de temps.

Deux méthodes de détermination sont expliquées ici :

- Méthode 1 : utilisation de la fonction de corrélation ;
- Méthode 2 : utilisation directe de la transformée de Fourier.

➤ *Méthode 1 : Utilisation de la fonction de corrélation*

Soit $v(t)$ la variable aléatoire (Figure 1.3-6²), dont la caractéristique de puissance $S_w(\omega)$ doit être déterminée.

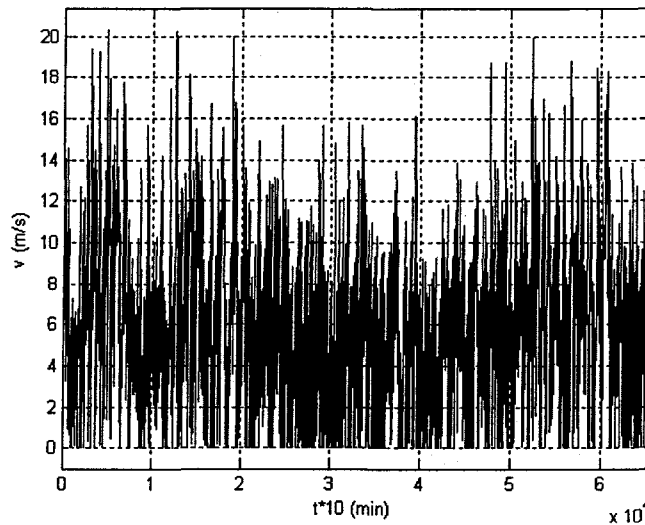


Figure 1.3-6 : Variation temporelle de la vitesse du vent

On calcule la fonction de corrélation :

$$R_{vv}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t)x(t+\tau) dt \quad (1.3.16)$$

D'après le théorème de Wiener Khintchine, la densité spectrale de puissance est la transformée de Fourier de la fonction de corrélation :

$$S_{vv}(\omega) = F[R_{vv}(\tau)] = \int_{-\infty}^{\infty} R_{vv}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (1.3.17)$$

On considère ici le cas de variables à temps discret. Si $v(i)$, $i = \overline{0, N-1}$, est la série de temps

donnée par le fichier de données mesurées, la fonction de corrélation est :

² Les figures Figure 1.3-6 à Figure 1.3-9 et Figure 1.3-13 ont été réalisées à l'aide des données de vitesses de vent à 20 m de la station de Baie-Comeau

$$R_{vv}(i) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} v(k+i)v(k) \quad i = \overline{N-1, N+1} \quad (1.3.18)$$

Le vecteur $R_{vv}(i)$ a la dimension $2N-1$, mais la fonction de corrélation est paire. Donc, toute l'information concernant l'auto-corrélation est contenue dans $R_{vv}(i)$, $i = \overline{0, N-1}$.

La fonction du logiciel Matlab®³ qui calcule cette fonction d'auto-corrélation est **xcor**. Ainsi la commande

```
cr1=xcor(v,'biased')
```

où **v** est le fichier (vecteur) de données de dimension N et '**biased**' indique le fait que le calcul est réalisé avec la relation (1.3.18) – utilisant le facteur $1/N$ – crée un fichier (vecteur) de dimension $2N-1$ qui contient la fonction auto-corrélation (Figure 1.3-7).

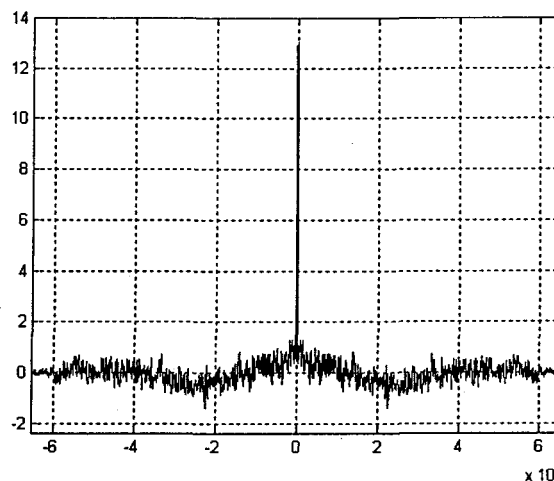


Figure 1.3-7 : Fonction de corrélation de la série de données de vent

Pour déterminer la densité spectrale de puissance, il est nécessaire d'appliquer la transformée de Fourier discrète à la fonction de corrélation :

³ La version de Matlab® utilisée est Matlab® 6.5 R13

$$S_{vv}(k) = F_d[R_{vv}(i)] \quad (1.3.19)$$

où k représente les valeurs discrètes de la fréquence. Sous Matlab®, le calcul de la transformée de Fourier discrète est effectuée avec l'algorithme FFT (Fast Fourier Transform) et implique l'utilisation de la fonction **fft**.

Maintenant, considérons le cas général d'une série de temps, $x(i)$, $i=\overline{0, N-1}$, qui doit être traitée pour déterminer la caractéristique spectrale. La transformée de Fourier discrète est :

$$X(k) = F_d[x(i)] = \sum_{i=0}^{N-1} x(i) \underline{u}^{-ik} \quad k = \overline{0, N-1} \quad (1.3.20)$$

$$\text{avec } \underline{u} = \exp\left(-j \frac{2\pi}{N}\right) \quad (1.3.21)$$

Les valeurs $X(k)$ sont complexes. La liaison avec les paramètres (le spectre) de la série de Fourier complexe est :

$$\underline{A}_k = \frac{X(k)}{N} \quad (1.3.22)$$

La suite des valeurs complexes a une symétrie par rapport à l'abscisse $k=N/2$: la symétrie est paire pour les modules et impaire pour les arguments (les phases).

En conclusion : sous forme graphique, on représente normalement les paramètres de la série de Fourier complexe :

$$\begin{cases} |\underline{A}_k| & k = \overline{0, \frac{N}{2}} \\ |\underline{A}_0| = A_0 & \text{est la valeur moyenne} \\ \arg \underline{A}_k & k = \overline{1, \frac{N}{2}} \end{cases} \quad (1.3.23)$$

Le spectre classique de la série harmonique est donné par :

$$\text{- la moyenne :} \quad A_0 = \frac{X(0)}{N} \quad (1.3.24)$$

$$\text{- les amplitudes des harmoniques :} \quad A_k = 2 \frac{|X(k)|}{N} \quad k = \overline{1, \frac{N}{2}} \quad (1.3.25)$$

$$\text{- les phases des harmoniques :} \quad \varphi_k = \arg X(k) \quad (1.3.26)$$

Le calcul de la transformée de Fourier discrète avec Matlab® est effectuée comme suit :

$$\mathbf{tfd} = \text{fft}(\mathbf{x}, N)$$

où le vecteur **tfd** des nombres complexes contient les valeurs $X(k)$, $k = \overline{0, N-1}$:

$$\mathbf{tfd}(0) = X(0)$$

$$\mathbf{tfd}(1) = X(1)$$

...

$$\mathbf{tfd}(N) = X(N-1)$$

Maintenant, nous appliquons à l'aide de Matlab® la relation (1.3.19) :

$$\mathbf{ssp} = \text{fft}(\mathbf{crl}, 2*N-1)$$

Puisque **crl** est une fonction paire, il en résulte que **ssp** contient des valeurs réelles, soit :

$$\mathbf{ssp}(k) = \text{abs}(\mathbf{ssp}(k)).$$

On représente graphiquement (Figure 1.3-8) la caractéristique spectrale de puissance contenue dans la première moitié du vecteur **ssp** : $\text{ssp}(k)$; $k=1, \overline{N}$

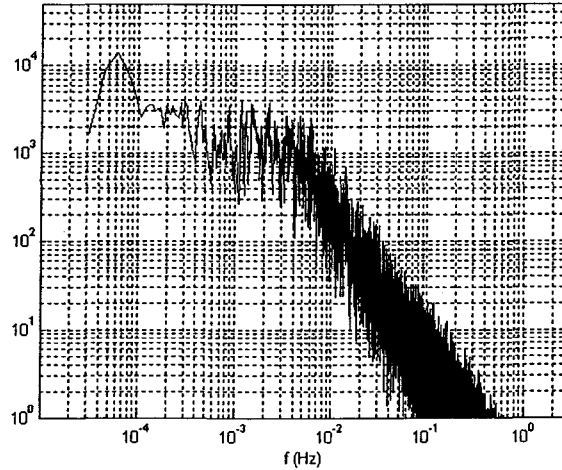


Figure 1.3-8 : Densité spectrale de puissance à l'aide de la méthode 1

➤ *Méthode 2 : Utilisation directe de la transformée de Fourier*

Soit $v(t)$ la variable aléatoire (Figure 1.3-6), dont la caractéristique de puissance $S_w(\omega)$ doit être déterminée. Notons par $v_T(t)$ la variable $v(t)$ « vue » par la fenêtre du temps $[-T, T]$, c'est à dire :

$$v_T(t) = \begin{cases} v(t) & \text{pour } |t| \leq T \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (1.3.27)$$

Soit $V_T(\omega)$ la transformée de Fourier du signal $v_T(t)$. La caractéristique spectrale de la variable aléatoire $v(t)$ est :

$$S_w(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} |V_T(\omega)|^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} V_T(\omega) V_T(-\omega) \quad (1.3.28)$$

Pour le cas des variables à temps discret, considérons $v(i)$ la série de temps, $i=\overline{0,N-1}$, qui est donnée par le fichier de mesures. On détermine la transformée de Fourier discrète de $v(i)$:

$$V(k) = F_d[v(i)] \quad k = \overline{0, N-1} \quad (1.3.29)$$

La densité spectrale de puissance est :

$$S_w(k) = \frac{1}{N} |V(k)|^2 = \frac{1}{N} V(k) V(-k) \quad (1.3.30)$$

Le calcul sous Matlab® s'effectue comme suit :

```
tfd=fft(v,N);
dsp=diag(tfd)*tfd/N;
```

où **dsp** contient les valeurs réelles $S_w(k)$ pour $k=\overline{0,N}$:

```
dsp(1)= S_w(0)
dsp(2)= S_w(1)
...
```

La densité spectrale déterminée avec la méthode 2 est représentée par la Figure 1.3-9.

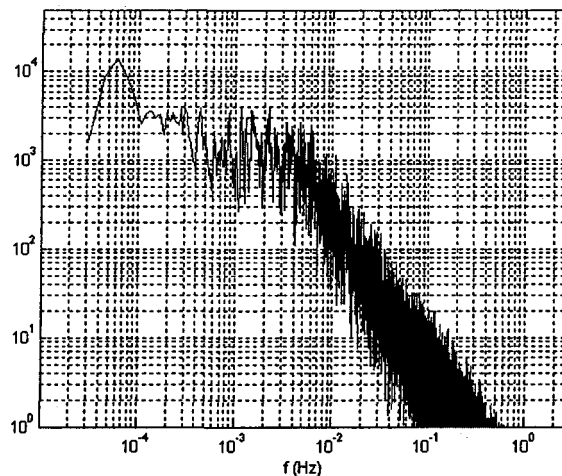


Figure 1.3-9 : Densité spectrale de puissance à l'aide de la méthode 2

Remarques :

- Les lignes spectrales obtenues avec la transformée de Fourier discrète sont distancées, sur l'échelle des pulsations ω , par le pas :

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{NT_e} \quad (1.3.31)$$

- Dans le cas du traitement numérique des séries de temps aléatoires par FFT, on obtient, habituellement, un « bruit de calcul » qui se superpose sur les « lignes moyennes » représentant les caractéristiques spectrales cherchées. Pour diminuer l'amplitude de ce bruit de calcul, on peut utiliser un procédé de filtrage de la suite $dsp(k)$, $k=1,2,\dots,N$, à l'aide d'un filtre numérique dont la fonction de transfert est (Figure 1.3-10) :

$$H(z) = \frac{(1-a)z^{-1}}{1-az^{-1}} \quad (1.3.32)$$

où la constante a détermine le poids de l'effet de filtrage. Plus a est proche de la valeur unitaire (Figure 1.3-11), plus l'effet de filtrage est fort. Donc, les composantes filtrées de la caractéristique spectrale s'obtiennent par les équations :

$$dspf(k) = a \cdot dspf(k-1) + (1-a)dsp(k-1) \quad k = 2, 3, \dots, N \quad (1.3.33)$$

$$dspf(1) = dsp(1) \quad (1.3.34)$$

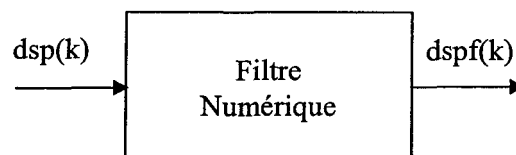


Figure 1.3-10 : Fonction de transfert du filtre numérique

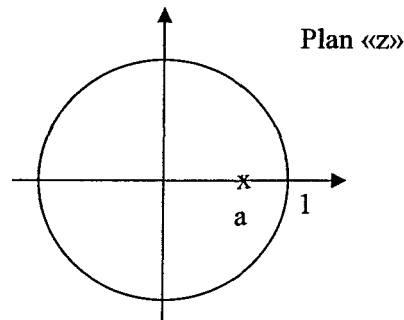


Figure 1.3-11 : Représentation dans le plan « z » de l'emplacement de a

Description de la méthode de validation et du programme sous Matlab®

La série de temps à modéliser par traitement numérique des données (similaire à un enregistrement de courte durée du vent) contient un bruit coloré additionné sur une composante continue (la turbulence + la composante constante).

Le schéma de génération de la série de temps est donné à la Figure 1.3-12.

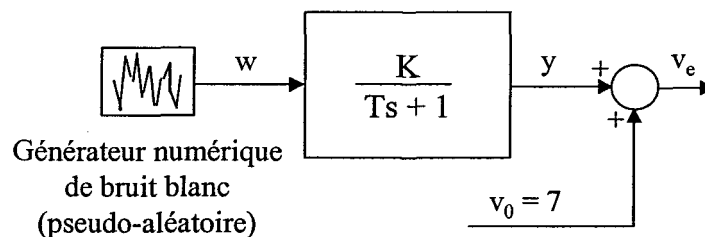


Figure 1.3-12 : Schéma de génération de la série de temps

Dans le logiciel, les paramètres du «filtre de formation» du bruit (composante de turbulence) sont $K = 10$ et $T = 20s$.

On détermine la densité spectrale de puissance par les deux méthodes décrites précédemment. Les résultats doivent être similaires (Figure 1.3-13).

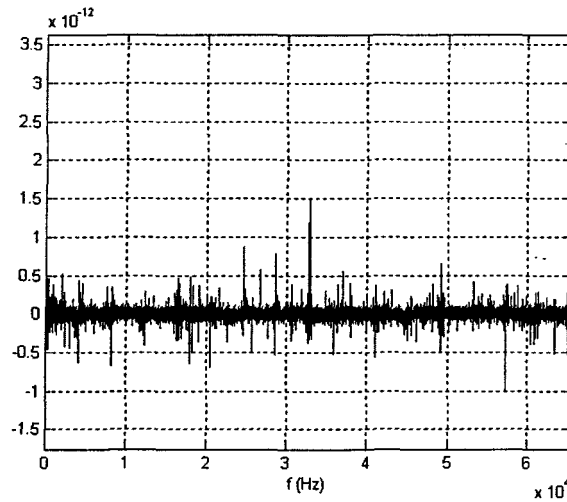


Figure 1.3-13 : Différence entre les densités spectrales calculées avec les méthodes 1 et 2

Remarque :

- Dans la méthode 1, on applique la commande FFT sur le fichier $R_w(i)$ – la fonction de corrélation – dont la dimension est $2N-1$. Donc, toutes les caractéristiques spectrales sont échantillonnées sur l'échelle de fréquence avec le pas :

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{(2N-1) \cdot T_e} \quad (1.3.35)$$

- Pour que la méthode 2 soit comparée avec la méthode 1, il est nécessaire que le calcul de FFT du signal $v(i)$ se fasse avec la commande Matlab® :

$$tfd=fft(v,2*N-1)$$

Dans ce cas, la méthode 2 donne la caractéristique spectrale avec le même pas

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{(2N-1) \cdot T_e} \text{ et les deux méthodes peuvent être comparées.}$$

Pour valider la caractéristique spectrale de puissance obtenue, l'idée est de reconstruire la fonction de transfert du « filtre de formation » à la base de la caractéristique spectrale de puissance obtenue par traitement numérique des données.

On utilise la relation fondamentale de la dynamique statistique :

$$S_{yy}(f) = |H_f(j2\pi f)|^2 S_{ww}(f) \quad (1.3.36)$$

où $S_{yy}(f)$ est la densité spectrale de puissance de la variable aléatoire, obtenue numériquement, $S_{ww}(f)$ est la densité spectrale de puissance du bruit blanc (Figure 1.3-12) et $H(j2\pi f)$ est la réponse fréquentielle du filtre.

On sait que pour un bruit blanc numérique engendré avec la période d'échantillonnage T_e (annexe IX) on a :

$$S_{ww}(f) \cong T_e \quad (\text{constante}) \quad (1.3.37)$$

Donc, on peut calculer la caractéristique de gain du filtre comme suit :

$$G_f(f) = \sqrt{S_{yy}(f)} / T_e \quad (1.3.38)$$

Après avoir tracé la caractéristique de gain en échelle logarithmique, sous la forme d'une caractéristique de Bode, on peut paramétrer celle-ci en traçant la courbe asymptotique de pente -20dB/décade. On détermine ensuite graphiquement les paramètres T et K du « filtre de formation ».

Le calcul direct, avec la méthode 2, de la caractéristique spectrale de puissance, implique l'utilisation de la commande Matlab® :

$$\text{tfd}=\text{fft}(v,N)$$

On obtient la caractéristique spectrale avec le pas $\Delta\omega = \frac{2\pi}{NT_e}$, qui doit avoir la même allure que celle de la caractéristique calculée et représentée graphiquement avec le pas :

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{(2N-1) \cdot T_e}.$$

1.3.2. Étude spatiale

1.3.2.1 Les lois de cisaillement du vent

On appelle « loi de cisaillement du vent » une équation permettant de calculer à partir d'une donnée de vitesse de vent connue, la vitesse du vent à une altitude différente, dans la plupart des cas plus élevée. En effet, dans la majorité des cas, les capteurs de vitesses des tours de mesures ne sont pas situés à la même hauteur que les nacelles d'éoliennes. Même si pour remédier à ce problème, les tours de mesure sont construites de plus en plus hautes, les éoliennes elles aussi ont tendance à être de plus en plus hautes afin de capter le plus de vent possible. Le problème est donc seulement déplacé.

Il existe plusieurs lois de cisaillement possédant chacune des paramètres caractéristiques reliés au site étudié.

Loi de cisaillement faisant appel à un facteur de puissance α

Cette loi est celle qui est le plus couramment utilisée dans le monde de l'éolien :

$$V_2 = V_1 \left(\frac{Z_2}{Z_1} \right)^\alpha \quad (1.3.39)$$

- où :
- Z_1 , en m, est la hauteur de l'observation initiale de la vitesse du vent ;
 - V_1 , en m/s, est la vitesse observée à l'altitude Z_1 ;
 - Z_2 , en m, est la hauteur à laquelle on veut estimer la vitesse du vent ;
 - V_2 , en m/s, est la vitesse du vent que l'on estime à la hauteur Z_2 ;
 - α est un facteur de puissance dont la valeur varie généralement entre 0,1 et 0,25 suivant les sites⁴ ([9] et [26]).

La loi étudiée ici ne dépend que d'un seul paramètre : l'exposant α , dont la valeur dépend de plusieurs facteurs comme la rugosité, la topographie et la stabilité de l'atmosphère.

Pour chaque site, il est donc nécessaire de déterminer le facteur α et on peut même supposer que l'étude de α , en relation avec les caractéristiques dont il dépend, pourrait permettre de trouver une relation du style :

$$\alpha = f(\text{rugosité, topographie, stabilité de l'atmosphère})$$

La détermination de cette fonction passe évidemment par l'étude des données existantes sur les tours de mesure possédant des anémomètres à des altitudes différentes. Cette étude permettra

⁴ Pour le premier « Atlas éolien du Québec », la valeur de 0,17 avait été choisie ([34] et [35])

non seulement de mieux connaître le paramètre α et ses variations mais, aussi, d'étudier d'autres types de lois de puissance moins souvent utilisées.

Cependant, les variations de la vitesse du vent suivant l'altitude, c'est-à-dire le cisaillement du vent, pourraient être caractérisées de manière plus précise par des lois de Weibull avec des facteurs de forme et d'échelle différents suivant l'altitude.

Loi de cisaillement utilisant la rugosité z_0

Cette loi est définie par :

$$\frac{V(z)}{V(z_R)} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_R}{z_0}\right)} \quad (1.3.40)$$

- avec :
- z , l'altitude en m à laquelle on désire calculer la vitesse du vent ;
 - $V(z)$, la vitesse en m/s à calculer ;
 - z_R , l'altitude de référence en m;
 - $V(z_R)$, la vitesse connue à l'altitude de référence en m/s;
 - z_0 , la rugosité en m.

Cette loi est utilisée dans certaines études ([21]) et a pour principal avantage la prise en compte d'un paramètre physique z_0 , définissant la rugosité du terrain. Dans ce cas, il est nécessaire d'évaluer la rugosité du terrain qui dépend du relief et des constructions entourant le site. Le Tableau 1.3-1 présente l'évaluation de ce paramètre suivant les conditions extérieures.

Tableau 1.3-1 : Tableau des classes et longueurs de rugosité z_0

Classes de rugosité	$Z_{0(m)}$	Description
0	0,0002	Surface d'eau
0.5	0,0024	Terrain complètement dégagé avec une surface lisse, par exemple une piste d'atterrissage en béton ou de l'herbe fraîchement coupée
1	0,03	Terrain agricole dégagé, sans clôtures ou haies vives et avec très peu de constructions, seulement des collines doucement arrondies
1.5	0,055	Terrain agricole avec quelques constructions et des haies vives de 8 m de haut situées à environ 1250 m les unes des autres
2	0,1	Terrain agricole avec quelques constructions et des haies vives de 8 m de haut situées à environ 500 m les unes des autres
2.5	0,2	Terrain agricole avec quelques constructions et des haies vives de 8 m de haut situées à environ 250 m les unes des autres
3	0,4	Villages, petites villes, terrain agricole avec de nombreuses ou de hautes haies vives, des forêts et un terrain très accidenté
3.5	0,8	Grandes villes avec de hauts immeubles
4	1,6	Très grandes villes avec de hauts immeubles et des gratte-ciel

Source : www.espace-eolien.fr/lille/pu_wind/puwch1.htm

1.3.2.2 La rose des vents

La réalisation de la rose des vents correspond à l'analyse de la variation des directions du vent pour une station, une analyse d'autant plus intéressante puisqu'elle représente géographiquement le vent. En effet, lors de l'installation d'éoliennes sur un site, il est nécessaire de connaître la ou les directions principales du vent afin, notamment, de limiter l'interaction négative entre plusieurs éoliennes ou avec des obstacles.

Les roses des vents donnent plusieurs informations. On peut, par exemple, déterminer la répartition de la fréquence des vents ou alors la valeur moyenne des vents pour chaque direction et faire cela pour huit ou seize directions différentes.

Dans le cadre de ce travail, une rose des vents a été réalisée pour chaque station où nous avons des données de vent valides. Cependant, les objectifs de ce travail étant reliés à la

conception d'un générateur de numérique de vitesses de vent comme entrée d'un simulateur de turbine éolienne, nous avons préféré nous concentrer sur l'étude des variations de la vitesse du vent plutôt que sur l'étude des variations de sa direction. De plus, peu de données de directions de vent étaient disponibles et n'auraient pas permis d'approfondir cet aspect de l'étude.

La Figure 1.3-14 montre un exemple de rose des vents réalisée pour la station de Desrosiers à l'aide des données de directions de vent à une hauteur de 20 m. Elle donne les pourcentages de répartition du vent suivant seize directions. On peut alors observer que, pour cette station, les deux directions principales sont OSO (Ouest-Sud-Ouest) et NE (Nord-Est).

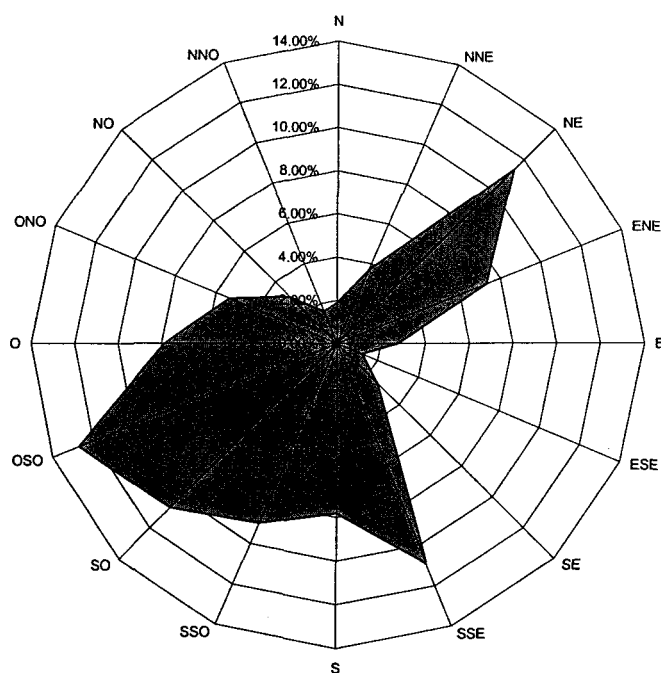


Figure 1.3-14 : Rose des vents pour la station de Desrosiers (directions à 20 m)

1.4. Présentation des outils d'analyse

L'analyse des données comporte deux étapes distinctes :

- une étude statistique des données qui permet de calculer les paramètres de la fonction de Weibull, les variations des moyennes et des écarts-types de vitesses, les variations des températures et les variations des coefficients de puissance ;
- une étude fréquentielle des données qui permet de déterminer les spectres de fréquence caractérisant les sites étudiés

Pour l'étude statistique, deux programmes ont été développés.

Dans un premier temps, un programme sur Visual Fortran a été réalisé. Celui-ci avait l'avantage de pouvoir être combiné avec Visual Basic afin de concevoir une interface graphique pour faciliter l'utilisation du programme. De plus, il permettait de choisir parmi plusieurs options : choix de la hauteur de calcul des paramètres de la loi de Weibull, type de fichier utilisé (fichier provenant de la campagne de mesure du MRN, fichier contenant une ou deux série(s) de données de vitesses et/ou de directions de vent). Cependant, durant l'analyse des résultats il s'est révélé que les fichiers provenant du MRN utilisés au début comportaient beaucoup de manques dans les données. D'autres fichiers comportant des données plus complètes ont donc été utilisés et, pour accélérer la réalisation de l'analyse, un autre programme a été développé avec le logiciel Matlab®).

Le changement du langage de programmation a pour principaux avantages l'accélération des calculs et une accessibilité plus accrue du programme écrit car le logiciel Matlab® est beaucoup plus utilisé aujourd'hui que son grand frère Visual Fortran. Cependant, on peut quand même déplorer l'absence d'interface graphique que n'offre pas Matlab®.

Les différents sous-programmes écrits avec Matlab® permettent de réaliser les différentes étapes suivantes :

- Tri des données par mois et par catégorie (température, vitesse à 20 m,...) ;
- Calcul des moyennes et des écarts-types mensuels des vitesses de vent ;
- Calcul des paramètres k et c de la loi de Weibull pour chaque mois ;
- Calcul des valeurs de la distribution des directions du vent pour chaque mois ;
- Calcul des moyennes mensuelles de la température ;
- Calcul des moyennes mensuelles des coefficients de puissance.

Toutes ces données sont enregistrées dans deux fichiers contenant les résultats de l'analyse. Ces fichiers sont ensuite ouverts par une macro réalisée à partir d'Excel qui permet de visualiser les courbes de variation des différents paramètres statistiques :

- variation des paramètres k et c de la loi de Weibull ;
- variation de la vitesse moyenne du vent ;
- variation de l'écart-type ;
- rose des vents pour chaque mois ;
- variation de la température ;
- variation du coefficient de puissance.

Il est alors possible de réaliser des fichiers de comparaison de ces différents résultats pour l'analyse.

1.5. Résultats

1.5.1. Le choix des sites étudiés

L'analyse réalisée porte sur les sites pour lesquels des mesures ont été faites, de décembre 1998 à mars 2003, dans le cadre d'un programme du MRN. Ce programme a permis d'installer une quarantaine de tours de mesure au Québec et particulièrement dans les régions du Bas Saint Laurent, de la Gaspésie et des Îles-de-la-Madeleine. En effet, il avait pour but, suite au premier Atlas éolien du Québec [35], de mieux estimer le potentiel éolien de ces régions.

Cependant, avant de commencer à étudier les sites, il a été nécessaire d'en sélectionner seulement une partie. En effet, afin de valider ses mesures, le MRN a demandé à une société extérieure spécialisée en météorologie, Enviromet International Inc.⁵, de procéder à une analyse des données ; de grosses anomalies ont alors été trouvées pour une grande partie des stations. À titre d'exemple, le Tableau 1.5-1, construit à partir du rapport d'Enviromet International Inc. [38], montre, pour chaque station, le pourcentage de données valides pour des vitesses à 20 m. Le même type de tableau a été réalisé pour les autres catégories de données : vitesses à 40 m, écarts-types des vitesses à 20 m et à 40 m, températures, directions à 20 m et à 40 m, écarts-types des directions à 20 m et à 40 m. Ces tableaux sont donnés en annexe VI.

Tableau 1.5-1 : Pourcentages des nombres d'observations de vitesses à 20 m (Phases I à IV)

Phase	Station	Pourcentage de données valides	Pourcentage de données manquantes	Pourcentage de données trop petites	Pourcentage de données erronées
I	Bonaventure	68,2%	31,7%	0,0%	0,1%

⁵ Société spécialisée dans la consultation en environnement et dans les sciences atmosphériques (<http://www.enviromet.qc.ca/>)

	Rivière-au-Renard	0,0%	26,0%	74,0%	0,0%
	Sainte-Thérèse	85,0%	14,3%	0,6%	0,1%
	Saint-Jean-de-Cherbourg	84,4%	14,3%	1,2%	0,1%
	Saint-Octave-de-l'Avenir	0,0%	31,9%	68,1%	0,0%
II	Pointe-à-Boisvert	46,6%	0,4%	53,0%	0,0%
	Luceville	97,2%	0,9%	2,0%	0,0%
	Pointe-des-Monts	92,6%	7,0%	0,4%	0,0%
	Sainte-Anne-des-Monts	96,7%	3,0%	0,3%	0,0%
	Sainte-Félicité 1	90,7%	5,9%	3,4%	0,0%
III	Baie-des-Sables	99,3%	0,0%	0,7%	0,0%
	Bernatchez	99,8%	0,1%	0,1%	0,0%
	Cap-Saint-Ignace	98,7%	0,8%	0,6%	0,0%
	Desrosiers	99,6%	0,1%	0,4%	0,0%
	Gagné	99,0%	0,0%	0,9%	0,0%
	Île-d'Anticosti	95,3%	4,5%	0,2%	0,0%
	Îles-de-la-Madeleine	98,1%	0,2%	1,7%	0,0%
	Marquis	96,8%	3,1%	0,2%	0,0%
	Martin	99,7%	0,2%	0,1%	0,0%
	Murdochville	66,8%	14,4%	18,7%	0,0%
	Petit-Cap	94,3%	4,4%	1,1%	0,2%
	Rivière-au-Renard Marinard	98,7%	0,7%	0,6%	0,0%
	Sainte-Marguerite	70,8%	1,5%	27,6%	0,0%
	Sainte-Félicité 2 - NRG	98,5%	0,9%	0,6%	0,0%

	Sainte-Félicité 2 - RM	98,4%	0,9%	0,7%	0,0%
	Sainte-Sophie	93,6%	0,2%	6,1%	0,0%
	TV – anémomètre 1	0,0%	0,2%	5,4%	94,4%
	TV – anémomètre 2	97,5%	0,6%	1,9%	0,0%
	TV – anémomètre à 30 m	89,8%	0,6%	9,6%	0,0%
IV	Saint-Athanase	97,7%	0,2%	2,2%	0,0%
	Sainte-Rita	0,0%	0,0%	4,7%	95,2%
	Kamouraska	97,2%	2,2%	0,4%	0,2%
	Trois-Pistoles	99,3%	0,0%	0,6%	0,0%
	Chic-Chocs	0,0%	0,5%	3,3%	96,2%
	Île-d'Anticosti 2	0,0%	0,0%	3,1%	96,8%
	Natashquan	86,7%	0,2%	13,0%	0,1%
	Chevery	80,8%	1,4%	17,3%	0,4%
	Fermont	95,7%	0,0%	4,3%	0,0%
	Montagne-Sèche	95,9%	0,2%	3,9%	0,0%
	Pointe-Saint-Pierre-an. 1	0,0%	0,1%	0,2%	99,7%
	Pointe-Saint-Pierre-an. 2	80,5%	0,5%	19,0%	0,0%
	Canton-Power	90,4%	0,0%	9,6%	0,0%

Les tableaux réalisés ont servi à sélectionner, pour l'analyse, les stations qui présentaient plus de 95% de données valides et moins de 3% de données erronées ou manquantes. De plus, la plupart des stations retenues l'ont été non pas pour toutes les données, mais seulement pour les données relatives aux vitesses et/ou aux directions de vents. Les stations sélectionnées sont présentées dans le Tableau 1.5-2 et on peut visualiser leur localisation géographique à l'annexe X.

Tableau 1.5-2 : Tableau des stations sélectionnées avec les types de données valables et le plus grand nombre de mois de données

Station	Phase	Numéro Station	Liste des données pour chaque station qui ont été sélectionnées	Nombre de mois	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Alt. (m)
Luceville	II	705RN02	Vitesse 20m, Vitesse 40m	16	48,485	-68,317	90
Sainte-Anne-des-Monts	II	705RN07	Vitesse 20m	21	49,341	-67,391	76
Baie-des-Sables	III	705RN15	Vitesse 20m, Vitesse 40m	16	48,734	-67,871	12
Bernatchez	III	705RN25	Vitesse 20m, Vitesse 40m	12	49,013	-64,411	45
Cap-Saint-Ignace	III	705RN16	Vitesse 20m, Vitesse 40m	16	47,048	-70,453	6
Desrosiers	III	705RN22	Vitesse 20m, Vitesse 40m, Direction 20m, Direction 40m	12	48,881	-67,363	63
Gagné	III	705RN24	Vitesse 20m, Vitesse 40m	10	48,831	-67,336	304
Île-d'Anticosti	III	705RN14	Vitesse 20m, Vitesse 40m	17	49,814	-64,342	20
Îles-de-la-Madeleine	III	705RN17	Vitesse 20m, Vitesse 40m, Direction 20m	16	47,471	-61,735	0
Marquis	III	705RN23	Vitesse 20m, Vitesse 40m	9	48,861	-67,386	130
Martin	III	705RN26	Vitesse 20m, Vitesse 40m, Direction 20m, Direction 40m	11	48,998	-64,398	59
Rivière-au-Renard Marinard	III	705RN19	Vitesse 20m, Vitesse 40m, Direction 40m	11	48,993	-64,376	24
Sainte-Marguerite	III	705RN20	Vitesse 40m, Direction 20m	14	48,313	-67,082	528
Sainte-Félicité	III	705RN09	Vitesse 20m, Vitesse 40m, Direction 20m	21	48,888	-67,374	32
Sainte-Sophie	III	705RN21	Vitesse 40m	16	48,129	-71,726	390
TV	III	705RN28	Vitesse 40m, Direction 40m	29	48,996	-64,433	309
Saint-Athanase	IV	705RN30	Vitesse 20m, Vitesse 40m	16	47,462	-69,323	535
Sainte-Rita	IV	705RN33	Vitesse 40m	16	47,933	-69,223	411

Kamouraska	IV	705RN31	Vitesse 20m, Vitesse 40m	14	47,600	-69,805	20
Chic-Chocs	IV	705RN34	Vitesse 40m, Direction 40m	15	48,643	-67,750	382
Île-d'Anticosti 2	IV	704RN29	Vitesse 40m, Direction 40m	9	49,462	-63,323	289
Trois-Pistoles	IV	705RN32	Vitesse 20m	16	48,095	-69,223	8
Fermont	IV	704RN04	Vitesse 20m, Vitesse 40m, Direction 20m	16	52,820	-67,091	690
Montagne-Sèche	IV	705RN35	Vitesse 20m, Vitesse 40m, Direction 20m	17	49,173	-64,960	366
Pointe-Saint-Pierre	IV	705RN36	Vitesse 40m	15	48,663	-64,230	25
Chevery	IV	704RN03	Direction 40m	15	50,473	-59,611	7
Canton-Power	IV	705RN37	Vitesse 40m, Direction 40m	16	48,611	-65,042	520

Le Tableau 1.5-3 illustre spécifiquement les périodes de mesures et les stations qui ont été utilisées pour l'étude des vitesses de vent à 20 m et à 40 m.

Tableau 1.5-3 : Stations et périodes utilisées pour les données de vitesses à 20 m et à 40 m

Type de données	Station	période	
Vitesses à 20 m	Luceville	déc-99	mai-01
	Sainte-Anne-des-Monts	déc-98	mai-01
	Baie-des-Sables	nov-00	avr-02
	Bernatchez	nov-00	oct-01
	Cap-Saint-Ignace	nov-00	avr-02
	Desrosiers	nov-00	nov-01
	Gagné	nov-00	sept-01
	Île-d'Anticosti 1	nov-00	mai-02
	Îles-de-la-Madeleine	nov-00	mars-02
	Marquis	nov-00	nov-01
	Martin	nov-00	nov-01
	Rivière-au-Renard Marinard	oct-00	sept-01
	Sainte-Félicité	juin-01	mars-03
	TV	oct-00	mars-03
	Saint-Athanase	nov-01	mars-03
	Kamouraska	nov-01	mars-03
	Trois-Pistoles	nov-01	mars-03

	Fermont	nov-01	mars-03
	Montagne-Sèche	oct-01	mars-03
Vitesses à 40 m	Luceville	déc-99	mai-01
	Baie-des-Sables	nov-00	avr-02
	Bernatchez	nov-00	oct-01
	Cap-Saint-Ignace	nov-00	avr-02
	Desrosiers	nov-00	nov-01
	Gagné	nov-00	sept-01
	Île-d'Anticosti 1	nov-00	mai-02
	Îles-de-la-Madeleine	nov-00	mars-02
	Marquis	nov-00	nov-01
	Martin	nov-00	nov-01
	Rivière-au-Renard Marinard	oct-00	sept-01
	Sainte-Marguerite	oct-00	mars-02
	Sainte-Félicité	juin-01	mars-03
	Sainte-Sophie	nov-00	avr-02
	TV	oct-00	mars-03
	Saint-Athanase	nov-01	mars-03
	Sainte-Rita	nov-01	mars-03
	Kamouraska	nov-01	mars-03
	Île-d'Anticosti 2	oct 01	juil-02
	Fermont	nov-01	mars-03
	Montagne-Sèche	oct-01	mars-03
	Canton-Power	nov-01	mars-03
Vitesses à 20 et à 40 m	Luceville	déc-99	mai-01
	Baie-des-Sables	déc-98	mai-01
	Bernatchez	nov-00	oct-01
	Cap-Saint-Ignace	nov-00	avr-02
	Desrosiers	nov-00	nov-01
	Gagné	nov-00	sept-01
	Île-d'Anticosti 1	nov-00	mai-02
	Îles-de-la-Madeleine	nov-00	mars-02
	Marquis	nov-00	nov-01
	Martin	nov-00	nov-01
	Rivière-au-Renard Marinard	oct-00	sept-01
	Sainte-Félicité	juin-01	mars-03
	TV	oct-00	mars-03
	Saint-Athanase	nov-01	mars-03
	Kamouraska	nov-01	mars-03
	Fermont	nov-01	mars-03
	Montagne-Sèche	oct-01	mars-03

Avant de commencer l'analyse des résultats, le Tableau 1.5-4 fait une synthèse des paramètres étudiés et indique les numéros de page de chaque étude afin de faciliter la lecture.

Tableau 1.5-4 : Tableau de présentation des paramètres étudiés

	Variation temporelle			Variation spatiale	
	Influence des années	Influence des saisons	Influence des mois	Influence de la localisation	Influence de la topographique
Facteur de forme de la loi de Weibull : k	48	52	54	58	77
Facteur d'échelle de la loi de Weibull : c	49	53	55	64	84
Intensité de turbulence	51	54	57	69	91
Densité spectrale	Analyse de la densité spectrale pour la station TV (Rivière au Renard) : 97				
Coefficient de puissance	Analyse de la variation globale du coefficient de puissance α : 99				
Facteur de forme de la loi de Weibull : k	Analyse de l'influence de la hauteur : 101				

1.5.2. Étude temporelle

1.5.2.1 Influence des années

L'influence des années est très difficile à caractériser à l'aide des données du programme du MRN puisque les tours ont été installées sur de courtes périodes et que, dans la majorité des cas, le nombre de mois de données est inférieur à seize mois.

On peut cependant considérer la station TV de la région de Rivière-au-Renard où ont été enregistrés 29 mois de données. Mais ces résultats ne peuvent pas être généralisés puisque cette station ne peut, à elle seule, être considérée comme représentative de toutes les autres. Finalement,

l'étude de l'influence des années a été réalisée à l'aide de 24 mois de données de vitesses à 40 m de cette station, soit de janvier 2001 à décembre 2002. Les données à 20 m ont, quant à elles, été invalidées.

Variation du paramètre k (facteur de forme) de la loi de Weibull

L'analyse des données a été réalisée à l'aide des méthodes MLM et MLME. Cependant, les résultats trouvés à l'aide de ces deux méthodes ont été quasiment identiques avec des écarts maximum de l'ordre de 0,1%. Ce sont donc les résultats obtenus avec la méthode MLM qui seront présentés ici.

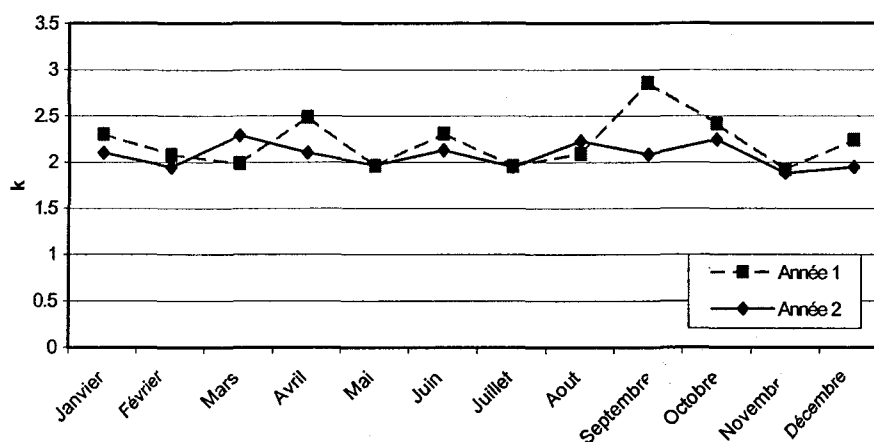


Figure 1.5-1 : Comparaison sur deux années de la variation de k à 40 m pour la station TV

De l'étude du facteur de forme k , on peut tirer deux conclusions :

- dans la plupart des cas, les valeurs de k sont plus élevées pour l'année 1 ;
- si pour les deux années, les variations de mois en mois sont sensiblement les mêmes, on observe une différence significative pendant les mois de mars et septembre.

Comme on peut voir dans le Tableau 1.5-5 qui montre un écart-type moyen beaucoup plus élevé pour l'année 1, le changement d'année ne semble avoir d'influence non pas sur les variations de k , mais plutôt sur l'intensité de ces variations.

Tableau 1.5-5 : Tableau comparatif de l'influence des années sur k

	Année 1	Année 2	Variation
Moyenne	2,22	2,07	6,56%
Écart-type	0,28	0,13	51,36%

Variation du paramètre c (facteur d'échelle) de la loi de Weibull

La variation du paramètre c de la loi de Weibull est relié à la variation de la vitesse moyenne par la relation (1.3.3). Ainsi, la variation du facteur c et de la vitesse moyenne sont identiques et seulement l'analyse du paramètre c est présentée ici.

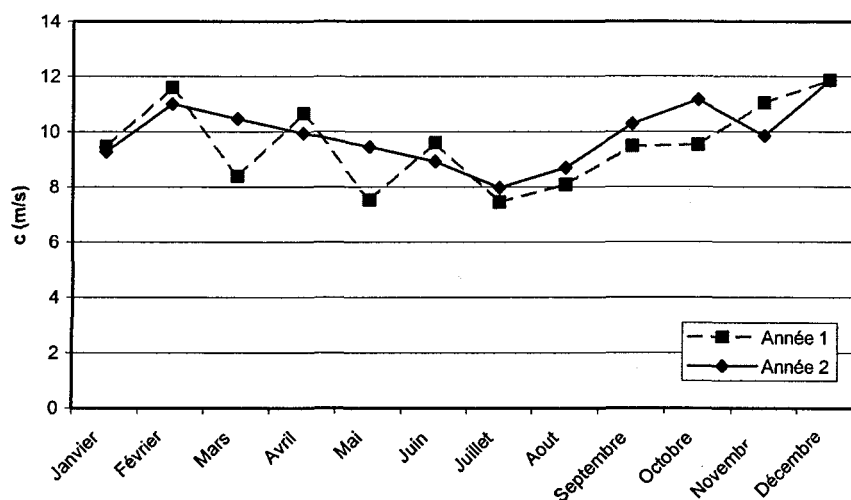


Figure 1.5-2 : Comparaison sur deux années de la variation de c (m/s) à 40 m pour la station TV

La comparaison des deux années de mesures engendre les conclusions suivantes :

- entre les mois de juillet et décembre des deux années, les variations du facteur c sont assez similaires et sont caractérisées par une augmentation quasi-constante ; par contre, on observe des valeurs plus élevées la deuxième année ;
- dans la période allant du mois de février au mois de juin, les valeurs de c sont caractérisées par une décroissance constante la deuxième année et une évolution en « dents de scie » la première année, évolution qui laisse supposer une année caractérisée par des variations mensuelles de vent inhabituelles ;
- pour chacune des années, le mois de janvier se distingue par une valeur de c plus faible que pour les mois de décembre et février. Il semble donc être caractérisé par des vitesses de vent plus faibles. Cependant, comme aucune autre station de mesures n'est disponible pour la même période de mesures, il n'est pas possible de confirmer ou d'infirmer cette constatation.

Des conclusions précédentes, on peut déduire que les variations du facteur d'échelle c sont globalement les mêmes pour les deux années et sont caractérisées par trois périodes :

- un mois de janvier plus faible que les deux mois qui l'entourent ;
- une constante baisse entre les mois de février et juillet (minimum atteint) ;
- une constante hausse entre les mois d'août et décembre (maximum atteint).

Cependant, plus de données seraient nécessaires pour généraliser cette tendance.

Le tableau suivant confirme les résultats précédents. Les valeurs moyennes sont sensiblement égales pour les deux années alors que l'écart-type de l'année 1 est élevé principalement à cause des premiers mois en « dents de scie ».

Tableau 1.5-6 : Tableau comparatif de l'influence des années pour c

	Année 1	Année 2	Variation
Moyenne	9.56	9.91	3.66%
Écart-type	1.51	1.12	25.70%

Variation de l'intensité de turbulence

Rappel : l'intensité de turbulence permet de qualifier la turbulence d'un site, elle est définie à l'aide de la formule (1.3.14).

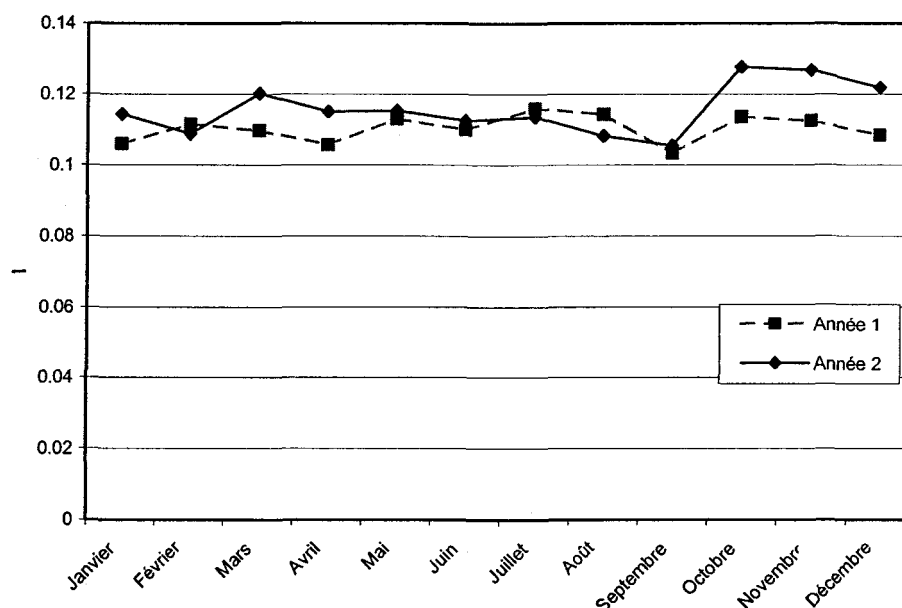


Figure 1.5-3 : Comparaison sur deux années de la variation de l'intensité de turbulence à 40 m pour la station de Rivière-au-Renard – TV

Les résultats étant sensiblement les mêmes, Tableau 1.5-7, il est difficile de tirer une conclusion par rapport à l'influence des années sur la variation de l'intensité de turbulence.

Tableau 1.5-7 : Tableau comparatif de l'influence des années pour l'intensité de turbulence

Mois	Année 1	Année 2	Variation
Janvier	0,106	0,114	7,96%
Février	0,112	0,109	2,49%
Mars	0,110	0,120	9,64%
Avril	0,106	0,115	8,89%

Mai	0,113	0,115	2,03%
Juin	0,110	0,113	2,42%
Juillet	0,116	0,114	2,10%
Août	0,114	0,108	5,27%
Septembre	0,103	0,106	2,17%
Octobre	0,114	0,128	12,37%
Novembre	0,112	0,127	12,80%
Décembre	0,109	0,122	12,33%
Moyenne	0,110	0,116	5,00%

1.5.2.2 Influence des saisons

Pour étudier l'influence des saisons, il est nécessaire de définir les quatre saisons :

- Hiver : décembre, janvier et février ;
- Printemps : mars, avril et mai ;
- Été : juin, juillet et août ;
- Automne : septembre, octobre et novembre.

Les mesures utilisées pour chaque saison (trimestre) correspondent à la totalité des mesures de toutes les stations et de toutes les années des trois mois qui la composent.

Variations du paramètre k (facteur de forme) de la loi de Weibull

On voit (Figure 1.5-4) que, à une hauteur de 20 m, l'hiver et l'automne sont caractérisés par des valeurs de k élevées (1.97 et 1.98 respectivement) alors que les valeurs de k sont plus faibles l'été et le printemps (1.90 et 1.88). Même si les valeurs de k sont plus élevées, le même constat peut être fait pour une hauteur de 40 m.

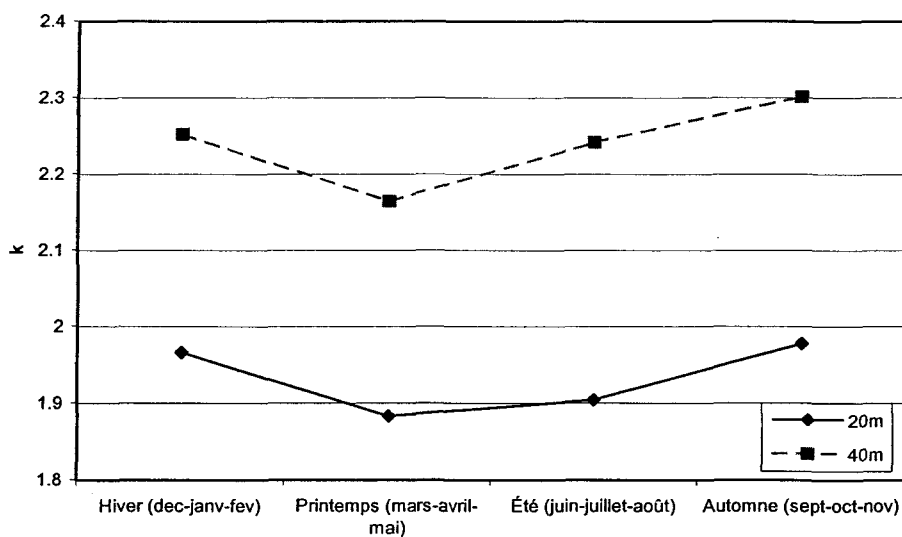


Figure 1.5-4 : Influence des saisons sur la valeur de k

Variations du paramètre c (facteur d'échelle) de la loi de Weibull

On a un facteur d'échelle c maximum l'hiver, qui baisse au printemps, atteint un minimum l'été et enfin remonte à l'automne à une valeur légèrement supérieure à celle du printemps (Figure 1.5-5).

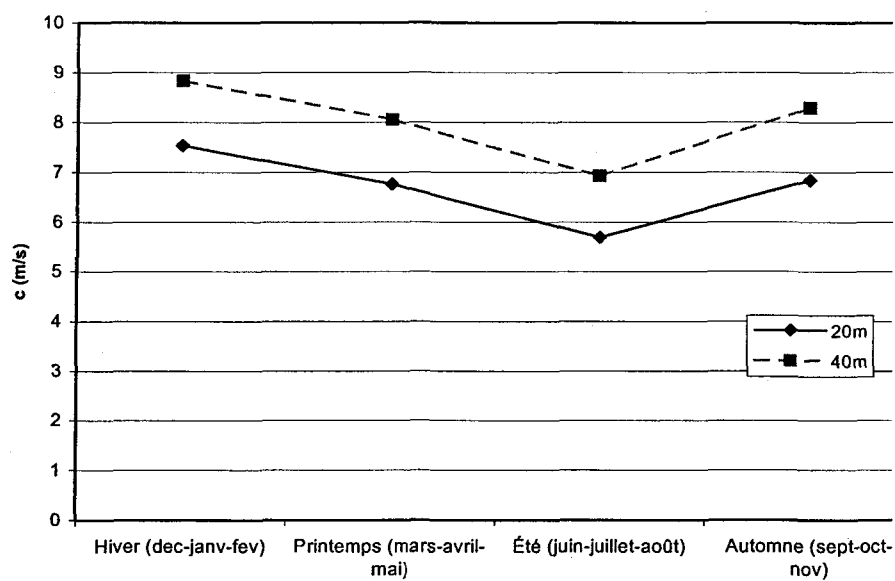


Figure 1.5-5 : Influence des saisons sur la valeur de c (m/s)

Variations de l'intensité de turbulence

Les variations de l'intensité de turbulence suivant les saisons sont très faibles. Cependant, il semble que celle-ci soit plus élevée pendant le printemps et l'été, plus faible en automne et minimale en hiver. Donc, les vents semblent plus constants en hiver où il y a moins de turbulence que pendant l'été et le printemps. Ceci implique que les vents sont de meilleure « qualité » l'hiver.

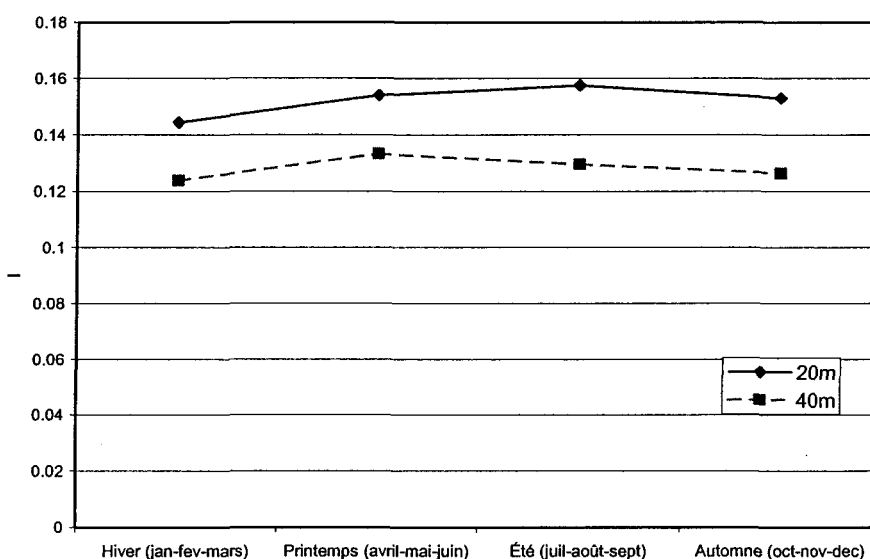


Figure 1.5-6 : Influence des saisons sur la valeur de l'intensité de turbulence

1.5.2.3 Influence des mois

Pour chaque mois, les données utilisées correspondent à la totalité des mesures de toutes les stations, quelles que soient les années.

Variations du paramètre k (facteur d'échelle) de la loi de Weibull

La variation mensuelle est présentée à la Figure 1.5-7.

On retrouve les mêmes variations pour 20 m et 40 m mais avec des valeurs plus élevées à 40 m où on peut décrire la variation mensuelle de k comme suit : au mois de janvier la valeur de k est approximativement égale à 2.32, elle diminue progressivement pendant les mois de février et mars, augmente au mois d'avril et reste stable pendant les mois de mai, juin et juillet, puis une forte augmentation a lieu pendant les mois d'août et septembre où elle atteint son maximum (2.43), enfin elle diminue ensuite pendant les mois d'octobre et novembre avant d'augmenter à nouveau en décembre pour atteindre une valeur sensiblement égale à celle du mois de janvier.

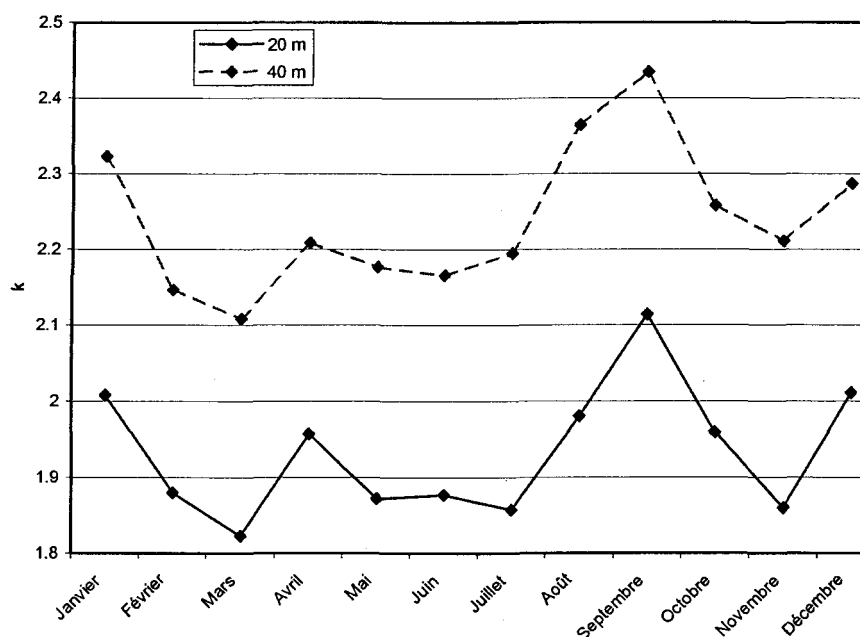


Figure 1.5-7 : Variations mensuelles de k

Variations du paramètre c (facteur d'échelle) de la loi de Weibull

On voit, sur la Figure 1.5-8, que les variations du facteur c sont les mêmes pour les deux hauteurs et sont presque proportionnelles ; ce qui concorde avec la loi de puissance reliant les moyennes de vitesses de vent (voir équation (1.3.39)).

Les résultats montrent la même tendance que ceux obtenus pour la station de Rivière-au-Renard :

- diminution de la valeur de c entre février et juillet (légère hausse en juin seulement avec un minimum en juillet) ;
- augmentation entre les mois de juillet et décembre pour lequel on atteint le maximum ;
- valeur plus faible pour le mois de janvier par rapport aux mois de décembre et février ;

on peut ajouter que la valeur pour le mois de décembre (maximum) est presque une fois et demi plus élevée que la valeur pour le mois de juillet (minimum), ce qui montre bien les différences importantes de vitesses de vent entre les mois.

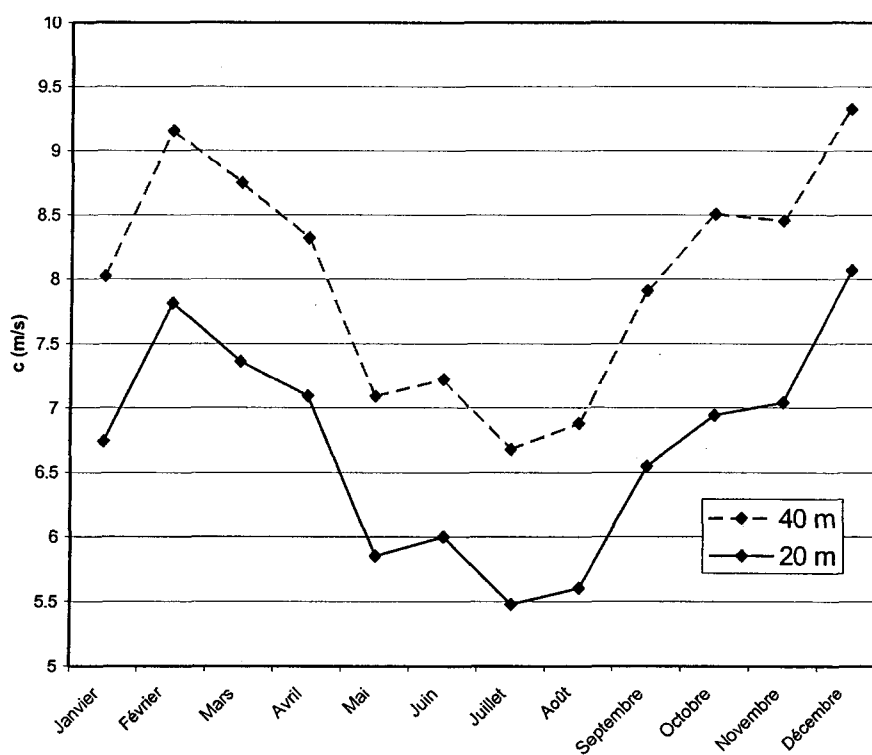


Figure 1.5-8 : Variations mensuelles de c (m/s) à 20 m et à 40 m

Variations de l'intensité de turbulence

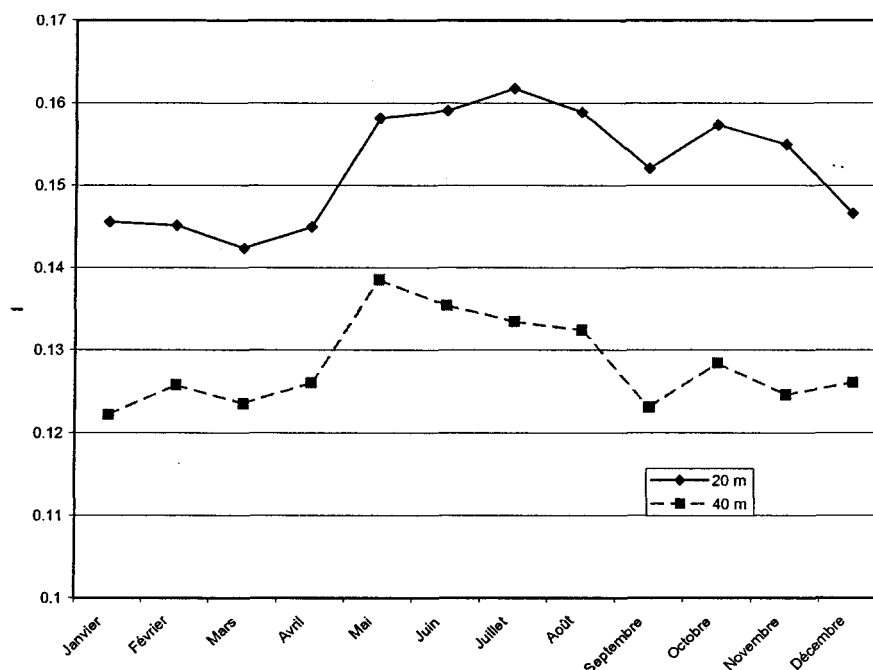


Figure 1.5-9 : Variations mensuelles de l'intensité de turbulence à 20 m et à 40 m

Ici, on retrouve les mêmes résultats que ceux présentés lors de l'analyse par saison : l'intensité de turbulence est plus faible pendant les mois d'hiver et augmente significativement pendant les mois d'été.

L'année peut donc être divisée en deux parties : les mois de mai à août qui ont une intensité de turbulence plus élevée et les mois de septembre à avril pendant lesquels celle-ci est plus faible. On peut aussi remarquer que la valeur de l'intensité de turbulence est plus faible à 40 m qu'à 20 m. Cela confirme la théorie puisque plus l'on s'approche du niveau du sol plus l'importance de la rugosité augmente et donc plus la turbulence a tendance à augmenter. De plus, on peut remarquer que la valeur de l'intensité de turbulence est comprise entre 0,12 et 0,14 à 20 m et entre 0,14 et 0,17 à 40 m : valeurs plus faibles que celle employée dans certains standards qui est de 0,2 [6].

1.5.2.4 Influence de la localisation

Pour l'influence de la localisation, il était important de comparer des valeurs de vitesses de vent pour les mêmes mois de la même année. Les résultats sont donc présentés par phase : la phase III, qui correspond à la période située entre décembre 2000 et mars 2002 et la phase IV qui correspond à la période située entre novembre 2001 et mars 2003. Ces deux phases sont les seules pour lesquelles des données ont été validées. De plus, comme les variations à 20 m et à 40 m sont similaires, seuls les résultats à 40 m sont présentés pour alléger le texte.

Remarque : pour cette section ainsi que pour la suite de la présentation des résultats, la notation « décembre1 » correspond au mois de décembre 2000, « janvier2 » au mois de janvier 2001 et ainsi de suite.

Les différents tableaux (tableaux 1.5-8 à 1.5-13) présentés dans les sections 1.5.2.4 et 1.5.2.5 donnent les écarts relatifs pour chaque station et pour chaque mois par rapport à la moyenne mensuelle calculée. La dernière colonne tableau indique les moyennes annuelles.

L'erreur relative est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\Sigma_{\text{relatif}} = \frac{(\text{Valeur du mois de la station} - \text{Valeur moyenne du mois})}{\text{Valeur moyenne du mois}} * 100 \quad (1.4.1)$$

Variations du paramètre k (facteur d'échelle) de la loi de Weibull

Pour les stations de la phase III, on obtient les résultats présentés sur la Figure 1.5-10 et dans le Tableau 1.5-8.

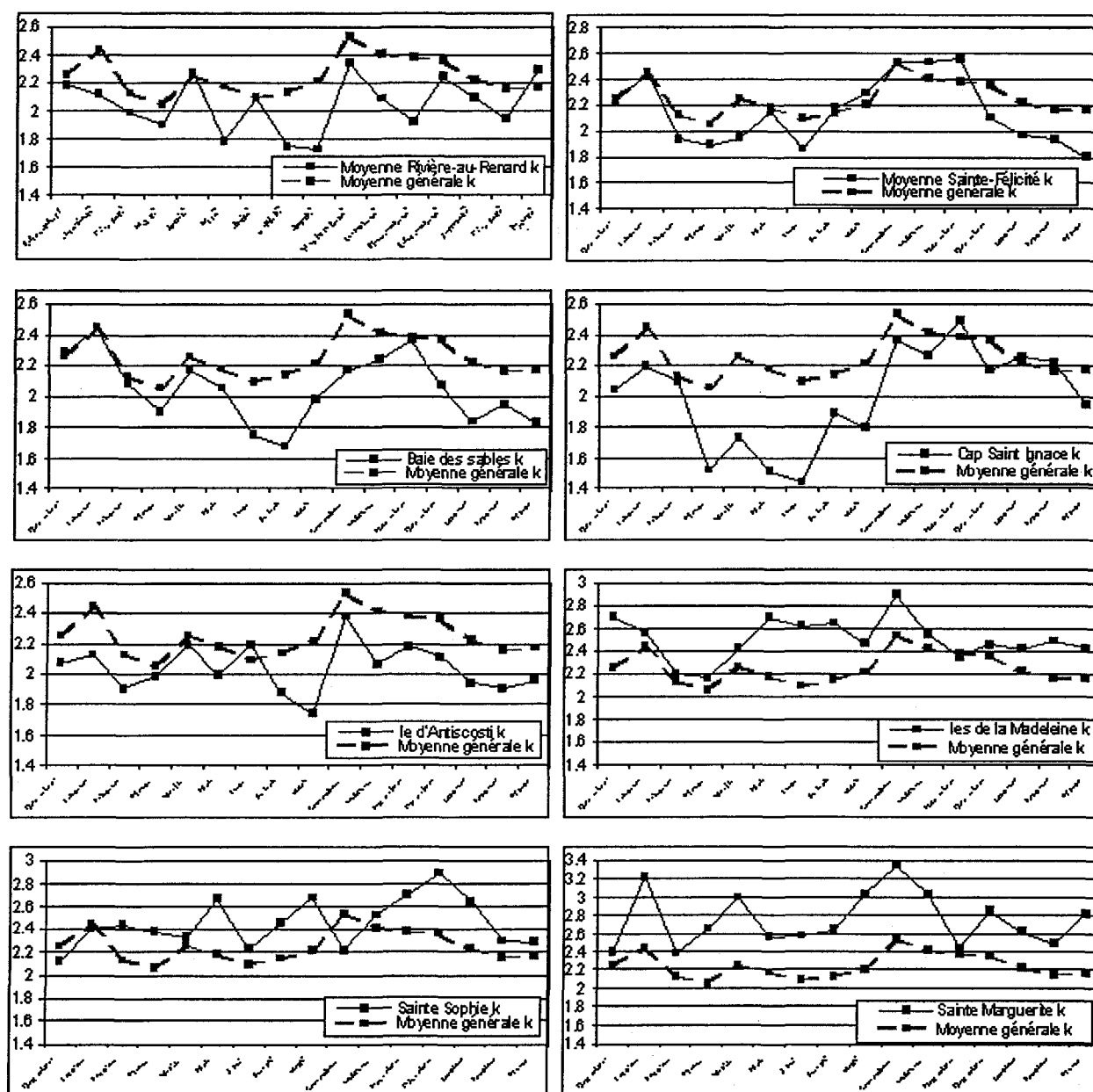


Figure 1.5-10 : Variations de k entre décembre 2000 et mars 2002 à 40 m (phase III)

Seulement trois stations ont des valeurs globalement plus élevées que la moyenne. Ces stations sont : Sainte-Marguerite, Sainte-Sophie et Îles-de-la-Madeleine. Les deux premières, contrairement aux autres, sont des stations qui sont situées à l'intérieur des terres (région de

Causapscal et Saguenay) alors que la troisième est assez particulière puisqu'elle est située sur une île assez éloignée des terres.

On peut alors penser que la valeur du coefficient de forme k est plus élevée pour les stations situées plus dans les terres et qu'elle est aussi globalement plus élevée pour les sites insulaires.

Pour la phase IV, les résultats sont présentés sur la Figure 1.5-11 et dans le Tableau 1.5-9.

Trois stations ont des valeurs globalement au-dessus de la moyenne : Sainte Rita, Saint Athanase et Île d'Anticosti. Les deux premières confirment la conclusion précédente. Quant à la troisième, elle remet en cause le résultat trouvé pour la station de l'île d'Anticosti de la phase III. Cependant, on peut émettre l'hypothèse que les sites insulaires comme les sites éloignés du Saint-Laurent (Fermont, Îles de la Madeleine) possèdent un régime de vent particulier.

De plus, on pourrait ajouter à cette catégorie la station de Canton Power qui, bien qu'en Gaspésie, est située profondément dans les terres mais à une altitude très élevée.

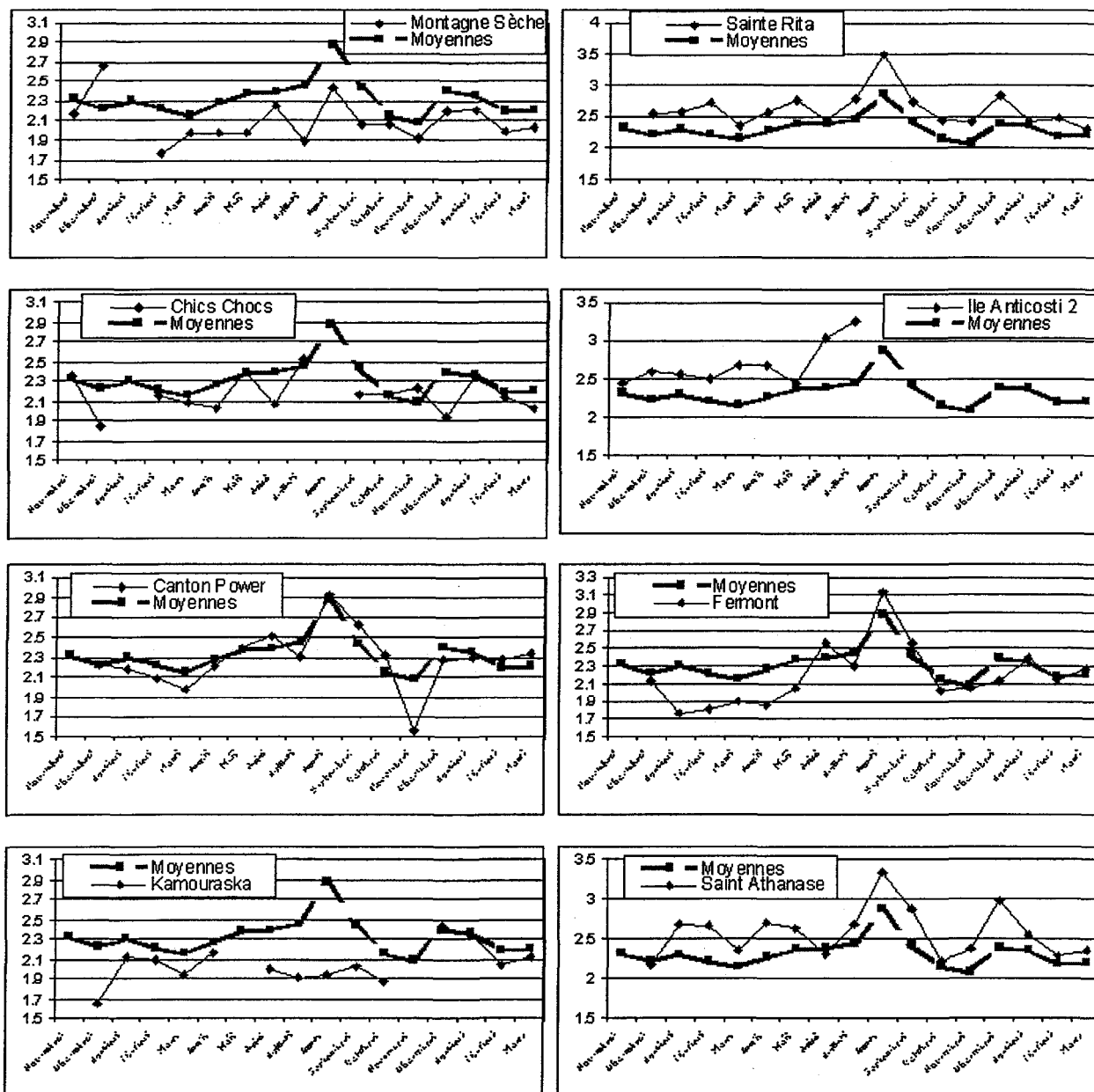


Figure 1.5-11 : Variations de k entre novembre 2001 et mars 2003 à 40 m (phase IV)

Tableau 1.5-8 : Comparaison des écarts relatifs mensuels du facteur k pour chaque station à 40 m lors de la phase III

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.	Moy.
Marquis	2,48	2,05	1,91	1,96	2,15	1,81	2,16	2,68				2,37	2,17
	7,96%	-1,21%	-5,65%	-10,09%	3,30%	-10,90%	5,01%	24,20%				4,67%	1,92%
Gagné	2,62	1,95	2,05	2,03	2,28	2,08	2,28	2,48				2,09	2,21
	14,26%	-5,86%	1,56%	-6,97%	9,49%	2,55%	10,45%	15,10%				-7,60%	3,67%
Desrosiers	2,25	1,81	1,72	1,85	2,01	1,69	2,05	2,14	2,47	2,46		2,21	2,06
	-2,24%	-12,58%	-15,01%	-15,11%	-3,37%	-16,76%	-0,62%	-0,96%	1,93%	5,99%		-2,29%	-5,55%
Sainte Félicité	2,11	2,09	1,89	1,86		1,80	2,23	2,25	2,23	2,22	2,20	2,29	2,11
	-8,33%	0,65%	-6,26%	-14,78%		-11,46%	8,04%	4,19%	-8,12%	-4,35%	-2,87%	1,10%	-3,84%
Bernatchez	1,90	1,85	1,79	2,07	1,66	1,92	1,64	1,58	1,96	1,83	1,98	2,03	1,85
	-17,16%	-10,74%	-11,39%	-5,28%	-20,32%	-5,24%	-20,48%	-26,75%	-19,09%	-20,98%	-12,86%	-10,48%	-15,06%
TV	2,21	2,04	2,13	2,29	1,96	2,22	1,95	2,16	2,47	2,33	2,06	2,13	2,16
	-3,74%	-1,63%	5,70%	5,07%	-5,79%	9,26%	-5,23%	0,12%	1,82%	0,31%	-9,45%	-6,11%	-0,80%
Marinard	1,99	2,01	1,82	2,15	1,65	1,94	1,62	1,55			2,05	2,27	1,90
	-13,46%	-3,25%	-9,81%	-1,32%	-21,01%	-4,57%	-21,36%	-28,36%			-9,47%	0,24%	-11,24%
Martin	2,28	2,03	2,03	2,37	1,89	2,19	1,76	1,71	2,20	2,03		2,25	2,07
	-0,89%	-2,26%	0,62%	8,52%	-9,29%	7,69%	-14,52%	-20,78%	-9,22%	-12,64%		-0,82%	-4,87%
Baie des Sables	2,14	2,01	1,86	2,17	2,05	1,74	1,68	1,97	2,16	2,24	2,36	2,18	2,05
	-6,92%	-3,14%	-7,77%	-0,59%	-1,63%	-14,22%	-18,56%	-8,53%	-10,98%	-3,52%	4,05%	-3,94%	-6,31%
Cap St Ignace	2,22	2,16	1,73	1,85	1,50	1,44	1,89	1,79	2,36	2,26	2,49	2,11	1,98
	-3,33%	3,96%	-14,21%	-14,98%	-27,85%	-29,14%	-8,44%	-17,11%	-2,63%	-2,54%	9,63%	-7,02%	-9,47%
Ile Anticosti 1	2,03	1,90	1,97	2,16	1,99	2,19	1,87	1,74	2,38	2,07	2,18	2,09	2,05
	-11,60%	-8,20%	-2,52%	-0,97%	-4,31%	7,70%	-9,24%	-19,32%	-1,97%	-10,94%	-3,78%	-7,71%	-6,07%
Iles Madeleine	2,49	2,34	2,30	2,41	2,69	2,62	2,64	2,47	2,89	2,55	2,35	2,57	2,53
	8,22%	12,86%	13,67%	10,46%	29,30%	28,99%	27,92%	14,36%	19,27%	9,74%	3,48%	13,55%	15,99%
Sainte Sophie	2,52	2,37	2,33	2,38	2,67	2,22	2,45	2,67	2,22	2,52	2,70	2,50	2,46
	9,91%	14,17%	15,33%	8,94%	28,03%	9,39%	18,70%	23,81%	-8,64%	8,65%	18,79%	10,50%	13,13%
Ste Marguerite	2,92	2,43	2,74	2,99	2,57	2,57	2,65	3,02	3,34	3,02	2,33	2,62	2,77
	27,31%	17,23%	35,75%	37,10%	23,45%	26,71%	28,32%	40,03%	37,64%	30,27%	2,47%	15,92%	26,85%
Moyenne	2,30	2,07	2,02	2,18	2,08	2,03	2,06	2,16	2,43	2,32	2,27	2,26	2,17

Tableau 1.5-9 : Comparaison des écarts relatifs mensuels du facteur k pour chaque station à 40 m lors de la phase IV

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.	Moyenne
Fermont	2,08	1,98	2,09	1,86	2,05	2,56	2,29	3,14	2,56	2,02	2,05	2,13	2,23
	-10,64%	-10,11%	-3,39%	-17,64%	-12,94%	10,70%	-0,85%	9,38%	4,28%	-4,64%	-7,60%	-10,15%	-4,47%
Kamouraska	2,23	2,07	2,03	2,17		2,00	1,91	1,93	2,02	1,87		2,04	2,03
	-4,15%	-5,99%	-6,09%	-3,82%		-13,55%	-17,50%	-32,56%	-17,63%	-11,85%		-13,80%	-12,69%
Saint Athanase	2,62	2,48	2,36	2,71	2,65	2,31	2,68	3,35	2,88	2,23	2,38	2,58	2,60
	12,58%	12,91%	9,30%	20,32%	12,30%	-0,09%	16,04%	16,62%	17,45%	5,19%	7,01%	8,58%	11,52%
Montagne Sèche	2,21	1,87	2,00	1,98	1,97	2,24	1,89	2,43	2,06	2,06	2,04	2,42	2,10
	-4,76%	-14,81%	-7,28%	-12,33%	-16,28%	-2,87%	-18,22%	-15,39%	-16,09%	-3,12%	-8,18%	2,22%	-9,76%
Sainte Rita	2,49	2,59	2,32	2,56	2,75	2,44	2,79	3,50	2,75	2,43	2,41	2,68	2,64
	6,96%	18,00%	7,45%	13,48%	16,92%	5,80%	20,54%	21,94%	12,00%	14,41%	8,77%	13,15%	13,29%
Chics Chocs	2,36	2,14	2,05	2,03	2,40	2,06	2,52		2,16	2,16	2,30	1,89	2,19
	1,72%	-2,66%	-5,06%	-10,18%	1,89%	-10,83%	8,85%		-11,76%	1,99%	3,41%	-20,37%	-3,91%
Ile Anticosti 2	2,55	2,50	2,68	2,68	2,45	3,04	3,25				2,45	2,59	2,69
	9,63%	13,76%	24,08%	18,66%	4,13%	31,37%	40,57%				10,52%	9,32%	18,00%
Canton Power	2,24	2,18	2,16	2,21	2,39	2,51	2,30	2,92	2,62	2,32	1,56	2,25	2,31
	-3,48%	-0,64%	-0,06%	-1,80%	1,25%	8,74%	-0,45%	1,90%	6,84%	9,48%	-29,84%	-5,10%	-1,10%
Moyenne	2,32	2,20	2,16	2,26	2,36	2,31	2,31	2,87	2,45	2,12	2,22	2,37	2,32

Variations du paramètre c (facteur d'échelle) de la loi de Weibull

Les résultats obtenus pour la phase III sont présentés par la Figure 1.5-12 et le Tableau 1.5-10.

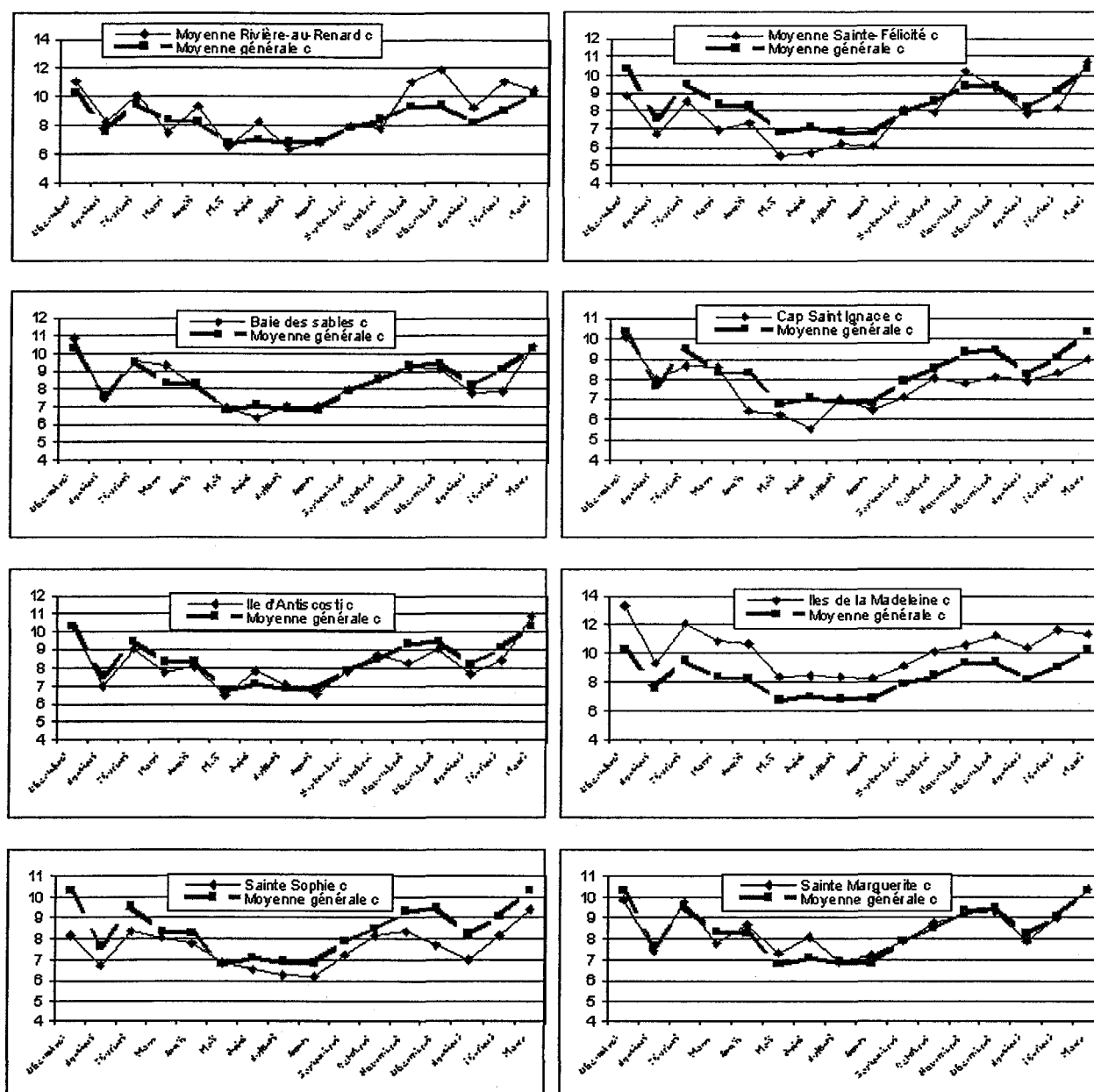


Figure 1.5-12 : Variations de c entre décembre 2000 et mars 2002 à 40 m (phase III)

Pour cette phase, seule la station des Îles de la Madeleine a des valeurs toujours supérieures à la moyenne. On peut conclure que cette station insulaire bénéficie d'un très bon régime de vent. Par contre, les stations de Sainte Sophie et Cap Saint Ignace ont des valeurs souvent plus faibles que la moyenne. Effectivement, ce sont des stations qui ne sont pas situées dans des régions réputées pour avoir un fort potentiel éolien. Par ailleurs, on peut aussi remarquer que, quelle que soit la station, les variations du vent suivent la même évolution mais avec des amplitudes différentes.

Pour la phase IV (Figure 1.5-13 et Tableau 1.5-11), seule la station de Fermont a des valeurs au-dessus de la moyenne pour une majeure partie de la période. Cette station semble donc avoir un régime de vent différent des autres et cela est certainement dû à sa localisation. En effet, elle ne se situe pas proche du golfe du Saint-Laurent mais bien plus au nord. Ce qui confirme la conclusion émise avec les résultats des stations de la phase III sur les tendances de variation qui sont les mêmes pour toutes les stations du Golfe du Saint-Laurent.

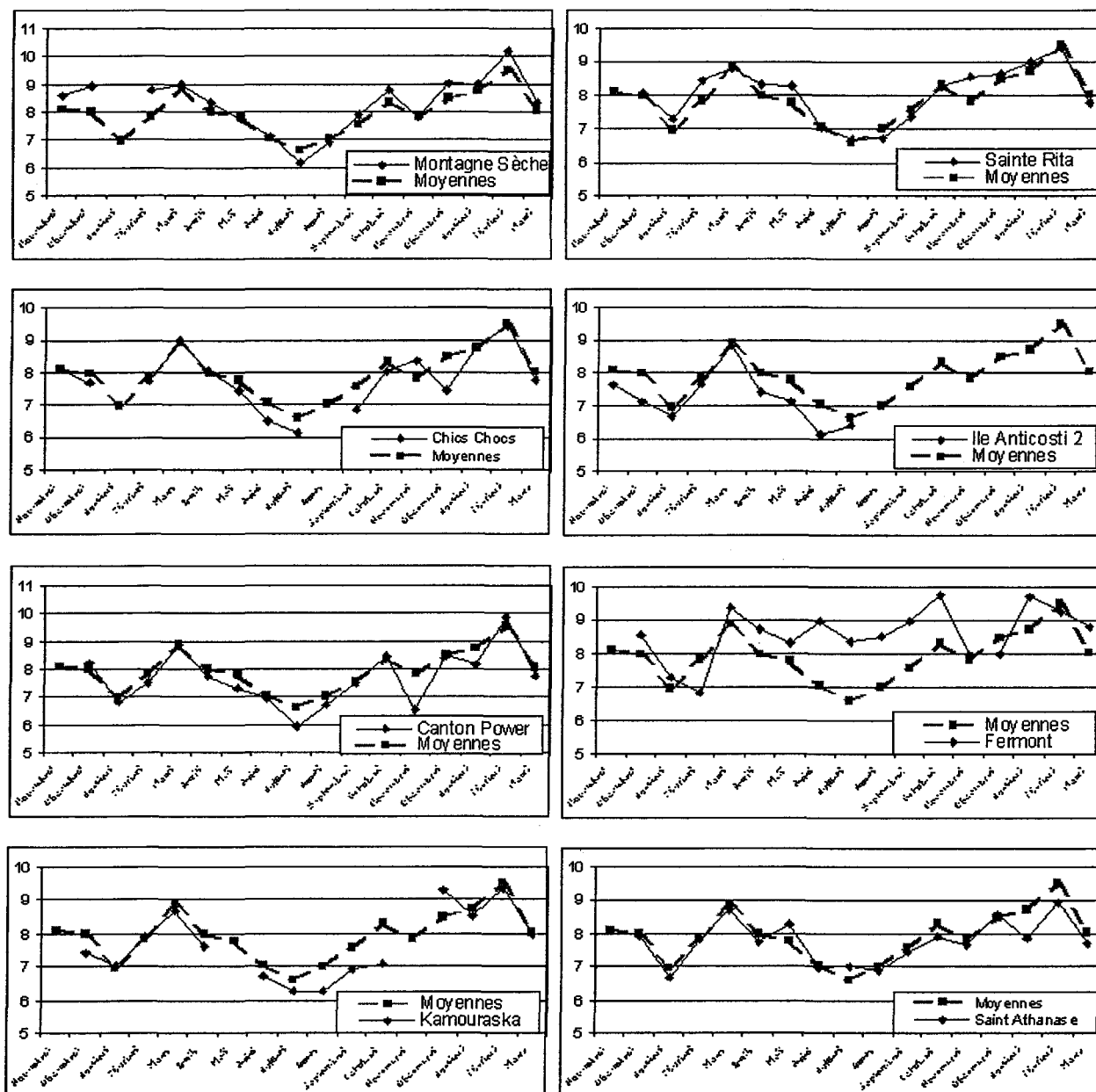


Figure 1.5-13 : Variations de c entre novembre 2001 et mars 2003 à 40 m (phase IV)

Tableau 1.5-10 : Comparaison des écarts relatifs mensuels du facteur c pour chaque station à 40 m lors de la phase III

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.	Moy.
Marquis	7,86	9,77	7,89	8,20	6,33	6,28	6,80	8,66				10,04	7,98
	0,21%	4,49%	-5,61%	-1,85%	-4,11%	-11,65%	2,54%	25,84%				1,53%	1,27%
Gagné	5,63	7,26	5,82	6,62	4,99	5,36	5,17	5,47				7,51	5,98
	-28,31%	-22,31%	-30,38%	-20,79%	-24,38%	-24,57%	-22,00%	-20,50%				-24,04%	-24,14%
Desrosiers	6,60	8,47	7,01	7,04	5,18	5,28	5,66	5,89	7,18	7,16		9,04	6,77
	-15,94%	-9,35%	-16,14%	-15,76%	-21,56%	-25,74%	-14,65%	-14,44%	-8,79%	-14,95%		-8,58%	-15,08%
Sainte Félicité	8,83	9,52	8,11	6,89		7,04	6,82	7,06	7,88	8,93	9,58	9,53	8,20
	12,55%	1,91%	-3,02%	-17,57%		-1,05%	2,86%	2,60%	0,05%	6,06%	11,28%	-3,60%	1,10%
Bernatchez	8,41	10,40	7,49	9,52	6,34	8,15	6,29	6,67	7,68	7,26	7,39	11,33	8,08
	7,16%	11,31%	-10,47%	13,92%	-4,03%	14,65%	-5,03%	-3,14%	-2,53%	-13,79%	-14,19%	14,62%	0,71%
TV	9,91	11,44	9,65	10,30	8,50	9,27	7,71	8,39	9,88	10,35	9,82	12,15	9,78
	26,25%	22,41%	15,48%	23,27%	28,66%	30,32%	16,38%	21,92%	25,45%	22,92%	14,04%	22,83%	22,49%
Marinard	8,04	10,03	7,51	9,17	6,45	8,39	6,17	6,49			7,19	10,87	8,03
	2,39%	7,30%	-10,20%	9,81%	-2,36%	17,97%	-6,87%	-5,69%			-16,46%	9,96%	0,59%
Martin	7,32	8,51	6,71	8,14	5,90	6,99	5,57	6,04	6,72	6,54		9,40	7,08
	-6,72%	-8,92%	-19,73%	-2,61%	-10,66%	-1,69%	-16,03%	-12,30%	-14,66%	-22,33%		-4,96%	-10,97%
Baie des Sables	7,63	8,70	9,84	8,18	6,93	6,41	6,97	6,98	8,02	8,62	9,21	10,01	8,13
	-2,76%	-6,88%	17,74%	-2,03%	5,01%	-9,87%	5,24%	1,44%	1,79%	2,36%	6,94%	1,18%	1,68%
Cap St Ignace	7,94	8,48	8,79	7,34	6,25	5,52	7,03	6,49	7,12	8,06	7,75	9,07	7,49
	1,17%	-9,32%	5,09%	-12,16%	-5,34%	-22,41%	6,03%	-5,71%	-9,61%	-4,22%	-9,92%	-8,29%	-6,22%
Ile Anticosti 1	7,32	8,75	9,29	8,39	6,45	7,79	7,03	6,52	7,85	8,69	8,25	9,69	8,00
	-6,78%	-6,39%	11,10%	0,48%	-2,25%	9,60%	6,07%	-5,28%	-0,38%	3,24%	-4,11%	-2,04%	0,27%
Iles Madeleine	9,85	11,88	11,12	10,67	8,36	8,46	8,41	8,26	9,16	10,09	10,61	12,27	9,93
	25,49%	27,08%	33,00%	27,72%	26,63%	18,91%	26,84%	19,98%	16,29%	19,86%	23,22%	24,06%	24,09%
Sainte Sophie	6,86	8,25	8,74	7,82	6,84	6,51	6,24	6,20	7,24	8,17	8,35	7,94	7,43
	-12,64%	-11,75%	4,58%	-6,42%	3,56%	-8,44%	-5,87%	-9,93%	-8,06%	-2,99%	-3,02%	-19,70%	-6,73%
Ste Marguerite	7,69	9,39	9,08	8,69	7,32	8,11	6,93	7,24	7,91	8,74	7,94	9,59	8,22
	-2,05%	0,43%	8,55%	4,00%	10,84%	13,97%	4,49%	5,23%	0,46%	3,84%	-7,78%	-2,99%	3,25%
Moyenne	7,85	9,35	8,36	8,35	6,60	7,11	6,63	6,88	7,88	8,42	8,61	9,89	7,93

Tableau 1.5-11 : Comparaison des écarts relatifs mensuels du facteur c pour chaque station à 40 m lors de la phase IV

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.	Moyenne
Fermont	8,51	8,06	9,09	8,72	8,33	8,98	8,35	8,53	8,96	9,74	7,99	8,29	8,63
	4,50%	-7,33%	6,67%	6,99%	2,04%	21,91%	21,07%	20,83%	16,07%	16,48%	-1,45%	-1,88%	8,83%
Kamouraska	7,77	8,62	8,34	7,64		6,70	6,26	6,27	6,91	7,08		8,36	7,40
	-4,59%	-0,89%	-2,17%	-6,27%		-8,95%	-9,21%	-11,13%	-10,51%	-15,29%		-1,03%	-7,01%
Saint Athanase	7,28	8,39	8,21	7,74	8,30	6,98	7,02	6,87	7,46	7,92	7,67	8,25	7,67
	-10,63%	-3,58%	-3,65%	-5,06%	1,68%	-5,20%	1,89%	-2,66%	-3,46%	-5,22%	-5,40%	-2,36%	-3,64%
Montagne Sèche	8,99	9,48	8,67	8,34	7,74	7,11	6,16	6,91	7,91	8,78	8,19	8,97	8,11
	10,38%	9,03%	1,70%	2,35%	-5,17%	-3,42%	-10,62%	-2,09%	2,49%	5,07%	1,09%	6,24%	1,42%
Sainte Rita	8,17	8,94	8,31	8,31	8,28	7,04	6,68	6,71	7,37	8,27	8,57	8,37	7,92
	0,34%	2,78%	-2,56%	1,98%	1,45%	-4,34%	-3,13%	-4,95%	-4,58%	-1,03%	5,76%	-0,96%	-0,77%
Chics Chocs	8,80	8,59	8,38	8,05	7,42	6,50	6,15		6,86	8,02	8,23	7,56	7,69
	8,07%	-1,22%	-1,67%	-1,15%	-9,02%	-11,75%	-10,80%		-11,19%	-4,07%	1,56%	-10,49%	-4,70%
Ile Anticosti 2	6,65	7,68	8,85	7,43	7,12	6,14	6,41				7,62	7,14	7,23
	-18,32%	-11,75%	3,79%	-8,84%	-12,68%	-16,54%	-7,07%				-5,97%	-15,53%	-10,32%
Canton Power	7,49	8,69	8,31	7,75	7,33	6,98	5,92	6,72	7,49	8,43	6,51	8,36	7,50
	-8,05%	-0,16%	-2,45%	-4,95%	-10,15%	-5,19%	-14,19%	-4,75%	-3,01%	0,80%	-19,68%	-1,01%	-6,07%
Moyenne	8,14	8,70	8,52	8,15	8,16	7,36	6,89	7,06	7,72	8,36	8,10	8,45	7,94

Variations de l'intensité de turbulence

Contrairement aux paramètres de la loi de Weibull, les conclusions sont difficiles à tirer sur l'influence de la localisation sur l'intensité de turbulence, à l'aide des résultats présentés ci-dessous.

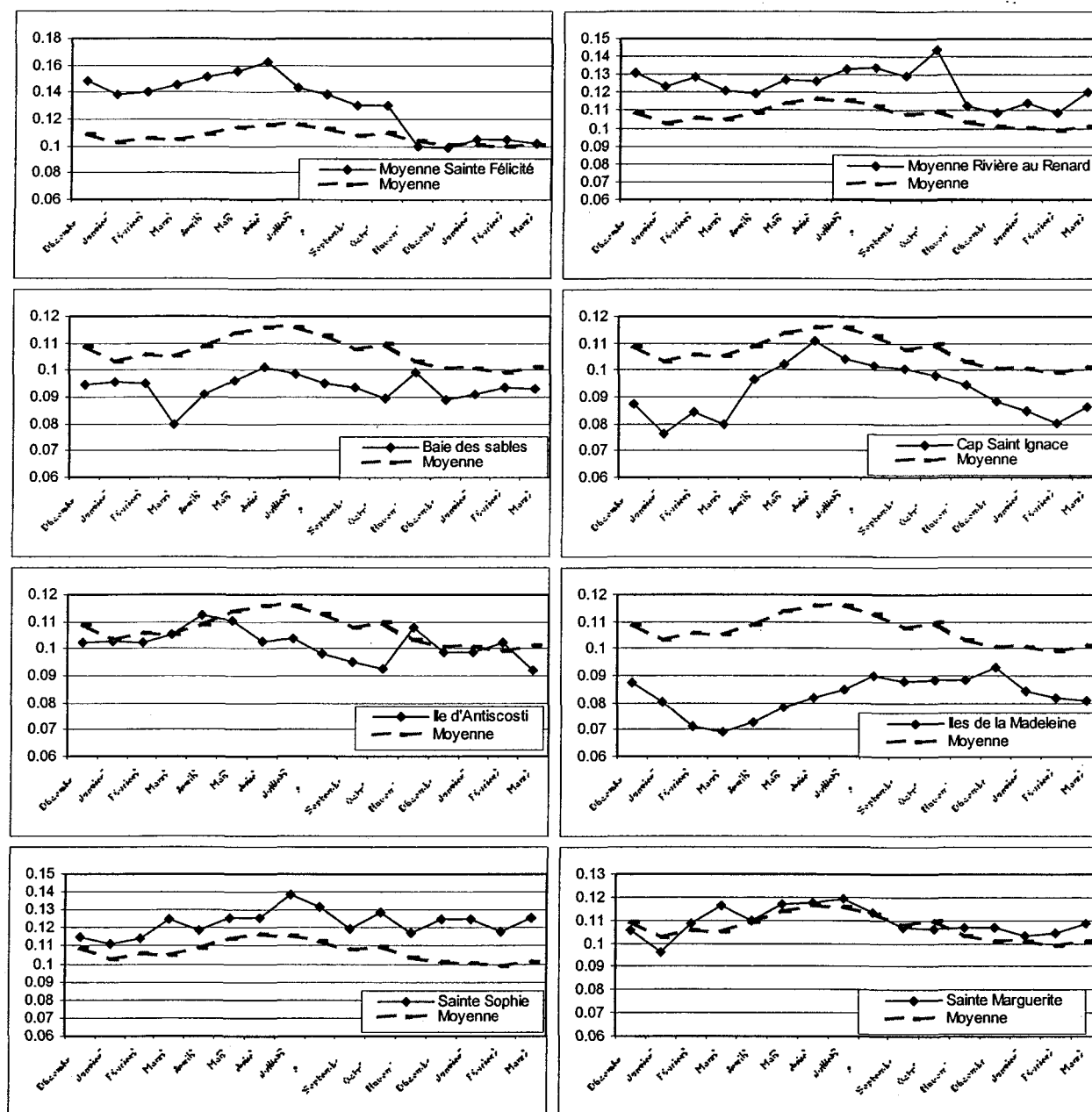


Figure 1.5-14 : Variations de l'intensité de turbulence entre décembre 2000 et mars 2002 à 40 m (phase III)

Cependant, on peut conclure que :

- les sites insulaires (Îles de la Madeleine, Île d'Anticosti) ainsi que les sites côtiers (Baie des Sables, Cap Saint Ignace) ont une intensité de turbulence globalement plus faible que la moyenne. Les Îles de la Madeleine ont la plus faible valeur d'intensité de turbulence avec une moyenne de 0,08, environ 30% en dessous de la moyenne ;
- les sites des régions de Sainte-Félicité et Rivière-au-Renard donnent des résultats plus élevés que la moyenne. Ils sont détaillés plus loin (page 91 et page 95).

Tableau 1.5-12 : Comparaison des écarts relatifs mensuels de l'intensité de turbulence à 40 m pour chaque station lors de la phase III

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.	Moy.
Marquis	0,10	0,10	0,11	0,12	0,12	0,13	0,12	0,11				0,11	0,11
	-9,74%	-11,23%	-4,51%	-0,04%	-0,21%	0,70%	-6,56%	-13,44%				-7,16%	-5,80%
Gagné	0,16	0,18	0,18	0,18	0,18	0,19	0,18	0,17				0,19	0,18
	42,55%	51,06%	56,35%	55,51%	45,28%	56,11%	44,36%	41,99%				55,82%	49,89%
Desrosiers	0,15	0,14	0,15	0,16	0,16	0,17	0,17	0,16	0,16	0,16		0,15	0,16
	31,85%	23,59%	26,84%	34,54%	32,58%	35,27%	33,47%	33,33%	41,09%	36,36%		26,84%	32,34%
Sainte Félicité	0,10	0,10	0,10	0,10		0,10	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
	-11,49%	-12,43%	-11,17%	-14,05%		-15,98%	-12,08%	-11,75%	-10,96%	-15,84%	-3,01%	-18,99%	-12,52%
Bernatchez	0,12	0,12	0,12	0,11	0,13	0,13	0,14	0,14	0,13	0,14	0,12	0,12	0,13
	3,62%	3,16%	6,14%	-2,46%	8,94%	2,31%	10,35%	15,96%	12,35%	20,95%	11,10%	3,13%	7,96%
TV	0,11	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,12	0,11	0,11	0,11
	1,00%	2,74%	3,27%	-5,02%	-7,50%	-10,40%	-8,61%	-9,16%	-8,36%	1,81%	10,54%	-4,53%	-2,85%
Marinard	0,11	0,12	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,12			0,09	0,12	0,11
	-0,24%	1,18%	-14,74%	-10,46%	-19,13%	-19,28%	-8,67%	-2,39%			-9,89%	-0,08%	-8,37%
Martin	0,16	0,17	0,15	0,15	0,16	0,17	0,16	0,16	0,16	0,17		0,17	0,16
	37,49%	44,05%	33,00%	32,72%	29,94%	35,94%	30,89%	31,65%	36,73%	47,51%		43,44%	36,67%
Baie des Sables	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09	0,09
	-17,98%	-18,60%	-24,89%	-21,81%	-22,12%	-18,63%	-21,46%	-22,50%	-17,87%	-24,42%	-4,62%	-22,90%	-19,82%
Cap St Ignace	0,08	0,08	0,08	0,09	0,10	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09
	-29,13%	-29,11%	-27,69%	-21,80%	-17,34%	-10,66%	-17,21%	-17,00%	-11,74%	-17,27%	-9,03%	-26,18%	-19,52%
Ile Anticosti 1	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,11	0,10	0,10
	-11,59%	-11,79%	-14,31%	-9,90%	-10,69%	-17,30%	-17,57%	-20,01%	-16,80%	-21,97%	3,83%	-15,57%	-13,64%
Iles Madeleine	0,08	0,08	0,08	0,07	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08
	-27,58%	-34,14%	-34,83%	-37,46%	-36,44%	-33,95%	-32,59%	-26,74%	-22,89%	-25,46%	-14,70%	-24,21%	-29,25%
Sainte Sophie	0,12	0,12	0,13	0,12	0,13	0,13	0,14	0,13	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12
	3,63%	-0,21%	8,71%	5,58%	1,85%	1,26%	10,56%	7,32%	4,65%	8,60%	12,95%	1,03%	5,50%
Ste Marguerite	0,10	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
	-12,39%	-8,26%	-2,18%	-5,34%	-5,16%	-5,39%	-4,87%	-7,27%	-6,18%	-10,26%	2,82%	-10,63%	-6,26%
Moyenne	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,12	0,11	0,12	0,10	0,12	0,12

Les résultats de la phase IV (Figure 1.5-16 et Tableau 1.5-13) ne permettent pas de confirmer les conclusions présentées suite à l'analyse des résultats de la phase III. En effet, :

- le site de l'Île d'Anticosti présente des valeurs d'intensité de turbulence très élevées (moyenne de 0,21, 41% plus élevé que la moyenne). Cependant, cette station, contrairement à la station Île d'Anticosti 1 de la phase III, est placée bien plus à l'intérieur des terres comme le montre la Figure 1.5-15.
- bien que côtier, le site de Kamouraska présente des résultats bien en dessous de la moyenne (34% plus faible) ;
- le site de Fermont présente des valeurs moins élevées de 7% par rapport à la moyenne.

Ainsi, la localisation semble avoir moins d'influence sur l'intensité de turbulence que ce qui était attendu. Bien que les sites côtiers et particulièrement les sites insulaires semblent susceptibles d'avoir une intensité de turbulence plus faible, la position de la tour de mesure sur le site, la rugosité ainsi que la direction des vents paraissent avoir une grande importance dans la valeur de cette intensité. L'analyse topographique permet de présenter des résultats confirmant cette hypothèse.

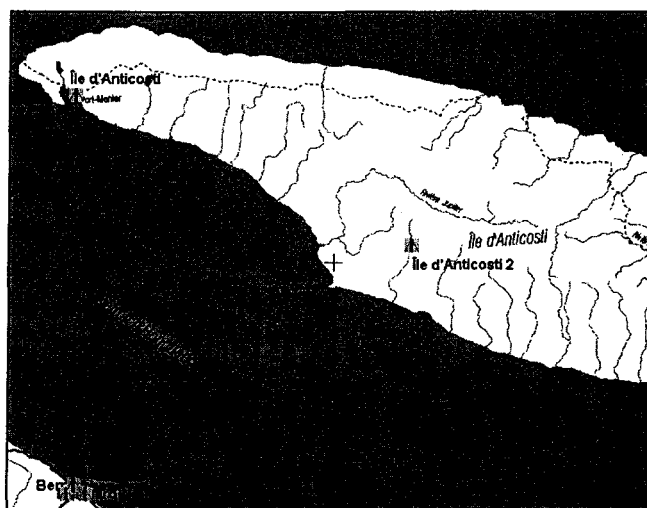


Figure 1.5-15 : Position des stations sur l'Île d'Anticosti

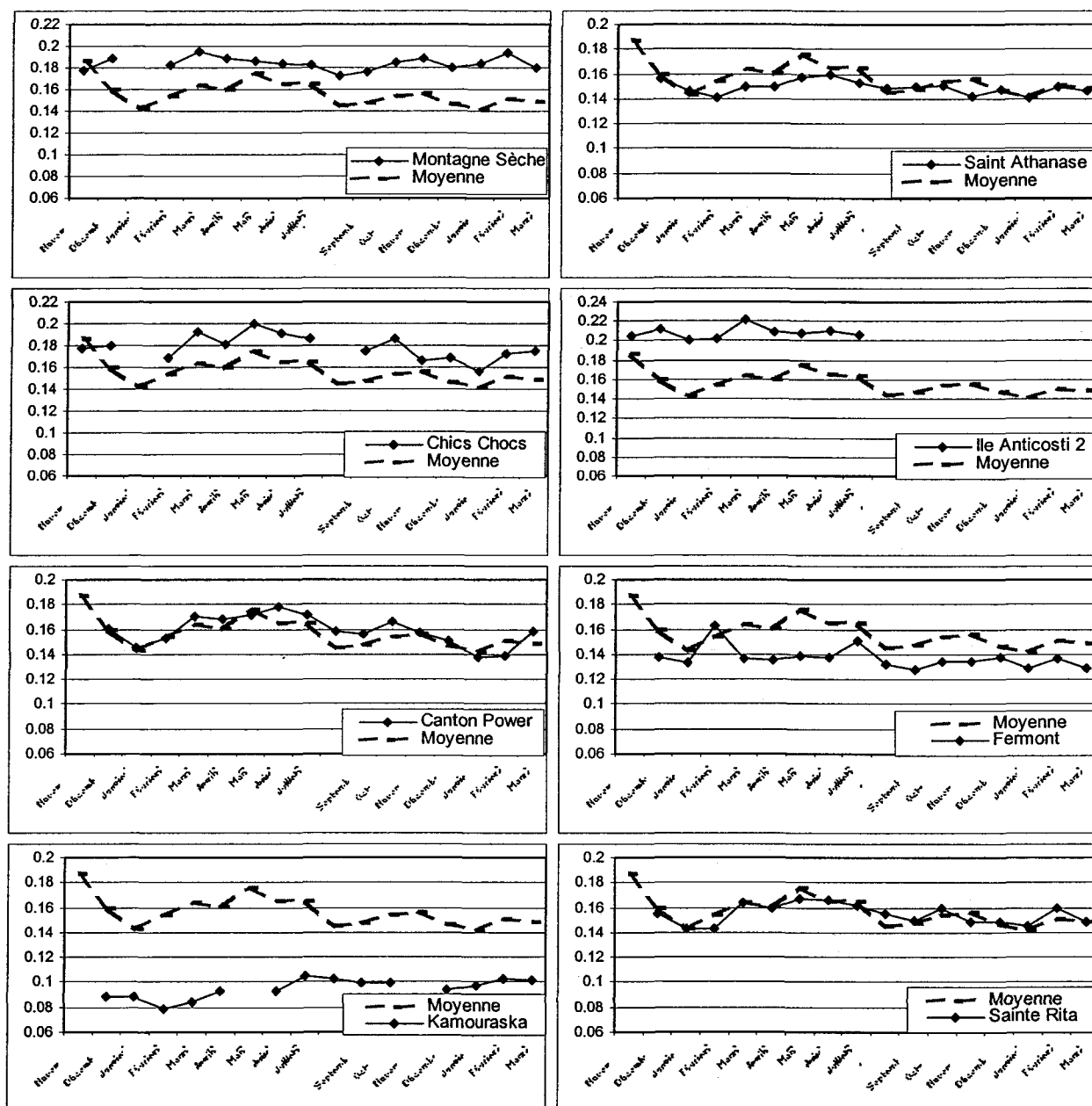


Figure 1.5-16 : Variations de l'intensité de turbulence entre novembre 2001 et mars 2003 à 40 m (phase IV)

Tableau 1.5-13 : Comparaison des écarts relatifs mensuels de l'intensité de turbulence à 40 m pour chaque station lors de la phase IV

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.	Moyenne
Fermont	0,13	0,15	0,13	0,14	0,14	0,14	0,15	0,13	0,13	0,13	0,13	0,14	0,14
	-5,76%	3,49%	-7,39%	-7,01%	-14,55%	-6,80%	-0,03%	-7,11%	-9,14%	-8,15%	-11,20%	-4,14%	-6,48%
Kamouraska	0,09	0,09	0,09	0,09		0,09	0,10	0,10	0,10	0,10		0,09	0,10
	-33,13%	-37,35%	-35,20%	-36,34%		-37,37%	-30,41%	-27,86%	-29,56%	-31,71%		-36,25%	-33,52%
Saint Athanase	0,14	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14	0,15	0,15
	3,43%	0,04%	3,16%	3,26%	-3,40%	7,67%	1,75%	4,77%	6,46%	3,82%	-6,82%	5,77%	2,49%
Montagne Sèche	0,18	0,19	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
	31,61%	29,52%	30,44%	30,17%	14,85%	24,49%	21,51%	21,06%	25,52%	26,54%	20,20%	28,65%	25,38%
Sainte Rita	0,14	0,15	0,16	0,16	0,17	0,17	0,16	0,16	0,15	0,16	0,15	0,15	0,16
	3,85%	4,30%	8,98%	9,92%	3,10%	12,01%	7,19%	9,14%	6,72%	9,51%	-2,17%	5,97%	6,54%
Chics Chocs	0,16	0,17	0,18	0,18	0,20	0,19	0,19		0,18	0,19	0,17	0,17	0,18
	12,57%	17,89%	27,90%	24,64%	22,78%	29,51%	23,65%		24,90%	27,43%	13,26%	21,56%	22,37%
Ile Anticosti 2	0,20	0,20	0,22	0,21	0,21	0,21	0,21				0,20	0,21	0,21
	43,84%	39,01%	54,26%	43,51%	27,87%	42,49%	36,98%				34,82%	47,41%	41,13%
Canton Power	0,14	0,15	0,16	0,17	0,17	0,18	0,17	0,16	0,16	0,17	0,16	0,16	0,16
	1,74%	0,71%	14,53%	15,98%	5,37%	20,41%	14,06%	11,27%	11,52%	13,95%	3,56%	8,17%	10,11%
Moyenne	0,14	0,15	0,14	0,15	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14	0,15	0,15	0,14	0,14

1.5.2.5 Influence de la topographie

Pour étudier l'influence de la topographie, il est nécessaire que les stations comparées soient situées dans un rayon très réduit (distance entre chaque station inférieure à 10 km) afin de pouvoir considérer de manière réaliste qu'elles sont soumises aux mêmes conditions de vent. Dans ce cas, seules les stations situées autour des villes de Rivière-au-Renard et de Sainte-Félicité répondent à ces critères. Ci-dessous sont présentées les cartes de ces deux zones ainsi que les tableaux donnant les distances entre les stations de mesure.

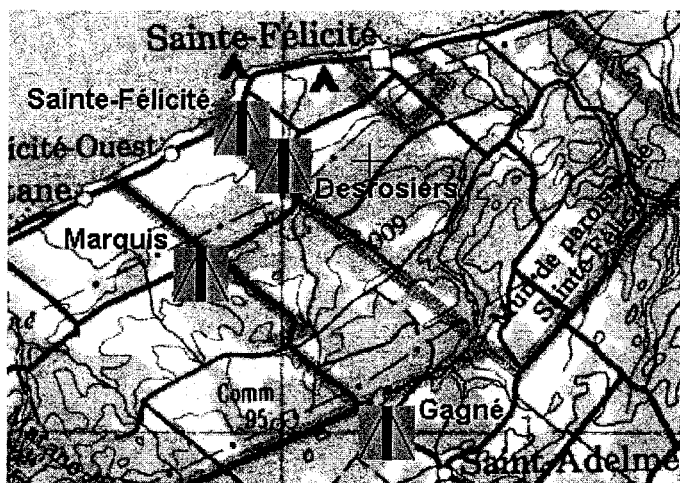


Figure 1.5-17 : Carte de la région de Sainte-Félicité

Les quatre stations de la région de Sainte-Félicité sont : Sainte-Félicité, Desrosiers, Marquis et Gagné. Les distances relatives entre celles-ci sont présentées dans le Tableau 1.5-14.

Tableau 1.5-14 : Tableau des distances pour la région de Sainte-Félicité

Villes	Distance en km
Sainte-Félicité – Desrosiers	1,1
Sainte-Félicité – Gagné	6,9
Sainte-Félicité – Marquis	3,1
Desrosiers – Gagné	5,9
Desrosiers – Marquis	2,8
Gagné – Marquis	5

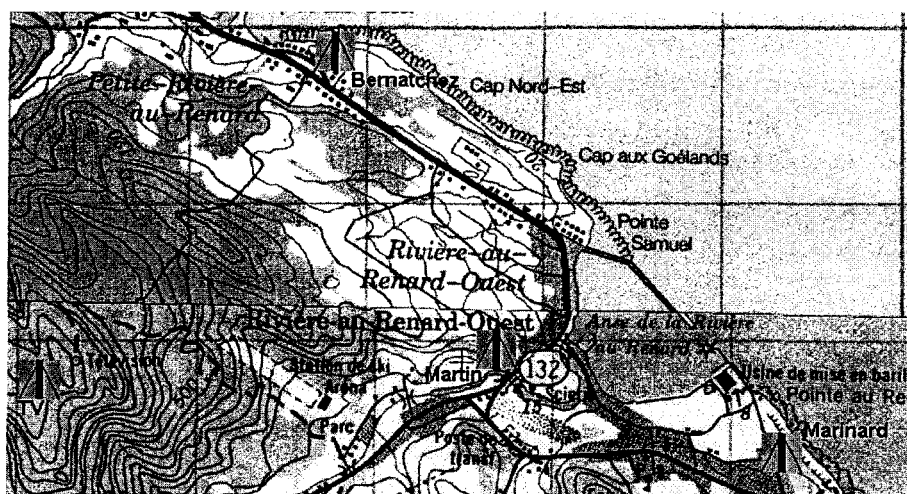


Figure 1.5-18 : Carte de la région de Rivière-au-Renard

Les quatre stations de la région de Rivière-au-Renard sont : Bernatchez, Martin, TV et Marinard. Les distances relatives entre celles-ci sont présentées dans le Tableau 1.5-15.

Tableau 1.5-15 : Tableau des distances pour la région de Rivière-au-Renard

Villes	Distance en km
Bernatchez – Martin	2
Bernatchez – TV	2,5
Bernatchez – Marinard	3,4
Martin – TV	2,5
Martin – Marinard	1,7
Marinard – TV	4,2

De plus, pour la comparaison, il est nécessaire de prendre les valeurs obtenues pour les mêmes dates même si cela réduit considérablement le nombre de valeurs, puisque les périodes de mesures sur les différentes stations ne correspondent pas forcément.

Dans la région de Sainte-Félicité, les stations Gagné, Marquis et Desrosiers peuvent donc être comparées entre les mois de décembre 2000 (décembre¹) et de juillet 2001 (juillet²). Par contre, on ne peut comparer les quatre stations (Gagné, Marquis, Desrosiers et Sainte-Félicité) que pour le mois de juillet 2001. On peut ensuite comparer trois stations pour le mois d'août 2001 (Gagné,

Desrosiers et Sainte-Félicité) et pour le mois de septembre 2001 (Marquis, Desrosiers et Sainte-Félicité) et enfin deux pour le mois d'octobre de la même année (Desrosiers et Sainte-Félicité).

Dans la région de Rivière-au-Renard, les données de toutes les stations peuvent être comparées entre les mois de décembre 2000 (novembre 1) et d'août 2001 (octobre2) car pour le mois de novembre 2000, il n'y a pas de données pour la station Martin, et pour les mois de septembre et octobre 2001, il n'y a pas de données pour la station Marinard.

Variation du paramètre k (facteur d'échelle) de la loi de Weibull

➤ Région de Sainte-Félicité

On peut remarquer, à l'aide des figures 1.5-19 et 1.5-20, que pour la majorité des cas, la valeur de k est plus élevée pour la station Gagné, la plus éloignée du fleuve et située à la plus haute altitude, et moins élevée pour la station Desrosiers, la plus proche du fleuve et située à la plus basse altitude.

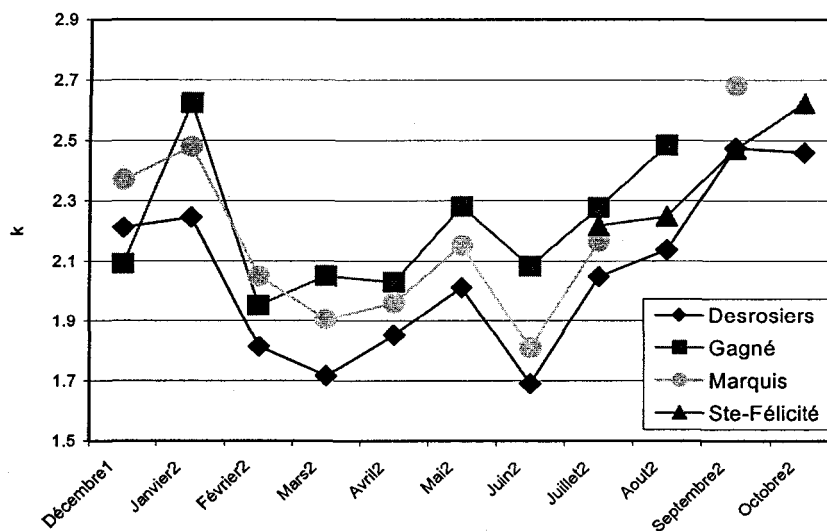


Figure 1.5-19 : Comparaison des variations de k à 40 m pour la région de Sainte-Félicité

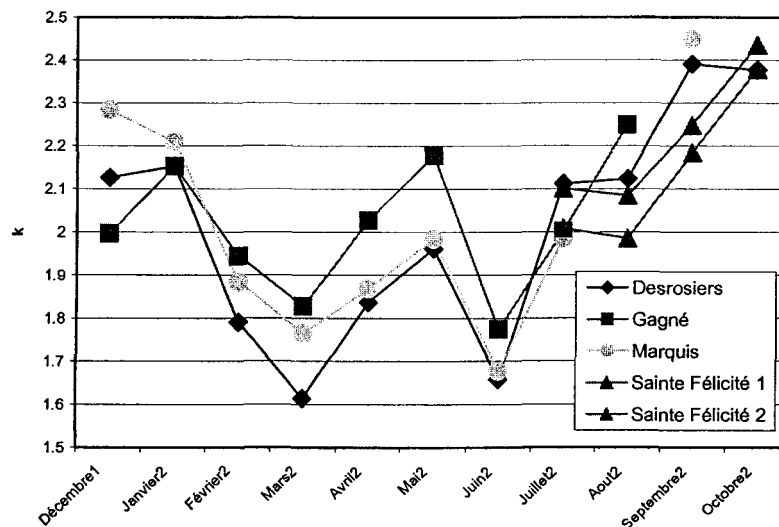


Figure 1.5-20 : Comparaison des variations de k à 20 m pour la région de Sainte-Félicité

L'éloignement du fleuve avec l'augmentation de l'altitude semble donc avoir comme impact une augmentation de la valeur de k.

De manière générale, on remarque une assez bonne corrélation : entre les valeurs des différentes stations et entre les données à 20 m et celles à 40 m (Figure 1.5-21).

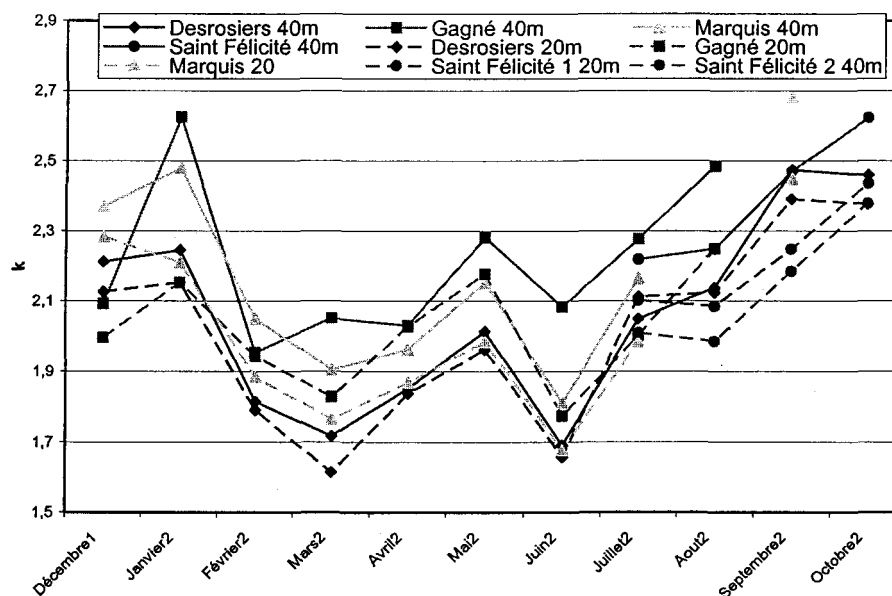


Figure 1.5-21 : Comparaison de la valeur de k à 20 m et à 40 m pour la région de Sainte-Félicité

Tableau 1.5-16 : Comparaison des écarts relatifs mensuels du facteur k pour les stations de la région de Sainte-Félicité à 20 m

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.	Moyenne
Marquis	2,21	1,88	1,76	1,87	1,98	1,68	1,98	2,45				2,28	2,01
	2,95%	-1,63%	1,27%	-0,64%	-2,81%	-2,31%	-3,45%	10,27%				6,89%	1,17%
Gagné	2,15	1,94	1,83	2,03	2,18	1,77	2,00	2,25				2,00	2,02
	0,33%	1,48%	4,88%	7,79%	6,69%	3,35%	-2,65%	1,28%				-6,59%	1,84%
Desrosiers	2,15	1,79	1,61	1,84	1,96	1,66	2,11	2,12	2,39	2,38		2,13	2,01
	0,36%	-6,51%	-7,38%	-2,33%	-3,89%	-3,44%	2,75%	-4,36%	6,45%	6,38%		-0,48%	-1,13%
Sainte Félicité	2,07	2,04	1,76	1,79		1,76	2,12	2,06	2,10	2,09	2,08	2,14	2,00
	-3,64%	6,66%	1,22%	-4,82%		2,40%	3,36%	-7,19%	-6,45%	-6,38%	0,00%	0,18%	-1,33%
Moyenne	2,15	1,92	1,74	1,88	2,04	1,72	2,06	2,22	2,25	2,23	2,08	2,14	2,03

Tableau 1.5-17 : Comparaison des écarts relatifs mensuels du facteur k pour les stations de la région de Sainte-Félicité à 40 m

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.	Moyenne
Marquis	2,48	2,05	1,91	1,96	2,15	1,81	2,16	2,68				2,37	2,17
	4,90%	3,72%	0,74%	1,86%	0,15%	-1,94%	-0,67%	12,27%				5,76%	2,98%
Gagné	2,62	1,95	2,05	2,03	2,28	2,08	2,28	2,48				2,09	2,21
	11,03%	-1,16%	8,43%	5,41%	6,16%	12,87%	4,47%	4,04%				-6,64%	4,96%
Desrosiers	2,25	1,81	1,72	1,85	2,01	1,69	2,05	2,14	2,47	2,46		2,21	2,06
	-5,01%	-8,22%	-9,26%	-3,82%	-6,32%	-8,39%	-5,99%	-10,48%	5,19%	5,13%		-1,27%	-4,40%
Sainte Félicité	2,11	2,09	1,89	1,86		1,80	2,23	2,25	2,23	2,22	2,20	2,29	2,11
	-10,93%	5,67%	0,09%	-3,45%		-2,55%	2,19%	-5,82%	-5,19%	-5,13%	0,00%	2,15%	-2,09%
Moyenne	2,36	1,98	1,89	1,93	2,15	1,85	2,18	2,39	2,35	2,34	2,20	2,24	2,15

➤ *Région de Rivière-au-Renard*

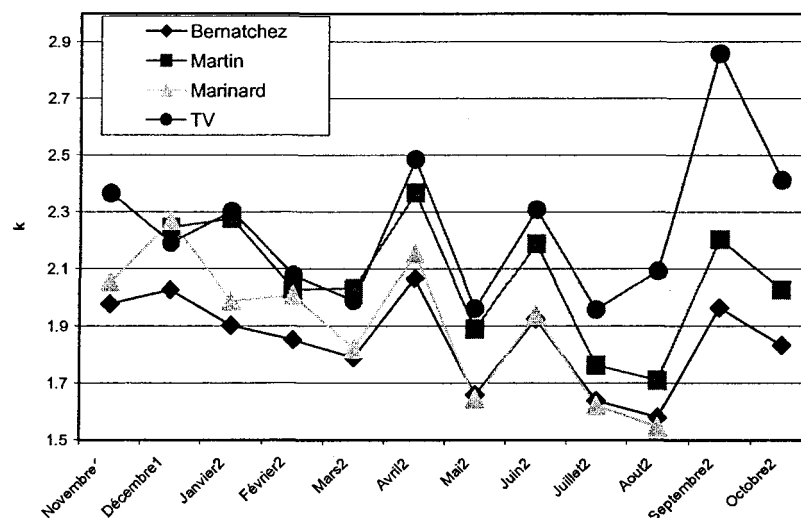


Figure 1.5-22 : Comparaison des variations de k à 40 m pour la région de Rivière-au-Renard

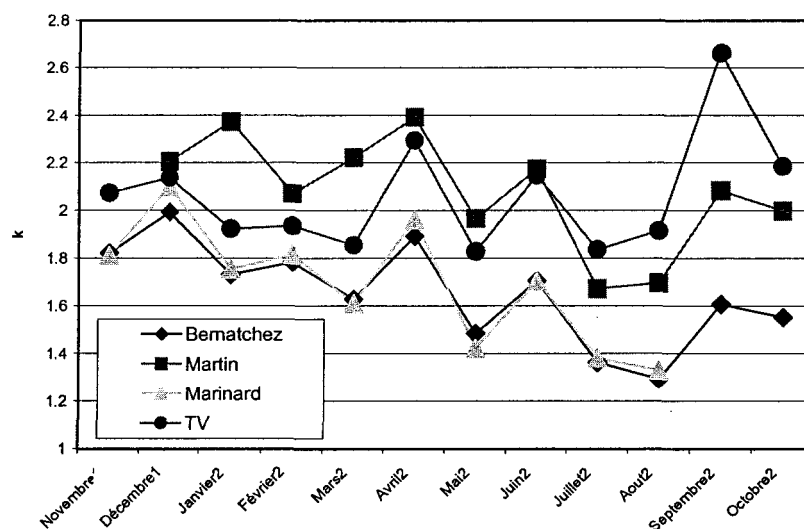


Figure 1.5-23 : Comparaison des variations de k à 20 m pour la région de Rivière-au-Renard

Dans la région de Rivière-au-Renard, pour toute la période de mesures, les stations de Marinard et Bernatchez donnent des valeurs très proches autant à 20 m qu'à 40 m. Celles-ci sont relativement plus faibles que pour les deux autres stations. À 40 m, les valeurs de k sont plus élevées pour la station TV alors qu'à 20 m, c'est la station Martin qui a les plus élevées.

Ici, deux conclusions peuvent être apportées :

- comme pour la région de Sainte-Félicité, ce sont les stations les plus éloignées du fleuve et celles qui sont à la plus haute altitude qui ont les valeurs de k les plus élevées ;
- la station TV semble avoir un cisaillement vertical plus élevé que la station Martin, à cause d'une part, de la turbulence générée par la présence d'une forêt à proximité de la station qui a pour effet de diminuer les vitesses de vent à 20 m et d'autre part, de la dénivellation assez accentuée autour de cette station qui augmente l'effet de colline, particulièrement à 40 m.

Rappel : des vitesses de vent plus élevées, plus souvent, décalent la courbe de Weibull vers la droite, c'est-à-dire que le coefficient k augmente (Figure 1.3-2).

Comme pour la région de Sainte-Félicité, on retrouve une bonne corrélation entre les données des différentes stations ainsi qu'entre les données à 20 m et celles à 40 m (Figure 1.5-24).

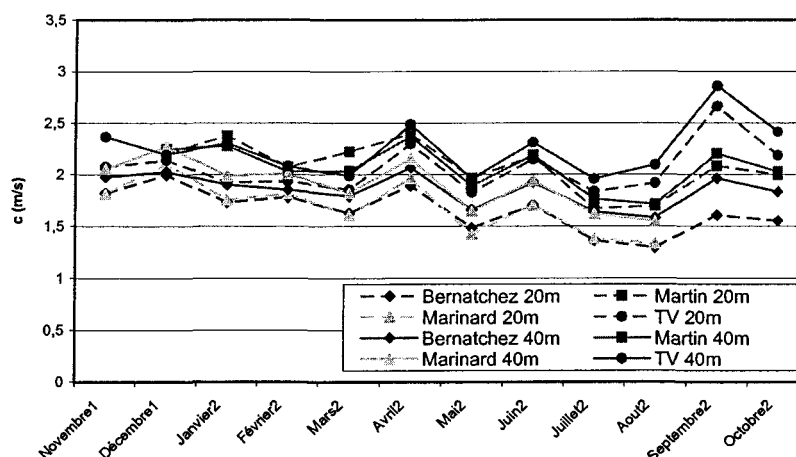


Figure 1.5-24 : Comparaison de la valeur de k à 20 m et à 40 m pour la région de Rivière-au-Renard

À propos de l'influence de la topographie, on peut conclure que :

- l'augmentation de l'altitude liée à l'éloignement du fleuve engendre une augmentation du facteur de forme k de Weibull ;
- il existe une certaine corrélation, d'une part, entre les vitesses de vent des différentes stations (influence de la localisation) et, d'autre part, entre les données de vitesses de vent à 20 m et celles à 40 m.

Tableau 1.5-18 : Comparaison des écarts relatifs mensuels du facteur k des stations de la région de Rivière-au-Renard à 20 m

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.	Moyenne
Bernatchez	1,73	1,78	1,63	1,89	1,49	1,71	1,36	1,29	1,61	1,55	1,82	1,99	1,65
	-10,84%	-4,68%	-12,15%	-10,17%	-10,98%	-10,86%	-12,29%	-17,89%	-19,45%	-17,75%	-0,47%	-3,18%	-10,89%
TV	1,91	1,81	1,95	2,18	1,80	2,07	1,80	1,98	2,29	2,11	1,85	1,93	1,97
	-1,70%	-3,14%	5,26%	3,42%	7,81%	8,06%	15,80%	25,83%	15,00%	11,89%	1,35%	-6,05%	6,96%
Marinard	1,75	1,81	1,61	1,96	1,42	1,71	1,38	1,33			1,81	2,10	1,69
	-9,66%	-2,98%	-13,05%	-6,84%	-14,71%	-10,83%	-11,07%	-15,58%			-0,88%	2,08%	-8,35%
Martin	2,37	2,07	2,22	2,39	1,97	2,17	1,67	1,70	2,08	2,00		2,21	2,08
	22,21%	10,80%	19,94%	13,59%	17,89%	13,63%	7,56%	7,64%	4,46%	5,86%		7,14%	11,88%
Moyenne	1,94	1,87	1,85	2,11	1,67	1,91	1,55	1,58	1,99	1,89	1,83	2,06	1,85

Tableau 1.5-19 : Comparaison des écarts relatifs mensuels du facteur k des stations de la région de Rivière-au-Renard à 40 m

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.	Moyenne
Bernatchez	1,90	1,85	1,79	2,07	1,66	1,92	1,64	1,58	1,96	1,83	1,98	2,03	1,85
	-9,16%	-6,56%	-7,97%	-6,91%	-7,24%	-6,90%	-6,01%	-9,64%	-11,25%	-11,11%	-2,54%	-6,47%	-7,65%
TV	2,21	2,04	2,13	2,29	1,96	2,22	1,95	2,16	2,47	2,33	2,06	2,13	2,16
	5,56%	2,97%	9,78%	3,27%	9,68%	7,35%	12,02%	23,52%	11,68%	12,84%	1,28%	-1,90%	8,17%
Marinard	1,99	2,01	1,82	2,15	1,65	1,94	1,62	1,55			2,05	2,27	1,90
	-5,10%	1,28%	-6,32%	-3,01%	-8,04%	-6,25%	-7,05%	-11,62%			1,25%	4,74%	-4,01%
Martin	2,28	2,03	2,03	2,37	1,89	2,19	1,76	1,71	2,20	2,03		2,25	2,07
	8,69%	2,31%	4,51%	6,65%	5,61%	5,80%	1,04%	-2,26%	-0,42%	-1,73%		3,63%	3,07%
Moyenne	2,09	1,98	1,94	2,22	1,79	2,07	1,74	1,75	2,21	2,06	2,03	2,17	2,01

Variations du paramètre c (facteur d'échelle) de la loi de Weibull

➤ Région de Sainte-Félicité

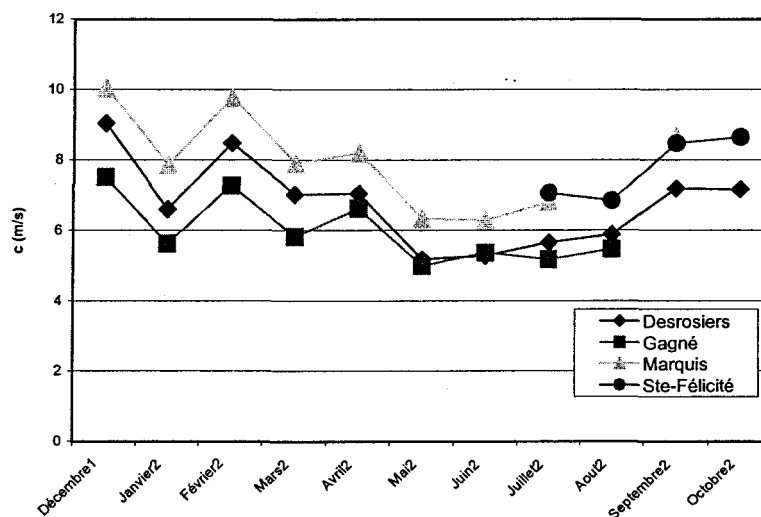


Figure 1.5-25 : Comparaison des variations de c (m/s) à 40 m pour la région de Sainte-Félicité

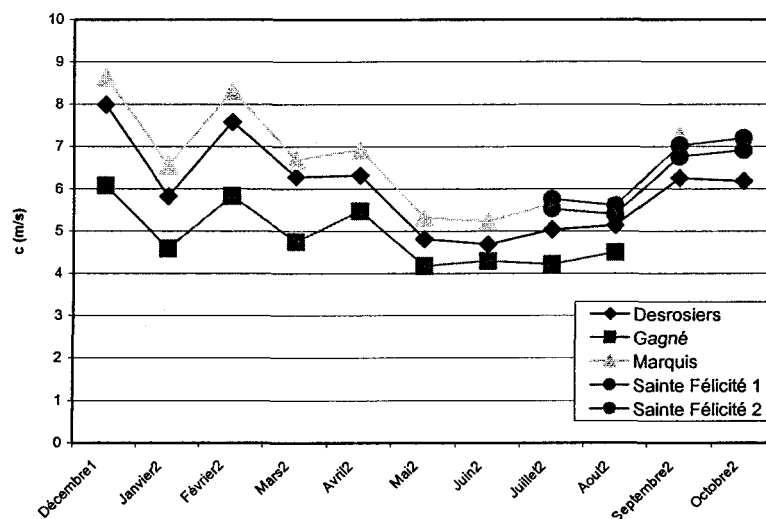


Figure 1.5-26 : Comparaison des variations de c (m/s) à 20 m pour la région de Sainte-Félicité

Pour cette région, que ce soit à 20 m ou à 40 m, les variations de c sont les mêmes pour toutes les stations, à l'amplitude près. Les valeurs les plus élevées de c sont enregistrées

respectivement pour les stations de Marquis et de Sainte-Félicité et les valeurs les plus faibles s'observent respectivement dans les stations de Desrosiers et Gagné.

Même si, ici, il est difficile de conclure sur l'influence de la topographie, on pourrait avancer, en se basant sur les résultats de la station Marquis, l'hypothèse qu'il existe un compromis entre l'éloignement par rapport au fleuve et l'altitude. En effet, les valeurs les plus faibles du paramètre c , représentatif de la valeur moyenne de la vitesse du vent, correspondent respectivement aux stations Desrosiers (plus proche du fleuve mais située à une altitude plus faible) et Gagné (plus éloignée du fleuve et située à une altitude plus élevée). Pour cette dernière, une augmentation de la rugosité sur la trajectoire des vents principaux (provenant du fleuve) semble aussi influencer les résultats.

Par contre, cette hypothèse est nuancée par les résultats de la station Sainte-Félicité à 20 m et 40 m car ceux-ci sont plus élevés que les autres stations (Gagné et Desrosiers). On pourrait alors ajouter que « l'extrême » proximité du fleuve a une plus grande influence que l'altitude.

Comme pour les valeurs du coefficient k , il existe une bonne corrélation entre les variations du coefficient c entre les différentes stations et les variations entre les deux hauteurs (Figure 1.5-27).

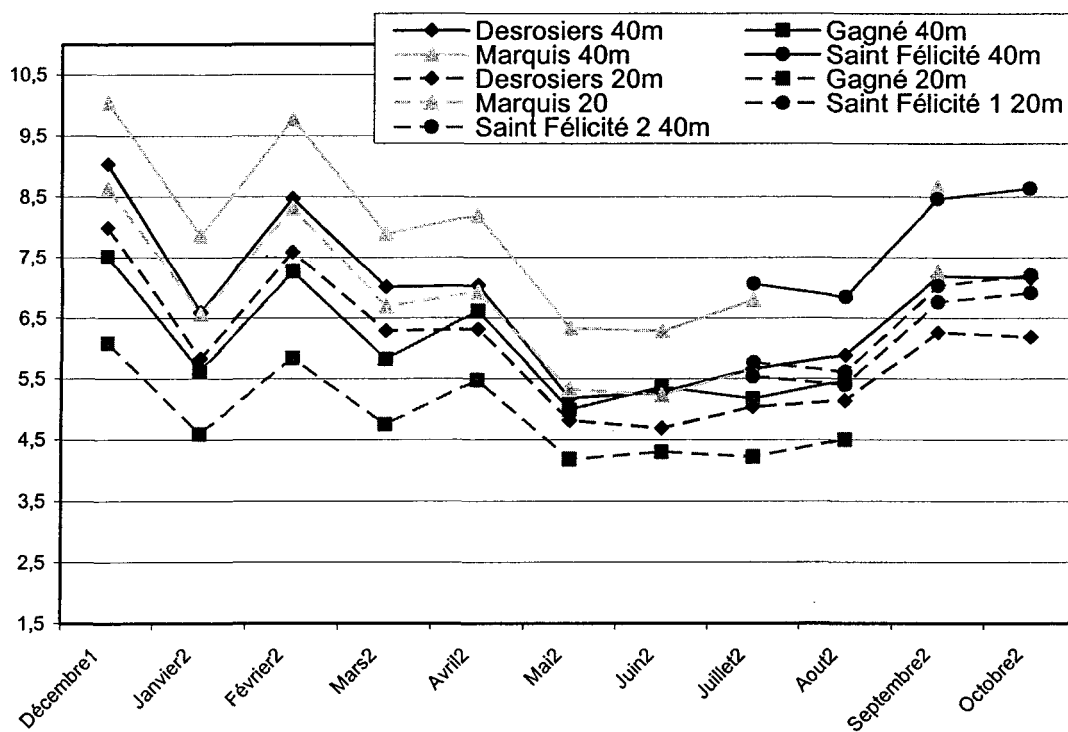


Figure 1.5-27 : Comparaison de la valeur de c (m/s) à 20 m et à 40 m pour la région de Ste-Félicité

Tableau 1.5-20 : Comparaison des écarts relatifs mensuels du facteur c pour les stations de la région de Sainte-Félicité à 20 m

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.	Moyenne
Marquis	6,56	8,31	6,69	6,93	5,32	5,23	5,65	7,25				8,64	6,73
	8,00%	12,73%	3,56%	8,22%	11,50%	5,66%	11,53%	29,53%				13,31%	11,56%
Gagné	4,59	5,84	4,75	5,48	4,18	4,30	4,22	4,50				6,08	4,88
	-24,47%	-20,84%	-26,48%	-14,45%	-12,41%	-13,15%	-16,77%	-19,66%				-20,24%	-18,72%
Desrosiers	5,83	7,58	6,29	6,32	4,82	4,69	5,04	5,14	6,26	6,19		8,00	6,01
	-4,10%	2,86%	-2,63%	-1,33%	0,91%	-5,29%	-0,64%	-8,20%	-0,08%	-13,02%		4,84%	-2,43%
Sainte Félicité	7,33	7,76	8,11	6,89		5,58	5,37	5,51	6,27	8,04	7,90	7,79	6,96
	20,57%	5,26%	25,55%	7,56%		12,78%	5,88%	-1,67%	0,08%	13,02%	0,00%	2,10%	8,28%
Moyenne	6,08	7,37	6,46	6,40	4,77	4,95	5,07	5,60	6,27	7,11	7,90	7,63	6,30

Tableau 1.5-21 : Comparaison des écarts relatifs mensuels du facteur c pour les stations de la région de Sainte-Félicité à 40 m

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.	Moyenne
Marquis	7,86	9,77	7,89	8,20	6,33	6,28	6,80	8,66				10,04	7,98
	8,77%	11,53%	9,49%	14,12%	15,09%	4,87%	11,23%	27,92%				11,17%	12,69%
Gagné	5,63	7,26	5,82	6,62	4,99	5,36	5,17	5,47				7,51	5,98
	-22,19%	-17,08%	-19,25%	-7,91%	-9,24%	-10,47%	-15,39%	-19,18%				-16,83%	-15,28%
Desrosiers	6,60	8,47	7,01	7,04	5,18	5,28	5,66	5,89	7,18	7,16		9,04	6,77
	-8,76%	-3,23%	-2,73%	-2,06%	-5,85%	-11,86%	-7,41%	-13,03%	-4,62%	-10,99%		0,10%	-6,40%
Sainte Félicité	8,83	9,52	8,11	6,89		7,04	6,82	7,06	7,88	8,93	9,58	9,53	8,20
	22,17%	8,78%	12,49%	-4,15%		17,46%	11,58%	4,29%	4,62%	10,99%	0,00%	5,56%	8,53%
Moyenne	7,23	8,76	7,21	7,18	5,50	5,99	6,11	6,77	7,53	8,04	9,58	9,03	7,41

➤ *Région de Rivière-au-Renard*

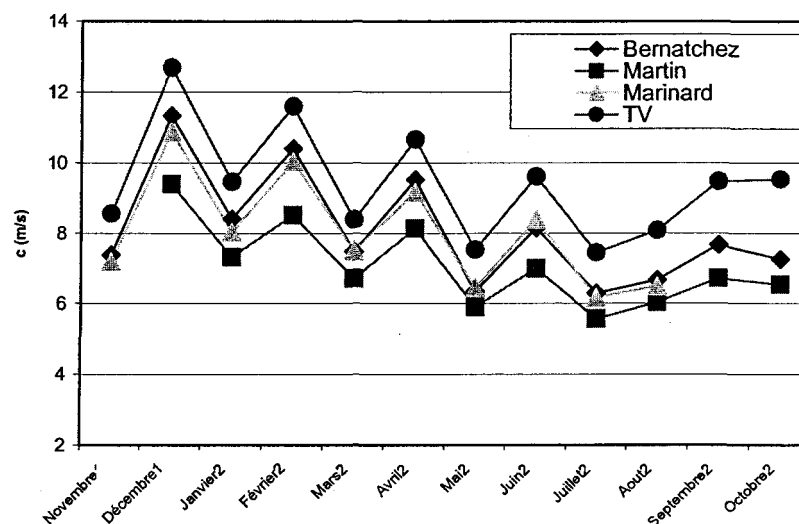


Figure 1.5-28 : Comparaison des variations de c (m/s) à 40 m pour la région de Rivière-au-Renard

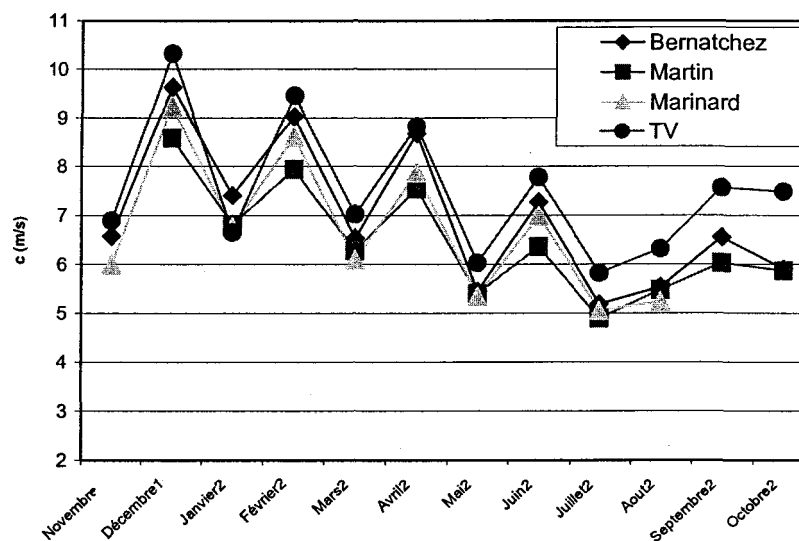


Figure 1.5-29 : Comparaison des variations de c (m/s) à 20 m pour la région de Rivière-au-Renard

Pour les stations de la région de Rivière-au-Renard, on peut faire les observations suivantes :

- la station TV a les valeurs les plus élevées ;
- les stations Bernatchez et Marinard ont des résultats similaires ;
- la station Martin a les valeurs les plus faibles ;

- c'est la station qui a la plus haute altitude qui obtient les résultats les plus élevés.

Les hypothèses formulées précédemment semblent erronées ici. Il semble alors impossible de formuler des hypothèses fiables sur l'influence de la topographie en se basant sur les données disponibles actuellement.

On peut cependant affirmer que la topographie d'un site a une grande influence sur le vent qui le balaie, particulièrement l'altitude, la rugosité et l'éloignement du fleuve mais dans des proportions qui varient suivant le site et suivant la direction principale du vent.

Pour la région de Rivière-au-Renard, on retrouve aussi une bonne corrélation entre les données.

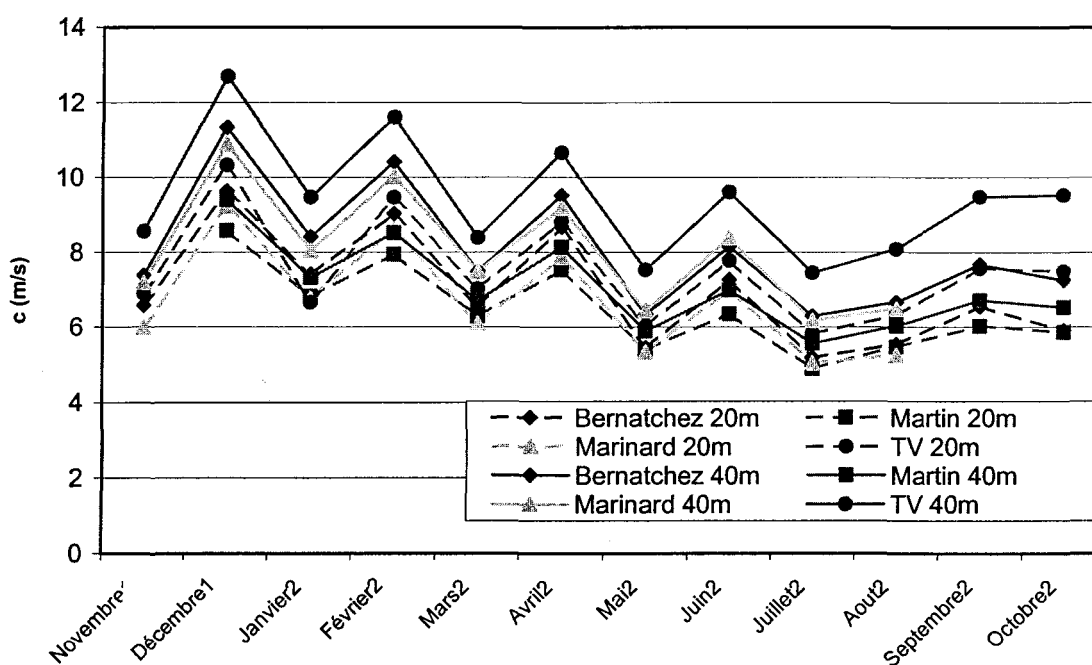


Figure 1.5-30 : Comparaison de la valeur de c (m/s) à 20 m et à 40 m pour la région de Rivière-au-Renard

Tableau 1.5-22 : Comparaison des écarts relatifs mensuels du facteur c pour les stations de la région de Rivière-au-Renard à 20 m

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.	Moyenne
Bernatchez	7,41	9,03	6,53	8,67	5,45	7,27	5,19	5,54	6,55	5,91	6,57	9,63	6,98
	4,24%	3,86%	-2,13%	6,97%	-5,03%	3,72%	-1,94%	-2,96%	-3,88%	-13,47%	-3,48%	4,09%	-0,83%
TV	7,44	9,19	7,80	8,35	6,74	7,43	6,03	6,56	7,87	8,71	7,86	9,57	7,79
	4,66%	5,74%	16,77%	2,97%	17,49%	5,89%	13,92%	14,97%	15,38%	27,50%	15,41%	3,40%	12,01%
Marinard	6,77	8,61	6,09	7,87	5,35	6,99	5,05	5,25			6,00	9,24	6,72
	-4,80%	-0,95%	-8,73%	-2,93%	-6,74%	-0,32%	-4,49%	-8,01%			-11,93%	-0,19%	-4,91%
Martin	6,82	7,94	6,28	7,54	5,41	6,36	4,89	5,48	6,03	5,87		8,58	6,47
	-4,10%	-8,65%	-5,90%	-7,00%	-5,72%	-9,29%	-7,49%	-4,00%	-11,50%	-14,03%		-7,30%	-7,73%
Moyenne	7,11	8,69	6,68	8,11	5,73	7,01	5,29	5,71	6,82	6,83	6,81	9,25	7,00

Tableau 1.5-23 : Comparaison des écarts relatifs mensuels du facteur c pour les stations de la région de Rivière-au-Renard à 40 m

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.	Moyenne
Bernatchez	8,41	10,40	7,49	9,52	6,34	8,15	6,29	6,67	7,68	7,26	7,39	11,33	8,08
	-0,11%	3,04%	-4,52%	2,54%	-6,74%	-0,57%	-2,21%	-3,33%	-5,14%	-9,82%	-9,16%	3,62%	-2,70%
TV	9,91	11,44	9,65	10,30	8,50	9,27	7,71	8,39	9,88	10,35	9,82	12,15	9,78
	17,70%	13,32%	23,15%	10,96%	25,03%	13,01%	19,84%	21,68%	22,08%	28,58%	20,72%	11,05%	18,93%
Marinard	8,04	10,03	7,51	9,17	6,45	8,39	6,17	6,49			7,19	10,87	8,03
	-4,55%	-0,67%	-4,24%	-1,16%	-5,12%	2,30%	-4,10%	-5,87%			-11,56%	-0,59%	-3,55%
Martin	7,32	8,51	6,71	8,14	5,90	6,99	5,57	6,04	6,72	6,54		9,40	7,08
	-13,04%	-15,69%	-14,40%	-12,34%	-13,18%	-14,74%	-13,53%	-12,47%	-16,95%	-18,76%		-14,08%	-14,47%
Moyenne	8,42	10,10	7,84	9,28	6,79	8,20	6,44	6,90	8,09	8,05	8,13	10,94	8,26

Variations de l'intensité de turbulence

➤ Région de Sainte-Félicité

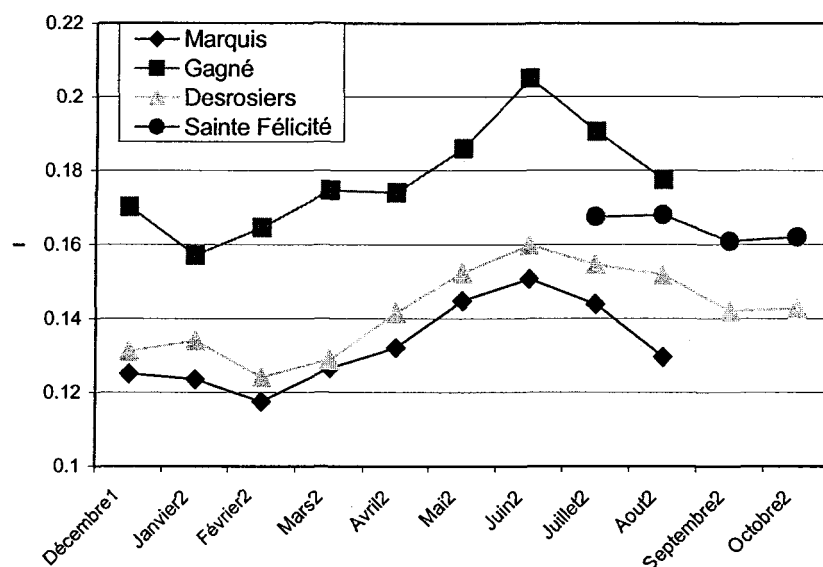


Figure 1.5-31 : Variations de l'intensité de turbulence à 20 m pour la région de Sainte-Félicité

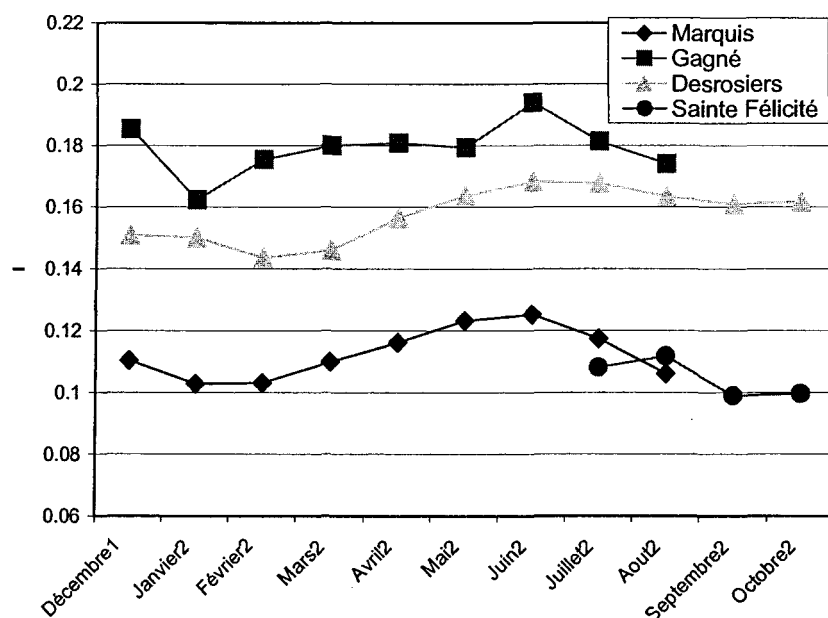


Figure 1.5-32 : Variations de l'intensité de turbulence à 40 m pour la région de Sainte-Félicité

Les résultats obtenus pour les stations de la région de Sainte-Félicité permettent de tirer une conclusion sur l'état de turbulence des sites. Que ce soit à 20 m ou à 40 m, la station Gagné a la turbulence la plus élevée, ce qui correspond bien au fait que c'est la station qui est la plus éloignée dans les terres et donc pour laquelle la rugosité a la plus grande influence.

Cependant, en suivant ce même raisonnement, la deuxième station la plus turbulente aurait dû être la station Marquis mais celle-ci se retrouve en dernière position (turbulence la plus faible à 20 m et 40 m). Elle semble donc être située sur un site où l'impact de la rugosité environnante a été diminué par une très bonne exposition au vent.

Les stations Desrosiers et Sainte-Félicité ont des intensités de turbulence intermédiaires. Leur positionnement plus proche du Saint-Laurent et, a priori, dans un environnement plus stable est peut-être bouleversé pour certaines directions de vent. En effet, les stations ne sont pas à des très hautes altitudes et, à cause d'une plus grande rugosité, les vents provenant du continent engendrent une plus grande turbulence, augmentant ainsi les moyennes mensuelles.

Cependant, le phénomène important qu'il faut mentionner ici et qui appuie les conclusions précédentes est la différence entre les résultats de turbulence à 20 m et 40 m. En effet, il semblerait normal que la turbulence diminue avec l'augmentation de la hauteur même si ce n'est que faiblement, ce qui est le cas pour les stations Marquis et Sainte-Félicité. Mais, c'est le contraire que l'on retrouve pour la station Desrosiers et dans une moindre mesure, pour la station Gagné. Une étude plus approfondie serait nécessaire pour identifier les caractéristiques extérieures de ces stations qui provoquent ces résultats.

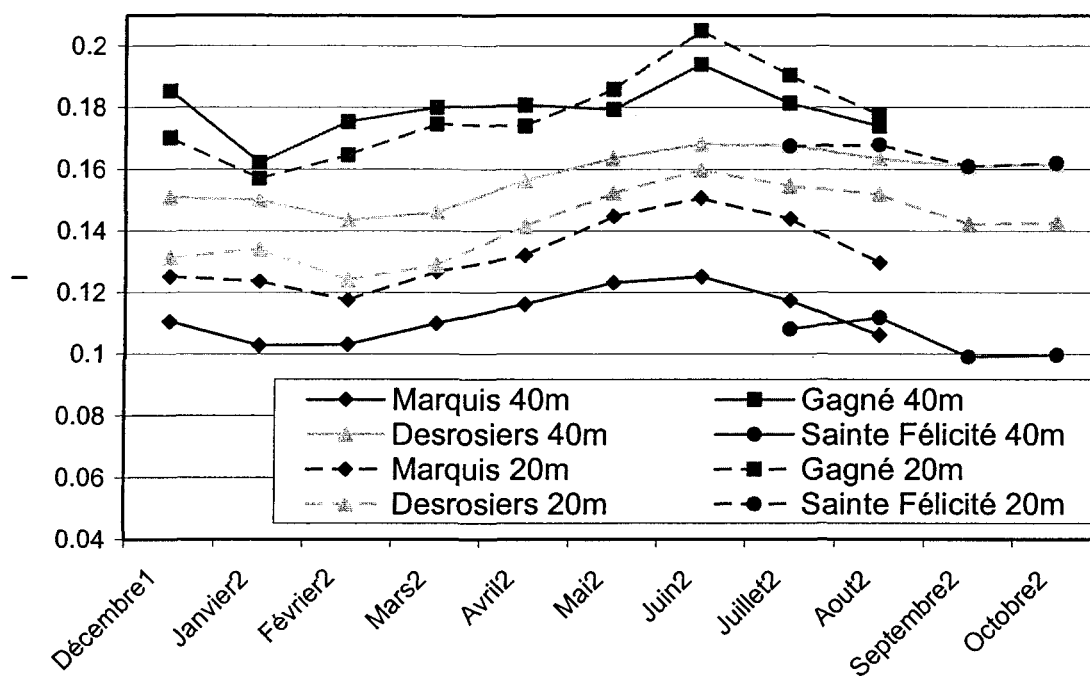


Figure 1.5-33 : Comparaison de l'intensité de turbulence à 20 m et à 40 m pour la région de Sainte-Félicité

Tableau 1.5-24 : Comparaison des écarts relatifs mensuels de la valeur de l'intensité de turbulence à 20 m pour les stations de la région de Sainte-Félicité

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.	Moyenne
Marquis	0,12	0,12	0,13	0,13	0,14	0,15	0,14	0,13				0,13	0,13
	-13,89%	-17,43%	-14,88%	-13,27%	-10,07%	-11,52%	-12,49%	-17,06%				-14,67%	-13,92%
Gagné	0,16	0,16	0,17	0,17	0,19	0,21	0,19	0,18				0,17	0,18
	9,46%	15,62%	17,34%	14,22%	15,49%	20,38%	15,78%	13,61%				16,08%	15,33%
Desrosiers	0,13	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,15	0,15	0,14	0,14		0,13	0,14
	-6,59%	-12,79%	-13,40%	-7,02%	-5,42%	-6,18%	-6,02%	-2,79%	-6,98%	-7,10%		-10,49%	-7,71%
Sainte Félicité	0,16	0,16	0,17	0,16		0,17	0,17	0,17	0,16	0,16	0,17	0,16	0,16
	11,02%	14,60%	10,94%	6,08%		-2,67%	2,73%	6,24%	6,98%	7,10%	0,00%	9,09%	6,55%
Moyenne	0,14	0,14	0,15	0,15	0,16	0,17	0,16	0,16	0,15	0,15	0,17	0,15	0,15

Tableau 1.5-25 : Comparaison des écarts relatifs mensuels de la valeur de l'intensité de turbulence à 40 m pour les stations de la région de Sainte-Félicité

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.	Moyenne
Marquis	0,10	0,10	0,11	0,12	0,12	0,13	0,12	0,11				0,11	0,11
	-20,33%	-21,26%	-18,30%	-16,00%	-20,73%	-15,40%	-18,61%	-23,08%				-18,65%	-19,15%
Gagné	0,16	0,18	0,18	0,18	0,18	0,19	0,18	0,17				0,19	0,18
	25,82%	33,98%	33,77%	30,69%	15,41%	31,16%	25,75%	26,17%				36,53%	28,81%
Desrosiers	0,15	0,14	0,15	0,16	0,16	0,17	0,17	0,16	0,16	0,16		0,15	0,16
	16,38%	9,62%	8,52%	13,07%	5,32%	13,65%	16,26%	18,49%	22,62%	23,67%		11,14%	14,43%
Sainte Félicité	0,10	0,10	0,10	0,10		0,10	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
	-21,87%	-22,33%	-24,00%	-27,77%		-29,41%	-23,41%	-21,58%	-22,62%	-23,67%	0,00%	-29,02%	-22,34%
Moyenne	0,13	0,13	0,13	0,14	0,16	0,15	0,14	0,14	0,13	0,13	0,10	0,14	0,13

➤ Région de Rivière-au-Renard

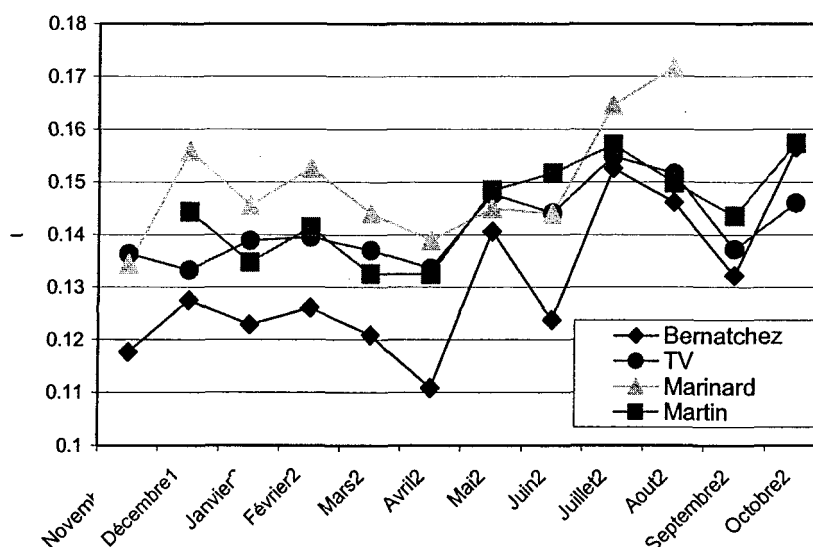


Figure 1.5-34 : Variations de l'intensité de turbulence à 20 m pour la région de Rivière-au-Renard

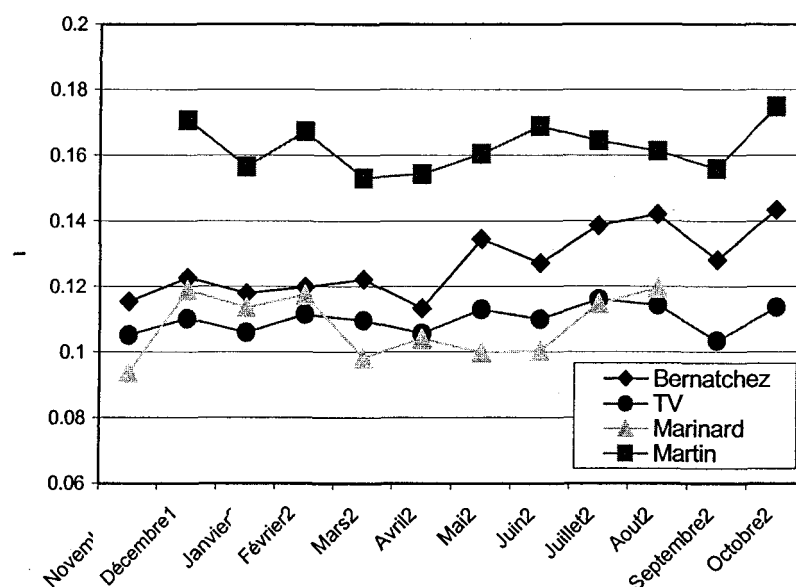


Figure 1.5-35 : Variations de l'intensité de turbulence à 40 m pour la région de Rivière-au-Renard

Pour la région de Rivière-au-Renard, les résultats sont très différents à 20 m et à 40 m et aucune conclusion ne peut donc être donnée.

Tableau 1.5-26 : Comparaison des écarts relatifs mensuels de la valeur de l'intensité de turbulence à 20 m pour les stations de la région de
Rivière-au-Renard

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.	Moyenne
Bernatchez	0,12	0,13	0,12	0,11	0,14	0,12	0,15	0,15	0,13	0,16	0,12	0,13	0,13
	-11,43%	-11,65%	-12,20%	-15,06%	-3,38%	-12,54%	-2,65%	-4,95%	-3,86%	-1,10%	-12,56%	-10,93%	-8,53%
TV	0,15	0,15	0,15	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14	0,16	0,15	0,14	0,15
	9,40%	5,50%	11,28%	7,09%	1,73%	3,58%	-2,57%	-4,12%	-0,52%	1,68%	12,69%	1,19%	3,91%
Marinard	0,15	0,15	0,14	0,14	0,15	0,14	0,16	0,17			0,13	0,16	0,15
	4,92%	7,01%	4,63%	6,45%	-0,36%	1,77%	4,99%	11,64%			-0,13%	8,89%	4,98%
Martin	0,13	0,14	0,13	0,13	0,15	0,15	0,16	0,15	0,14	0,16		0,14	0,14
	-2,89%	-0,87%	-3,71%	1,52%	2,01%	7,20%	0,24%	-2,56%	4,38%	-0,59%		0,85%	0,51%
Moyenne	0,14	0,14	0,14	0,13	0,15	0,14	0,16	0,15	0,14	0,16	0,13	0,14	0,14

Tableau 1.5-27 : Comparaison des écarts relatifs mensuels de la valeur de l'intensité de turbulence à 40 m pour les stations de la région de
Rivière-au-Renard

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Octobre	Nov.	Déc.	Moyenne
Bernatchez	0,12	0,12	0,12	0,11	0,13	0,13	0,14	0,14	0,13	0,14	0,12	0,12	0,13
	-6,20%	-8,53%	-0,72%	-5,94%	5,70%	0,16%	4,12%	6,37%	-1,08%	-2,00%	6,91%	-6,66%	-0,66%
TV	0,11	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,12	0,11	0,11	0,11
	-8,57%	-8,91%	-3,41%	-8,40%	-10,25%	-12,28%	-13,78%	-16,67%	-19,31%	-17,51%	6,37%	-13,60%	-10,53%
Marinard	0,11	0,12	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,12			0,09	0,12	0,11
	-9,69%	-10,28%	-20,25%	-13,65%	-21,53%	-20,97%	-13,83%	-10,47%			-13,29%	-9,57%	-14,35%
Martin	0,16	0,17	0,15	0,15	0,16	0,17	0,16	0,16	0,16	0,17		0,17	0,16
	24,46%	27,72%	24,39%	27,99%	26,08%	33,09%	23,49%	20,77%	20,39%	19,51%		29,83%	25,25%
Moyenne	0,13	0,13	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,15	0,11	0,13	0,13

En faisant la comparaison entre l'intensité de turbulence à 20 m et à 40 m, les résultats semblent assez étonnants puisque seule la station Martin donne une intensité de turbulence plus faible à 40 m qu'à 20 m. Une analyse plus précise de la topographie de la région permettrait éventuellement de comprendre ces résultats.

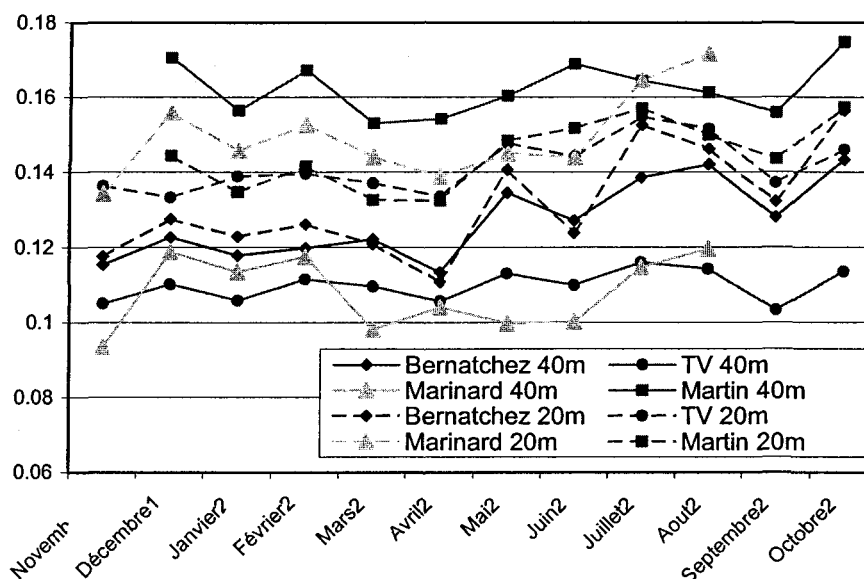


Figure 1.5-36: Comparaison de l'intensité de turbulence entre 20 m et 40 m pour la région de Rivière-au-Renard

Conclusion : en combinant les résultats des deux régions étudiées, il est difficile d'arriver à identifier des critères de variation de l'intensité de turbulence liés à la topographie. Il serait intéressant qu'une étude de ce phénomène soit effectuée plus en profondeur avec plus de séries de données.

1.5.2.6 Variation de la densité spectrale de puissance

Les données provenant du programme du MRN ne sont pas suffisantes pour permettre d'obtenir des résultats pertinents dans l'étude de la densité spectrale de puissance. En effet, puisque

le spectre représente l'influence des variations temporelles, afin de pouvoir observer l'influence des variations annuelles il est nécessaire d'étudier au moins deux ans de données. Et, dans notre cas, seule une station, la station TV, possède des données sur plus de deux ans. De plus, pour les hautes fréquences (turbulence), les données disponibles pour l'étude sont des moyennes aux dix minutes seulement et ne permettent pas de faire une analyse approfondie.

Cependant, en faisant l'analyse de toutes les stations on obtient des résultats assez similaires (figures 1.5-37, 1.5-38 et 1.5-39) avec un maximum pour une fréquence proche de 10^{-2} Hz (période d'une journée), ce qui confirme une partie des conclusions apportées par Van der Hoven [40].

La Figure 1.5-37 est un exemple de résultat, celui de la station TV qui possède le plus de valeurs. Elle a été réalisée à l'aide de la « méthode 2 » présentée dans le paragraphe sur l'étude du spectre fréquentiel (page 28).

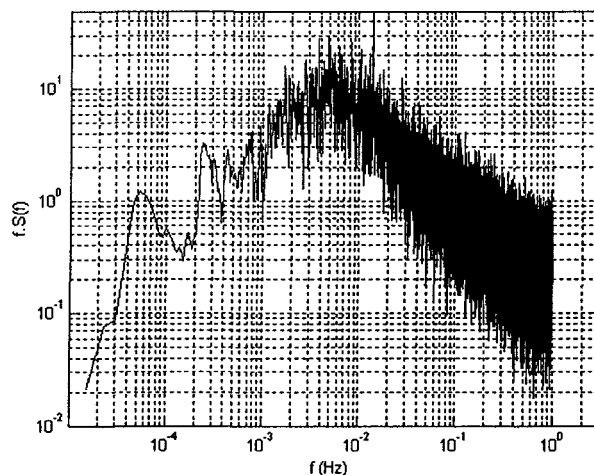


Figure 1.5-37 : Densité spectrale de puissance pour la station TV

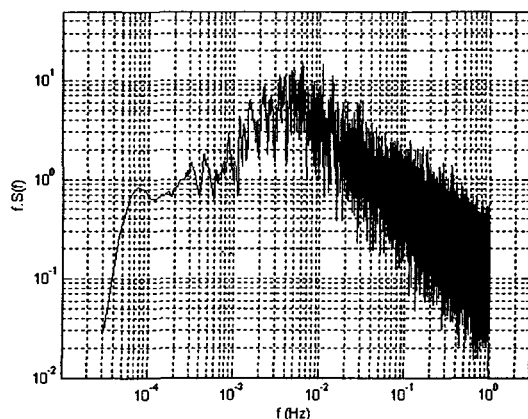


Figure 1.5-38 : Densité spectrale de puissance pour la station Baie-des-Sables

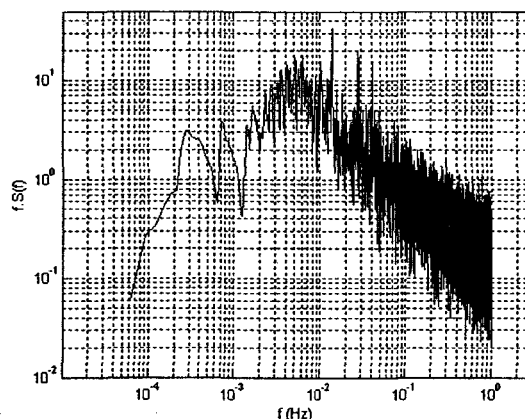


Figure 1.5-39 : Densité spectrale de puissance pour la station Bernatchez

1.5.3. Étude spatiale : Étude du cisaillement vertical

1.5.3.1 La loi de cisaillement : étude de la variation du coefficient de puissance α

Le calcul du coefficient de puissance a été réalisé à partir des moyennes de vitesses de vent de toutes les stations pour lesquelles les données à 20 m et à 40 m ont été validées pour chaque mois en utilisant la relation (1.3.39).

Ne bénéficiant pas de beaucoup de stations utilisables pour l'estimation de ce facteur – 17 stations seulement – seuls les résultats moyens par mois sont présentés (Figure 1.5-40).

Les résultats sont assez surprenants puisque la valeur du coefficient de puissance est toujours supérieure à la valeur 0,17 utilisée dans le premier « Atlas éolien du Québec » [35]. On obtient alors des différences dans la valeur de α variant de 37% à 78% par rapport à l'utilisation de la valeur 0,17.

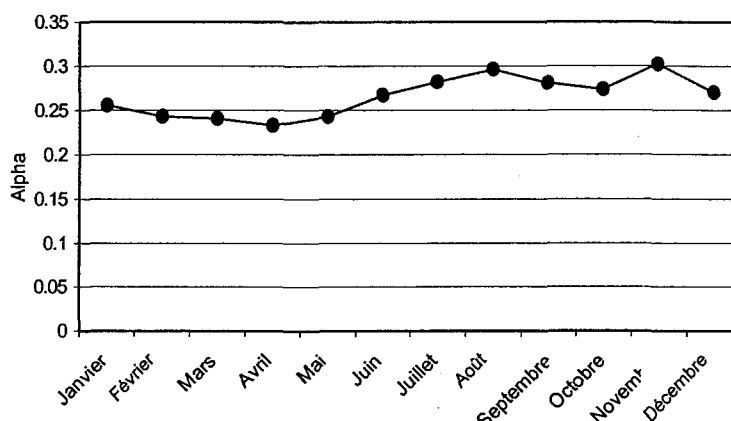


Figure 1.5-40 : Variation du coefficient de puissance α

Ces grandes différences de valeurs sont très importantes puisque l'utilisation de tours de mesure vise à connaître le potentiel éolien d'un site mais elles ne peuvent en général être placées aussi hautes que les éoliennes elles-mêmes. Il est donc nécessaire de faire une extrapolation des valeurs en utilisant ce type de loi pour le cisaillement vertical. En utilisant un facteur de puissance de 0,17 avec une tour de mesure de 40 m, on obtient une erreur de 12% sur la valeur de la vitesse calculée pour une éolienne de 80 m !

Ces résultats devraient être confirmés avec une étude plus approfondie et il faudrait notamment essayer d'utiliser une autre loi pour l'estimation du cisaillement vertical, particulièrement une loi qui tiendrait compte de la rugosité qu'il faudra alors déterminer (cf. (1.3.40)). Cependant, ils semblent montrer que l'utilisation d'un facteur fixe pour tous les sites est erronée, que des sites situés dans des climats comme celui du Québec ont un plus grand cisaillement vertical et qu'il est nécessaire d'installer des tours de mesures avec au minimum deux anémomètres à des hauteurs différentes pour déterminer ce cisaillement.

Puisque le facteur d'échelle c de la loi de Weibull est représentatif de la variation de la vitesse moyenne du vent, il n'est pas nécessaire de réétudier l'influence de l'altitude sur le paramètre c .

1.5.3.2 Influence de la hauteur pour le paramètre k de la loi de Weibull

Les résultats qui suivent (Figure 1.5-41) montrent que, globalement, la valeur de k augmente avec la hauteur et ce presque uniformément sur l'ensemble de l'année. L'écart entre les valeurs à 20 m et à 40 m varie entre 0,11 et 0,16 avec une moyenne à 0,14 et un écart-type de 0,01.

Mais, avec seulement deux hauteurs, il n'est pas possible de déterminer le type de loi (linéaire, quadratique, cubique, etc.) qui pourrait être utilisé pour calculer le facteur de forme k de la loi de Weibull à une hauteur différente.

Il est important de souligner que, comme pour le coefficient de puissance, la constatation a été faite sur les valeurs moyennes trouvées pour chaque mois et avec toutes les stations. Cependant, si l'on prenait une station particulière les résultats seraient différents, il faudrait alors étudier l'influence des paramètres extérieurs (topographie, localisation,...) sur les variations du paramètre k et du coefficient de puissance suivant la hauteur.

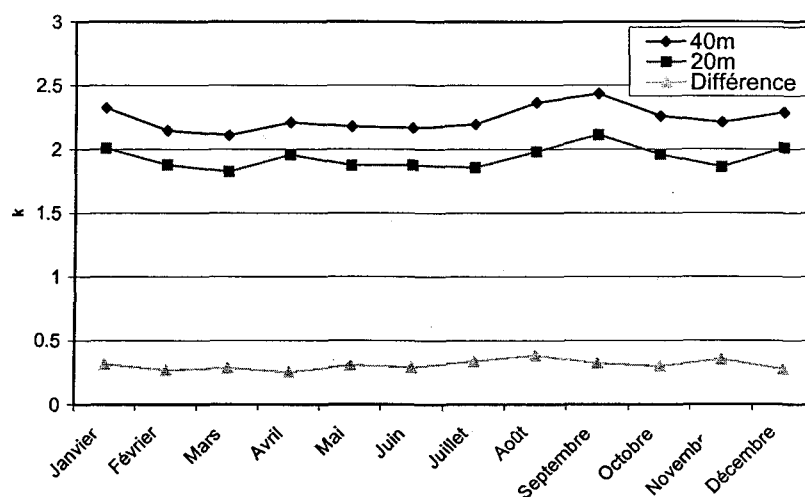


Figure 1.5-41 : Comparaison de la valeur de k à 20 m et à 40 m

1.6. Conclusions

À l'issue de l'étude effectuée, on peut tirer certaines conclusions sur les paramètres étudiés et sur un ensemble de facteurs pouvant entraîner leur variation. Les résultats obtenus et les conclusions auxquelles nous aboutissons sont cependant limités par l'insuffisance des données disponibles ainsi que par la courte période de mesures couverte.

1.6.1. *Le facteur de forme k de la loi de Weibull*

L'analyse temporelle a permis d'illustrer la grande variabilité des valeurs du facteur de forme k sur une année. Les analyses saisonnière et mensuelle ont permis d'observer des valeurs plus élevées en hiver, et en automne et des valeurs plus faibles au printemps et à l'été. Puisque le facteur de forme k représente l'allure de la distribution de Weibull, il est raisonnable de conclure qu'en hiver et en automne, la répartition des vents autour de la moyenne étant plus étroite, on a une moins grande variabilité des vents et donc que ceux-ci sont plus constants.

L'analyse spatiale a mis particulièrement en perspective l'influence de la rugosité et de la topographie locale plutôt que l'influence de la localisation géographique d'un site donné. En effet, sur presque toutes les stations étudiées, quel que soit leur emplacement, on a observé des variations similaires du facteur de forme k . Cependant, l'analyse topographique d'une région spécifique révèle l'influence de l'emplacement de la tour de mesure - et donc de l'éolienne sur le site - sur la valeur et les variations de ce paramètre. La rugosité et une topographie accidentée sont donc des éléments déterminants dans la valeur du facteur k . De plus, il semble que la diminution de la rugosité entraîne une augmentation de la valeur de k , c'est-à-dire une plus grande constance des vents.

Cependant, pour valider complètement ces résultats, une étude plus approfondie qui prendrait en compte la direction des vents serait nécessaire afin de déterminer plus précisément l'influence de la rugosité et celle d'une topographie plus ou moins accidentée.

Par ailleurs, si l'on considère les résultats obtenus, la moyenne de k est respectivement de 2,17 et de 2,32 pour les phases III et IV. L'écart observé avec la valeur 2 du facteur de forme utilisée par la loi de Rayleigh est donc assez important (respectivement 8,5% et 16%). L'utilisation de la loi de Rayleigh, pour décrire la distribution statistique des vitesses de vent, aurait donc apporté des erreurs non négligeables dans l'estimation du potentiel éolien.

1.6.2. *Le facteur d'échelle c de la loi de Weibull*

Pour le facteur d'échelle c , l'analyse temporelle des sites étudiés a permis de découper l'année en trois périodes : on observe des valeurs plus élevées en hiver, moyennes au printemps et à l'automne et plus faibles en été. Ce découpage concorde avec les résultats de l'Atlas éolien du Québec ([34] et [35]). Plus précisément, on observe une décroissance des valeurs du facteur c entre les mois de février et de juillet, mois correspondant au minimum, et une croissance entre les mois d'août et de décembre, mois pour lequel le maximum est atteint. Le mois de janvier donne des résultats assez surprenants puisque l'on observe des valeurs plus faibles que pendant les mois de décembre et de février. Une analyse sur une plus longue période serait nécessaire pour confirmer ce résultat. De plus, on peut souligner que la valeur maximale, observée en décembre, est une fois et

demie (1,5) plus élevée que la valeur minimale du mois de juillet, ce qui engendrerait un très important écart en terme de production de puissance.

L'analyse spatiale a mis en évidence la similarité entre les régimes de vent observés sur les différentes stations. En effet, que ce soit pour les phases III ou IV, on observe pour toutes les stations une évolution similaire mais d'amplitude variable. Ce sont donc la localisation et les paramètres physiques des sites qui engendrent les différences dans les valeurs observées. Cependant, dans cette étude, il a été difficile de mettre en relief le paramètre qui a la plus grande influence. En effet, il est évident que les sites situés dans des régions déjà identifiées comme ayant un bon potentiel éolien auront de meilleurs résultats mais, par la suite, il semble nécessaire de faire une étude plus approfondie du site pour trouver le meilleur compromis entre l'altitude, la rugosité (liée à l'éloignement du fleuve pour la plupart des sites étudiés) et l'exposition à certaines directions de vent. De plus, une topographie accidentée a aussi une influence importante sur les résultats, particulièrement par son incidence sur la valeur de la rugosité et/ou la difficulté ou non de l'évaluer.

1.6.3. *L'intensité de turbulence I*

L'intensité de turbulence est caractérisée par des variations saisonnières que l'on pourrait mettre en parallèle avec les résultats obtenus pour le coefficient k . En effet, on retrouve une intensité de turbulence élevée au cours de l'été, précisément pendant les mois de mai à août, et plus faible en hiver, soit de décembre à avril. Les mois d'été semblent donc offrir des vents plus turbulents et donc moins propices à une bonne exploitation du potentiel éolien contrairement aux mois d'hiver.

L'analyse spatiale révèle la grande importance de la rugosité sur la turbulence d'un site. Deux exemples appuient cette affirmation : les résultats de la station des Îles de la Madeleine et la différence entre les deux sites de l'Île d'Anticosti. En effet, dans le premier cas, on retrouve les valeurs d'intensité les plus faibles, soit de 30% inférieure à la moyenne ; dans le second cas, les deux stations sont situées sur un site insulaire mais on a observé des valeurs d'intensité de turbulence bien plus élevées sur celle se trouvant plus à l'intérieur des terres. On peut aussi souligner que, mis à part les sites insulaires, ce sont les sites côtiers qui donnent les valeurs d'intensité de turbulence les plus faibles : en effet, ils sont plus souvent exposés à des vents provenant du fleuve Saint-Laurent et qui sont, de fait, moins turbulents à cause de la rugosité presque nulle de ce dernier. Cependant, un bémol pourrait être apporté à cette conclusion. En effet, certaines stations, celle de Fermont en est un exemple, ont des valeurs d'intensité de turbulence faibles alors qu'elles sont plus éloignées du Saint-Laurent. Une bonne exposition aux vents provenant de toutes les directions peut être à l'origine de ces résultats.

CHAPITRE 2

LE GENERATEUR NUMERIQUE DE VITESSES DE VENT

2.1. Problématique

La simulation du vent à travers un générateur de vitesses est très importante car elle est la première étape du simulateur de turbine éolienne (banc d'essai) qui permettra ([20] et [25]) :

- la prédiction de production d'énergie ;
- l'analyse de la conversion d'énergie et de la dynamique du système ;
- le développement de stratégies de contrôle pour les systèmes éoliens/diesel ;
- l'étude des charges mécaniques sur les éoliennes.

La principale problématique liée à la génération de vitesses de vent est la méthode qui sera utilisée pour la modélisation. En effet, plusieurs méthodes existent :

- ondelettes ([13] et [16]) ;
- double transformée de Fourier [24] ;
- méthode d'analyse spectrale ([19], [20], [25] et [32]).

Dans cette étude, nous avons choisi de développer une méthode d'analyse spectrale utilisant les spectres de von Karman et de Kaimal.

On peut souligner qu'une autre piste a été l'objet de quelques tests qui n'ont pas donné de résultats concluants. Cette autre approche est basée sur l'étude de vitesses de vent et l'utilisation des paramètres k et c de la loi de Weibull. Les nombres sont générés à partir de la loi de Weibull inverse. Seulement, l'aspect temporel n'est pas pris en compte dans cette génération contrairement à une génération liée à l'utilisation de spectres. Il faudrait alors appliquer, sur les nombres issus de la loi de Weibull inverse, des contraintes reliées à la variabilité temporelle qui régit le vent. Par exemple, il est physiquement impossible que le vent puisse passer d'une moyenne de 0 m/s à 15 m/s en dix minutes. Une étape fastidieuse de « tri temporel » des données générées s'impose donc.

Comme mentionné précédemment, l'utilisation des spectres répond à l'aspect temporel de la variation de la vitesse du vent. Il faut maintenant répondre au besoin de l'aspect spatial. Celui-ci est intégré aux caractéristiques des spectres par l'intermédiaire de l'intensité de turbulence, qui peut-être déterminée en fonction des paramètres géographiques (latitude, hauteur) et topographiques (rugosité). Cependant, comme cela sera expliqué dans le paragraphe 2.4 à la page 114, le traitement numérique requis est assez compliqué à cause notamment de la complexité des spectres de von Karman et de Kaimal.

2.2. Objectifs

La réalisation d'un générateur numérique de vitesses de vent a pour objectif à long terme d'aider à la conception de nouvelles éoliennes et, dans un premier temps, d'aider à l'amélioration des caractéristiques des éoliennes pour qu'elles répondent au mieux à la variabilité du vent.

Pour cela, la première étape consiste en l'élaboration d'un banc d'essai pour lequel le générateur numérique de vitesse de vent servira d'entrée (Figure 2.2-1).

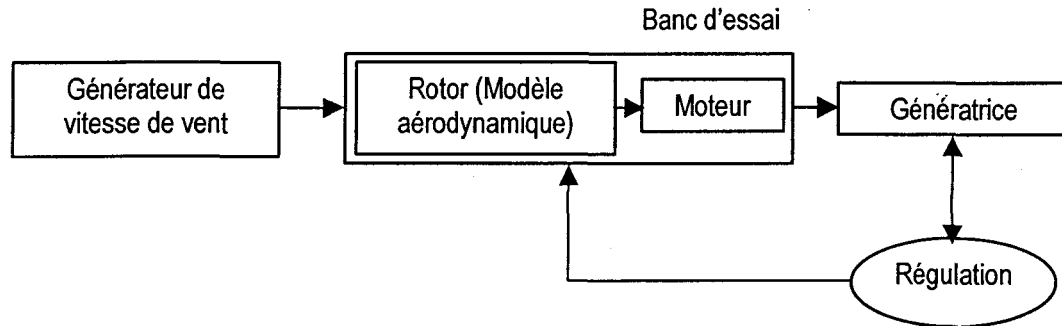


Figure 2.2-1 : Illustration du fonctionnement du banc d'essai éolien

Le générateur de vitesses de vent permettra de générer des nombres aléatoires qui respecteront les lois caractéristiques du vent. Ceci permettra donc de mieux caractériser les réactions d'une éolienne face à des perturbations particulières qu'elles soient à haute fréquence, comme la turbulence ou les rafales de vent, ou à basse fréquence comme les réactions aux variations saisonnières par exemple.

Pour la réalisation de ce générateur, il est nécessaire d'étudier les techniques de modélisation de vent déjà développées, de dégager la plus appropriée et ensuite de la programmer à l'aide du logiciel Matlab® afin de créer les données numériques.

2.3. Méthode 1 : Utilisation de la loi de Weibull inverse

Après l'analyse des caractéristiques de la variabilité du vent et la classification de cette variabilité à l'aide de lois statistiques, il faut maintenant générer des nombres qui répondent à toutes les caractéristiques de lois de distributions identifiées dans l'analyse.

On peut signaler ici qu'ils existent déjà plusieurs études qui ont porté sur la modélisation et la simulation du vent ([25] et [46]).

2.3.1. Méthodologie

2.3.1.1 Description de la loi de Weibull inverse

Dans cette partie, des valeurs de vitesses de vent seront générées à l'aide de la loi de Weibull inverse pour différents intervalles allant jusqu'à un intervalle de temps de dix minutes.

À partir de la loi de Weibull, on obtient la loi de Weibull inverse de la façon suivante :

$$\begin{aligned} f(x) &= \alpha \beta x^{\beta-1} e^{-\alpha x^{\beta}} \\ F(x) &= 1 - e^{-\alpha x^{\beta}} \\ x &= \left[-\frac{1}{\alpha} \ln(1-u) \right]^{\frac{1}{\beta}} \end{aligned} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} x = V \\ \alpha = \left(\frac{1}{c^k} \right) \\ \beta = k \\ u \text{ loi uniforme sur } [0, 1] \end{cases} \quad (2.3.1)$$

Les valeurs de k et c sont évidemment les valeurs des facteurs de forme et d'échelle respectivement déterminés à l'aide de l'étude statistique.

Les valeurs de vitesse de vent ainsi déterminées respecteront les paramètres de la loi de Weibull correspondant aux caractéristiques du site étudié.

2.3.1.2 Classement des nombres

La méthode précédente est très efficace pour générer les nombres mais possède un inconvénient majeur. En effet, elle ne prend pas en compte la répartition temporelle des valeurs.

Pour pallier ce problème, il ne semble pas qu'il y ait de méthode déjà définie. Pour notre cas, deux méthodes ont été envisagées :

- une analyse des différences entre deux voire trois valeurs successives afin de pouvoir illustrer la notion de baisse ou d'augmentation de la vitesse du vent.
- une approche fondée sur une méthode exposée lors du Congrès de l'ACFAS 2004 à Montréal par Messieurs V. Autier et V. Molcretre du Laboratoire des Systèmes Électrotechniques et Environnement de l'Université d'Artois qui est développée ici.

Ensuite, un tri des données générées est effectué afin de répondre à cette dernière analyse. On obtient ainsi une courbe donnant la variation du vent sur une même échelle de temps que celle des mesures de vitesse utilisées dans le cadre de la détermination des paramètres de Weibull.

Pour le classement des nombres, on utilise la Figure 2.3-1.





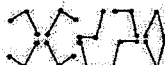
Type de profil		
P_1		Stable
P_2		Légère variation
P_3		Perturbation
P_4		Changement abrupte
P_5		Instable

Figure 2.3-1 : Type de profil

Il faut donc qualifier les variations de la vitesse du vent par la valeur des écarts entre les valeurs qui se suivent. Le tableau suivant présente cette qualification :

Tableau 2.3-1 : Qualification des profils

P1	Différences inférieures à 0.1 m/s entre deux valeurs consécutives
P2	Différence inférieure à 0.1 m/s entre deux valeurs consécutives et différence inférieure à 1 m/s entre les deux autres valeurs consécutives
P3	Différence inférieure à 1 m/s entre deux valeurs consécutives
P4	Trois valeurs consécutives constamment croissantes ou constamment décroissantes
P5	Tous les autres cas

Chaque séquence de trois nombres est ainsi analysée et classée suivant les trois types de profils. Le choix du type de profil est progressif, du profil P1 jusqu'au profil P5 qui correspond à tous les ensembles de trois n'appartenant à aucun des quatre premiers types.

2.3.2. Résultats

Le programme utilise des données réelles provenant du PMPE du MRN. Le fichier de données par défaut contient les vitesses de vent en km/h pour un mois de 30 jours, ce qui correspond à 4320 données de vent aux dix minutes. L'analyse de ces données donne les résultats suivants :

Tableau 2.3-2 : Résultats de l'analyse pour les valeurs réelles

Analyse des facteurs de la loi de Weibull	
Valeur de k	1,7604
Valeur de c	6,8919
Analyse de l'appartenance aux classes de profil de la Figure 2.3-1	
P1	3,340%
P2	21,499%
P3	51,410%
P4	12,246%
P5	11,504%

Remarque : le programme permet aussi de valider la méthode et le programme de calcul des facteurs de forme k et d'échelle c en comparant les résultats avec ceux calculés par la fonction Matlab® **weibfit** qui détermine aussi les valeurs des coefficients de la loi de Weibull. Lorsque que

l'on force un écart de moins de 0.01% entre deux valeurs de k successives lors de l'itération, on obtient un écart relatif de 0.02% entre les valeurs de k calculées par les deux méthodes.

La figure suivante présente la variation temporelle des valeurs réelles :

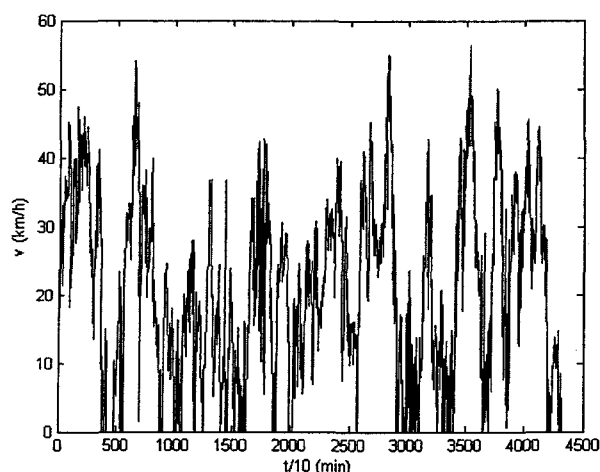


Figure 2.3-2 : Variation temporelle des données réelles

Les valeurs générées avant le tri sont illustrées à la Figure 2.3-3 (4500 valeurs générées).

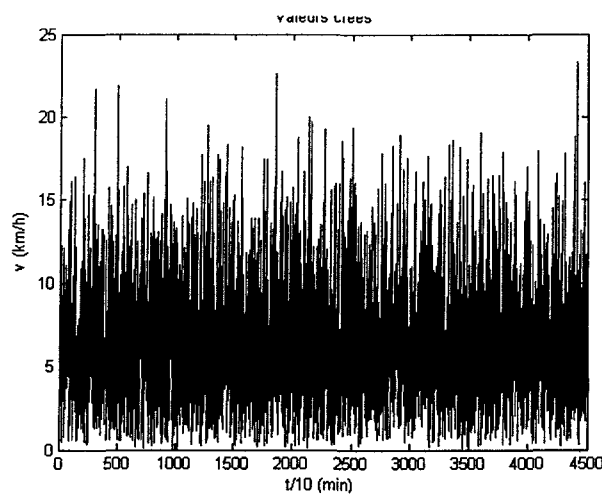


Figure 2.3-3 : Variation temporelle des données générées et non triées

Les valeurs des paramètres de la loi de Weibull pour les vitesses générées non triées ainsi que la répartition par profil sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 2.3-3 : Résultats de l'analyse pour les valeurs générées non triées

Analyse des facteurs de la loi de Weibull	
Valeur de k	1,7403
Valeur de c	6,943
Analyse de l'appartenance aux classes de profil de la Figure 2.3-1	
P1	0,07%
P2	0,58%
P3	2,58%
P4	31,39%
P5	65,38%

Pour les vitesses générées, on obtient donc des erreurs respectives de 1,14% et 0,74% pour les valeurs de k et de c. On peut considérer que ces résultats sont bons si on se fie au faible nombre de valeurs générées (4500).

Par contre, l'analyse du profil montre bien la grande différence entre des données qui représentent les variations de vitesses de vent et des nombres qui possèdent simplement une distribution statistique de Weibull très similaire. Ceci est évidemment encore plus explicite lorsque l'on regarde la variation « temporelle » de ces nombres sur la Figure 2.3-3.

Le tri des données par l'utilisation des profils donne les résultats présentés Figure 2.3-4 et Tableau 2.3-4 pour la variation temporelle des données générées et triées.

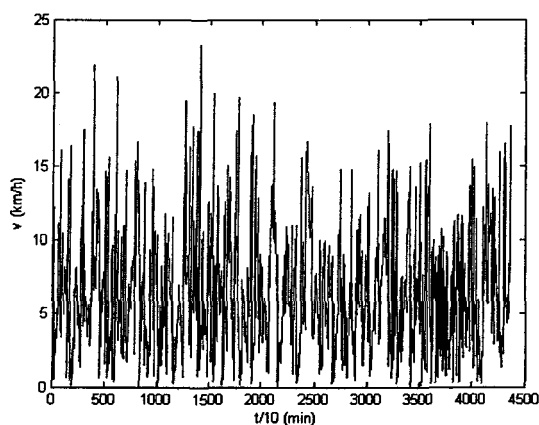


Figure 2.3-4 : Variation temporelle des données générées et triées

Tableau 2.3-4 : Résultats de l'analyse pour les valeurs générées triées

Analyse des facteurs de la loi de Weibull	
Valeur de k	1,7403
Valeur de c	6,943
Analyse de l'appartenance aux classes de profil de la Figure 2.3-1	
P1	3,74%
P2	27,40%
P3	46,63%
P4	13,65%
P5	8,58%

Une nette amélioration a été apportée mais celle-ci n'est pas suffisante surtout si l'on se réfère au tableau suivant :

Tableau 2.3-5 : Comparaison des résultats obtenus pour l'analyse du profil entre les vitesses réelles et les vitesses générées et triées

	Données réelles	Vitesses générées et triées	Erreur
P1	3,34%	3,74%	11,98%
P2	21,50%	27,40%	27,44%
P3	51,41%	46,63%	9,30%
P4	12,25%	13,65%	11,49%
P5	11,50%	8,58%	25,40%

Avant de l'utiliser pour de la génération de vitesses de vent dans le cadre de la mise sur pied d'un banc d'essai, la méthode devrait donc être améliorée.

2.4. Méthode 2 : Utilisation des spectres

Afin de réaliser un générateur capable de générer des vitesses de vent à haute fréquence, il est nécessaire de passer par une analyse fréquentielle. La méthode qui a été développée ici s'appuie sur les équations du livre *Wind Energy Handbook* [6].

2.4.1. Méthodologie

2.4.1.1 Caractérisation géographique du site

La caractérisation géographique consiste ici à déterminer deux paramètres du site, soit la latitude du site en degrés et la rugosité z_0 du terrain mesurée en mètres.

Pour le premier paramètre, il est facile de déterminer les coordonnées d'un site en utilisant par exemple un GPS (Global Positionning System). Par contre, le second est plus difficile à évaluer car il faut caractériser l'environnement du site. Cependant, on peut trouver dans le Tableau 1.3-1 présenté à la page 37 quelques valeurs de rugosité en fonction du type de paysage.

2.4.1.2 Calcul de l'intensité de turbulence

Hypothèses

- On modélise le vent dans la couche limite (*boundary layer*).
- On admet que l'atmosphère est neutre, c'est à dire qu'elle est en équilibre thermique avec l'environnement. Même dans cette situation, il est possible qu'il apparaisse des phénomènes comme la tempête, les bourrasques, les changements brusques de la direction du vent, etc.
- La distribution de probabilité de la composante de turbulence est considérée comme une distribution normale, en dépit du fait qu'il existe des phénomènes comme ceux mentionnés précédemment, qui engendrent une distorsion de la distribution normale.

- On admet que la composante de turbulence a une moyenne nulle sur un horizon de 10 minutes.

Modèles mathématiques

L'intensité de turbulence est :

$$I = \frac{\sigma}{\bar{U}} \quad (2.4.1)$$

où σ et \bar{U} , en m/s, sont respectivement la déviation standard de la turbulence et la vitesse moyenne du vent.

Dans l'atmosphère neutre, les propriétés de la couche limite dépendent de la rugosité du terrain et de l'effet de Coriolis.

La rugosité est caractérisée par la longueur de rugosité z_0 tandis que l'effet de Coriolis est décrit par le paramètre :

$$f = 2\Omega \sin(|\lambda|) \quad (2.4.2)$$

où Ω est la vitesse angulaire de la terre et λ la latitude du site.

La hauteur de la couche limite est :

$$h = \frac{u^*}{6f} \quad (2.4.3)$$

où u^* est nommée vitesse de frottement (*friction velocity*), donnée par la relation :

$$\frac{u^*}{\bar{U}} = \frac{\kappa}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + \psi} \quad (2.4.4)$$

où κ est la constante de von Karman ($\kappa \cong 0,4$), z la hauteur par rapport au sol, et ψ une variable qui dépend de la stabilité atmosphérique. Pour une atmosphère neutre, la relation valable est :

$$\frac{u^*}{\bar{U}} = \frac{34,5 \cdot f \cdot z}{u^*} \quad (2.4.5)$$

et on obtient l'équation itérative non linéaire suivante :

$$\frac{u^*}{\bar{U}} = \frac{\kappa}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + 34,5 \cdot f \cdot \frac{z}{u^*}} \quad (2.4.6)$$

dont la solution nous donne la vitesse de frottement u^* . Si on néglige le terme ψ par rapport à $\ln(z/z_0)$, on obtient la relation approximative :

$$u^* = \frac{\bar{U} \cdot \kappa}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (2.4.7)$$

Nous déterminons la solution u^* en résolvant l'équation (2.4.6) par la méthode des itérations.

Pour cela, on pose l'équation (2.4.6) sous la forme :

$$u^* = \frac{\kappa \cdot \bar{U} \cdot u^*}{u^* \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + 34,5 \cdot f \cdot z} \quad (2.4.8)$$

On peut ensuite réaliser entre dix et quinze itérations de la forme :

$$u^*(i) = \frac{\kappa \cdot \bar{U} \cdot u^*(i-1)}{u^*(i-1) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + 34,5 \cdot f \cdot z} \quad (2.4.9)$$

avec l'initialisation :

$$u^*(0) = \frac{\bar{U} \cdot \kappa}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (2.4.10)$$

En effet, pour l'initialisation de l'itération, il est intéressant d'utiliser une valeur approchée de u^* pour améliorer les performances du calcul. De plus, l'utilisation de la relation approximative (2.4.7) peut-être justifiée avec le calcul suivant : pour $z_0=0,1$, $z=60$, nous obtenons : $34,5f \frac{z}{u} = 0,2297$ alors que $\ln(z/z_0) = 6,3969$.

Dans l'approche la plus simple, la déviation standard de la composante de turbulence de la vitesse du vent sur la direction longitudinale est donnée par la relation approximative :

$$\sigma_u \cong 2,5u^* \quad (2.4.11)$$

Cependant suivant des travaux plus récents [41], on recommande l'utilisation de la relation :

$$\sigma_u = \frac{7,5\eta \left(0,538 + 0,9 \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)\right)^p \cdot u^*}{1 + 0,156 \cdot \ln\left(\frac{u^*}{f \cdot z_0}\right)} \quad (2.4.12)$$

où

$$\eta = 1 - \frac{6 \cdot f \cdot z}{u^*} \quad (2.4.13)$$

$$\rho = \eta^{16} \quad (2.4.14)$$

Les relations (2.4.11) et (2.4.12) donnent des valeurs approchées au niveau du sol, mais elles donnent des valeurs qui diffèrent sensiblement aux niveaux plus élevés.

L'intensité de turbulence longitudinale est donnée par la relation :

$$I_u = \frac{\sigma_u}{U} \quad (2.4.15)$$

Les intensités de turbulence sur les directions latérale et verticale sont, respectivement :

$$I_v = \frac{\sigma_v}{U} = I_u \left(1 - 0,22 \cos^4 \left(\frac{\pi z}{2h} \right) \right) \quad (2.4.16)$$

$$I_w = \frac{\sigma_w}{U} = I_u \left(1 - 0,45 \cos^4 \left(\frac{\pi z}{2h} \right) \right) \quad (2.4.17)$$

Le modèle mathématique ci-avant présenté est général, puisqu'il inclut tous les facteurs qui déterminent le niveau de l'intensité de turbulence.

Il existe des approches plus simples qui négligent une partie de ces facteurs :

- **Le standard danois DS472 [42]**, pour lequel on néglige l'effet de la vitesse moyenne du vent \bar{U} . Le modèle est donné par les équations suivantes :

$$I_u = \frac{1}{\ln \left(\frac{z}{z_0} \right)} \quad (2.4.18)$$

$$I_v = 0,8 I_u \quad (2.4.19)$$

$$I_w = 0,5 I_u \quad (2.4.20)$$

- **Le standard ICE [43]** qui a les particularités suivantes :
 - on néglige l'effet de la hauteur, z ;
 - la rugosité est évaluée pour deux niveaux « flous » : « haute » turbulence du site (*higher turbulence sites*) et « basse » turbulence du site (*lower turbulence sites*).

Le modèle est donné par :

$$I_u = \frac{I_{15} \left(a + \frac{15}{U} \right)}{a+1} \quad (2.4.21)$$

avec $I_{15} = \begin{cases} 0,18 & \text{niveau « haut »} \\ 0,16 & \text{niveau « bas »} \end{cases}$ et $a = \begin{cases} 2 & \text{niveau « haut »} \\ 3 & \text{niveau « bas »} \end{cases}$.

$$I_v = 0,8 I_u \quad (2.4.22)$$

$$I_w = 0,5 I_u \quad (2.4.23)$$

- **Les règles de Germanischer Lloyd [44]** négligent toutes les influences des variables

z_0 , z et U . On admet ici : $I_u = 0,2$ (2.4.24)

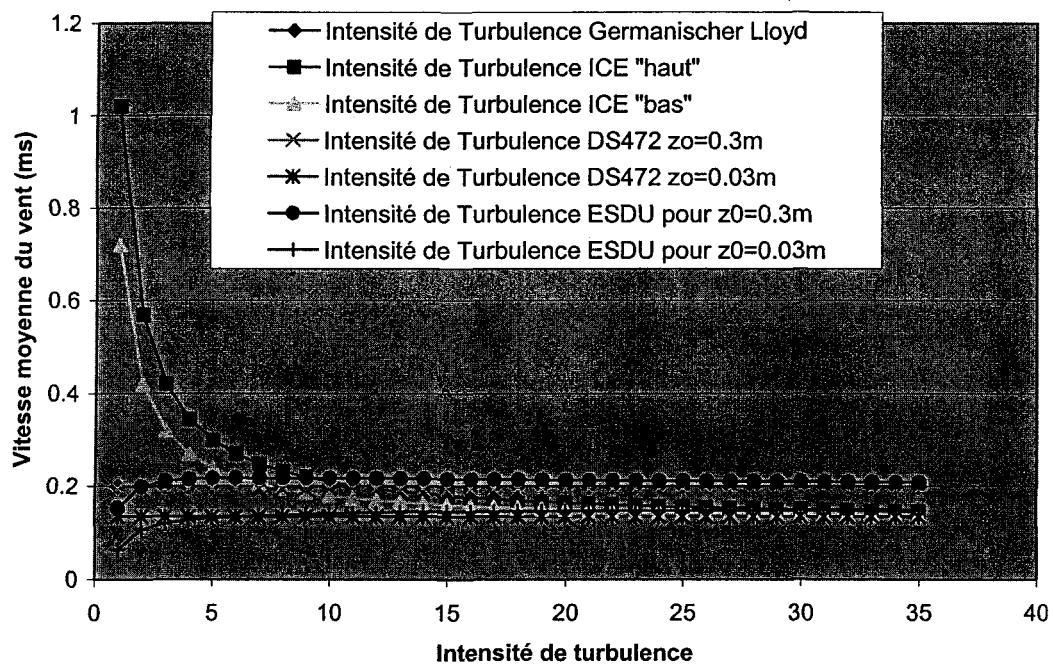


Figure 2.4-1 : Courbes comparatives des intensités de turbulence suivant le standard utilisé pour $z=50$ m et une latitude de $48,4^\circ$

2.4.1.3 Calcul de la longueur de turbulence (*length scale*)

La longueur de turbulence est un paramètre qui intervient dans le modèle de la caractéristique spectrale de puissance de la composante de turbulence. Il dépend des facteurs suivants :

- Le type de spectre utilisé pour modéliser la turbulence :
 - Spectre de type **Kaimal** : on utilise les notations L_{1u} , L_{1v} et L_{1w} pour les longueurs de turbulence selon les directions longitudinale, latérale et verticale, respectivement.
 - Spectre de type **von Karman**, où les longueurs de turbulence mentionnées sont alors notées par L_{2u} , L_{2v} et L_{2w} .
- La longueur de rugosité, en mètre, z_0 .
- La hauteur z , en mètre, par rapport au sol.

Modèles mathématiques

Il existe trois méthodes de calcul pour ce paramètre :

- une méthode plus générale, basée sur les paramètres d'entrée z_0 et z ;
- et les standards DS472 et ICE, où on utilise seulement la hauteur z (il existe aussi le standard Eurocode 1 [45], mais celui-ci n'est pas utilisé pour les systèmes éoliens).

Méthode générale

À l'aide du paramètre z_0 , on calcule la variable z_1 :

$$z_i = 1000 \cdot z_0^{0,18} \quad (2.4.25)$$

Les paramètres L_{2u} , L_{2v} et L_{2w} du spectre de von Karman sont alors :

$$L_{2u} = 280 \cdot \left(\frac{z}{z_i} \right)^{0,35} \quad (2.4.26)$$

$$L_{2v} = 140 \cdot \left(\frac{z}{z_i} \right)^{0,48} \quad (2.4.27)$$

$$L_{2v} = 0,35 \cdot z \quad \text{valable pour } z < 400 \text{ m} \quad (2.4.28)$$

Pour le spectre de Kaimal, les longueurs de turbulence sont calculées à l'aide des paramètres issus des équations (2.4.26) à (2.4.28) du spectre de von Karman, avec les relations suivantes :

$$L_{1u} = 2,329 \cdot L_{2u} \quad (2.4.29)$$

$$L_{1v} = 3,2054 \cdot L_{2v} \quad (2.4.30)$$

$$L_{1w} = 3,2054 \cdot L_{2w} \quad (2.4.31)$$

Remarque : les paramètres de base L_{1u} et L_{2u} , qui concernent la composante longitudinale de la vitesse du vent, peuvent être reliés par une relation d'essence théorique : aux fréquences élevées ($\omega \rightarrow \infty$), les caractéristiques spectrales de Kaimal et de von Karman ont la même asymptote, de pente $-\frac{5}{3} \cdot 20$ dB/décade, d'où résulte la relation (2.4.29) : $L_{1u} = 2,329 \cdot L_{2u}$.

Standard Danois DS 472

Pour le spectre de Kaimal, on a :

$$L_{1u} = \begin{cases} 150 \text{ m} & \text{pour } z \geq 30 \text{ m} \\ 5z & \text{pour } z < 30 \text{ m} \end{cases} \quad (2.4.32)$$

$$L_{1v} = 0,3 \cdot L_{1u} \quad (2.4.33)$$

$$L_{1w} = 0,14 \cdot L_{1u} \quad (2.4.34)$$

Le standard DS 472 ne fait pas référence au spectre de von Karman, mais il est possible d'utiliser les relations (2.4.29) à (2.4.31) pour déterminer les longueurs de turbulence.

Standard IEC

Pour le spectre de Kaimal, on a :

$$L_{1u} = \begin{cases} 170,1 \text{ m} & \text{pour } z \geq 30 \text{ m} \\ 5,67 \cdot z & \text{pour } z < 30 \text{ m} \end{cases} \quad (2.4.35)$$

$$L_{1v} = 0,3333 \cdot L_{1u} \quad (2.4.36)$$

$$L_{1w} = 0,08148 \cdot L_{1u} \quad (2.4.37)$$

Et pour le spectre de von Karman :

$$L_{2u} = \begin{cases} 73,5 \text{ m} & \text{pour } z \geq 30 \text{ m} \\ 2,45 \cdot z & \text{pour } z < 30 \text{ m} \end{cases} \quad (2.4.38)$$

$$L_{2u} = L_{2w} = 0,5 \cdot L_{2u} \quad (2.4.39)$$

2.4.1.4 Génération numérique des spectres de Kaimal et de von Karman et des caractéristiques de fréquence non paramétriques de ces spectres

Spectre de Kaimal

Sur la direction longitudinale (u), on a :

$$\frac{f \cdot S_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{4 \left(\frac{f \cdot L_{1u}}{\bar{U}} \right)}{\left(1 + 6 \left(\frac{f \cdot L_{1u}}{\bar{U}} \right) \right)^{\frac{5}{3}}} \quad (2.4.40)$$

- où :
- f est la fréquence en Hz ;
 - L_{1u} est la longueur de turbulence sur la direction u (longitudinale), en mètre ;
 - \bar{U} est la vitesse moyenne du vent, en m/s ;
 - σ_u^2 est la variance de la vitesse (composante de turbulence) sur la direction u .

Sur les **directions latérale** (v) et **verticale** (w), le spectre de Kaimal a la même forme en utilisant les paramètres L_{1v} et L_{1w} , respectivement.

La **densité spectrale de puissance** (normée) qui correspond au spectre de Kaimal est :

$$\frac{S_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{4T_f}{(1 + 6f \cdot T_f)^{5/3}} \quad (2.4.41)$$

où T_f est une constante de temps définie par :

$$T_f = \frac{L_{1u}}{\bar{U}} \quad (2.4.42)$$

La **caractéristique de fréquence du filtre de formation** qui peut engendrer à la sortie la densité spectrale de puissance donnée par la relation (2.4.41) est :

$$G(f) = \frac{\sqrt{4 \cdot T_f}}{(1 + 6f \cdot T_f)^{5/6}} \quad (2.4.43)$$

Spectre de von Karman

Sur la **direction longitudinale** (u), on a :

$$\frac{f \cdot S_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{4 \left(\frac{f \cdot L_{2u}}{U} \right)}{\left(1 + 70,8 \left(\frac{f \cdot L_{2u}}{U} \right)^2 \right)^{5/6}} \quad (2.4.44)$$

où sont utilisées les notations précédentes (l'indice 2 dans L_{2u} spécifiant le spectre de von Karman).

Sur les **directions latérale** (v) et **verticale** (w), le spectre de von Karman est :

$$\frac{f \cdot S_i(f)}{\sigma_i^2} = \frac{4 \left(\frac{f \cdot L_{2i}}{U} \right) \cdot \left[1 + 755,2 \left(\frac{f \cdot L_{2i}}{U} \right)^2 \right]}{\left[1 + 283,2 \left(\frac{f \cdot L_{2i}}{U} \right)^2 \right]^{11/6}} \quad (2.4.45)$$

où $i = v$ – pour la direction latérale et $i = w$ – pour la direction verticale.

Les densités spectrales de puissance (normées) sont, respectivement :

$$\frac{S_u(f)}{\sigma_u^2} = \frac{4T_f}{\left[1 + (f \cdot T_{f2})^2 \right]^{5/3}} \quad (2.4.46)$$

$$\frac{S_i(f)}{\sigma_i^2} = \frac{4T_f \left[1 + (f \cdot T_{f1i})^2 \right]}{\left[1 + (f \cdot T_{f2i})^2 \right]^{11/6}} \quad (2.4.47)$$

où $i = v, w$ et avec

$$T_f = \frac{L_{2u}}{U} \quad (2.4.48)$$

$$T_{f2} = \sqrt{70,8} \cdot T_f \quad (2.4.49)$$

$$T_{fi} = \frac{L_{2i}}{U} \quad (2.4.50)$$

$$T_{f1i} = \sqrt{755.2} \cdot T_{fi} \quad (2.4.51)$$

$$T_{f2i} = \sqrt{283.2} \cdot T_{fi} \quad (2.4.52)$$

Les caractéristiques de fréquence des filtres de formation sont :

$$G(f) = \frac{\sqrt{4T_f}}{\left[1 + (f \cdot T_{f2})^2\right]^{5/12}} \quad (2.4.53)$$

$$G_i(f) = \frac{\sqrt{4T_{fi}} \left[1 + (f \cdot T_{f1i})^2\right]}{\left[1 + (f \cdot T_{f2i})^2\right]^{11/12}} \text{ avec } i=v,w \text{ respectivement} \quad (2.4.54)$$

Résultats

Pour toute l'étude, les paramètres suivants ont été utilisés :

- méthode de calcul pour l'intensité et la longueur de turbulence parmi les modèles présentés : IS=1 : modèle général, IS=2 : standard DS 472 et IS=3 : standard IEC ;
- type de spectre : IK=1 : spectre de Kaimal et IK=2 : spectre de von Karman.

Tracé comparatif des spectres, des densités spectrales (normées) et des caractéristiques des filtres de formation (d'ordre non entier) pour les paramètres suivants : $z_0=0,001$ m, $z=30$ m, $U=10$ m/s et $IS=3$.

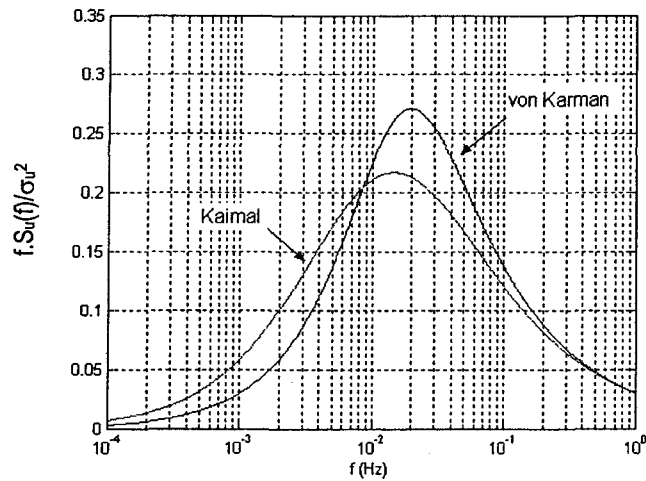


Figure 2.4-2 : « Spectres » de von Karman et de Kaimal $\frac{f \cdot S_u(f)}{\sigma_u^2}$, en échelle semi-logarithmique

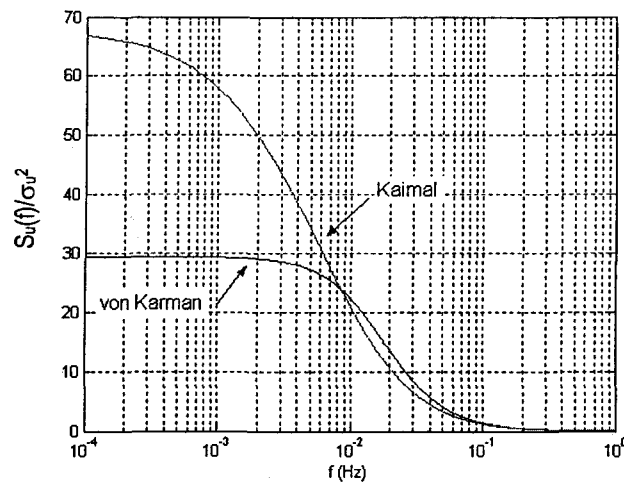


Figure 2.4-3 : Caractéristiques spectrales de puissance de von Karman et de Kaimal $\frac{S_u(f)}{\sigma_u^2}$, en échelle semi-logarithmique

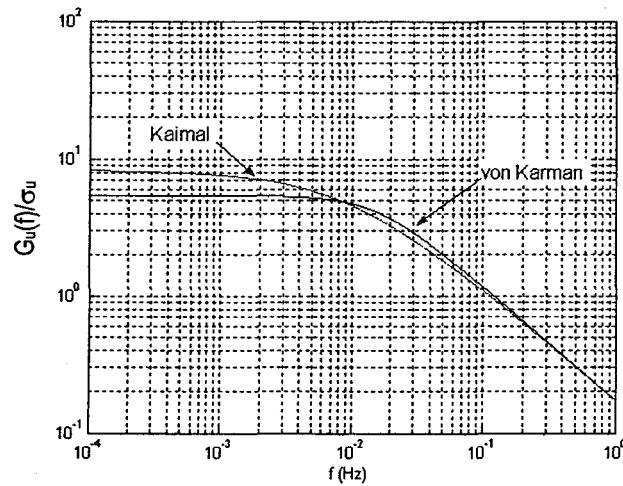


Figure 2.4-4 : Caractéristiques de fréquence des filtres de formation non-paramétriques, pour les spectres de von Karman et de Kaimal, $\frac{G_u(f)}{\sigma_u}$ en échelle double-logarithmique

2.4.1.5 Obtention des filtres de formation rationnels

Principes de simulation de la composante de turbulence

Il existe deux possibilités de simulation numérique de la composante de turbulence, en partant des modèles de Kaimal ou de von Karman :

- utilisation de filtres de formation d'ordre non entier, issus des modèles Kaimal et von Karman ;
- détermination de filtres de formation rationnels qui approximent les caractéristiques de filtres d'ordre non entier de Kaimal/von Karman.

Méthode 1

Soit la caractéristique de gain donnée par la relation (2.4.53) d'un filtre de formation pour le modèle de von Karman :

$$G(f) = \frac{\sqrt{4T_f}}{\left[1 + (f \cdot T_{f2})^2\right]^{5/12}} \quad (2.4.55)$$

Cette caractéristique peut être posée sous la forme :

$$G(\omega) = |H(j\omega)| = \frac{K}{\left(\sqrt{1 + (\omega \cdot T)^2}\right)^{5/6}} \quad (2.4.56)$$

où
$$K = \sqrt{4T_f}, T = \frac{T_{f2}}{2\pi} \text{ et } \omega = 2\pi f \quad (2.4.57)$$

Elle provient d'un filtre d'ordre 5/6, dont la réponse fréquentielle est :

$$H(j\omega) = \frac{K}{(1 + \omega \cdot T)^{5/6}} \quad (2.4.58)$$

Le procédé de simulation, à la base du modèle (2.4.58), implique les étapes suivantes :

- Le calcul de la partie réelle de la réponse fréquentielle (2.4.58) :

$$P(\omega) = \text{Re}\{H(j\omega)\} \text{ et } \omega = 0 : d\omega : \omega_{\max} \quad (2.4.59)$$

où, après les informations initiales concernant la caractéristique de fréquence (Figure 2.4-4), on adopte : $df = 0,001$ et $f_{\max} = 1$ avec $\omega = 2\pi f$ donc $N+1$ échantillons, avec $N = 1000$.

En effet, le pas $d\omega$ ne fait qu'influencer la représentation graphique de la caractéristique de Bode. Étant dans l'échelle logarithmique, le graphique ne part pas de zéro ($\log(0)=\text{inf}$), mais de $d\omega$.

Pour le spectre de von Karman, une fréquence minimale de 0,001 est suffisante puisque la caractéristique est quasiment constante (Figure 2.4-4) jusqu'à 0,01 et pour la valeur maximale de 1 la pente de la caractéristique est atteinte. On peut remarquer ici que le cas est différent pour la représentation du modèle de Kaimal pour laquelle il est nécessaire de prendre un pas $d\omega$ plus petit, on choisit alors 0,0002 (figures 2.4-5 et 2.4-6). Pour les deux représentations, si on veut une partie horizontale plus large dans les basses fréquences, il suffit alors de diminuer encore le pas.

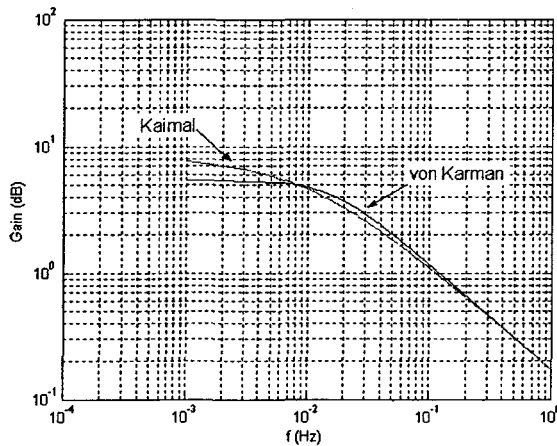


Figure 2.4-5 : Représentation des caractéristiques pour $df=0,001$

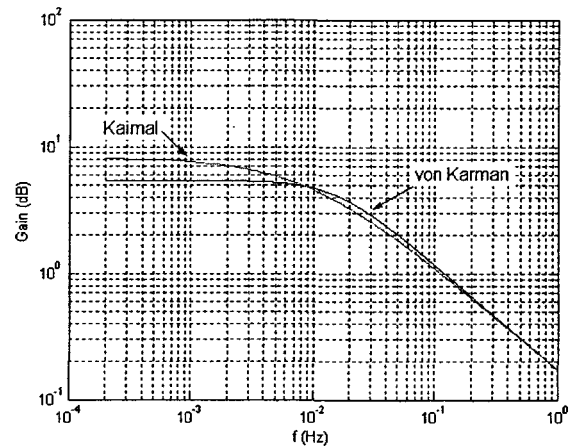


Figure 2.4-6 : Représentation des caractéristiques pour $df=0,0002$

- Le calcul de la réponse impulsionnelle du filtre de formation :

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} P(\omega) \cos(\omega \cdot t) d\omega \cong \frac{2}{\pi} \int_0^{T_{\max}} P(\omega) \cos(\omega \cdot t) d\omega \quad (2.4.60)$$

où on admet que pour $t > t_{\max}$, $h(t) \cong 0$.

Le calcul numérique de la réponse impulsionnelle échantillonnée est fait à l'aide de :

$$h(j \cdot dt) = \frac{2}{\pi} d\omega \sum_{i=0}^N P(i \cdot d\omega) \cos(i \cdot d\omega \cdot j \cdot dt) \quad (2.4.61)$$

en considérant le temps t discrétisé sous la forme : $t = 0 : dt : t_{\max}$, $dt = 0,2s$, $t_{\max} = 100s$ et $M = 500$.

- L'obtention de la composante de turbulence comme la réponse du filtre dont l'entrée est alimentée par le bruit blanc w . On utilise le modèle du filtre de type convolution :

$$v_u(t) = \int_0^{t_{\max}} h(\tau) w(t-\tau) d\tau \quad (2.4.62)$$

où $v_u(t)$ est la composante longitudinale de la turbulence. Pour les valeurs discrètes du temps

$$\begin{aligned} t &= i \cdot dt && \text{avec } i = 0, 1, 2, \dots \\ \tau &= k \cdot dt && \text{avec } k = \overline{0, M} \end{aligned} \quad (2.4.63)$$

on a

$$v_u(i) = dt \cdot \sum_{k=0}^M h(k) w(i-k) \quad (2.4.64)$$

Ce procédé a deux inconvénients :

- il implique un grand volume de calcul ;
- il est applicable seulement pour le modèle de von Karman. Le modèle de Kaimal n'a pas naturellement une réponse fréquentielle pour $\omega \in (-\infty, +\infty)$, dont la transformée inverse de Fourier nous donne la réponse fréquentielle $h(t)$.

Méthode 2

On détermine des filtres de formation rationnels qui approximent les caractéristiques de filtres d'ordre non entier de Kaimal et de von Karman. Le principe de réalisation d'une pente de

-20α dB/décade, $\alpha < 1$, est illustré Figure 2.4-7, en termes de caractéristiques asymptotiques (en réalité, l'approximation est faite pour une courbe dont la pente varie continuellement).

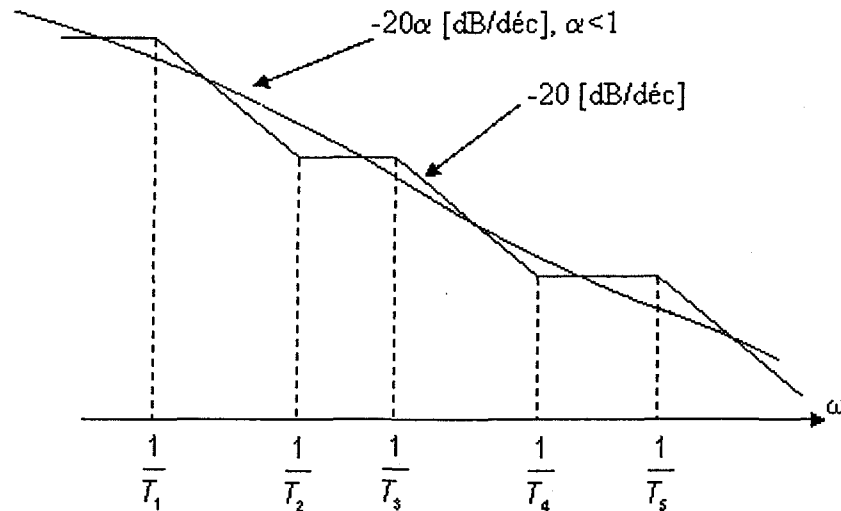


Figure 2.4-7 : Principe de réalisation d'une pente de -20α dB/décade, $\alpha < 1$

La fonction de transfert du filtre de formation est :

$$H_f(s) = \frac{K(T_2s+1)(T_4s+1)\cdots}{(T_1s+1)(T_3s+1)(T_5s+1)\cdots} \quad (2.4.65)$$

Le procédé est général et permet l'utilisation des deux modèles de turbulence, Kaimal et von Karman : c'est la raison pour laquelle il a été adopté.

Synthèse du filtre de formation rationnel optimal pour le spectre de Kaimal

Le spectre de turbulence, comme caractéristique de la fréquence à approximer, varie en fonction de différents paramètres : la vitesse moyenne, la hauteur, etc. Il est essentiel de synthétiser un filtre de formation rationnel qui s'adapte aux paramètres mentionnés.

L'idée est d'utiliser comme constante de temps pilote du filtre rationnel, la constante de temps $T_{fi} = 6T_f = 6 \frac{L_i}{U}$ ($i=u, v, w$ – correspondant aux 3 directions) du filtre d'ordre non entier. Les autres constantes de temps de la fonction de transfert (2.4.65) sont rapportées à cette constante de temps.

La fonction de transfert du filtre de formation pour le spectre de Kaimal est :

$$H_{fi}(s) = \frac{\sqrt{4T_{fi}} (m_1 T_{fi} s + 1)(m_3 T_{fi} s + 1)}{(T_{fi} s + 1)(m_2 T_{fi} s + 1)(m_4 T_{fi} s + 1)} \quad (2.4.66)$$

où
$$T_{fi} = \frac{L_i}{U} \text{ et } T_{fii} = 6T_{fi} \text{ avec } i \in \{u, v, w\} \quad (2.4.67)$$

La forme de la caractéristique de fréquence est déterminée par les fréquences de cassure, où la fréquence de cassure $1/T_{fi1}$ pilote les autres : $\frac{1}{m_k T_{fii}}$, $k=1, 2, 3, 4$.

Les paramètres m_k , $k=\overline{1,4}$ sont ajustés de telle sorte que la déviation standard de l'erreur d'approximation soit minimisée :

$$\varepsilon(f_i) = G(f_i) - G_{FR}(f_i) \quad (2.4.68)$$

Dans la relation (2.4.68), $G(f)$ est la caractéristique de fréquence d'ordre non entier, $G_{FR}(f)$ est la caractéristique de fréquence du filtre rationnel (2.4.66) et f_i les fréquences discrètes dans la bande $[0,001 ; 1]$, avec le pas $df = 0,001$.

L'utilisation de 4 paramètres m_k est justifiée par les courbes suivantes. En effet, pour deux ou trois paramètres, le filtre de formation n'est pas assez proche du spectre de Kaimal.

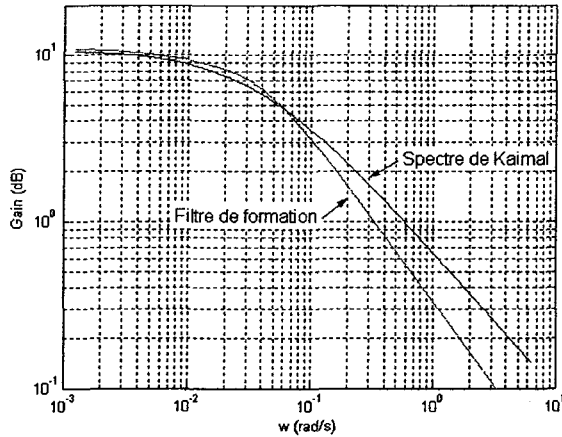


Figure 2.4-8 : Filtre de formation pour le spectre de Kaimal pour deux paramètres

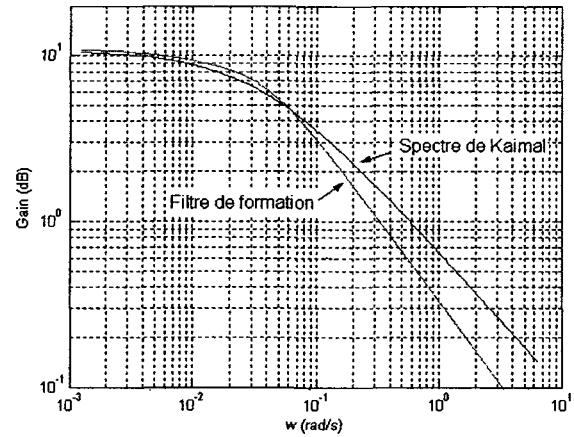


Figure 2.4-10 : Filtre de formation pour le spectre de Kaimal pour trois paramètres avec une fonction de type

$$H_f(s) = \frac{\sqrt{4T_f} (m_1 T_{f1} s + 1)(m_3 T_{f1} s + 1)}{(T_{f1} s + 1)(m_2 T_{f1} s + 1)}$$

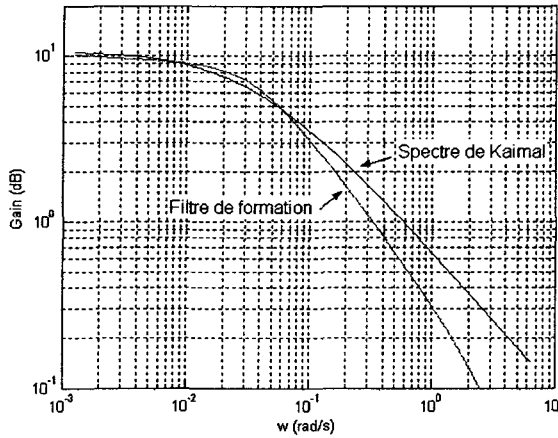


Figure 2.4-9 : Filtre de formation pour le spectre de Kaimal pour trois paramètres avec une fonction de type

$$H_f(s) = \frac{\sqrt{4T_f} (m_1 T_{f1} s + 1)}{(T_{f1} s + 1)(m_2 T_{f1} s + 1)(m_4 T_{f1} s + 1)}$$

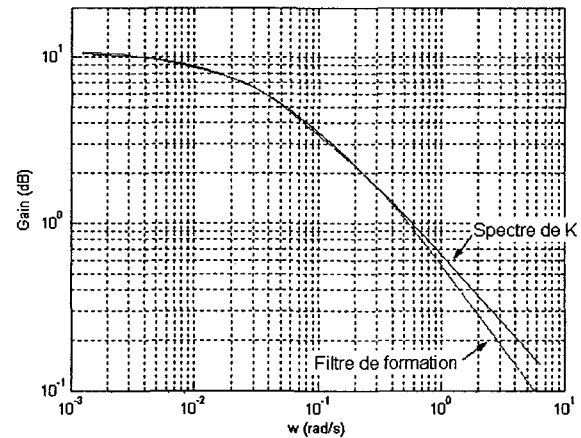


Figure 2.4-11 : Filtre de formation pour le spectre de Kaimal pour quatre paramètres

De plus, des facteurs de pondération ont été introduits pour modifier les valeurs de m_3 et m_4 déterminées par l'optimisation. Ces facteurs ne sont pas nécessaires mais permettent d'améliorer les résultats pour les plus hautes fréquences. En effet, pour les fréquences élevées le gain est réduit donc la différence de gain aussi (équation (2.4.68)) ce qui donne une erreur plus petite. Les facteurs

de pondération ont été déterminés après plusieurs tests qui ont été arrêtés lorsque l'erreur a été réduite de façon acceptable sans détériorer les résultats. Les résultats sont l'utilisation des facteurs de pondération 0,95 pour m_3 ($m_3=m_3*0,95$) et 0,85 pour m_4 ($m_4=m_4*0,85$).

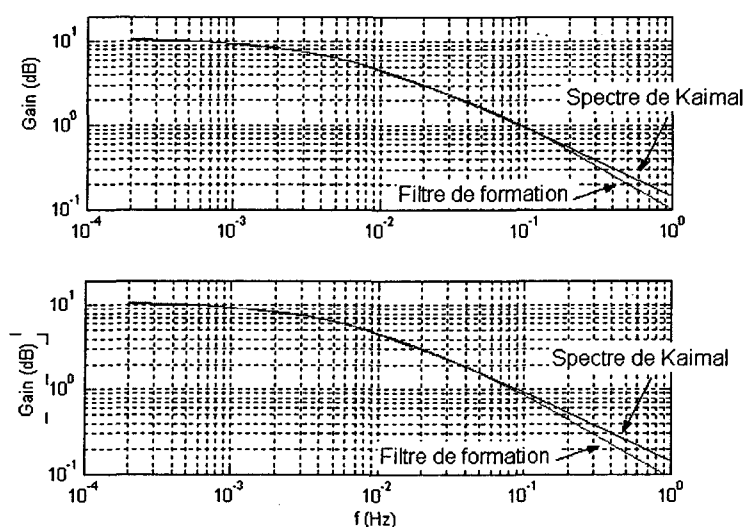


Figure 2.4-12 : Représentation du spectre de Kaimal et des filtres de formation pondéré (figure du haut) et non pondéré (figure du bas) en échelle loglog

Enfin, différents tests ont permis de montrer que les valeurs des paramètres m_k varient peu même si l'on modifie les conditions initiales (valeurs de z , de z_0 et de \bar{U}). Le tableau suivant illustre ces résultats :

Tableau 2.4-1 : Tableau de comparaison des valeurs des paramètres pour différentes conditions initiales pour le spectre de longitudinal de Kaimal avec la méthode générale ($IS=1$)

Valeurs des conditions initiales			Valeurs des paramètres			
U (m/s)	z (m)	z_0 (m)	m_1	m_2	m_3	m_4
10	10	0,001	4,8277	6,3859	-0,32569	-0,15334
		0,1	4,8155	6,3956	-0,33395	-0,1604
		1	4,8093	6,4006	-0,33801	-0,16399
	30	0,001	4,8433	6,3737	-0,31485	-0,14447
		0,1	4,8317	6,383	-0,32299	-0,1511
		1	4,8257	6,3876	-0,32713	-0,15455
	50	0,001	4,8501	6,3684	-0,30992	-0,14055

15	10	0,1	4,839	6,3772	-0,31797	-0,14698
		1	4,8331	6,3819	-0,32204	-0,15031
		0,001	4,8106	6,3996	-0,33718	-0,16325
	30	0,1	4,798	6,4096	-0,34509	-0,17046
		1	4,7917	6,4147	-0,3488	-0,17399
		0,001	4,8269	6,3866	-0,32628	-0,15384
		0,1	4,8146	6,3963	-0,33454	-0,16092
		1	4,8084	6,4013	-0,33859	-0,16451
		50	0,001	4,8343	6,3809	-0,32121
	0,1		4,8222	6,3903	-0,32946	-0,15652
	1		4,8161	6,3952	-0,33359	-0,16008
	Moyenne		4,8221	6,3905	-0,3293	-0,1566
	Écart-type		0,0155	0,01224351	0,0103439	0,00887581

Remarques :

- Le fait de changer le modèle de calcul pour l'intensité de turbulence a aussi peu d'impact. Ceci est illustré par le Tableau 2.4-2. Les valeurs des erreurs sont très faibles pour les paramètres m_1 et m_2 qui sont les plus influents.

Tableau 2.4-2 : Influence du choix de la méthode de calcul de la longueur de turbulence sur les paramètres m_i

IS	m_1	m_2	m_3	m_4
1	4,8433	6,3737	-0,31485	-0,14447
2	4,8154	6,3957	-0,33403	-0,16047
3	4,8207	6,3914	-0,33046	-0,15738
Erreur pour IS=2 par rapport à IS=1	0,58%	0,35%	6,09%	11,07%
Erreur pour IS=3 par rapport à IS=1	0,47%	0,28%	4,96%	8,94%

- Pour le spectre de Kaimal, on trouve des valeurs de m_3 et m_4 négatives. Celles-ci ne posent pas de problème pour le moment car le filtre de formation n'est pas utilisé pour générer des valeurs. Cependant, il sera nécessaire par la suite de prendre les valeurs absolues de ces paramètres pour ne pas avoir un filtre instable. De plus, l'utilisation des valeurs absolues ne change pas le filtre.

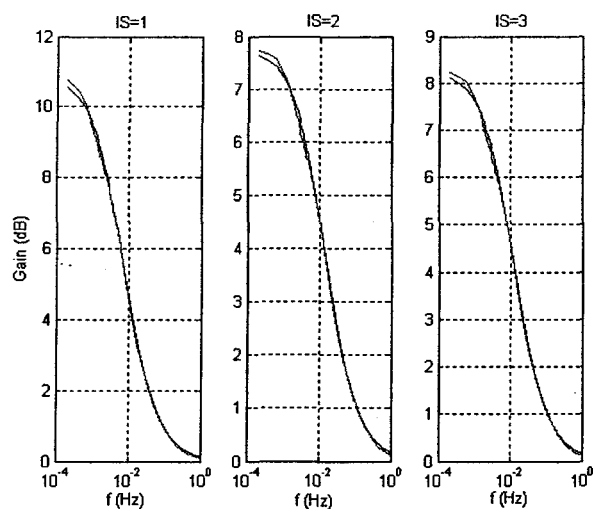


Figure 2.4-13 : Comparaison des caractéristiques de fréquences du filtre d'ordre non entier et du filtre rationnel pour différentes valeurs de IS en échelle semilog

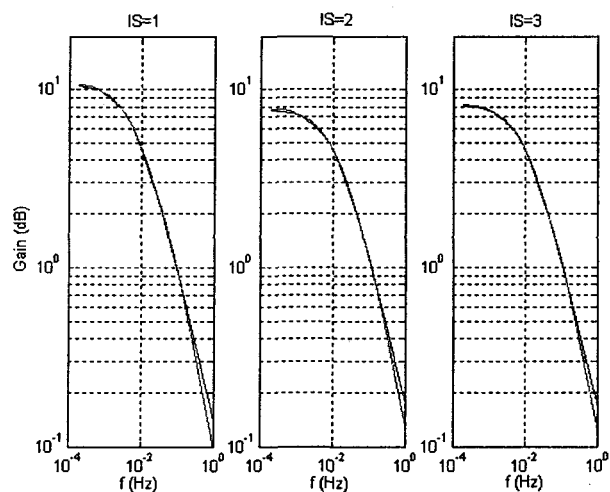


Figure 2.4-14 : Comparaison des caractéristiques de fréquences du filtre d'ordre non entier et du filtre rationnel pour différentes valeurs de IS en échelle loglog

Par la suite, dans certains cas, pour améliorer les vitesses de calculs, les paramètres m_k seront fixés. Leurs valeurs ayant été préalablement évaluées et considérées comme satisfaisantes pour différentes conditions initiales.

Synthèse des filtres de formation rationnels pour le spectre de von Karman

Spectre sur la direction longitudinale

La fonction de transfert du filtre de formation rationnel est :

$$H_{fu}(s) = \frac{\sqrt{4T_f}(m_1T_{f2}s+1)}{(T_{f2}s+1)(m_2T_{f2}s+1)} \quad (2.4.69)$$

où
$$T_f = \frac{L_2}{U} \quad \text{et} \quad T_{f2} = \sqrt{70.8} \cdot T_f / 2\pi \quad (2.4.70)$$

T_{f2} est la constante de temps pilote du filtre, elle dépend de z_0 , z , et \bar{U} . Les paramètres m_1 et m_2 , qui déterminent les fréquences de cassure additionnelles, $\frac{1}{m_1T_{f2}}$ et $\frac{1}{m_2T_{f2}}$, sont : $m_1 = 0,4$ et $m_2=0,25$ (paramètres déterminés avec une série de tests).

Spectre sur les directions latérale et verticale

La fonction de transfert du filtre de formation rationnel est :

$$H_{fi}(s) = \frac{\sqrt{4T_{fi}}(T_{fi}s+1)(m_1T_{fi}s+1)}{(T_{f2i}s+1)(m_2T_{f2i}s+1)(m_3T_{f2i}s+1)} \quad \text{avec } i \in \{v, w\} \quad (2.4.71)$$

où
$$\begin{cases} T_{fi} = \frac{L_{2i}}{U} \\ T_{f1i} = \sqrt{755.2} \cdot T_{fi} \\ T_{f2i} = \sqrt{283.2} \cdot T_{fi} \end{cases} \quad \text{avec } i \in \{v, w\} \quad (2.4.72)$$

Ici, on utilise deux constantes de temps pilotes, T_{f1i} et T_{f2i} , et trois constantes de temps m_1T_{f1i} , m_2T_{f2i} , m_3T_{f2i} qui dépendent des paramètres d'optimisation m_1 , m_2 et m_3 .

Puisque la caractéristique de fréquence a une « résonance » aux petites fréquences, elle est donc difficile à approximer aux basses fréquences et il a été introduit un facteur de pondération, qui donne une importance élevée au domaine des basses fréquences.

Les valeurs discrètes de ce facteur sont :

$$e^{-k \cdot 2\pi f_i} \text{ avec } f_i = 0.001 \cdot i \text{ et } i = \overline{0,1000} \quad (2.4.73)$$

Donc, on minimise la déviation standard des valeurs :

$$\varepsilon(f_i) \cdot e^{-k \cdot 2\pi f_i} \quad (2.4.74)$$

où

$$\varepsilon(f_i) = G(f_i) - G_{FR}(f_i) \quad (2.4.75)$$

La valeur de k est alors choisie afin d'obtenir les meilleurs résultats. **Elle est fixée égale à 2 par la suite.**

Ci-après sont présentés les résultats avec et sans pondération pour démontrer l'amélioration qu'apporte l'utilisation de la pondération.

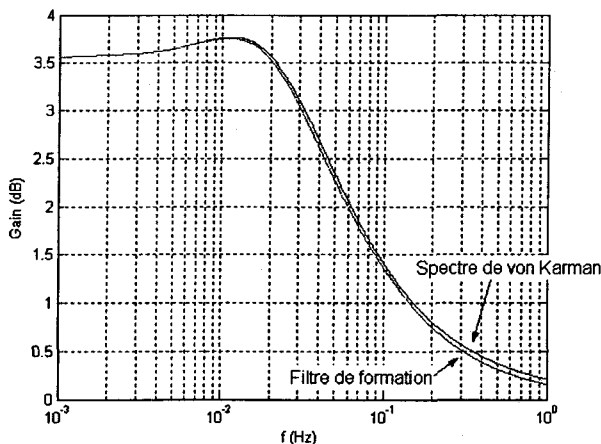


Figure 2.4-15 : Représentation du spectre de von Karman sur la direction latérale et du filtre de formation non pondéré en échelle semilog (caractéristique de Bode) sans pondération

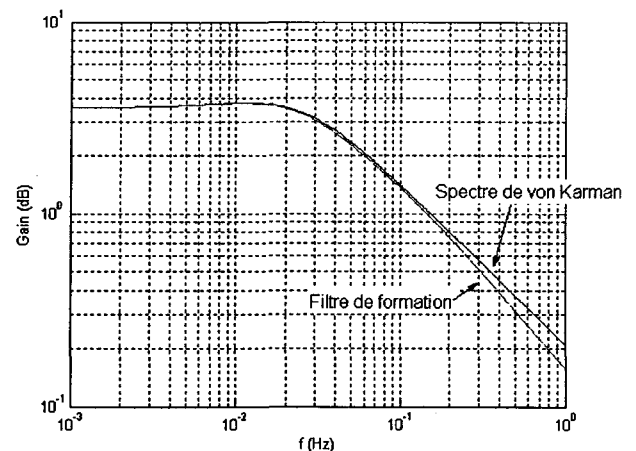


Figure 2.4-16 : Représentation du spectre de von Karman sur la direction latérale et du filtre de formation non pondéré en échelle loglog (caractéristique de Bode) sans pondération

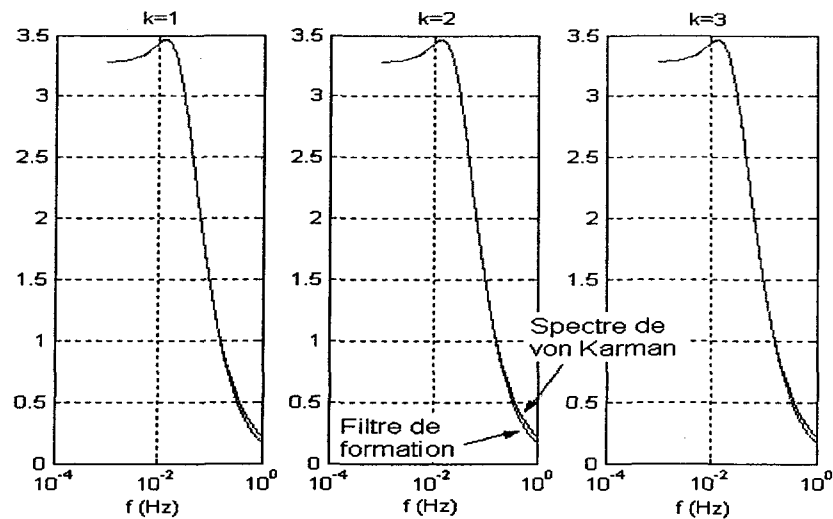


Figure 2.4-17: Représentation du spectre de von Karman sur la direction latérale et du filtre de formation non pondéré en échelle semilog (caractéristique de Bode) pour différentes pondérations

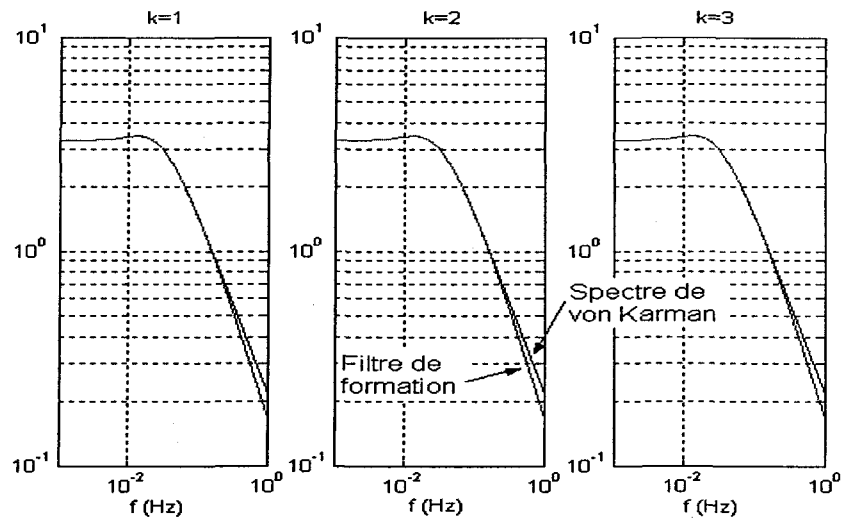


Figure 2.4-18 : Représentation du spectre de von Karman sur la direction latérale et du filtre de formation non pondéré en échelle loglog (caractéristique de Bode) pour différentes pondérations

Exemple : pour $z_0=0,7$ m, $z=30$ m, $\bar{U}=10$ m/s et $IS=1$, les valeurs pour les paramètres sont :

- sans la pondération : $m_1=0,1676$, $m_2=0,9389$ et $m_3=0,2025$;
- avec la pondération ($k=2$) : $m_1=0,2014$, $m_2=0,9292$ et $m_3=0,2423$.

2.4.1.6 Principe de génération de la vitesse du vent comme processus aléatoire non stationnaire

Le schéma de principe du générateur de la vitesse du vent est donné par la figure suivante :

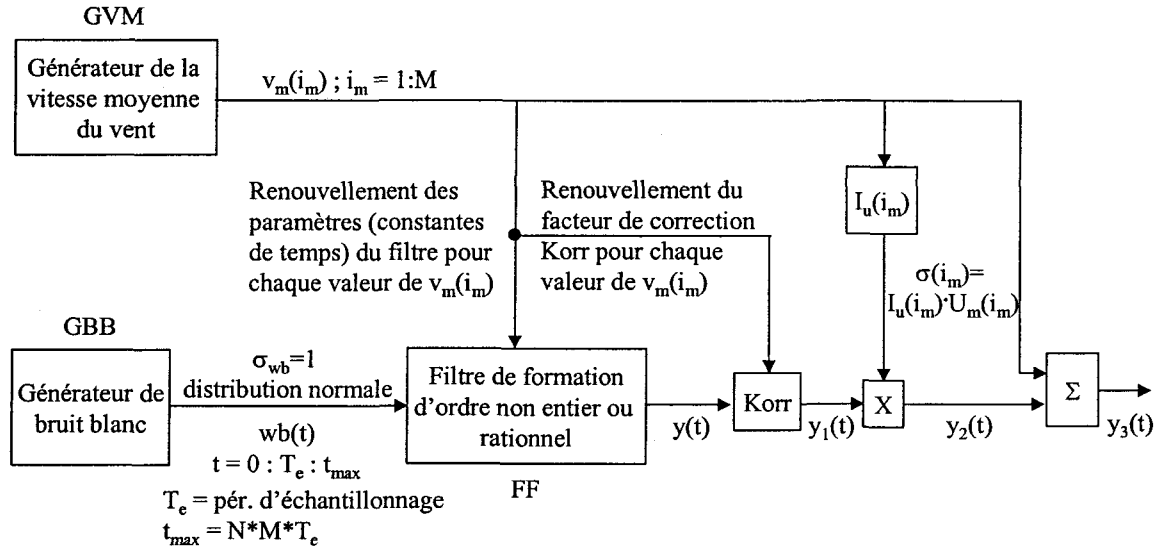


Figure 2.4-19 : Schéma présentant le principe du générateur de vitesses de vent

On note :

- $v_m(i_m)$, $i_m = \overline{1, M}$, est la suite des vitesses moyennes engendrées par GVM (Générateur de Vitesses Moyennes) ; chaque valeur $v_m(i_m)$ est obtenue par la moyenne sur N valeurs instantanées de la vitesse du vent, acquises avec la période d'échantillonnage T_e . Nous avons considéré : $T_e = 1$, $N = 600$ et $M = 36$. Donc $N \cdot T_e = 600s$ (les moyennes sont sur 10 minutes) et $t_{max} = N \cdot M \cdot T_e = 21600s = 6h$.
- $wb(t)$ est le bruit blanc engendré avec la période d'échantillonnage T_e , donc $t = i \cdot T_e = i$, avec $i = 0, 1, 2, \dots$
- $y(t)$ est le bruit coloré obtenu à la sortie du filtre de formation (FF). Ce filtre a des paramètres (constantes de temps) qui dépendent de la vitesse moyenne courante,

$v_m(i_m)$, $i_m = \overline{1, M}$. Même si les propriétés dynamiques de la série de temps $y(t)$ correspondent à la composante courante de turbulence, la déviation standard, σ_y , n'est pas unitaire. Il est nécessaire d'ajuster l'échelle (l'amplitude) de $y(t)$, pour qu'il y ait une déviation standard unitaire. Cet ajustement est fait, à chaque pas i_m , par le facteur de correction Korr.

- $y_1(t)$ est une série de temps dont les propriétés dynamiques correspondent au modèle courant de la composante de turbulence du vent, mais la déviation standard, σ_{y1} , est unitaire (théoriquement, – en réalité $\sigma_{y1}(i_m)$ est une variable aléatoire qui doit être proche de 1).
- $y_2(t)$ est la composante de turbulence. Elle est obtenue en multipliant $y_1(t)$ par la déviation standard $\sigma(i_m)$, issue de la valeur courante de l'intensité de turbulence $I_u(i_m)$.
- $y_3(t) = y_2(t) + v_m(i_m)$ est la valeur instantanée de la vitesse du vent.

2.4.1.7 Validation du principe

Théorie

Le problème le plus difficile est de déterminer la constante de correction Korr. On a la relation :

$$S_y(\omega) = |H_{FF}(j\omega)|^2 \cdot S_{wb}(\omega) \quad (2.4.76)$$

où $S_y(\omega)$ et $S_{wb}(\omega)$ sont les densités spectrales de puissance des variables $y(t)$ et $w_b(t)$, respectivement, et $H_{FF}(\omega)$ la réponse fréquentielle du filtre de formation.

Puisque $y_1(t) = \text{Korr} \cdot y(t)$ (2.4.77)

on a $S_{y_1}(\omega) = \text{Korr}^2 \cdot S_y(\omega) = \text{Korr}^2 \cdot |H_{FF}(j\omega)|^2 \cdot S_{wb}(\omega)$ (2.4.78)

➤ Soit le cas où **FF est d'ordre non entier** : le modèle de von Karman du filtre est :

$$H_{FF}(j\omega) = \frac{\sqrt{4T_f}}{(1 + j\omega \cdot T_{f2})^{5/6}} \quad (2.4.79)$$

et $S_{y_1}(\omega) = \frac{4T_f \cdot \text{Korr}^2}{[1 + (\omega \cdot T_{f2})^2]^{5/6}} \cdot S_{wb}(\omega) = \frac{4T_f \cdot \text{Korr}^2}{[1 + (\omega \cdot T_{f2})^2]^{5/6}} \cdot T_e$ (2.4.80)

car (annexe IX) : $S_{wb}(\omega) = T_e$ (2.4.81)

On sait que : $\sigma_{y_1}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_{y_1}(\omega) d\omega$ (2.4.82)

donc, la condition $\sigma_{y_1}^2 = 1$ devient :

$$\frac{1}{2\pi} \cdot 4T_f \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{[1 + (\omega T_{f2})^2]^{5/6}} \cdot d\omega = 1 \quad (2.4.83)$$

qu'on peut écrire

$$\frac{1}{2\pi} \cdot 4T_f \cdot \text{Korr}^2 \cdot T_e \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{[1 + (\omega \cdot T_{f2})^2]^{5/6}} \cdot d\omega = 1 \quad (2.4.84)$$

Mais, on connaît la relation analytique [32] :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{[1 + (\omega \cdot T_{f2})^2]^{5/6}} \cdot d\omega = \frac{1}{T_{f2}} B\left(\frac{1}{2}, \frac{5}{6}, -\frac{1}{2}\right) = \frac{1}{T_{f2}} B\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{3}\right) \quad (2.4.85)$$

Et selon (2.4.84) et (2.4.85), on obtient la solution analytique pour Korr :

$$Korr = \sqrt{\frac{2\pi}{B\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{3}\right)} \cdot \frac{T_{f2}}{T_e} \cdot \frac{1}{4 \cdot T_f}} \quad (2.4.86)$$

où B est la fonction « bêta ».

➤ Soit le cas où **FF est rationnel** : la fonction de transfert du filtre $H_{FF}(s)$ est assez simple, pour la modélisation de von Karman de la composante de turbulence longitudinale, mais elle devient complexe pour les composantes latérale et verticale, comme pour les modèles de type Kaimal. La seule solution est d'évaluer par une méthode numérique l'intégrale :

$$Int = \int_{-\infty}^{+\infty} |H_{FF}(j\omega)|^2 d\omega \quad (2.4.87)$$

Pour le modèle de von Karman de la composante longitudinale, on a :

$$H_{FF}(j\omega) = \frac{\sqrt{4T_f} (1 + j\omega \cdot m_1 \cdot T_{f2})}{(1 + j\omega T_{f2})(1 + j\omega \cdot m_2 \cdot T_{f2})} \quad (2.4.88)$$

avec $m_1 = 0,4$; $m_2 = 0,25$

Le calcul de l'intégrale (2.4.87) est fait en utilisant la méthode des trapèzes. Le facteur de correction est :

$$Korr = \sqrt{\frac{2\pi}{Int \cdot T_e}} \quad (2.4.89)$$

L'objectif de la validation est de constater que le résultat obtenu par la méthode numérique (qui est approximative, mais plus générale, et pouvant être utilisée pour tous les modèles du filtre de formation) corresponde au résultat analytique (2.4.86).

Pour assurer une bonne vitesse de calcul en simulation, l'intégration des équations du filtre rationnel est faite avec la méthodologie suivante :

- On développe la fonction de transfert $H_{FF}(s)$ comme suit :

$$H_{FF}(s) = \sum_{k=1}^n \frac{r_k}{1-p_k} \quad (2.4.90)$$

où n est l'ordre du filtre, p_k et r_k , les pôles et résidus, respectivement.

- On effectue la discrétisation du modèle par une méthode usuelle. Si on utilise le bloqueur d'ordre zéro (annexe VIII), on a :

$$H_{FF}(z) = \sum_{k=1}^n \frac{b_k z^{-1}}{1-a_k z^{-1}} \quad (2.4.91)$$

où
$$a_k = \exp(T_\theta \cdot p_k) \text{ et } b_k = -\frac{r_k}{p_k}(1-a_k) \quad (2.4.92)$$

- Ainsi, les équations récurrentes du filtre deviennent :

$$\begin{cases} v_k(i) = a_k \cdot v_k(i-1) + b_k \cdot wb(i-1) \\ y(i) = \sum_{k=1}^n v_k(i) \end{cases} \quad (2.4.93)$$

L'objectif de la validation est de constater que le résultat obtenu avec les équations (2.4.93) correspond au résultat donné avec une fonction de simulation Matlab® : **lsim**.

Résultats de la génération

Nous présentons, ci-après, les résultats avec l'utilisation du spectre de von Karman, du standard IEC pour le calcul de l'intensité de turbulence et de la méthode standard pour le calcul de la longueur de turbulence.

Conclusion sur les résultats :

- les valeurs $\sigma_{y1}(i_m)$, $i_m = \overline{1, \overline{M}}$, sont proches de la valeur unitaire (Figure 2.4-22) ;
- la différence entre le coefficient de correction Kcorr, obtenu à l'aide de la relation (2.4.89), et le coefficient de correction Corr, obtenu à l'aide de la relation (2.4.86), est faible. La différence maximale est de 1.4% (Figure 2.4-25).

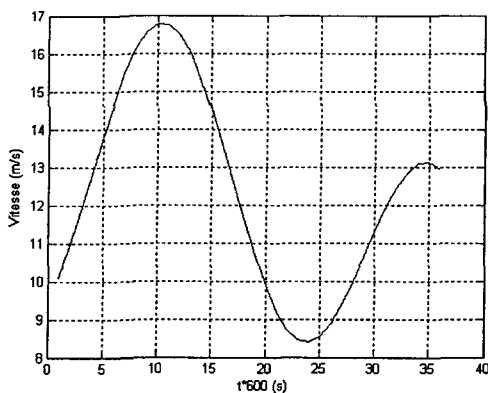


Figure 2.4-20 : Variation de la vitesse moyenne

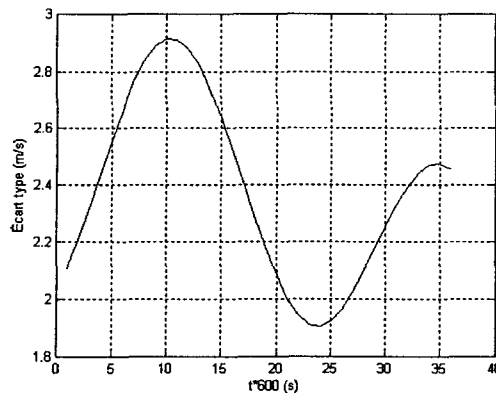


Figure 2.4-21 : Variation de l'écart-type

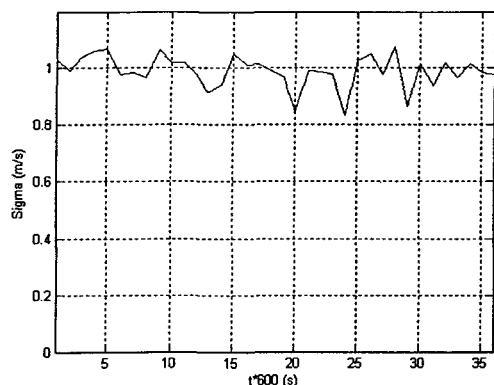


Figure 2.4-22 : Variation de l'écart-type à la sortie du filtre de formation

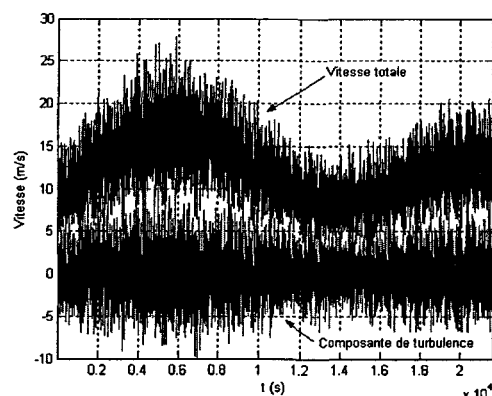


Figure 2.4-23 : Variation de la vitesse totale et de la turbulence

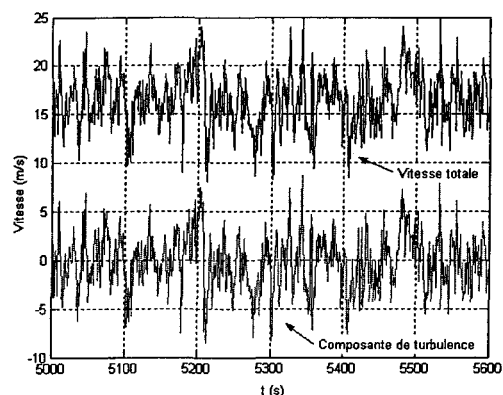


Figure 2.4-24 : Variation de la vitesse totale et de la turbulence sur 600 secondes

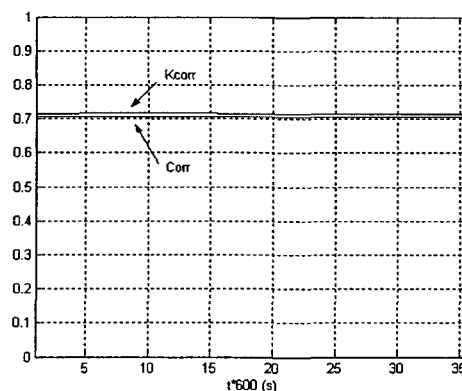


Figure 2.4-25 : Variation des facteurs de corrections

Résultats de la validation

Les figures ci-après montrent les deux signaux ($y_2(t)$, composante de la turbulence, et le signal généré par **lsim**) ainsi que la différence entre eux et valident la méthode utilisée.

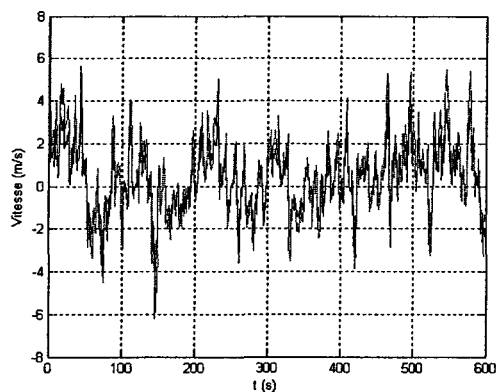


Figure 2.4-26 : Validation de la méthode

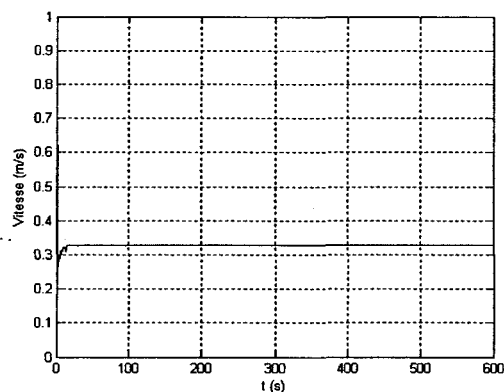


Figure 2.4-27 : Erreur (%) entre le Y2 (la turbulence) et le signal généré par Isim

2.4.1.8 Développement des logiciels finaux pour la génération du vent non stationnaire selon le modèle de von Karman

Algorithme

Le schéma suivant illustre le principe de génération de la vitesse du vent :

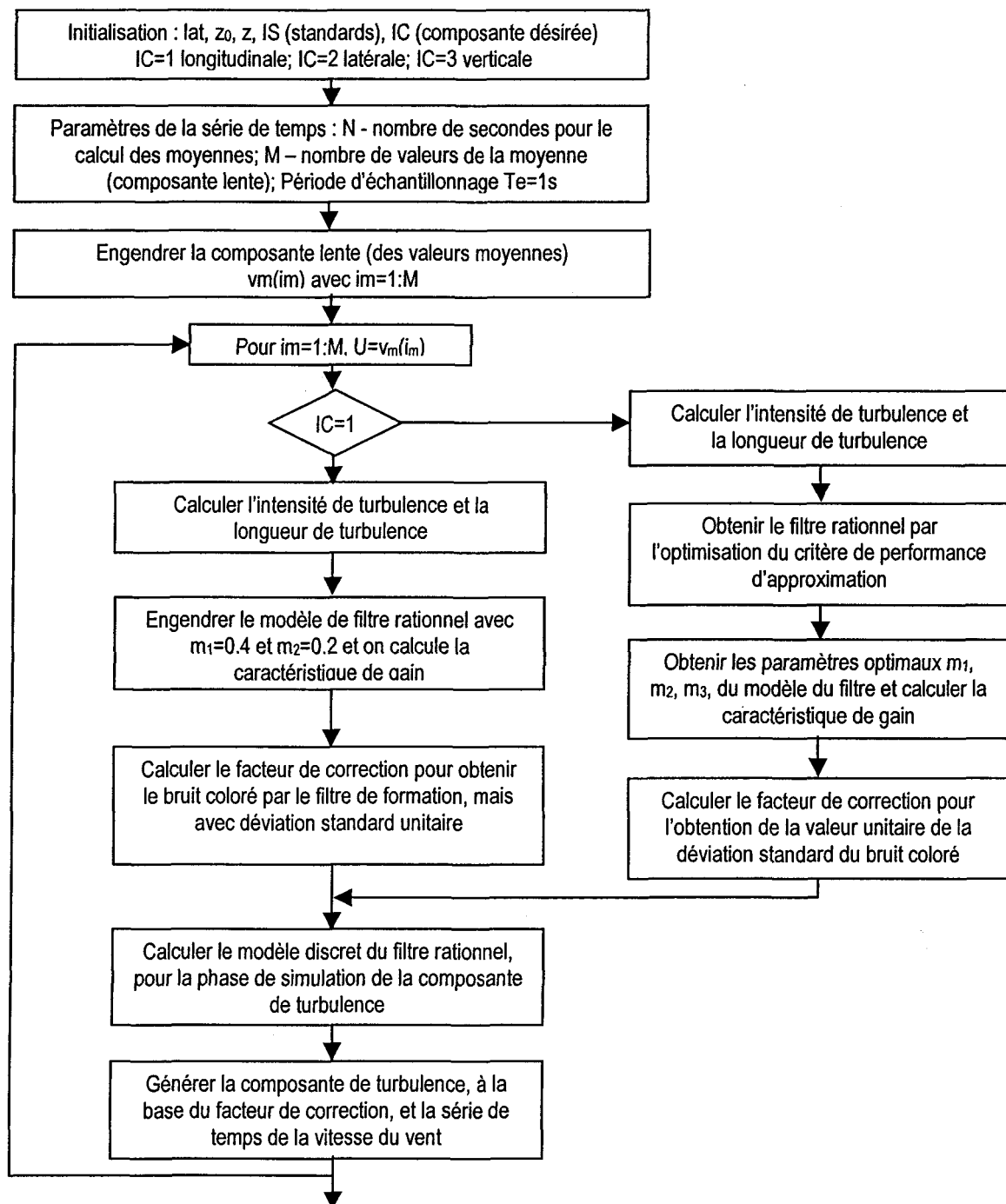


Figure 2.4-28 : Algorithme de génération de la vitesse du vent selon le modèle de von Karman

Résultats

Le programme fonctionne pour toutes les combinaisons (IS, IC) même pour IS=2 pour lequel le modèle de von Karman n'est pas prévu.

Certains résultats sont présentés ici pour des valeurs de N=600 et M=36 (représentation sur 21600s soit 6 heures) avec une rugosité $z_0=0,3$ m, une altitude $z=50$ m, une latitude $\text{lat}=50^\circ$, pour IS=1 et pour les trois directions.

Les variations de la vitesse de vent et de l'écart-type ne sont représentées que pour IC=1, étant identiques pour IC=2 et IC=3.

Pour IS=1 et IC=1

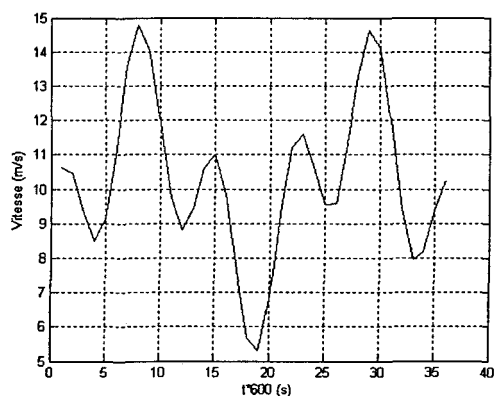


Figure 2.4-29 : Variation de la vitesse du vent pour IS=1 et IC=1

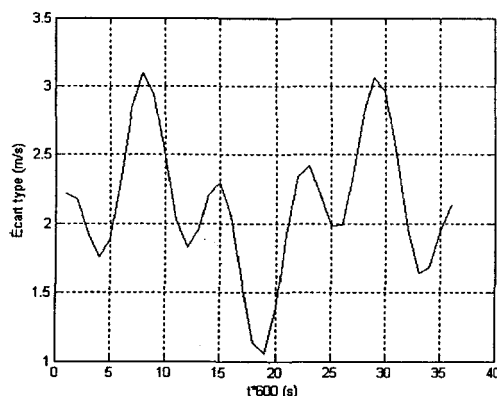


Figure 2.4-30 : Variation de l'écart-type pour IS=1 et IC=1

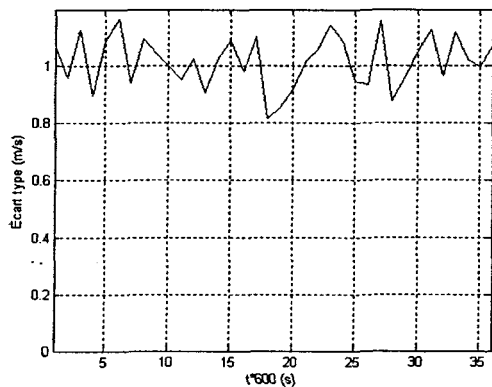


Figure 2.4-31 : Variation de l'écart-type à la sortie du filtre de formation pour IS=1 et IC=1

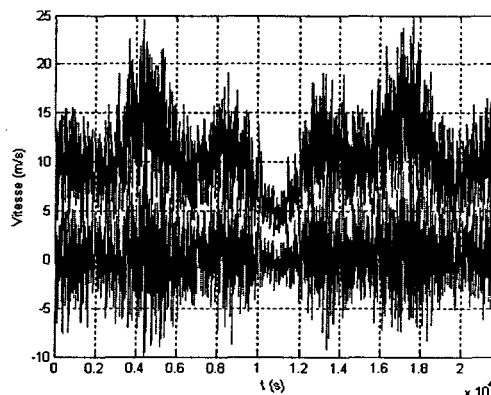


Figure 2.4-32 : Variation de la vitesse totale et de la turbulence pour IS=1 et IC=1

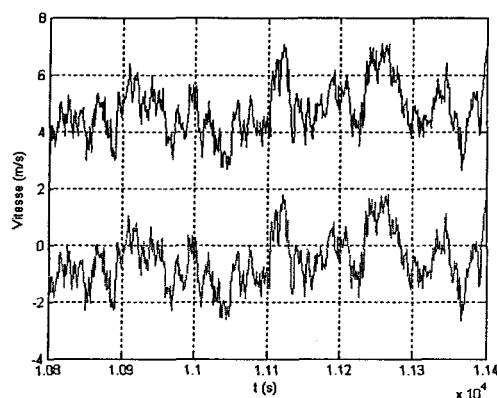


Figure 2.4-33 : Variation de la vitesse totale et de la turbulence sur 600s pour IS=1 et IC=1

Pour IS=1 et IC=2

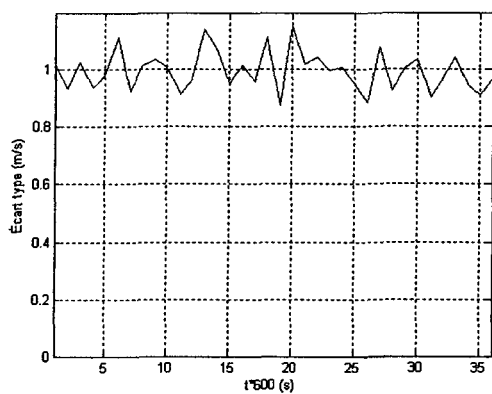


Figure 2.4-34 : Variation de l'écart-type à la sortie du filtre de formation pour IS=1 et IC=2

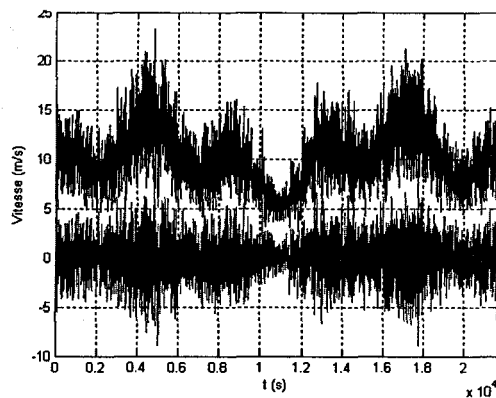


Figure 2.4-35 : Variation de la vitesse totale et de la turbulence pour IS=1 et IC=2

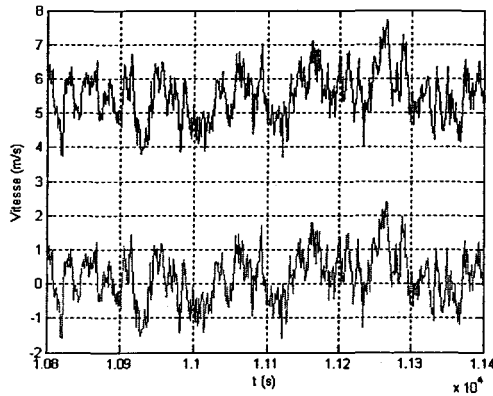


Figure 2.4-36 : Variation de la vitesse totale et de la turbulence sur 600s pour IS=1 et IC=2

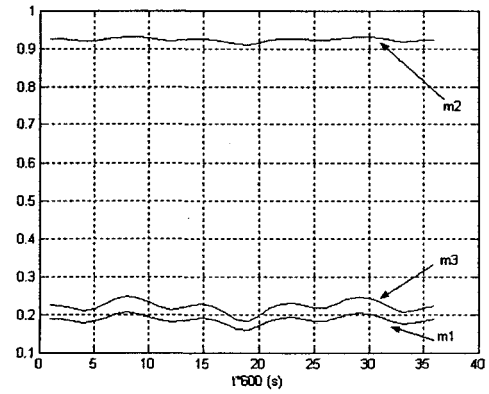


Figure 2.4-37 : Variation des paramètres m_i pour IS=1 et IC=2

Pour IS=1 et IC=3

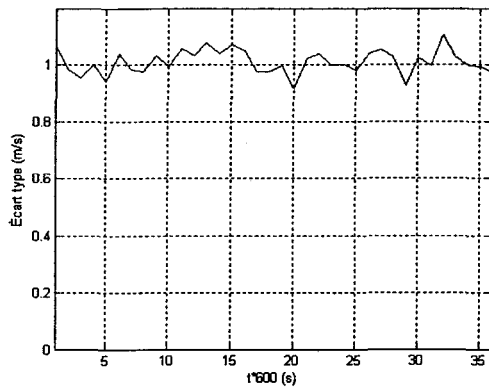


Figure 2.4-38 : Variation de l'écart-type à la sortie du filtre de formation pour IS=1 et IC=3

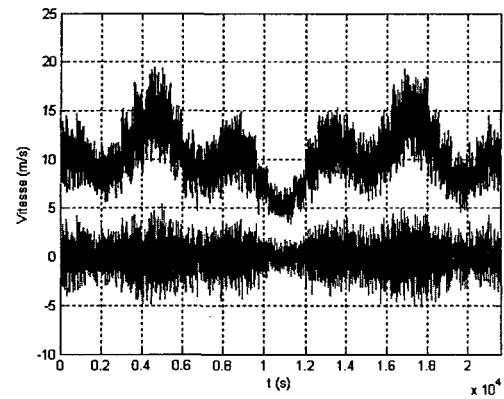


Figure 2.4-39 : Variation de la vitesse totale et de la turbulence pour IS=1 et IC=3

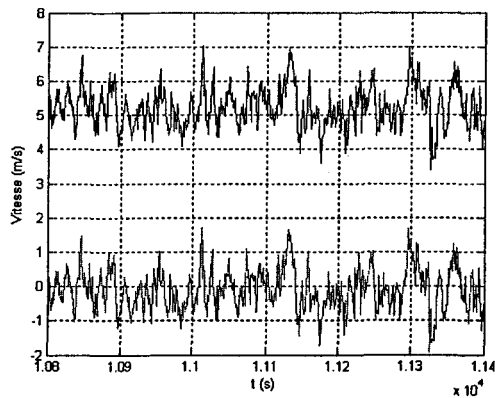


Figure 2.4-40 : Variation de la vitesse totale et de la turbulence sur 600s pour IS=1 et IC=3

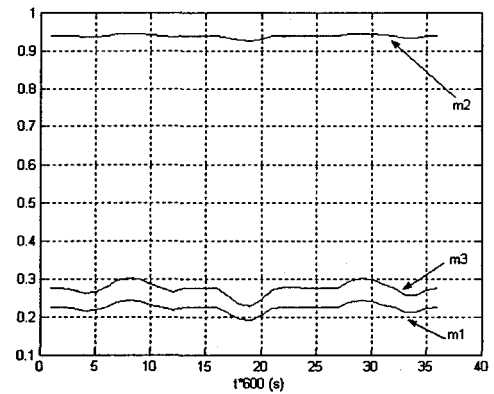


Figure 2.4-41 : Variation des paramètres m_i pour IS=1 et IC=3

Conclusions

Influence du choix du modèle de calcul pour l'intensité et la longueur de turbulence

Le modèle général d'une part, et les standards DS 472 et IEC, d'autre part, donnent des résultats différents selon les paramètres essentiels l_u , l_v , l_w , et L_u , L_v , L_w , qui sont reflétés dans les formes et les propriétés des séries de temps qui représentent le vent. Le modèle général est très nuancé par rapport aux paramètres z_0 , z , \bar{U} et lat . Par contre, les standards DS 472 et IEC sont très synthétiques ; ils ne sont pas sensibles ou suffisamment détaillés par rapport aux paramètres z_0 , lat . De plus, les dépendances de z et \bar{U} sont très simples (exemple : $L_u=150$ m si $z>30$ m et $L_u=5z$ si $z<30$ m).

Par conséquent, les résultats obtenus avec $IS=3$ et $IS=2$ sont similaires, mais ils diffèrent par rapport à $IS=1$. Pour illustrer cette situation, sur les figures 2.4-42 et 2.4-43 sont donnés trois « segments de vent » ayant des moyennes basse (5,3 m/s), modérée (8,5 m/s) et élevée (11,9 m/s) (respectivement du haut vers le bas), pour $IS = 3$ et $IS=2$, avec les paramètres $z_0=0,7$ et $z=10$. Si on modifie ces paramètres (seulement pour $IS=3$) dans le sens opposé tel que $z_0=0,001$ (donc de 0,7 à 0,001, diminution de la turbulence) et $z=50$ (donc de 10 m à 50 m, diminution de la turbulence), les résultats correspondants sont présentés sur la Figure 2.4-45.

Si on détermine les 6 enregistrements, avec les paramètres mentionnés, mais pour $IS=1$, on obtient la Figure 2.4-44 (correspondant aux figures 2.4-42 et 2.4-43) et la Figure 2.4-46 (correspondant à la Figure 2.4-45). On voit que le modèle général donne des résultats très nuancés comparativement aux résultats pour les standards DS 472 et IEC.

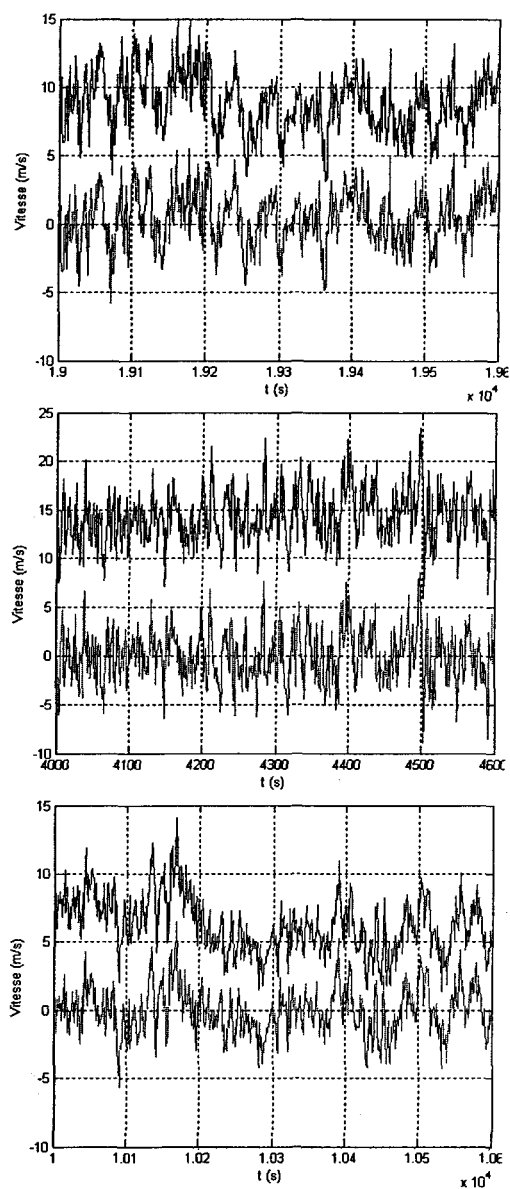


Figure 2.4-42 : Variation de la vitesse moyenne et de la turbulence pour différents niveaux de moyennes de vitesse de vent, pour $IS=3$, $z_0=0,7$ m, $z=10$ m

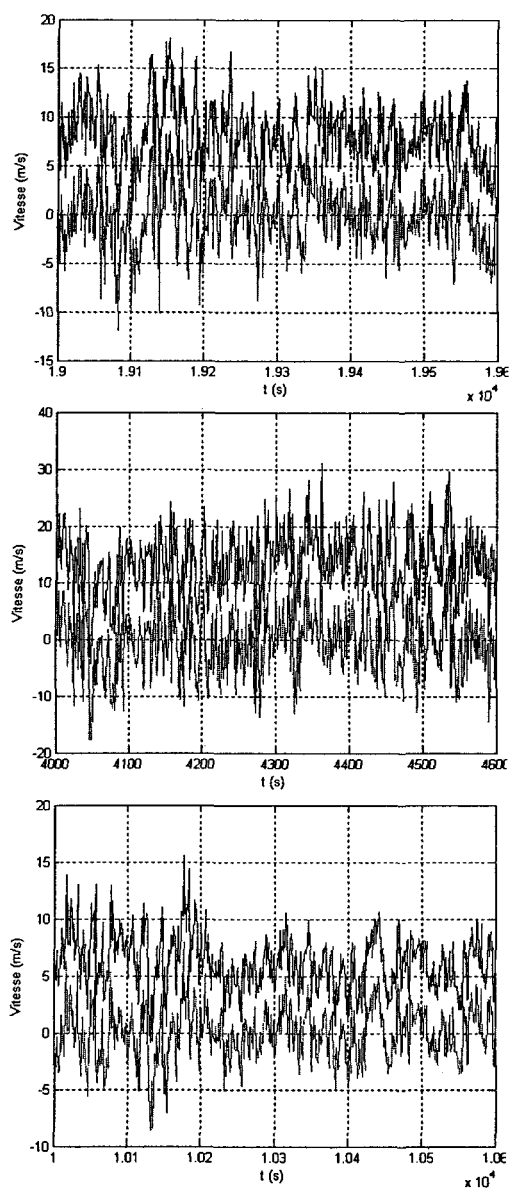


Figure 2.4-43 : Variation de la vitesse moyenne et de la turbulence pour différents niveaux de moyennes de vitesse de vent, pour $IS=2$, $z_0=0,7$ m, $z=10$ m

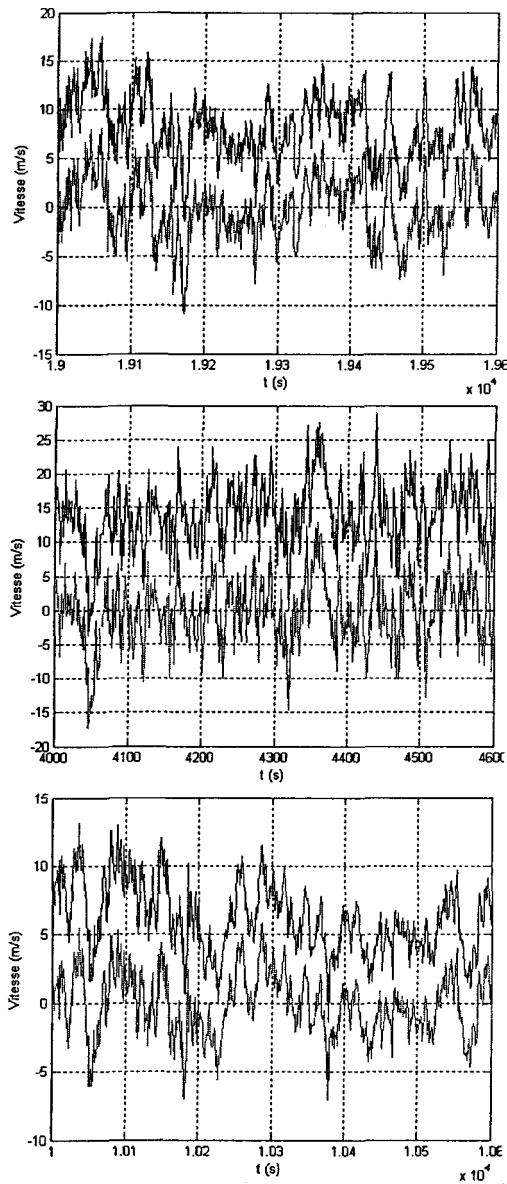


Figure 2.4-44 : Variation de la vitesse moyenne et de la turbulence pour différents niveaux de moyennes de vitesse de vent, pour $IS=1$, $z_0=0,7m$, $z=10m$

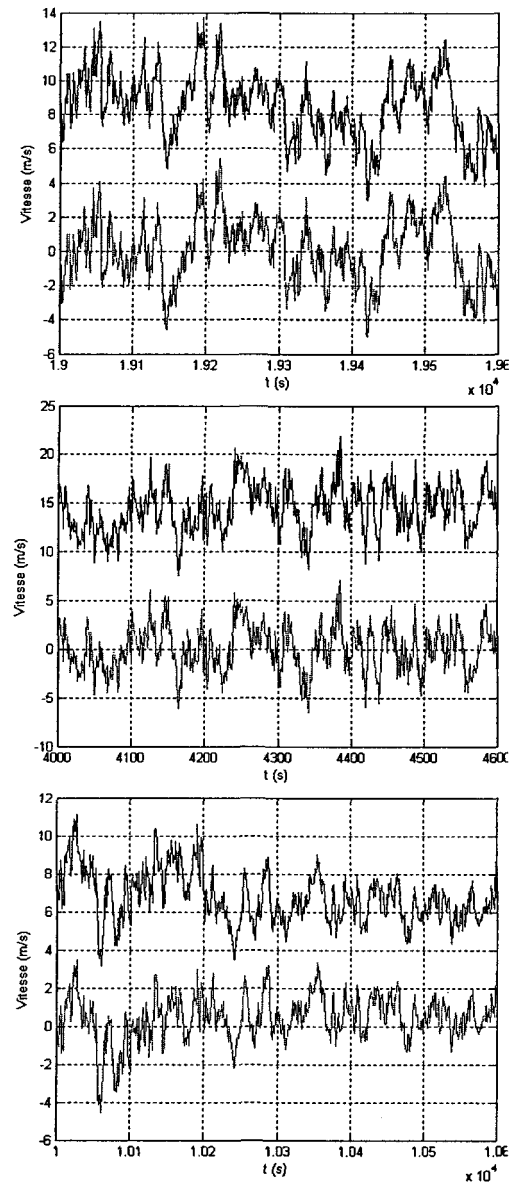


Figure 2.4-45 : Variation de la vitesse moyenne et de la turbulence pour différents niveaux de moyennes de vitesse de vent, pour $IS=3$, $z_0=0,001m$, $z=50m$

Les figures 2.4-47, 2.4-48 et 2.4-49 obtenues pour $IS=1$ et pour différents niveaux de rugosité ($z_0=0,001m$ et $z=50m$, $z_0=0,1m$ et $z=50m$ et $z_0=0,001m$ et $z=10m$, respectivement) confirment cette appréciation (réalisées avec une latitude $lat=50^\circ$ et $IC=1$)

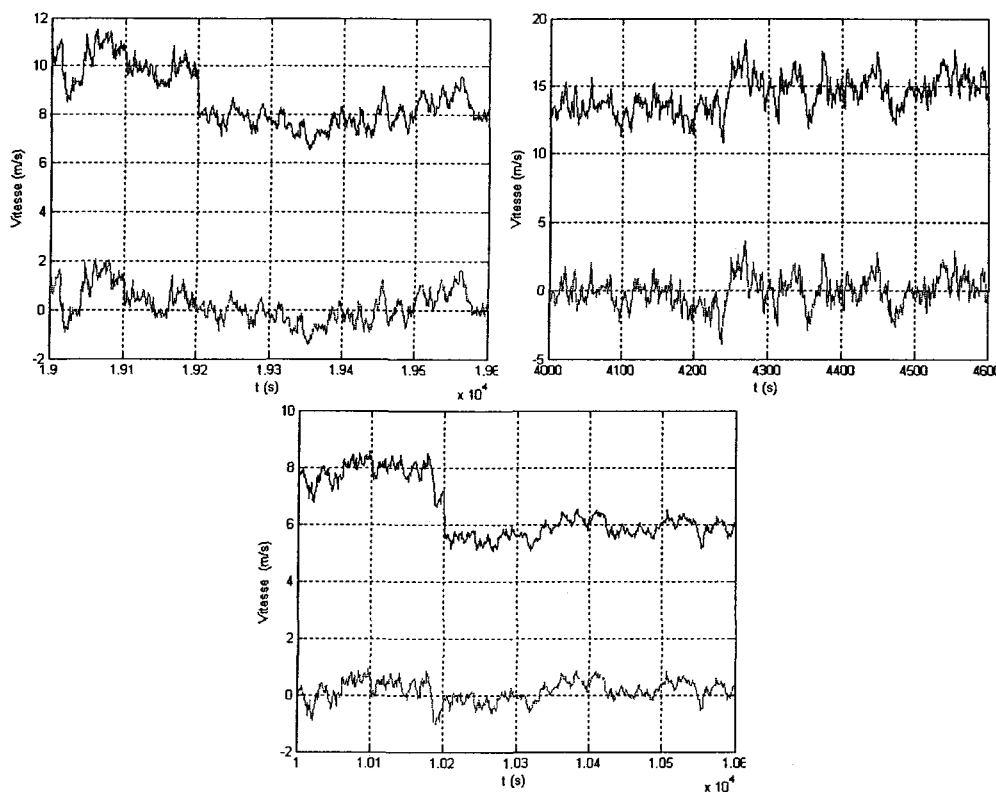


Figure 2.4-46 : Variation de la vitesse moyenne et de la turbulence pour différents niveaux de moyennes de vitesse de vent, pour $IS=1$, $z_0=0,001m$, $z=50m$

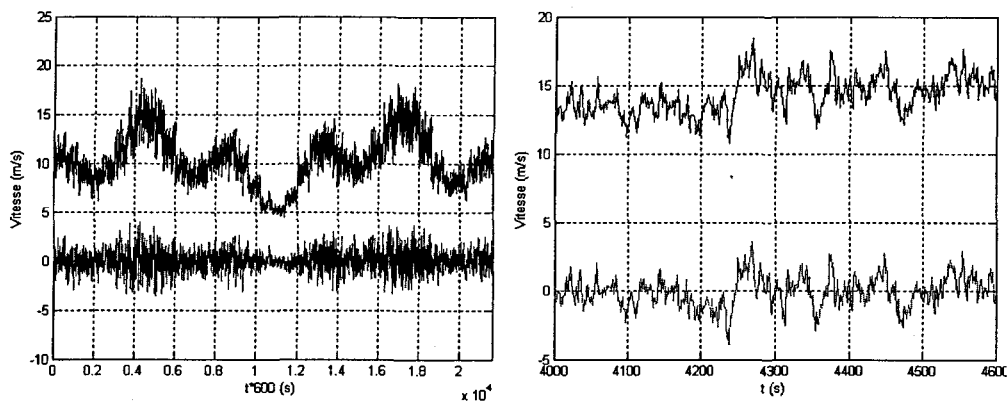


Figure 2.4-47 : Variation de la vitesse moyenne et de la turbulence sur la durée totale et sur un segment de temps, pour $IS=1$, $z_0=0,001m$, $z=50m$

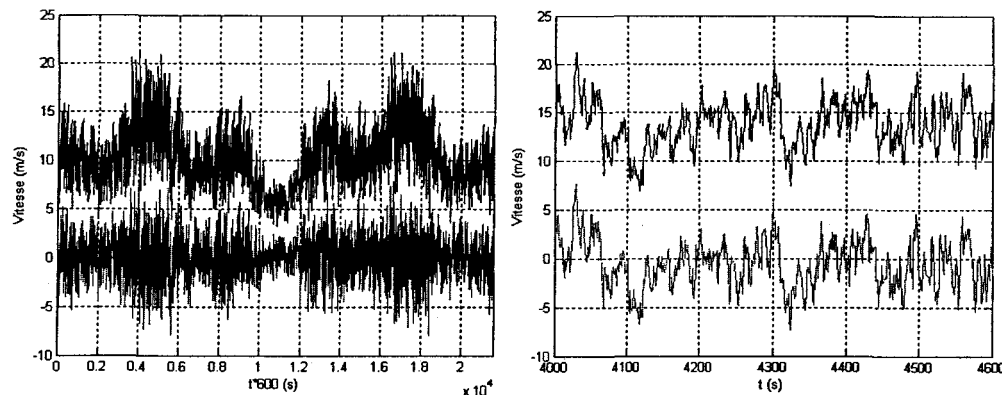


Figure 2.4-48 : Variation de la vitesse moyenne et de la turbulence sur la durée totale et sur un segment de temps, pour $IS=1$, $z_0=0,1m$, $z=50m$

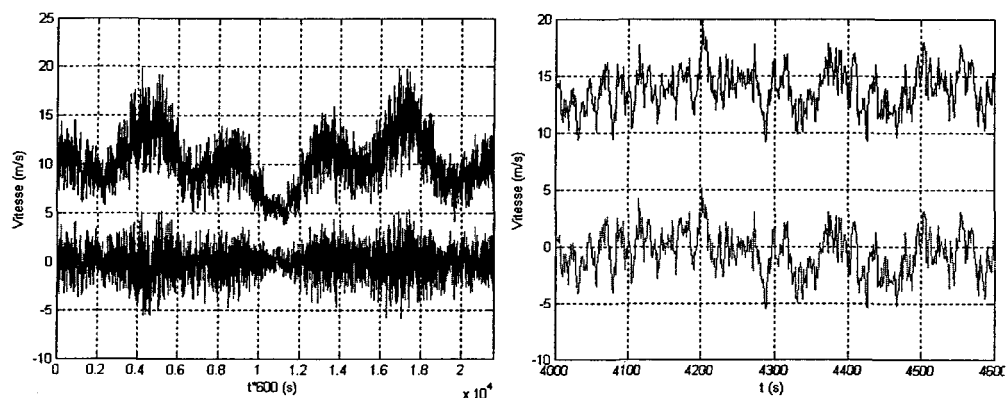


Figure 2.4-49 : Variation de la vitesse moyenne et de la turbulence sur la durée totale et sur un segment de temps, pour $IS=1$, $z_0=0,001m$, $z=10m$

Variation de l'écart-type à la sortie du filtre de formation

Les résultats obtenus correspondent aux attentes avec un écart-type qui varie autour de l'unité tout en restant très proche pour toutes les composantes (longitudinale, latérale et verticale). Ces résultats sont illustrés sur les figures 2.4-31, 2.4-34 et 2.4-38 pour $IS=1$ et $IC=1, 2$ et 3 respectivement.

On peut ajouter que les moyennes trouvées sur la totalité du signal varient entre 0,99 et 1,01.

On peut cependant ajouter que pour $IS=2$ et $IS=3$ (et avec $IC=1, 2$ et 3) les résultats sont encore meilleurs puisque la dispersion est plus faible que pour $IS=1$. En effet, pour $IS=1$ les valeurs de l'écart-type peuvent différer de 1% à 2% de l'unité (figures 2.4-31, 2.4-34 et 2.4-38). Ceci est illustré par les exemples présentés par les figures 2.4-50 et 2.4-51 pour $IS=2$ et $IC=1$ et 2 respectivement. On obtient alors $\sigma_{y1}=1,0241$ et $1,0180$ respectivement.

Les figures suivantes sont présentées pour une latitude $\text{lat}=50^\circ$, $z=50$ m et $z_0=0,3$ m.

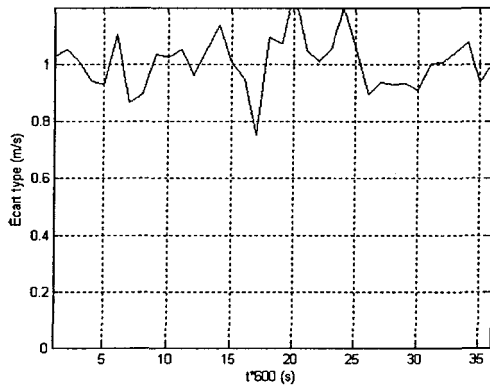


Figure 2.4-50 : Variation de l'écart-type σ_{y1} pour $IS=2$ et $IC=1$

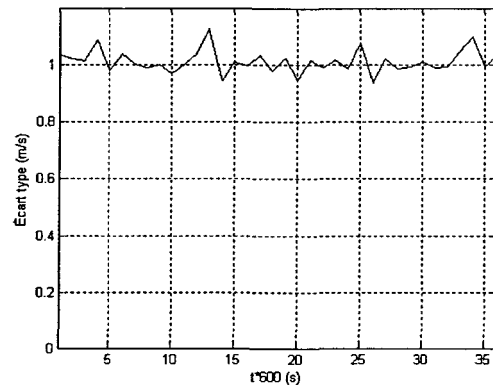


Figure 2.4-51 : Variation de l'écart-type σ_{y1} pour $IS=2$ et $IC=2$

Les composantes latérales et verticales

Les résultats pour ces deux composantes, latérale : figures 2.4-34 à 2.4-37 et verticale : figures 2.4-38 à 2.4-41, sont normaux. En les comparant aux figures 2.4-29 à 2.4-33, on constate que, pour des conditions similaires, les propriétés dynamiques de ces composantes sont différentes par rapport à la composante longitudinale, parce que les modèles spectraux sont relativement différents également.

On peut ajouter que, pour la composante verticale, l'intensité de turbulence diminue sensiblement.

Utilisation de l'approche simplifiée

Cette approche utilise des valeurs fixes pour les paramètres m_i pour les différentes composantes et donc aucun processus d'optimisation.

Les valeurs des paramètres s'encadrent dans un écart de $\pm 3\%$ (exemple : figures 2.4-37 à 2.4-41) ce qui est relativement faible. De plus, c'est le processus d'optimisation qui a la durée de calcul la plus longue, l'utilisation de cette approche engendre donc un gain de temps très appréciable et est justifiée par le peu d'erreurs engendrées.

L'annexe VII permet de justifier les valeurs utilisées pour les paramètres m_i pour les différentes composantes.

2.4.1.9 Développement des logiciels finaux pour la génération du vent non stationnaire selon le modèle de Kaimal

Algorithme

Pour tous les standards utilisés, le modèle de Kaimal nécessite l'obtention d'un filtre rationnel, ayant 4 paramètres : m_1 , m_2 , m_3 et m_4 . Donc, pour toutes les situations, il faut appeler un procédé d'optimisation paramétrique. Par conséquent, le schéma logique diffère de celui pour le modèle de von Karman par le fait qu'il soit « linéaire », c'est à dire que l'on n'utilise plus le test $IC=1$ (voir schéma de principe de la Figure 2.4-28) et, pour tous les standards ($IC=1, 2, 3$), on parcourt la branche située sur la partie droite qui contient l'opération d'optimisation.

Remarque : à l'aide des résultats du Tableau 2.4-1, on justifie l'utilisation des paramètres $m_1=4.82$, $m_2=6.39$, $m_3=0.33$ et $m_4=0.16$ pour la direction longitudinale pour la génération avec le programme simplifié. Les autres résultats découlent des tableaux de l'annexe VII.

Résultats

Le programme fonctionne pour toutes les combinaisons (IS, IC). Certains résultats sont présentés ici pour des valeurs de $N=600$ et $M=36$ (représentation sur 21600s soit 6 heures) avec une rugosité $z_0=0,3m$, une altitude $z=50m$, une latitude $lat=50^\circ$, pour $IS=1$ et pour les trois directions.

Les variations de la vitesse de vent et de l'écart-type ne sont pas représentées ici car elles sont identiques à celles de la Figure 2.4-29.

Pour IS=1 et IC=1

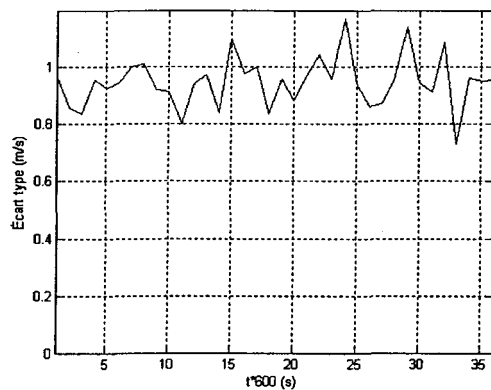


Figure 2.4-52 : Variation de l'écart-type à la sortie du filtre de formation pour $IS=1$ et $IC=1$ ($\sigma_{y1}=0,9686$)

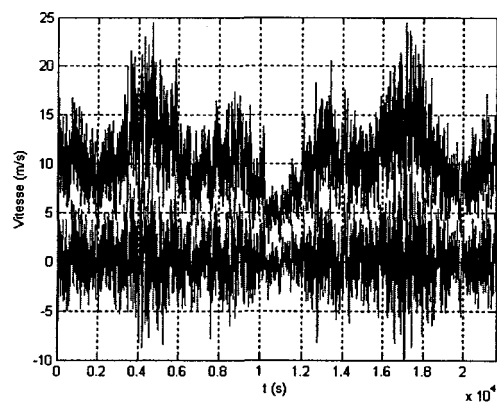


Figure 2.4-53 : Variation de la vitesse totale et de la turbulence pour $IS=1$ et $IC=1$

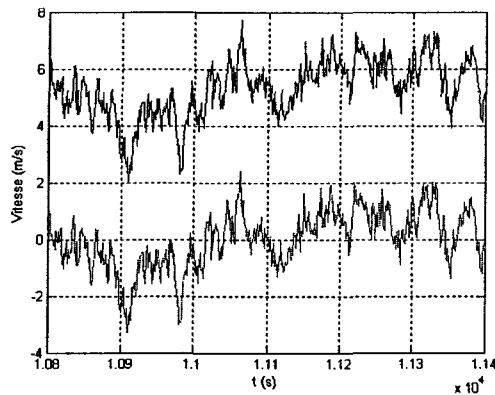


Figure 2.4-54 : Variation de la vitesse et de la turbulence sur 600s pour IS=1 et IC=1

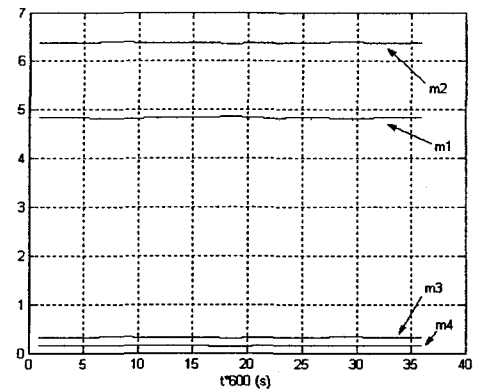


Figure 2.4-55 : Variation des paramètres m_i pour IS=1 et IC=1

Pour IS=1 et IC=2

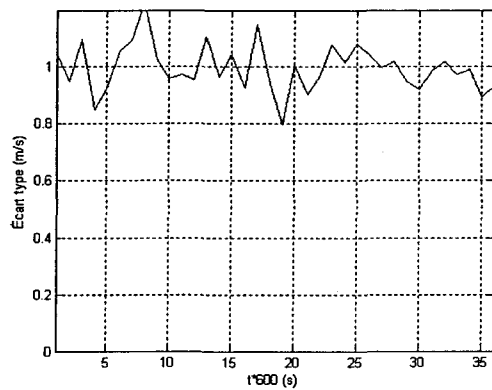


Figure 2.4-56 : Variation de l'écart-type à la sortie du filtre de formation pour IS=1 et IC=2 ($\sigma_{y1}=1,0245$)

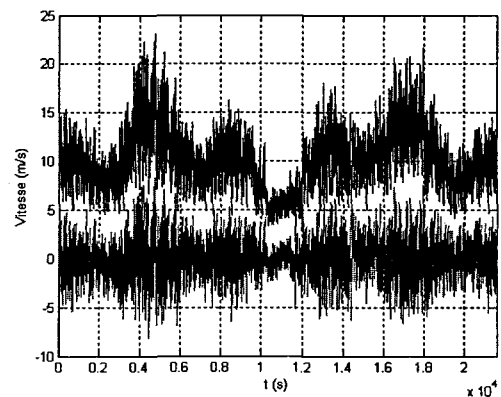


Figure 2.4-57 : Variation de la vitesse totale et de la turbulence pour IS=1 et IC=2

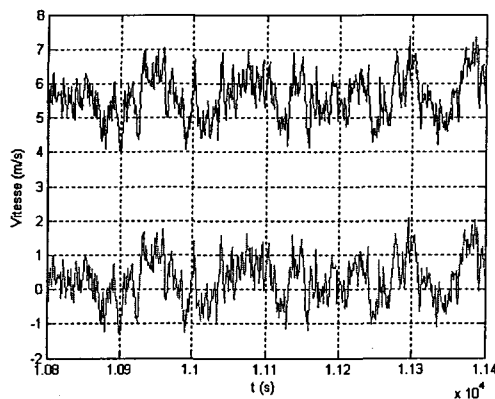


Figure 2.4-58 : Variation de la vitesse et de la turbulence sur 600s pour IS=1 et IC=2

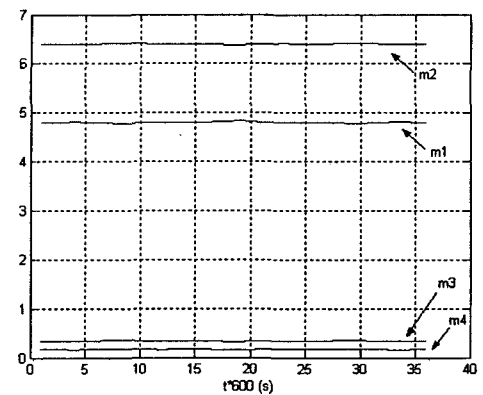


Figure 2.4-59 : Variation des paramètres m_i pour IS=1 et IC=2

Pour $IS=1$ et $IC=3$

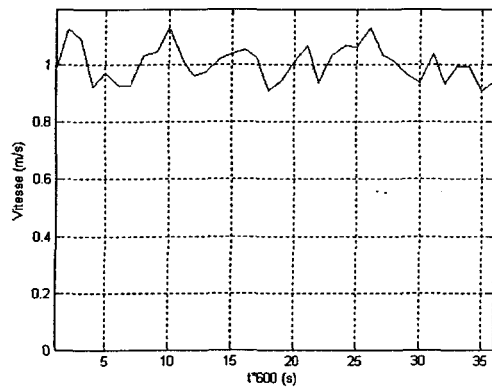


Figure 2.4-60 : Variation de l'écart-type à la sortie du filtre de formation pour $IS=1$ et $IC=3$ ($\sigma_{y1}=1,0186$)

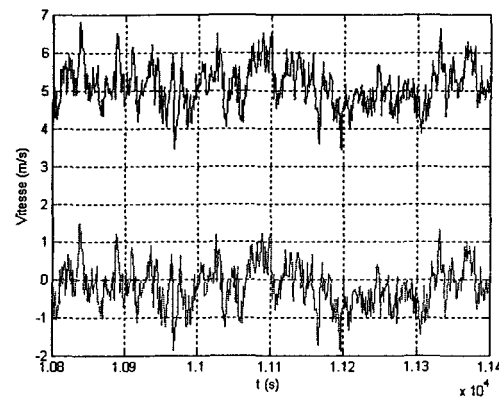


Figure 2.4-62 : Variation de la vitesse et de la turbulence sur 600s pour $IS=1$ et $IC=3$

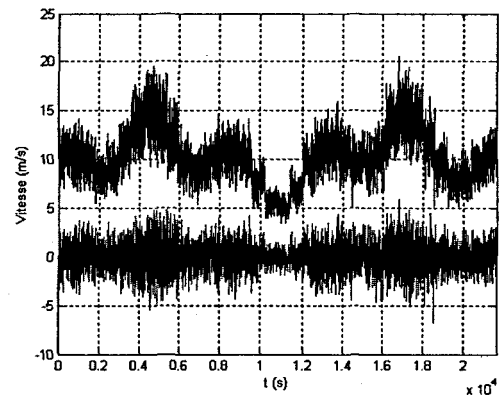


Figure 2.4-61 : Variation de la vitesse totale et de la turbulence pour $IS=1$ et $IC=3$

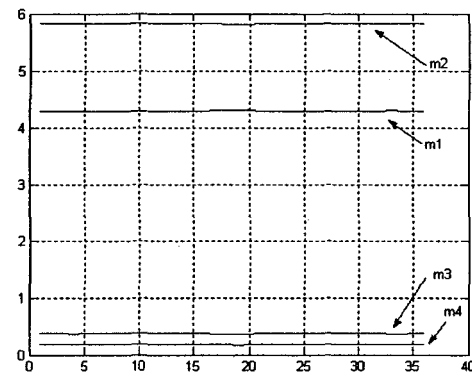


Figure 2.4-63 : Variation des paramètres m_i pour $IS=1$ et $IC=3$

Conclusions

Influence du choix du modèle de calcul pour l'intensité et la longueur de turbulence

Les mêmes conclusions peuvent être tirées avec l'utilisation du spectre de Kaimal. En effet, les relations utilisées pour calculer l'intensité et la longueur de turbulence pour le spectre de Kaimal sont assez proches de celles utilisées pour celui de von Karman et donc la méthode générale reste plus nuancée que les standards DS 472 et IEC qui restent synthétiques.

On obtient donc des résultats similaires pour $IS=2$ et $IS=3$ (comparaison qui n'est refaite ici) mais assez différents de ceux pour $IS=1$. Ces résultats sont illustrés par les figures suivantes, on ne considère qu'un seul segment de vent ici pour la comparaison.

Les différentes figures ont été réalisées avec latitude $lat=50^\circ$ et $IC=1$.

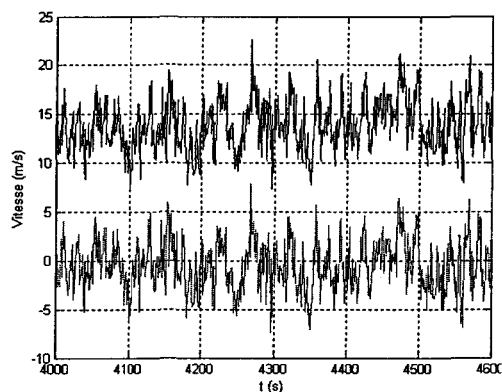


Figure 2.4-64 : Variation de la vitesse moyenne et de la turbulence pour une moyenne de vitesse de vent modérée pour $IS=3$, $z_0=0,7$ m, $z=10$ m

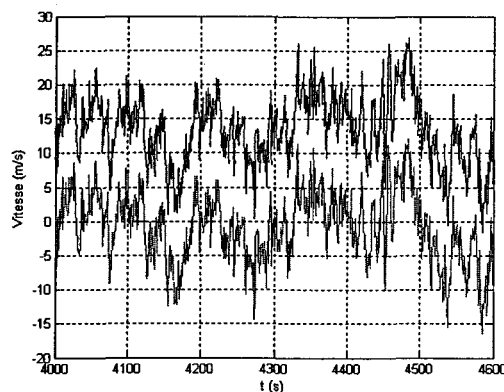


Figure 2.4-66 : Variation de la vitesse moyenne et de la turbulence pour une moyenne de vitesse de vent modérée pour $IS=1$, $z_0=0,7$ m, $z=10$ m

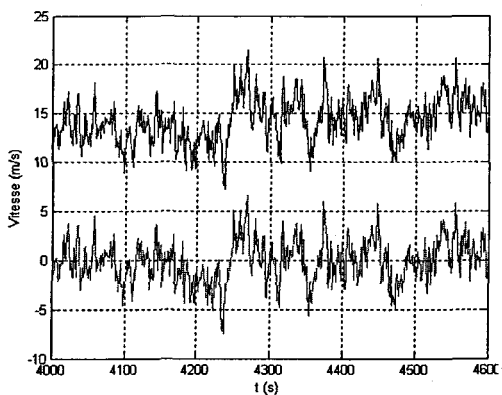


Figure 2.4-65 : Variation de la vitesse moyenne et de la turbulence pour une moyenne de vitesse de vent modérée pour $IS=3$, $z_0=0,001$ m, $z=50$ m

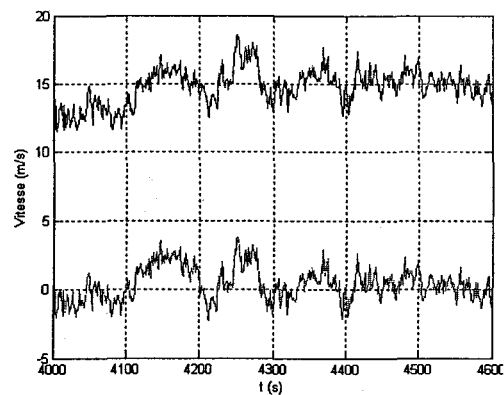


Figure 2.4-67 : Variation de la vitesse moyenne et de la turbulence pour une moyenne de vitesse de vent modérée pour $IS=1$, $z_0=0,001$ m, $z=50$ m

Variation de l'écart-type à la sortie du filtre de formation

Là encore, les conclusions restent les mêmes que pour le spectre de von Karman. Les figures 2.4-52, 2.4-56 et 2.4-60, en sont des exemples. Pour certains cas (Figure 2.4-52), les valeurs sont éventuellement plus éloignées de l'unité mais la moyenne reste proche de 1 ($\sigma_{y1}=0,9686$).

2.4.2. Conclusion : Comparaison von Karman – Kaimal

Chacun des spectres permet d'obtenir des vitesses de vent pour une fréquence de données de vent assez élevées. On peut cependant remarquer deux points particuliers de différences :

- la vitesse de calcul ;
- les différences dans les variations.

En effet, l'utilisation des logiciels généraux pour le calcul des vitesses de vent donne des temps de calculs beaucoup plus élevés pour l'utilisation du spectre de Kaimal que pour celle de von Karman puisque les filtres de formation, dans le premier cas, nécessitent quatre paramètres alors que, dans le second cas, on n'en a besoin seulement que de deux pour la composante longitudinale, ou de trois pour les composantes latérale et verticale.

De plus, les résultats démontrent que la composante turbulente pour le modèle de Kaimal est différente de celle du modèle de von Karman. Celle de type Kaimal contient beaucoup plus de variations plus lentes que celle de type von Karman. L'explication est simple : selon la densité spectrale de puissance de Kaimal (Figure 2.4-3), le filtre de formation colore le bruit blanc dans un domaine de fréquence plus large et l'élargissement se fait dans les basses fréquences.

Ce résultat est illustré ci-dessous à l'aide des figures 2.4-68 et 2.4-71.

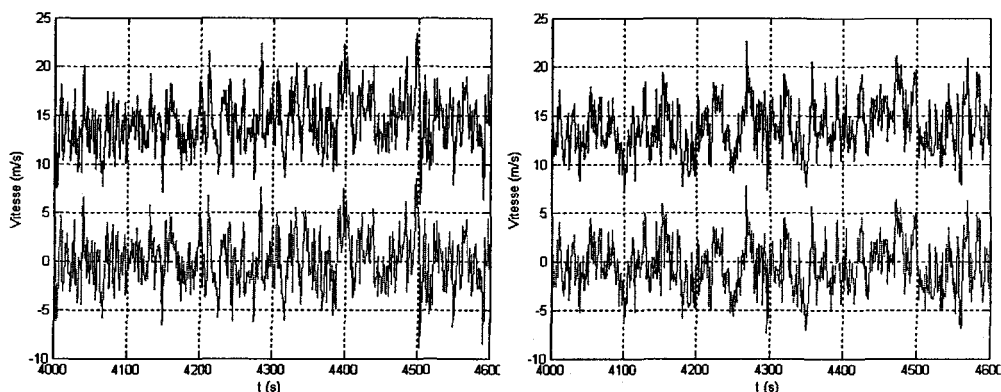


Figure 2.4-68 : Comparaison entre les vitesses et les turbulences avec l'utilisation du spectre von Karman (à gauche) et du spectre de Kaimal (à droite) pour $IS=3$, $IC=1$, $z_0=0,7m$ et $z=10m$

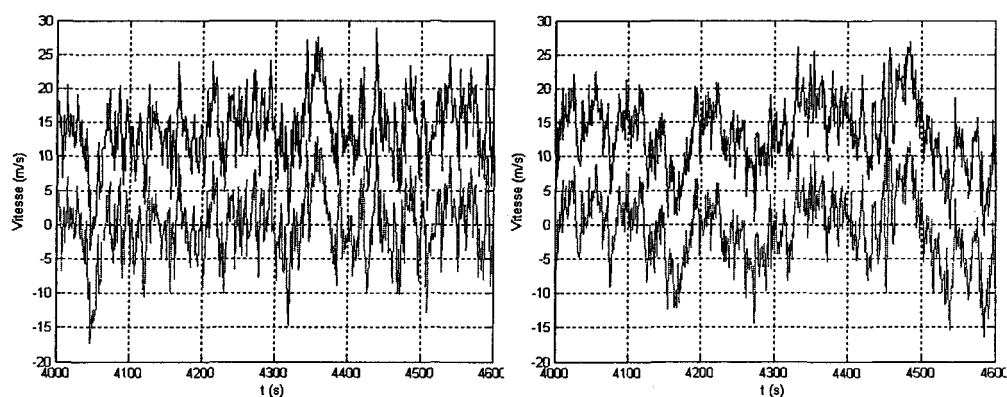


Figure 2.4-69 : Comparaison entre les vitesses et les turbulences avec l'utilisation du spectre von Karman (à gauche) et du spectre de Kaimal (à droite) pour $IS=1$, $IC=1$, $z_0=0,7m$ et $z=10m$

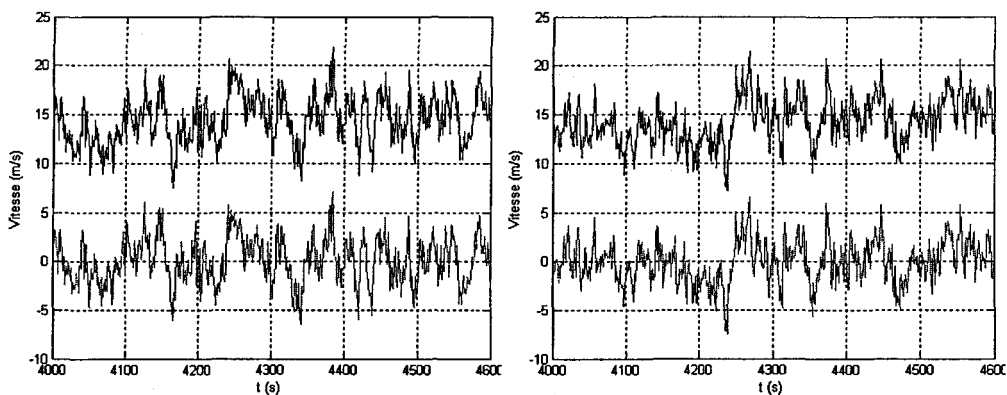


Figure 2.4-70 : Comparaison entre les vitesses et les turbulences avec l'utilisation du spectre von Karman (à gauche) et du spectre de Kaimal (à droite) pour $IS=3$, $IC=1$, $z_0=0,001m$ et $z=50m$

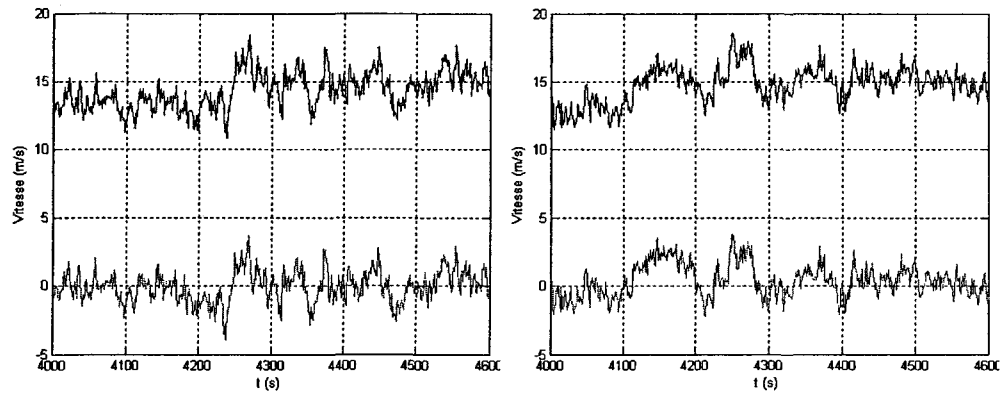


Figure 2.4-71 : Comparaison entre les vitesses et les turbulences avec l'utilisation du spectre von Karman (à gauche) et du spectre de Kaimal (à droite) pour $IS=1$, $IC=1$, $z_0=0.001m$ et $z=50m$

CONCLUSION

Deux sujets distincts ont été abordés dans ce mémoire : l'analyse de données réelles de vent et la conception d'un générateur numérique de vitesses de vent, chacun d'entre eux ayant une problématique et des objectifs particuliers.

En ce qui concerne l'analyse des données réelles de vitesses de vent, le but était de déterminer certaines caractéristiques des variations, temporelles et spatiales, du vent. Les données disponibles, malgré leur faible nombre et leur qualité, ont permis de réaliser plusieurs études et, ainsi, donner certaines conclusions sur les caractéristiques de ces variations.

Alors, il a été possible de décrire la variabilité des facteurs de forme et d'échelle de la loi de Weibull, k et c , respectivement, ainsi que de confirmer certains points comme l'importante variabilité saisonnière et l'influence de la rugosité et de la topographie sur les variations de ces paramètres. L'étude de l'intensité de turbulence a , elle aussi, permis de mettre en relief la grande influence de la rugosité et un certain parallèle a pu être établi entre les valeurs de l'intensité de turbulence et la valeur du paramètre k de la loi de Weibull, qui représente une mesure de la dispersion de la distribution. Un site de coefficient k élevé est généralement un site avec une intensité de turbulence plus élevée.

Cependant, certaines études complémentaires devraient être effectuées afin de confirmer les résultats trouvés. De plus, certaines analyses comme celle des variations journalières ou l'étude des roses de vent, n'ont pas été réalisées. Cette dernière devrait d'ailleurs faire l'objet d'une étude

poussée et réalisée en parallèle avec l'étude des variations des paramètres afin de déterminer l'influence des changements de directions de vent.

La conception d'un générateur numérique de vitesses de vent entre dans une optique de meilleure connaissance du vent et surtout d'une meilleure adaptation des éoliennes à sa variabilité. Sa modélisation et sa simulation fournissent les données nécessaires pour un banc d'essai permettant ainsi de prévoir les réactions des éoliennes aux différentes variations du vent.

Le chapitre 2 a donc permis de mettre progressivement en place ce générateur de vitesses de vent en s'appuyant sur les modèles de Kaimal et de von Karman. Il prend en compte des paramètres extérieurs représentatifs des caractéristiques d'un site que l'on souhaiterait étudier : la latitude (emplacement géographique), l'altitude et la rugosité.

Il est donc possible, à partir de seulement trois caractéristiques du site, de générer numériquement des vitesses de vent selon les trois directions : longitudinale, latérale et verticale, ceci à partir de modèles différents que ce soit pour le calcul de l'intensité de turbulence, de la longueur de turbulence ou pour le choix du type de spectre utilisé : Kaimal ou von Karman. Par ailleurs, les vitesses peuvent être générées pour une durée et une fréquence déterminées par l'utilisateur.

Cet outil constitue donc une base solide pour la mise en place du banc d'essai d'une turbine éolienne : il a les caractéristiques d'entrée et de sortie nécessaires à son bon fonctionnement.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] "The Windicator". *Wind Power Monthly*. 1996 (April or July issues).
- [2] Al-Hasan, Mohammed and Nigmatullin, Raoul R. *Identification of the generalized Weibull distribution in wind speed data by the Eigen-coordinates method*. *Renewable Energy*. 2003 Jan; 28(1):93-110.
- [3] Ayotte, Keith W.; Davy, Robert J., and Coppin, Peter A. *A Simple Temporal and Spatial Analysis of Flow in Complex Terrain in the Context of Wind Energy Modelling*. *Boundary-Layer Meteorology*. 2001 Feb; 98(2): 275-295.
- [4] Barry, Diane avec la collaboration de Maltais, Donald. *L'éolien, une énergie redécouverte*. 2002.
- [5] Bivona, S.; Burlon, R., and Leone, C. *Hourly wind speed analysis in Sicily*. *Renewable Energy*. 2003 Jul; 28(9):1371-1385.
- [6] Burton, Tony; Sharpe, David; Jenkins, Nick, and Bossanyi, Ervin. *Wind Energy Handbook*. John Wiley & Sons Ltd; 2001; ISBN: 0-471-48997-2.
- [7] Ceanga, Emil; Nichita, Cristian; Protin, Ludovic, and Cutululis. N. Antonio. *Théorie de la commande des systèmes*. Editura TEHNICA S.A.; 2001; ISBN: 973-31-21-03-7.
- [8] Celik, Ali N. *A Statistical Analysis of Wind Power Density Based on the Weibull and Rayleigh Models at the Southern Region of Turkey*. *Renewable Energy*. 2004 Apr; 29(4):593-604.
- [9] Chang, Tsang-Jung; Wu, Yu-Ting; Hsu, Hua-Yi; Chu, Chia-Ren, and Liao, Chun-Min. *Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in Taiwan*. *Renewable Energy*. 2003 May; 28(6):851-871.
- [10] Doran, J. C. and Verholek, M. G. *A note on vertical extrapolation formulas for Weibull velocity distribution parameters*. *Journal of Applied Meteorology*. 1978 Mar; 17:410-412.
- [11] Ettoumi, F. Youcef; Sauvageot, H., and Adane, A. E. H. *Statistical bivariate modelling of wind using first-order Markov chain and Weibull distribution*. *Renewable Energy*. 2003 Sep; 28(11):1787-1802.
- [12] Furevik, Birgitte R. and Espedal, Heidi A. *Wind Energy Mapping Using Synthetic Aperture Radar*. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 2002 Apr; 28(2):196-204.

- [13] Gurley, Kurtis R.; Tognarelli, Michael A., and Kareem, Ahsan. *Analysis and Simulation Tools For Wind Engineering*. Probabilistic Engineering Mechanics. 1997 Jan; 12(1):9-31.
- [14] Henderson, Andrew R.; Morgan, Colin; Smith, Bernie; Sorensen, Hans C.; Barthelmie, Rebecca J., and Boesmans, Bart. *Offshore Wind Energy in Europe - a Review of the State-of-the-Art*. Wind Energy. 2003 Jan-2003 Mar 31; 6(1):35-52.
- [15] Justus, C. G.; Hargraves, W. R.; Mikhail, A., and Graber, D. *Methods for estimating wind speed frequency distributions*. Journal of Applied Meteorology. 1978 Mar; 17:350-353.
- [16] Kitagawa, T. and Nomura, T. *A wavelet-based method to generate artificial wind fluctuation data*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2003 Jun; 91(7):943-964.
- [17] Kojabadi, H. M.; Chang, L. C., and Boutot, T. *Development of a Novel Wind Turbine Simulator for Wind Energy Conversion Systems Using an Inverter-Controlled Induction Motor*. Ieee Transactions on Energy Conversion. 2004 Sep; 19(3):547-552.
- [18] Lun, Isaac Y. F. and Lam, Joseph C. *A Study of Weibull Parameters Using Long-Term Wind Observations*. Renewable Energy. 2000 Jun; 20(2):145-153.
- [19] Lungu, Dan and van Gelder, Pieter. *Characteristics of wind turbulence with applications to wind codes*. European Safety and Reliability Conference 2003, ESREL 2003, Maastricht, The Netherlands. 2003 Jun.
- [20] Mann, Jakob. *Wind field simulation*. Probabilistic Engineering Mechanics. 1998 Oct; 13(4):269-282.
- [21] Mathew, S.; Pandey, K. P., and Kumar, A. *Analysis of Wind Regimes for Energy Estimation*. Renewable Energy. 2002 Mar; 25(3):381-399.
- [22] Ministère de l'Environnement et Ministère des Ressources Naturelles. *Plan d'action Québécois 2000-2002 sur les changements climatiques*. 2000.
- [23] Mitchell, K.; Nagrial, A., and Rizk, J. *Simulation and Optimisation of Renewable Energy Systems*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2005 Mar; 27(3):177-188.
- [24] Molla, S. I.; Kenimer, A. L.; Reddell, D. L.; Morton, A. D., and Sabbagh, G. J. *Wind Speed Simulation Using Double Fourier Transformation*. Transactions of the Asae. 2001 Jan-2001 Feb 28; 44(1):151-154.
- [25] Nichita, C.; Luca, D.; Dakyo, B., and Ceanga, E. *Large Band Simulation of the Wind Speed for Real Time Wind Turbine Simulators*. Ieee Transactions on Energy Conversion. 2002 Dec; 17(4):523-529.

- [26] Rehman, Shafiqur and Al-Abbadi, Naif M. *Wind shear coefficients and their effect on energy production*. Energy Conversion and Management. 2005 Sep; 46(15-16):2578-2591.
- [27] Rosen, Karen ; Van Buskirk, Robert, and Garbesi, Karina. *Wind Energy Potential of Coastal Eritrea: an Analysis of Sparse Wind Data*. Solar Energy. 1999 Jun; 66(3):201-213.
- [28] Seguro, J. V. and Lambert, T. W. *Modern Estimation of the Parameters of the Weibull Wind Speed Distribution for Wind Energy Analysis*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2000 Mar; 85(1):75-84.
- [29] Stevens, M. J. M. and Smulders, P. T. *The estimation of the parameters of the Weibull Wind speed distribution for wind energy utilization purposes*. Wind Engineering. 1979; 3(2).
- [30] Tamura, Yukio; Suda, Kenichi; Sasaki, Atsuchi; Iwatani, Yoshiharu; Fujii, Kunio; Ishibashi, Ryukichi, and Hibi, Kazubi. *Simultaneous Measurements of Wind Speed Profiles at Two Sites Using Doppler Sodars*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2001 Mar; 89(3-4):325-335.
- [31] Tchinda, R.; Kendjio, J.; Kaptoum, E., and Njomo, D. *Estimation of Mean Wind Energy Available in Far North Cameroon*. Energy Conversion and Management. 2000 Nov; 41(17):1917-1929.
- [32] Welfonder, E.; Neifer, R., and Spanner, M. *Development and Experimental Identification of Dynamic Models for Wind Turbines*. Control Engineering Practice. 1997 Jan; 5(1):63-73.
- [33] Yang, Z. L. and Xie, M. *Efficient Estimation of the Weibull Shape Parameter Based on a Modified Profile Likelihood*. Journal of Statistical Computation and Simulation. 2003 Feb; 73(2):115-123.
- [34] Ilinca, A.; McCarthy, E.; Chaumel, J. L., and Retiveau, J. L. *Wind Potential Assessment of Quebec Province*. Renewable Energy. 2003 Oct; 28(12):1881-1897.
- [35] McCarthy, E. ; Ilinca A. ; Chaumel J.-L., and Dugas, C. *Évaluation du potentiel éolien du Québec, Technical Report*. Février 1996: Université du Québec à Rimouski.
- [36] Alfred Mertins. *Signal Analysis: Wavelets, Filter Banks, Time-Frequency Transforms and Application*. John Wiley and sons; 1999; ISBN: 0-471-98626-7.
- [37] Eggleston, Eric D. and Clark R. Nolan. *Cut-in Note 1: Wind Speed Power Spectrum Analysis for Bushland, Texas, USA*. Wind Engineering. 2000 Jan 1; 24(1):49-52.
- [38] Hammouche, Rabbah; Popa, Lucian et Lelièvre, Claude. *Rapport sur le programme de mesure du potentiel éolien du Québec*. Enviromet International. Novembre 2003.

[39] Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. *Plan Stratégique 2005-2008 du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs*. 2005.

[40] Van der Hoven, I., *Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from .0007 to 900 cycles per hour*, Journal of Meteorology, 14, 160-164, 1957.

[41] ESDU, *Characteristics of atmospheric turbulence near the ground. Part II: Single point data for strong winds (neutral atmosphere)*. ESDU 85020 (amended 1993), Engineering Sciences Data Unit, UK. 1985.

[42] DS 472, *Code of practice for loads and safety of wind turbine constructions*. DS 472, The Danish Society of Engineers and the Federation of Engineers. 1992

[43] IEC, *Wind turbine generator systems – Part 1: Safety requirements.* International Standard 61400-1, Second Edition. International Electrotechnical Commission. 1999

[44] Germanischer Lloyd. *Rules and regulations IV – Non-marine technology, Part 1 – Wind Energy, (supplemented 1994, 1998)*. Germanischer Lloyd. 1993

[45] Eurocode. *Eurocode 1: Basis of design and actions on structures – part 2.4: Actions on structures – Wind actions*. 1997

[46] Veers PS. *Three-dimensional Wind Simulation*. SANDIA REPORT SAND88-0152, Sandia National Laboratory.

[47] Corotis, RB.; Sigl, AB., and Klein, M. *Probability models for wind velocity magnitude and persistence*. Solar Energy. 1978 ; 20:483-93.

ANNEXE I

La loi de Betz

La loi de Betz est la loi permettant d'obtenir la puissance ou densité de puissance éolienne à partir de la vitesse du vent, de la surface balayée par la turbine éolienne et de la densité de l'air. Son équation est la suivante :

$$P = \frac{1}{2} C_B \rho S V^3 \quad (1)$$

C'est donc une loi assez simple et qui ne dépend que de quatre paramètres :

➤ **Le coefficient de Betz :**

Ce fut l'allemand Albert Betz qui, en 1919, formula la loi de Betz pour la première fois (référence : *Wind-Energie* (Énergie éolienne) publié en 1926). La loi de Betz détermine qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de 16/27 (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent.

C'est donc ce coefficient C_B qui représente cette propriété, sa valeur maximale est donc de 16/27 soit environ 59%.

Preuve de la loi de Betz¹ :



Source : www.windpower.org

Figure Annexe I.1 : Représentation du vent traversant une turbine éolienne

¹ Démonstration que l'on retrouve sur le site www.windpower.org

Partons de la supposition raisonnable que la vitesse moyenne du vent traversant la surface balayée par le rotor est égale à la moyenne de la vitesse moyenne du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et de sa vitesse après le passage à travers le plan de rotor V_2 , soit $\frac{V_1 + V_2}{2}$.

La masse de l'air traversant la surface balayée par le rotor en une seconde est égale à :

$$m = \rho S \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (2)$$

où m est la masse par seconde, ρ la densité de l'air, S la surface balayée par le rotor, et $\frac{V_1 + V_2}{2}$ la vitesse moyenne du vent traversant le rotor. La puissance extraite du vent par le rotor est égale à la masse multipliée par le carré de la diminution de la vitesse du vent (selon la seconde loi de Newton) :

$$P = \frac{1}{2} m (V_1^2 - V_2^2) \quad (3)$$

En substituant m de l'équation (2) dans cette expression, nous obtenons l'expression suivante pour la puissance extraite du vent :

$$P = \frac{\rho}{4} (V_1^2 - V_2^2) (V_1 + V_2) S \quad (4)$$

Comparons maintenant notre résultat avec la puissance totale d'un flux d'air non perturbé traversant une surface similaire S sans la présence d'un rotor qui ralentit le vent. Nous appelons cette puissance P_0 :

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho S V_1^3 \quad (5)$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et celle du vent non perturbé sera alors :

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 \right) \left(1 + \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \right) \quad (6)$$

Nous pouvons alors tracer la courbe de $\frac{P}{P_0}$ en fonction de $\frac{V_2}{V_1}$:

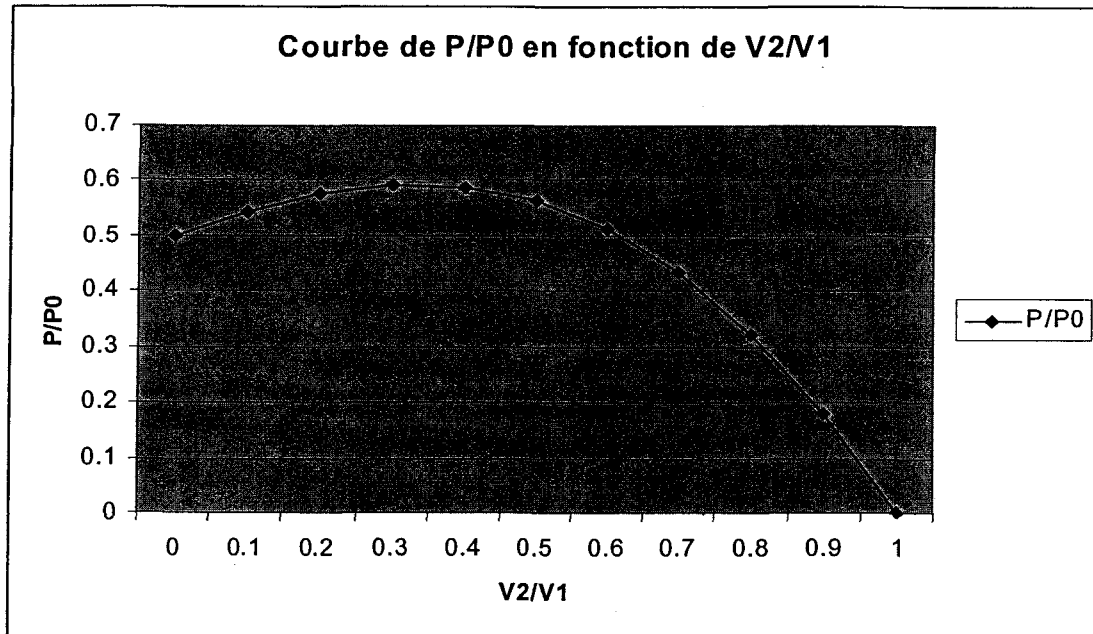


Figure Annexe I.2 : Courbe de $\frac{P}{P_0}$ en fonction de $\frac{V_2}{V_1}$

Comme nous pouvons le constater, la fonction atteint son maximum pour $\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{3}$, la valeur maximale pour la puissance extractible du vent étant alors de 0,59 ou $\frac{16}{27}$ de la puissance totale contenue dans le vent.

➤ La densité de l'air ρ

Par cette équation, on voit donc que la densité représente un coefficient à ne pas négliger dans l'évaluation de la densité de puissance éolienne.

En effet, la densité de l'air varie proportionnellement en fonction de la pression atmosphérique et inversement proportionnellement en fonction de la température, si l'on considère la loi des gaz parfaits pour l'air $\rho = \frac{P}{RT}$, avec R la constante des gaz parfaits. Cette loi représente une assez bonne approximation ici et particulièrement dans les régions du monde où des différences de températures importantes peuvent être relevées entre les différentes saisons.

Par exemple, à pression constante, on a $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$ à 15°C et $\rho=1.368 \text{ kg/m}^3$ à -15°C .

➤ La surface balayée

Cette surface balayée est évidemment reliée au diamètre de l'éolienne par $S = \frac{\pi}{4} D^2$.

L'éolienne tend donc à être de plus en plus grande pour essayer de recueillir le plus de vent possible.

➤ La vitesse du vent

C'est évidemment le facteur principal dans la loi de puissance puisque c'est le vent qui permet de faire tourner l'éolienne ! Cependant, son influence est plus grande encore que les autres facteurs puisqu'elle est élevée au cube dans cette loi.

Donc une vitesse de vent qui double permet de générer huit fois plus de puissance et une augmentation de seulement 10 % de cette vitesse engendre une augmentation de 30% de la valeur de la puissance produite. D'où la nécessité de bien connaître la vitesse de vent sur un site et d'être capable de bien caractériser celui-ci.

ANNEXE II

Calcul de la puissance et de l'énergie associée à la loi de Weibull,

définitions de vitesses particulières

À partir de la loi de Weibull, les caractéristiques de puissance et d'énergie éoliennes peuvent être définies ainsi que des vitesses de vent ayant des propriétés particulières.

➤ **Vitesse de vent la plus fréquente :**

Cette vitesse est par définition la vitesse qui correspond au maximum de fonction de densité de probabilité. Elle est donc obtenue d'après la définition de la fonction de densité de probabilité donnée par l'équation (1.3.1) et donc définie par :

$$V_{PB} = c \left(\frac{k-1}{k} \right)^{1/k} \quad (1)$$

➤ **Vitesse de vent transportant le maximum d'énergie**

Cependant, puisque la puissance éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent ce n'est pas la vitesse la plus probable mais une vitesse plus élevée qui apportera un maximum d'énergie.

L'énergie correspondant à une vitesse de vent particulière est donnée par :

$$E_v = Pf(V) \quad (2)$$

Et on sait que la puissance disponible par unité de surface est donnée, sans utiliser le coefficient de Betz, par :

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (3)$$

On obtient donc en utilisant les équations (3) et (1.3.1) :

$$E(V) = \frac{1}{2} \rho \frac{kV^{k+2}}{c^k} \exp \left(- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right) \quad (4)$$

Donc on a une énergie maximale pour la vitesse suivante :

$$V_{E \max} = c \left(\frac{k+2}{k} \right)^{1/k} \quad (5)$$

➤ **Densité de puissance éolienne et densité d'énergie éolienne**

En utilisant la définition de la puissance par unité de surface donnée par (3), on peut exprimer la densité de puissance éolienne basée sur la fonction densité de probabilité de la loi de Weibull par :

$$P = \int_0^{\infty} P(V) f(V) dV = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma \left(\frac{k+3}{k} \right) \quad (6)$$

avec Γ la fonction Gamma. On peut alors définir la densité d'énergie éolienne par unité de surface pour une période T par :

$$E = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma \left(\frac{k+3}{k} \right) T \quad (7)$$

La valeur de la moyenne de densité de puissance obtenue à l'aide la loi de Weibull est donc :

$$P_{m,W} = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma \left(\frac{k+3}{k} \right) T \quad (8)$$

➤ **Énergie éolienne générée par une machine idéale**

L'énergie produite pour une période T par une éolienne est évidemment reliée à son fonctionnement. En effet, pour un vent plus faible que la vitesse de démarrage V_I de l'éolienne aucune puissance ne pourra être générée et à partir d'une certaine vitesse de vent V_R la puissance est constante jusqu'à la vitesse de coupure V_O , suivant la courbe de puissance caractéristique de l'éolienne. On a donc une énergie disponible définie comme suit :

$$E_{TW} = T \int_{V_i}^{V_R} P(V) f(V) dV + T P_R \int_{V_R}^{V_o} f(V) dV \quad (9)$$

Donc en utilisant l'expression de $P(V) = \frac{1}{2} \rho A V^3$ et celle de la puissance constante produite

$P_R = \frac{1}{2} \rho A V_R^3$, avec A la surface balayée par l'éolienne, on obtient :

$$E_{TW} = T A \frac{\rho}{2} \left(\int_{V_i}^{V_R} V^3 \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right) dV + V_R^3 \int_{V_R}^{V_o} \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right) dV \right) \quad (10)$$

Cette intégrale ne peut pas être déterminée analytiquement mais peut-être calculée facilement par une technique d'intégration numérique telle que la règle de Simpson ou celle de la quadrature de Gauss.

➤ Énergie éolienne réelle produite par une éolienne

L'énergie réellement produite par une éolienne est évidemment plus faible que l'énergie éolienne totale disponible (cf. annexe I sur la loi de puissance de Betz). Pour calculer l'énergie que produira réellement une éolienne, on utilise la courbe de puissance de la machine qui peut-être dans la plupart des cas caractérisée par l'expression suivante :

$$P_T(V) = \begin{cases} 0 & , V < V_i \\ (a_1 V^3 + a_2 V^2 + a_3 V + a_4) P_R & , V_i \leq V < V_R \\ P_R & , V_R \leq V < V_o \\ 0 & , V \geq V_o \end{cases} \quad (11)$$

avec a_1 , a_2 , a_3 et a_4 des constantes de la fonction de régression linéaire de la courbe de puissance.

On peut remarquer qu'un polynôme de plus haut degré peut être utilisé pour l'approximation de la courbe de puissance.

En utilisant les équations (1.3.1), (3) et (11), on obtient l'expression de l'énergie réellement produite par l'éolienne :

$$E_{TA} = T \int_{V_i}^{V_o} P_T(V) f(V) dV \quad (12)$$

soit

$$\begin{aligned} E_{TA} = & TP_R \int_{V_i}^{V_R} (a_1 V^3 + a_2 V^2 + a_3 V + a_4) \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right) dV \\ & + TP_R \int_{V_R}^{V_o} \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right) dV \end{aligned} \quad (13)$$

➤ **Efficacité, facteur de capacité et facteur de disponibilité d'une éolienne**

Puisque l'énergie éolienne disponible ne peut pas être totalement extraite par l'éolienne, on peut définir l'efficacité d'une éolienne à partir des équations (10) et (13), on peut définir l'efficacité d'une éolienne comme le ratio entre l'énergie effectivement produite par l'éolienne et l'énergie que produirait une turbine idéale, soit :

$$\eta = \frac{E_{TA}}{E_{TW}} \quad (14)$$

Cependant, l'efficacité d'une éolienne ne dépend pas seulement des performances de la turbine mais aussi de la distribution du vent (cf. annexe I).

On peut aussi citer le facteur de capacité comme caractéristique importante pour mesurer la productivité d'une éolienne. Il compare la production réelle de l'éolienne pour une durée donnée avec la production maximale pour cette même durée.

Une éolienne qui serait à pleine capacité produirait pour une période T la quantité d'énergie suivante :

$$E_{TR} = TP_R \quad (15)$$

Le facteur de capacité est alors défini par le ratio de cette énergie avec l'énergie réellement produite définie par (13) :

$$C_F = \frac{E_{TA}}{E_{TR}} = \frac{\int_{V_i}^{V_R} (a_1 V^3 + a_2 V^2 + a_3 V + a_4) \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) dV}{\int_{V_R}^{V_0} \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) dV} \quad (16)$$

Enfin, on peut parler d'un facteur de disponibilité. Il est défini comme une mesure du pourcentage de fonctionnement de l'éolienne. Il réfère donc au pourcentage du temps pendant lequel l'éolienne est en opération et dépend donc des caractéristiques de la machine et du potentiel éolien. Il est défini par :

$$A_F = P(V_i \leq V < V_0) = \int_{V_i}^{V_0} \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] dV \quad (17)$$

ANNEXE III

***Calcul de la puissance et de l'énergie associée à la loi de Rayleigh,
définitions de vitesses particulières***

Comme pour la loi de Weibull des caractéristiques de puissance et d'énergie éoliennes peuvent être définies ainsi que des vitesses de vent ayant des propriétés particulières. Elles ressemblent en grande partie aux définitions trouvées pour la loi de Weibull mais avec une valeur du paramètre $k=2$.

On sait que la puissance disponible par unité de surface est donnée, sans utiliser le coefficient de Betz, par :

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (1)$$

La densité d'énergie éolienne d'un site peut être exprimée par :

$$E_I = \int_0^{\infty} P f(V) dV \quad (2)$$

Donc, en utilisant la définition d'une constante $K = \frac{\pi}{4V_m^2}$ et d'après les équations (1.3.13) et

(2), la densité d'énergie éolienne peut alors s'écrire :

$$E_I = K \rho \int_0^{\infty} V^4 \exp(-KV^2) dV \quad (3)$$

Cette intégrale peut alors être évaluée à :

$$E_I = \frac{3}{8} \frac{\rho \sqrt{\pi}}{K^{3/2}} \quad (4)$$

L'énergie calculée pour une période de temps T peut alors s'exprimer par :

$$E_s = T E_I = \frac{3}{8} \frac{\rho T \sqrt{\pi}}{K^{3/2}} \quad (5)$$

Donc en utilisant la valeur de K définie par $K = \frac{\pi}{4V_m^2}$, on obtient la valeur de l'énergie :

$$E_s = \frac{3}{\pi} \rho V_m^3 T \quad (6)$$

Et donc la valeur de la moyenne de la densité de puissance obtenue à partir de la loi de Rayleigh est :

$$P_{m,R} = \frac{3}{\pi} \rho V_m^3 \quad (7)$$

On peut aussi exprimer la vitesse de vent la plus fréquente. On utilise l'équation (1.3.13) et la définition de K pour réécrire l'expression de la densité de probabilité et on obtient :

$$f(V) = 2KV \exp(-KV^2) \quad (8)$$

Donc la vitesse de vent pour laquelle la densité de probabilité est maximale c'est-à-dire la vitesse de vent la plus fréquente est donnée par :

$$V_{F \max} = \frac{1}{\sqrt{2K}} \quad (9)$$

Cependant, puisque la puissance éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent ce n'est pas cette vitesse mais une vitesse plus élevée qui apportera un maximum d'énergie.

L'énergie correspondant à une vitesse de vent particulière est donnée par :

$$E_v = Pf(V) \quad (10)$$

On obtient en utilisant les équations précédentes :

$$E(V) = K \rho V^4 \exp(-KV^2) \quad (11)$$

ANNEXE IV

Autre exemple de calcul de la puissance éolienne

Donc on a une énergie maximale pour la vitesse suivante :

$$V_{E \max} = \sqrt{\frac{2}{K}} \quad (12)$$

Il est bien important de faire la différence entre ces deux dernières vitesses puisque le design des éoliennes doit se baser sur ces valeurs. En effet, il sera préférable d'ajuster au plus près la vitesse d'efficacité maximale de l'éolienne sur la vitesse engendrant une énergie maximale et non pas sur la vitesse ayant la plus grande densité de probabilité.

L'énergie produite pour une période T par une éolienne est évidemment reliée à son fonctionnement. En effet, pour un vent plus faible que la vitesse de démarrage V_i de l'éolienne aucune puissance ne pourra être générée et à partir d'une certaine vitesse de vent V_R la puissance est constante jusqu'à la vitesse de coupure V_o . On a donc une énergie disponible définie par :

$$E_T = T \int_{V_i}^{V_R} P(V) f(V) dV + T P_R \int_{V_R}^{V_o} f(V) dV \quad (13)$$

En utilisant l'expression de $f(V)$, on obtient :

$$E_T = TK\rho \int_{V_i}^{V_R} V^4 \exp(-KV^2) dV + TP_R \int_{V_R}^{V_o} f(V) dV \quad (14)$$

Et en appliquant $F(V) = \int f(V) dV$ et utilisant l'expression de la fonction cumulative, on a alors :

$$E_T = TK\rho \int_{V_i}^{V_R} V^4 \exp(-KV^2) dV + \frac{1}{2} \rho V_R^3 T \left[\exp(-KV_R^2) - \exp(-KV_o^2) \right] \quad (15)$$

L'intégrale ne peut être résolue analytiquement mais son expression peut être intégrée par des techniques numériques utilisant la règle de Simpson.

Cette méthode ne se base pas sur l'utilisation d'une distribution de Weibull. On définit ici la vitesse du vent à partir de la vitesse moyenne \bar{V} et d'une vitesse flottante $V'(t)$:

$$V(t) = \bar{V} + V'(t) \quad (1)$$

En utilisant la définition suivante pour la vitesse moyenne, avec $T=t_0+t_1$:

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_1} V(t) dt \quad (2)$$

La moyenne de la vitesse flottante $V'(t)$ est nulle. La puissance produite à travers une surface S en m^2 sans utiliser le coefficient de Betz, est définie par :

$$P = \frac{1}{2} \bar{\rho} S V^3 \quad (3)$$

avec $\bar{\rho}$ la densité moyenne de l'air.

On utilise ensuite la méthode de Hennesey [31] pour la détermination de la puissance éolienne. On obtient alors la valeur moyenne sur un temps T de la puissance :

$$\bar{P} = \frac{\bar{\rho}}{2T} \int_0^T V^3 dt \quad (4)$$

Ensuite à l'aide de (1), on obtient :

$$\bar{P} = \frac{\bar{\rho}}{2} \bar{V}^3 \left(1 + 3 \frac{\overline{V'^2}}{\bar{V}^2} + 3 \frac{\overline{V'}}{\bar{V}} + \frac{\overline{V'^3}}{\bar{V}^3} \right) \quad (5)$$

avec

$$\overline{V'} = \frac{1}{T} \int_0^T V' dx \quad (6)$$

$$\overline{V'^2} = \frac{1}{T} \int_0^T V'^2 dx \quad (7)$$

$$\overline{V'^3} = \frac{1}{T} \int_0^T V'^3 dx \quad (8)$$

Cependant, $\overline{V'} = 0$ et en utilisant le facteur de turbulence $I = \frac{\sigma_V}{\overline{V}}$ où $\sigma_V = (\overline{V'^2})^{1/2}$, on a :

$$\overline{P} = \frac{1}{2} \rho \overline{V}^3 \left(1 + 3I^2 + \frac{\overline{V'^3}}{\sigma_V^3} I^3 \right) \quad (9)$$

De plus, en tenant compte de la distribution statistique des vitesses de vent on a $\frac{\overline{V'^3}}{\sigma_V^3} \cong 0$ et

de la faible valeur de I^3 , la puissance moyenne disponible devient :

$$\overline{P} = \frac{1}{2} \rho (1 + 3I^2) \overline{V}^3 \quad (10)$$

Cette formule pour le calcul de la valeur de la puissance est valable pour des périodes de temps assez courtes. Pour de plus longues périodes, il est nécessaire d'utiliser la distribution statistique de la vitesse moyenne du vent $f_T(\overline{V})$ correspondant à l'intervalle T. On obtient alors :

$$\overline{P}_T = \frac{1}{2} \rho (1 + 3I^2) \int_0^\infty f_T(\overline{V}) \overline{V}^3 dV \quad (11)$$

Enfin, on détermine la puissance maximale qui peut être extraite du vent à l'aide de coefficient de Betz, on a alors :

$$\overline{P}_{T \max} = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho (1 + 3I^2) \int_0^\infty f_T(\overline{V}) \overline{V}^3 dV \quad (12)$$

ANNEXE V

Description des autres méthodes de détermination

des paramètres de la loi de Weibull

➤ **Utilisation de la valeur médiane du vent et des vitesses quartiles**

Elle est utilisée en particulier quand l'observation complète de la distribution des vitesses de vent n'est pas disponible mais que la vitesse médiane V_m et les vitesses « au quart » $V_{0.25}$ et $V_{0.75}$ telles que $P(V \leq V_{0.25}) = 0.25$ et $P(V \leq V_{0.75}) = 0.75$, le sont. Alors k et c peuvent être déterminées par les relations suivantes :

$$k = \frac{\ln\left(\frac{\ln(0,25)}{\ln(0,75)}\right)}{\ln\left(\frac{V_{0,75}}{V_{0,25}}\right)} = \frac{1,573}{\ln\left(\frac{V_{0,75}}{V_{0,25}}\right)} \quad (1)$$

$$c = \frac{V_m}{(\ln 2)^{1/k}} \quad (2)$$

➤ **Utilisation de la vitesse moyenne et l'écart-type : méthode des moments**

Cette méthode est utilisée principalement si les données disponibles ne sont que la valeur moyenne de la distribution \bar{V} et l'écart-type σ tel que $\sigma^2 = \langle (V - \bar{V})^2 \rangle$ où les $\langle \rangle$ signifient la prise de la valeur moyenne. Alors k et c peuvent être déterminées à l'aide des relations suivantes :

$$\bar{V} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (3)$$

$$\left(\frac{\sigma}{\bar{V}}\right)^2 = \left(\frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)}\right) - 1 \quad (4)$$

On peut alors utiliser une approximation de l'équation (3) pour exprimer k et utiliser l'équation (4) pour exprimer c :

$$k = \left(\sigma / \bar{V} \right)^{-1.086} \quad (5)$$

$$c = \bar{V} / \Gamma \left(1 + 1/k \right) \quad (6)$$

➤ Utilisation de la tendance entre k et la vitesse moyenne

Certaines études antérieures [15] ont permis de montrer qu'il existait une tendance générale entre le paramètre k de la loi de Weibull et la valeur moyenne du vent. Pour chaque site, on peut déterminer le coefficient k à partir du degré de variation de vitesses de vent σ / \bar{V} avec \bar{V} en m/s :

$$k = \begin{cases} 1,05 \bar{V}^{1/2} & (\text{low}) \\ 0,94 \bar{V}^{1/2} & (\text{average}) \\ 0,83 \bar{V}^{1/2} & (\text{high}) \end{cases} \quad (7)$$

À l'aide de la formule (6) le paramètre c est alors calculé.

➤ Utilisation du « facteur d'énergie »

Le facteur d'énergie [29] a été défini par Golding comme suit :

$$k_E = \frac{\text{Valeur totale de l'énergie disponible dans le vent}}{\text{Énergie calculée à partir du cube la vitesse moyenne du vent}}$$

On peut alors utiliser la définition de la vitesse moyenne de l'équation (3) et celle de l'énergie du vent traversant le rotor pendant un temps T, pour un rotor de rayon R et une densité de l'air ρ :

$$E_{vent} = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma \left(1 + \frac{3}{k} \right) \pi R^2 T \quad (8)$$

On obtient alors l'expression du facteur d'énergie :

$$k_E = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)}{\Gamma^3\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (9)$$

De plus, à partir des observations le « facteur d'énergie » peut-être déterminé comme suit :

$$k_E = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^3}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i\right)^3} \quad (10)$$

On utilise alors cette dernière équation et l'équation (9) pour déterminer la valeur de k. Le paramètre c peut alors être calculé à l'aide de l'équation (6).

➤ **Utilisation des estimateurs de centile**

Les 100 centiles p pour la distribution de la loi de Weibull sont définies comme les valeurs $v=v_p$ telles que :

$$F(v_p) = p = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{v_p}{c}\right)^k\right\} \quad (11)$$

À partir de deux points expérimentaux (v_1, p_1) et (v_2, p_2) on peut trouver les estimateurs centiles \hat{k} et \hat{c} des paramètres de Weibull k et c en utilisant l'équation (1.3.5) (celle de la méthode graphique). On obtient alors :

$$\hat{k} = \frac{a}{\ln(v_1) - \ln(v_2)} \quad (12)$$

$$\hat{c} = \exp[w \ln(v_1) + (1-w) \ln(v_2)] \quad (13)$$

Les deux estimateurs \hat{k} et \hat{c} sont asymptotiquement normaux avec les moyennes k et c et avec les variances asymptotiques égales à :

$$\sigma^2(\hat{k}) = \frac{k^2}{a^2 n} \left[\frac{a'_1}{a_1^2} + \frac{a'_2}{a_2^2} - 2 \frac{a'_1}{a_1 a_2} \right] \quad (14)$$

$$\sigma^2(\hat{c}) = \frac{c^2}{k^2 n} \left[\frac{a'_1 w}{a_1} \left\{ \frac{w}{a_1} + \frac{2(1-w)}{a_2} \right\} + a'_2 \frac{(1-w)^2}{a_2^2} \right] \quad (15)$$

$$\text{avec : } \begin{cases} 0 < p_1 < p_2 < 1 \\ w = 1 - \frac{\ln a_1}{a} \\ a = \ln a_1 - \ln a_2 \\ a_1 = -\ln(1-p_1) \\ a_2 = -\ln(1-p_2) \\ a'_1 = \frac{p_1}{1-p_1} \\ a'_2 = \frac{p_2}{1-p_2} \end{cases}$$

ANNEXE VI

***Tableaux récapitulatifs représentant les pourcentages d'observation pour les
différents types de données pour les phases I à IV***

Tableau Annexe VI.1 : Nombre d'observations de vitesses du vent à 40 m

Phase	Station	Pourcentage de données valides	Pourcentage de données manquantes	Pourcentage de données trop petites	Pourcentage de données erronées
I	Bonaventure	0,0%	31,7%	68,3%	0,0%
	Rivière-au-Renard	73,9%	25,8%	0,0%	0,2%
	Sainte-Thérèse	83,6%	14,1%	2,2%	0,1%
	Saint-Jean-de-Cherbourg	85,3%	14,1%	0,5%	0,1%
	Saint-Octave-de-l'Avenir	68,0%	31,9%	0,0%	0,1%
II«	Pointe-à-Boisvert	0,0%	0,4%	0,3%	99,3%
	Luceville	99,0%	0,9%	0,1%	0,0%
	Pointe-des-Monts	0,0%	7,0%	4,3%	88,7%
	Sainte-Anne-des-Monts	57,4%	3,0%	0,1%	39,5%
	Sainte-Félicité 1	38,6%	5,9%	0,0%	55,6%
III	Baie-des-Sables	99,7%	0,0%	0,3%	0,0%
	Bernatchez	99,4%	0,1%	0,5%	0,0%
	Cap-Saint-Ignace	98,5%	0,8%	0,7%	0,0%
	Desrosiers	99,9%	0,1%	0,0%	0,0%
	Gagné	99,9%	0,0%	0,0%	0,0%
	Île-d'Anticosti	95,5%	4,5%	0,0%	0,0%
	Îles-de-la-Madeleine	99,5%	0,2%	0,2%	0,0%
	Marquis	96,9%	3,1%	0,0%	0,0%
	Martin	99,7%	0,2%	0,1%	0,0%
	Murdochville	83,0%	14,4%	2,5%	0,0%
	Petit-Cap	94,1%	4,4%	0,1%	1,4%
	Rivière-au-Renard Marinard	98,8%	0,7%	0,6%	0,0%
	Sainte-Marguerite	98,3%	1,5%	0,1%	0,1%

	Sainte-Félicité 2 - NRG	98,8%	0,9%	0,3%	0,0%
	Sainte-Félicité 2 - RM	98,6%	0,9%	0,4%	0,0%
	Sainte-Sophie	99,5%	0,2%	0,2%	0,0%
	TV – anémomètre 1	99,2%	0,2%	0,4%	0,0%
	TV – anémomètre 2	90,2%	0,6%	9,3%	0,0%
IV	Saint-Athanase	99,8%	0,2%	0,0%	0,0%
	Sainte-Rita	99,9%	0,0%	0,0%	0,0%
	Kamouraska	97,4%	2,2%	0,2%	0,2%
	Trois-Pistoles	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
	Chic-Chocs	96,0%	2,4%	1,5%	0,0%
	Île-d'Anticosti 2	99,9%	0,0%	0,1%	0,0%
	Natashquan	0,0%	0,2%	5,3%	94,5%
	Chevery	0,0%	1,4%	0,2%	98,4%
	Fermont	99,6%	0,0%	0,4%	0,0%
	Montagne-Sèche	97,1%	2,2%	0,6%	0,0%
	Pointe-Saint-Pierre – an. 1	99,9%	0,1%	0,0%	0,1%
	Pointe-Saint-Pierre – an. 2	80,3%	0,5%	19,1%	0,0%
	Canton-Power	97,8%	0,2%	2,0%	0,0%

Tableau Annexe VI.2 : Nombre d'observations d'écart-types de la vitesse du vent à 20 m

Phase	Station	Pourcentage de données valides	Pourcentage de données manquantes	Pourcentage de données trop petites	Pourcentage de données erronées
II	Pointe-à-Boisvert	45,0%	0,4%	54,6%	0,0%
	Luceville	85,1%	0,4%	14,5%	0,0%
	Pointe-des-Monts	76,8%	7,2%	16,0%	0,0%

	Sainte-Anne-des-Monts	45,0%	3,0%	51,7%	0,3%
	Sainte-Félicité 1	46,7%	5,9%	47,1%	0,3%
III	Baie-des-Sables	98,7%	0,6%	0,7%	0,0%
	Bernatchez	99,8%	0,1%	0,1%	0,0%
	Cap-Saint-Ignace	98,8%	0,8%	0,4%	0,0%
	Desrosiers	99,8%	0,1%	0,1%	0,0%
	Gagné	99,4%	0,0%	0,5%	0,0%
	Île-d'Anticosti	94,9%	4,5%	0,6%	0,0%
	Îles-de-la-Madeleine	98,4%	0,2%	1,4%	0,0%
	Marquis	96,4%	3,1%	0,5%	0,0%
	Martin	99,8%	0,2%	0,0%	0,0%
	Murdochville	67,4%	14,4%	18,2%	0,0%
	Petit-Cap	95,3%	4,4%	0,1%	0,2%
	Rivière-au-Renard Marinard	99,3%	0,7%	0,0%	0,0%
	Sainte-Marguerite	70,8%	1,5%	27,7%	0,0%
	Sainte-Félicité 2 - NRG	98,6%	0,9%	0,4%	0,0%
	Sainte-Félicité 2 - RM	98,6%	0,9%	0,4%	0,0%
	Sainte-Sophie	93,8%	0,2%	5,9%	0,0%
	TV – anémomètre 1	0,0%	0,2%	5,4%	94,4%
	TV – anémomètre 2	97,5%	0,6%	1,9%	0,0%
	TV – anémomètre à 30 m	89,8%	0,6%	9,6%	0,0%
IV	Saint-Athanase	98,2%	0,2%	1,6%	0,0%
	Sainte-Rita	0,0%	0,0%	4,7%	95,2%
	Kamouraska	97,4%	2,2%	0,2%	0,2%
	Trois-Pistoles	99,5%	0,0%	0,5%	0,0%
	Chic-Chocs	0,0%	0,5%	3,3%	96,2%
	Île-d'Anticosti 2	0,0%	0,0%	3,1%	96,8%

Natashquan	94,3%	0,2%	5,4%	0,1%
Chevery	97,2%	1,5%	0,9%	0,4%
Fermont	99,0%	0,0%	1,0%	0,0%
Montagne-Sèche	97,3%	0,2%	2,5%	0,0%
Pointe-Saint-Pierre- an. 1	0,0%	0,1%	0,2%	99,7%
Pointe-Saint-Pierre- an. 2	80,6%	0,5%	18,8%	0,0%
Canton-Power	91,5%	0,0%	8,5%	0,0%

Tableau Annexe VI.3 : Nombre d'observations d'écarts-types de la vitesse du vent à 40 m

Phase	Station	Pourcentage de données valides	Pourcentage de données manquantes	Pourcentage de données trop petites	Pourcentage de données erronées
II	Pointe-à-Boisvert	0,0%	0,4%	20,5%	79,2%
	Luceville	85,3%	0,4%	14,3%	0,0%
	Pointe-des-Monts	0,0%	7,3%	20,0%	72,7%
	Sainte-Anne-des-Monts	45,5%	3,1%	51,4%	0,0%
	Sainte-Félicité 1	46,7%	5,9%	47,2%	0,2%
III	Baie-des-Sables	97,9%	1,2%	0,8%	0,0%
	Bernatchez	99,8%	0,1%	0,1%	0,0%
	Cap-Saint-Ignace	98,8%	0,8%	0,4%	0,0%
	Desrosiers	99,9%	0,1%	0,0%	0,0%
	Gagné	99,9%	0,0%	0,0%	0,0%
	Île-d'Anticosti	94,5%	4,5%	0,9%	0,1%
	Îles-de-la-Madeleine	98,0%	0,2%	1,7%	0,0%
	Marquis	96,9%	3,1%	0,1%	0,0%
	Martin	99,8%	0,2%	0,0%	0,0%
	Murdochville	82,2%	14,4%	3,3%	0,0%
	Petit-Cap	94,2%	4,4%	0,0%	1,4%

	Rivière-au-Renard Marinard	98,8%	0,7%	0,5%	0,0%
	Sainte-Marguerite	98,1%	1,5%	0,3%	0,1%
	Sainte-Félicité 2 - NRG	99,0%	0,9%	0,1%	0,0%
	Sainte-Sophie	99,5%	0,2%	0,3%	0,0%
	TV – anémomètre 1	99,2%	0,2%	0,6%	0,0%
	TV – anémomètre 2	90,2%	0,6%	9,3%	0,0%
IV	Saint-Athanase	99,8%	0,2%	0,0%	0,0%
	Sainte-Rita	99,9%	0,0%	0,0%	0,0%
	Kamouraska	97,4%	2,2%	0,2%	0,2%
	Trois-Pistoles	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%
	Chic-Chocs	96,0%	2,4%	1,6%	0,0%
	Île-d'Anticosti 2	99,8%	0,0%	0,2%	0,0%
	Natashquan	0,0%	0,2%	5,4%	94,4%
	Chevery	0,0%	1,5%	0,3%	98,2%
	Fermont	99,9%	0,0%	0,1%	0,0%
	Montagne-Sèche	97,1%	2,2%	0,3%	0,4%
	Pointe-Saint-Pierre– an. 1	99,9%	0,1%	0,1%	0,0%
	Pointe-Saint-Pierre– an. 2	80,3%	0,5%	19,1%	0,0%
	Canton-Power	97,8%	0,2%	2,0%	0,0%

Tableau Annexe VI.4 : Nombre d'observations de directions du vent à 20 m

Phase	Station	Pourcentage de données valides	Pourcentage de données manquantes	Pourcentage de données stables	Pourcentage de données Nord	Pourcentage de données Autres
I	Bonaventure	63,4%	31,7%	2,6%	0,5%	1,7%
	Rivière-au-Renard	0,0%	26,0%	2,0%	0,0%	72,0%
	Sainte-Thérèse	79,3%	14,7%	5,1%	0,2%	0,7%
	Saint-Jean-de-Cherbourg	0,0%	14,3%	6,5%	0,6%	78,6%

	Saint-Octave-de-l'Avenir	64,8%	32,3%	2,3%	0,1%	0,5%
II	Pointe-à-Boisvert	96,3%	0,4%	3,0%	0,2%	0,1%
	Luceville	93,6%	1,0%	3,4%	1,8%	0,1%
	Pointe-des-Monts	87,9%	7,0%	3,4%	1,7%	0,0%
	Sainte-Anne-des-Monts	65,1%	3,1%	7,9%	1,2%	22,7%
	Sainte-Félicité 1	90,1%	5,9%	2,6%	1,3%	0,2%
III	Baie-des-Sables	94,4%	0,6%	4,8%	0,0%	0,2%
	Bernatchez	94,3%	0,1%	5,2%	0,0%	0,4%
	Cap-Saint-Ignace	0,0%	1,8%	13,3%	0,2%	84,7%
	Desrosiers	96,1%	0,1%	3,7%	0,0%	0,1%
	Gagné	85,9%	0,0%	13,9%	0,0%	0,1%
	Île-d'Anticosti	90,8%	4,5%	3,5%	0,6%	0,5%
	Îles-de-la-Madeleine	96,4%	0,2%	3,1%	0,1%	0,2%
	Marquis	94,2%	3,1%	2,4%	0,0%	0,2%
	Martin	96,5%	0,2%	3,1%	0,0%	0,2%
	Murdochville	71,8%	14,4%	13,6%	0,0%	0,1%
	Petit-Cap	91,5%	4,4%	2,3%	0,5%	1,3%
	Rivière-au-Renard Marinard	92,3%	0,7%	6,5%	0,0%	0,4%
	Sainte-Marguerite	97,1%	1,5%	1,1%	0,0%	0,3%
	Sainte-Félicité 2 - NRG	95,6%	0,9%	3,4%	0,0%	0,0%
	Sainte-Félicité 2 - RM	97,7%	0,9%	0,8%	0,2%	0,5%
	Sainte-Sophie	89,6%	0,2%	9,6%	0,3%	0,2%
	TV	94,7%	0,2%	4,9%	0,0%	0,1%
IV	Saint-Athanase	92,0%	0,2%	7,8%	0,0%	0,1%
	Sainte-Rita	89,5%	0,0%	10,4%	0,0%	0,0%
	Kamouraska	92,5%	2,2%	5,0%	0,0%	0,2%
	Trois-Pistoles	0,0%	0,0%	3,0%	0,0%	97,0%
	Chic-Chocs	91,2%	0,5%	8,3%	0,0%	0,1%
	Île-d'Anticosti 2	86,6%	0,0%	13,4%	0,0%	0,0%
	Natashquan	92,9%	0,2%	1,9%	0,0%	5,0%

	Chevery	21,7%	1,4%	6,0%	0,0%	70,8%
	Fermont	95,1%	0,0%	4,9%	0,0%	0,0%
	Montagne-Sèche	95,7%	0,2%	4,2%	0,0%	0,0%
	Pointe-Saint-Pierre- an. 1	94,2%	0,1%	5,7%	0,0%	0,0%
	Canton-Power	92,3%	0,0%	7,7%	0,0%	0,0%

Tableau Annexe VI.5 : Nombre d'observations de directions du vent à 40 m

Phase	Station	Pourcentage de données valides	Pourcentage de données manquantes	Pourcentage de données stables	Pourcentage de données Nord	Pourcentage de données Autres
I	Bonaventure	29,8%	31,7%	24,3%	0,4%	13,8%
	Rivière-au-Renard	61,5%	26,0%	7,1%	0,2%	5,2%
	Sainte-Thérèse	70,9%	14,3%	14,1%	0,4%	0,4%
	Saint-Jean-de-Cherbourg	0,0%	14,3%	7,5%	0,8%	77,4%
	Saint-Octave-de-l'Avenir	64,9%	18,4%	16,3%	0,2%	0,2%
II	Pointe-à-Boisvert	0,0%	0,4%	15,3%	0,2%	84,1%
	Luceville	53,8%	1,0%	27,4%	0,3%	17,4%
	Pointe-des-Monts	28,3%	7,0%	6,3%	0,4%	58,1%
	Sainte-Anne-des-Monts	0,0%	3,1%	16,3%	2,4%	78,2%
	Sainte-Félicité 1	0,0%	5,9%	9,8%	0,9%	83,4%
III	Baie-des-Sables	83,8%	0,6%	15,6%	0,0%	0,0%
	Bernatchez	88,3%	0,1%	11,5%	0,0%	0,1%
	Cap-Saint-Ignace	0,0%	1,8%	35,5%	0,0%	62,7%
	Desrosiers	98,6%	0,1%	1,2%	0,0%	0,1%
	Gagné	89,5%	0,0%	10,4%	0,0%	0,1%
	Île-d'Anticosti	82,9%	4,5%	11,7%	0,6%	0,3%
	Îles-de-la-Madeleine	0,0%	0,2%	9,0%	0,0%	90,7%
	Marquis	88,4%	3,1%	8,4%	0,0%	0,1%
	Martin	98,9%	0,2%	0,8%	0,0%	0,2%

	Murdochville	78,6%	14,4%	6,9%	0,0%	0,0%
	Petit-Cap	94,8%	4,4%	0,8%	0,0%	0,1%
	Rivière-au-Renard Marinard	96,7%	0,7%	2,4%	0,0%	0,2%
	Sainte-Marguerite	92,0%	1,5%	6,5%	0,0%	0,0%
	Sainte-Félicité 2 - NRG	78,9%	0,9%	8,9%	0,0%	11,2%
	Sainte-Sophie	90,3%	0,2%	8,9%	0,4%	0,2%
	TV – anémomètre 1	95,3%	0,2%	4,4%	0,0%	0,0%
IV	Saint-Athanase	89,1%	0,2%	10,7%	0,0%	0,0%
	Sainte-Rita	85,7%	0,0%	14,2%	0,0%	0,0%
	Kamouraska	92,4%	2,2%	5,0%	0,0%	0,4%
	Trois-Pistoles	0,0%	0,0%	3,0%	0,0%	97,0%
	Chic-Chocs	98,6%	0,5%	0,8%	0,0%	0,0%
	Île-d'Anticosti 2	99,7%	0,0%	0,3%	0,0%	0,0%
	Natashquan	90,0%	0,2%	5,1%	0,0%	4,7%
	Chevery	96,4%	1,4%	1,7%	0,0%	0,5%
	Fermont	0,0%	2,7%	7,6%	0,1%	89,6%
	Montagne-Sèche	0,0%	1,2%	0,9%	0,0%	97,9%
	Pointe-Saint-Pierre	94,0%	0,1%	5,7%	0,0%	0,2%
	Canton-Power	98,8%	0,0%	1,0%	0,0%	0,2%

Tableau Annexe VI.6 : Nombre d'observations d'écarts-types de la direction du vent à 20 m

Phase	Station	Pourcentage de données valides	Pourcentage de données manquantes	Pourcentage de données stables	Pourcentage de données Nord	Pourcentage de données Autres
III	Baie-des-Sables	94,2%	0,6%	4,6%	0,0%	0,5%
	Bernatchez	94,0%	0,1%	5,1%	0,0%	0,8%
	Cap-Saint-Ignace	0,0%	1,8%	14,1%	0,2%	84,0%
	Desrosiers	95,6%	0,1%	3,4%	0,0%	0,9%
	Gagné	85,9%	0,0%	13,9%	0,0%	0,2%
	Île-d'Anticosti	90,2%	4,5%	3,5%	0,3%	1,4%
	Îles-de-la-Madeleine	96,2%	0,2%	3,1%	0,1%	0,4%

	Marquis	93,6%	3,1%	2,2%	0,0%	1,0%
	Martin	96,3%	0,2%	3,0%	0,0%	0,5%
	Murdochville	71,8%	14,4%	13,6%	0,0%	0,2%
	Petit-Cap	91,4%	4,4%	2,2%	0,5%	1,5%
	Rivière-au-Renard Marinard	92,0%	0,7%	6,3%	0,0%	1,1%
	Sainte-Marguerite	97,1%	1,5%	1,1%	0,0%	0,3%
	Sainte-Félicité 2 - NRG	94,9%	0,9%	3,2%	0,0%	1,0%
	Sainte-Félicité 2 - RM	96,5%	0,9%	0,6%	0,0%	1,9%
	Sainte-Sophie	89,3%	0,2%	9,6%	0,2%	0,7%
	TV – anémomètre 1	94,7%	0,2%	4,9%	0,0%	0,2%
IV	Saint-Athanase	92,0%	0,2%	7,8%	0,0%	0,1%
	Sainte-Rita	89,5%	0,0%	10,4%	0,0%	0,0%
	Kamouraska	92,4%	2,2%	5,0%	0,0%	0,4%
	Trois-Pistoles	0,0%	0,0%	3,0%	0,0%	97,0%
	Chic-Chocs	91,1%	0,5%	8,3%	0,0%	0,1%
	Île-d'Anticosti 2	86,6%	0,0%	13,4%	0,0%	0,0%
	Natashquan	92,8%	0,2%	1,9%	0,0%	5,1%
	Chevery	21,7%	1,4%	6,3%	0,0%	70,5%
	Fermont	95,0%	0,0%	4,9%	0,0%	0,1%
	Montagne-Sèche	95,6%	0,2%	4,2%	0,0%	0,1%
	Pointe-Saint-Pierre	94,2%	0,1%	5,7%	0,0%	0,0%
	Canton-Power	92,2%	0,0%	7,7%	0,0%	0,1%

Tableau Annexe VI.7 : Nombre d'observations d'écarts-types de la direction du vent à 40 m

Phase	Station	Pourcentage de données valides	Pourcentage de données manquantes	Pourcentage de données stables	Pourcentage de données Nord	Pourcentage de données Autres
III	Baie-des-Sables	83,7%	0,6%	15,6%	0,0%	0,1%
	Bernatchez	88,2%	0,1%	11,5%	0,0%	0,2%
	Cap-Saint-Ignace	0,0%	1,8%	34,9%	0,0%	63,3%
	Desrosiers	98,0%	0,1%	1,0%	0,0%	0,9%

	Gagné	89,3%	0,0%	10,3%	0,0%	0,3%
	Île-d'Anticosti	81,2%	4,5%	11,0%	0,4%	2,9%
	Îles-de-la-Madeleine	0,0%	0,2%	9,0%	0,0%	90,7%
	Marquis	87,8%	3,1%	8,4%	0,0%	0,7%
	Martin	97,9%	0,2%	0,7%	0,0%	1,2%
	Murdochville	78,5%	14,4%	6,9%	0,0%	0,2%
	Petit-Cap	94,2%	4,4%	0,7%	0,0%	0,7%
	Rivière-au-Renard Marinard	95,2%	0,7%	2,4%	0,0%	1,7%
	Sainte-Marguerite	91,9%	1,5%	6,5%	0,0%	0,1%
	Sainte-Félicité 2 - NRG	78,6%	0,9%	8,9%	0,0%	11,5%
	Sainte-Sophie	89,3%	0,2%	8,8%	0,2%	1,4%
	TV	95,0%	0,2%	4,4%	0,0%	0,3%
IV	Saint-Athanase	89,1%	0,2%	10,7%	0,0%	0,0%
	Sainte-Rita	85,7%	0,0%	14,2%	0,0%	0,0%
	Kamouraska	73,6%	2,2%	24,0%	0,0%	0,2%
	Trois-Pistoles	0,0%	0,0%	5,2%	0,0%	94,7%
	Chic-Chocs	98,5%	0,5%	0,8%	0,0%	0,2%
	Île-d'Anticosti 2	99,7%	0,0%	0,3%	0,0%	0,0%
	Natashquan	90,0%	0,2%	5,1%	0,0%	4,7%
	Chevery	96,4%	1,4%	1,7%	0,0%	0,5%
	Fermont	0,0%	2,7%	7,6%	0,1%	89,6%
	Montagne-Sèche	0,0%	1,2%	0,9%	0,0%	97,9%
	Pointe-Saint-Pierre- an. 1	97,8%	0,1%	1,9%	0,0%	0,2%
	Canton-Power	98,7%	0,0%	1,0%	0,0%	0,2%

Tableau Annexe VI.8 : Nombre d'observations de température

Phase	Station	Pourcentage de données valides	Pourcentage de données manquantes	Pourcentage de données Biaisées	Pourcentage de données erronées
I	Bonaventure	31,3%	35,5%	33,0%	0,2%
	Rivière-au-Renard	0,0%	26,9%	73,0%	0,1%
	Sainte-Thérèse	78,0%	15,9%	6,0%	0,1%

	Saint-Jean-de-Cherbourg	77,8%	15,5%	6,5%	0,1%
	Saint-Octave-de-l'Avenir	52,0%	36,0%	11,8%	0,2%
II	Pointe-à-Boisvert	99,6%	0,4%	0,0%	0,0%
	Luceville	0,0%	1,0%	98,8%	0,2%
	Pointe-des-Monts	0,0%	7,0%	93,0%	0,0%
	Sainte-Anne-des-Monts	39,0%	3,0%	57,9%	0,1%
	Sainte-Félicité 1	94,1%	5,9%	0,0%	0,0%
III	Baie-des-Sables	99,4%	0,6%	0,0%	0,0%
	Bernatchez	80,4%	0,1%	19,5%	0,0%
	Cap-Saint-Ignace	0,0%	1,8%	98,2%	0,0%
	Desrosiers	99,9%	0,1%	0,0%	0,0%
	Gagné	90,1%	0,0%	0,0%	9,9%
	Île-d'Anticosti	0,0%	4,5%	95,4%	0,1%
	Îles-de-la-Madeleine	99,7%	0,2%	0,0%	0,0%
	Marquis	96,9%	3,1%	0,0%	0,0%
	Martin	87,6%	0,2%	12,2%	0,0%
	Murdochville	53,2%	14,4%	31,7%	0,6%
	Petit-Cap	95,3%	4,4%	0,0%	0,3%
	Rivière-au-Renard Marinard	25,4%	0,7%	73,9%	0,0%
	Sainte-Marguerite	0,0%	1,5%	98,5%	0,0%
	Sainte-Félicité 2	89,9%	0,9%	9,1%	0,0%
	Sainte-Sophie	99,6%	0,2%	0,0%	0,2%
	TV	90,4%	0,2%	9,3%	0,0%
IV	Saint-Athanase	99,8%	0,2%	0,0%	0,0%
	Sainte-Rita	99,9%	0,0%	0,0%	0,0%
	Kamouraska	0,0%	2,2%	97,6%	0,2%
	Trois-Pistoles	99,9%	0,0%	0,0%	0,0%
	Chic-Chocs	99,5%	0,5%	0,0%	0,0%
	Île-d'Anticosti 2	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Natashquan	58,5%	0,2%	36,5%	4,8%
	Chevery	98,1%	1,4%	0,0%	0,4%
	Fermont	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Montagne-Sèche	99,8%	0,2%	0,0%	0,0%
	Pointe-Saint-Pierre	99,9%	0,1%	0,0%	0,0%
	Canton-Power	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%

ANNEXE VII

***Tableaux d'évaluation des paramètres m_i pour chaque cas avec la méthode
générale***

Les paramètres m_i donnés dans les tableaux suivants prennent en compte la pondération.

➤ Spectre de Kaimal

Tableau Annexe VII.1 : Tableau de comparaison des valeurs des paramètres pour différentes conditions initiales pour le spectre latéral de Kaimal avec la méthode générale ($IS=1$)

Valeurs des conditions initiales			Valeurs des paramètres			
\bar{U} (m/s)	z (m)	z ₀ (m)	m ₁	m ₂	m ₃	m ₄
10	10	0,001	4,793	6,4136	-0,34805	-0,17327
		0,1	4,7771	6,4264	-0,35682	-0,18205
		1	4,7703	6,4301	-0,35955	-0,1851
	30	0,001	4,8158	6,3953	-0,33376	-0,16023
		0,1	4,7986	6,4092	-0,34471	-0,17011
		1	4,7901	6,416	-0,34977	-0,17493
	50	0,001	4,8262	6,3871	-0,32678	-0,15425
		0,1	4,8092	6,4006	-0,33804	-0,16401
		1	4,8006	6,4075	-0,34348	-0,16897
15	10	0,001	4,7768	6,4266	-0,35695	-0,18219
		0,1	4,7671	6,4326	-0,36104	-0,18673
		1	4,7697	6,429	-0,35998	-0,18531
	30	0,001	4,7983	6,4094	-0,34491	-0,1703
		0,1	4,7817	6,4228	-0,35445	-0,17959
		1	4,7741	6,4271	-0,35784	-0,18326
	50	0,001	4,8089	6,4009	-0,33825	-0,1642
		0,1	4,7917	6,4147	-0,34882	-0,17401
		1	4,7835	6,4213	-0,35347	-0,17859
Moyenne			4,79070556	6,41501111	-0,34870389	-0,17428333
Écart-type			0,01713145	0,01315562	0,00987043	0,00943309

À l'aide de ces résultats, on justifie l'utilisation des paramètres $m_1= 4.79$, $m_2=6.42$, $m_3=0.35$ et $m_4=0.17$ pour la direction latérale pour la génération avec le programme simplifié.

Tableau Annexe VII.2 : Tableau de comparaison des valeurs des paramètres pour différentes conditions initiales pour le spectre vertical de Kaimal avec la méthode générale (IS=1)

Valeurs des conditions initiales			Valeurs des paramètres			
\bar{U} (m/s)	z (m)	z ₀ (m)	m ₁	m ₂	m ₃	m ₄
10	10	0,001	3,5748	4,6568	-0,41525	-0,17776
		0,1	3,5748	4,6568	-0,41525	-0,17776
		1	3,5748	4,6568	-0,41525	-0,17776
	30	0,001	4,7689	6,4299	-0,36025	-0,18569
		0,1	4,7689	6,4299	-0,36025	-0,18569
		1	4,7689	6,4299	-0,36025	-0,18569
	50	0,001	4,7743	6,4267	-0,35769	-0,1831
		0,1	4,7743	6,4267	-0,35769	-0,1831
		1	4,7743	6,4267	-0,35769	-0,1831
15	10	0,001	3,3648	4,4014	-0,44579	-0,19646
		0,1	3,3648	4,4014	-0,44579	-0,19646
		1	3,3648	4,4014	-0,44579	-0,19646
	30	0,001	4,8059	6,3896	-0,35432	-0,17283
		0,1	4,8059	6,3896	-0,35432	-0,17283
		1	4,8059	6,3896	-0,35432	-0,17283
	50	0,001	4,7671	6,4322	-0,36097	-0,18664
		0,1	4,7671	6,4322	-0,36097	-0,18664
		1	4,7671	6,4322	-0,36097	-0,18664
Moyenne			4,34263333	5,78943333	-0,38237833	-0,18374667
Écart-type			0,63827249	0,92027651	0,03624999	0,00762205

À l'aide de ces résultats, on justifie l'utilisation des paramètres $m_1=4,34$, $m_2=5,79$, $m_3=0,38$ et $m_4=0,18$ pour la direction verticale pour la génération avec le programme simplifié.

➤ Spectre de von Karman (IK=2)

Tableau Annexe VII.3 : Tableau de comparaison des valeurs des paramètres pour différentes conditions initiales pour le spectre longitudinal de von Karman avec la méthode générale (IS=1)

Valeurs des conditions initiales			Valeurs des paramètres	
\bar{U} (m/s)	z (m)	z ₀ (m)	m ₁	m ₂
10	10	0,001	0,39697	0,25618

		0,1	0,40499	0,26582
		1	0,40818	0,27004
	30	0,001	0,38414	0,24196
		0,1	0,39401	0,2528
		1	0,3985	0,25797
	50	0,001	0,37782	0,23524
		0,1	0,38804	0,24617
		1	0,39292	0,25157
15	10	0,001	0,40775	0,26937
		0,1	0,41281	0,27632
		1	0,4138	0,27843
	30	0,001	0,39761	0,25692
		0,1	0,40552	0,2665
		1	0,40862	0,27063
	50	0,001	0,39195	0,25048
		0,1	0,40087	0,26077
		1	0,40465	0,2654
	Moyenne		0,39939722	0,25958722
	Écart-type		0,00966526	0,01150342

Avec ces résultats, on justifie l'utilisation de $m_1=0,40$ et $m_2=0,25$.

Tableau Annexe VII.4 : Tableau de comparaison des valeurs des paramètres pour différentes conditions initiales pour le spectre latéral de von Karman avec la méthode générale (IS=1)

Valeurs des conditions initiales			Valeurs des paramètres		
\bar{U} (m/s)	z (m)	z ₀ (m)	m ₁	m ₂	m ₃
10	10	0.001	0,1994	0,92838	0,23955
		0.1	0,21956	0,93612	0,26807
		1	0,23008	0,93984	0,28314
	30	0.001	0,17505	0,91797	0,2057
		0.1	0,19336	0,92598	0,23104
		1	0,2028	0,92978	0,2443
	50	0.001	0,16411	0,91275	0,19076
		0.1	0,18141	0,92074	0,21454
		1	0,19122	0,9251	0,22805
15	10	0.001	0,22015	0,93635	0,26888
		0.1	0,24134	0,94362	0,29944
		1	0,25216	0,94698	0,31532
	30	0.001	0,19371	0,92612	0,23153

		0.1	0,21288	0,93364	0,25856
		1	0,22384	0,93769	0,27416
		0.001	0,18174	0,92088	0,21501
	50	0.1	0,20088	0,92902	0,2416
		1	0,21059	0,93278	0,25531
Moyenne			0,20523778	0,93020778	0,24805333
Écart-type			0,02265071	0,00881233	0,03202211

À l'aide de ces résultats, on justifie l'utilisation des paramètres $m_1=0.21$, $m_2=0.93$ et $m_3=0.25$ pour la direction verticale pour la génération avec le programme simplifié.

Tableau Annexe VII.5 : Tableau de comparaison des valeurs des paramètres pour différentes conditions initiales pour le spectre vertical de von Karman avec la méthode générale ($IS=1$)

Valeurs des conditions initiales		Valeurs des paramètres		
\bar{U} (m/s)	z (m)	m_1	m_2	m_3
10	10	0,18986	0,94158	0,19018
	30	0,25079	0,94664	0,31322
	50	0,22326	0,93746	0,27335
15	10	0,178	0,93283	0,19629
	30	0,27182	0,95285	0,34432
	50	0,24496	0,9448	0,3047
Moyenne		0,22644833	0,94269333	0,27034333
Écart-type		0,03339136	0,00644315	0,05832443

Pour le spectre vertical, avec l'utilisation de la méthode générale, la longueur de turbulence ne dépend de la rugosité.

À l'aide de ces résultats, on justifie l'utilisation des paramètres $m_1=0.23$, $m_2=0.94$ et $m_3=0.27$ pour la direction verticale pour la génération avec le programme simplifié.

ANNEXE VIII

Les bloqueurs

Cette annexe décrit deux procédés permettant de faire la conversion entre un système à temps continu vers un système à temps discret [7].

➤ Discrétisation à l'aide d'un ensemble échantillonneur – bloqueur : utilisation du bloqueur d'ordre 0

Soit $H(s)$ la fonction de transfert du système à temps continu. À l'aide du procédé de discrétisation (Figure Annexe VIII.1) on cherche à « construire » un nouveau système, approché du système initial, en suivant le processus suivant : à l'entrée du système à temps continu on applique le signal $\hat{u}(t)$, obtenu par l'ensemble échantillonneur – bloqueur. Le système à temps discret a à l'entrée la variable $u(k)$, obtenue de $u(t)$ par l'échantillonneur E . La variable de sortie du système à temps discret, $y(k)$, est donnée par un échantillonneur fictif.

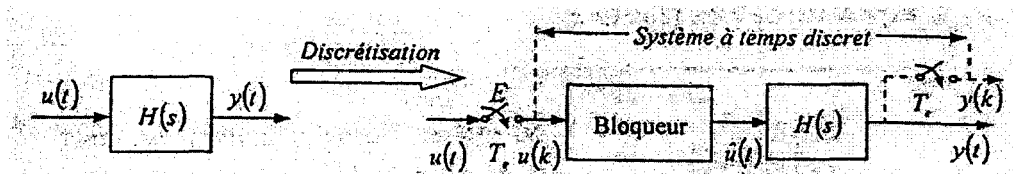


Figure Annexe VIII.1 : Discrétisation d'un système à temps continu par un schéma qui contient l'ensemble échantillonneur – bloqueur

L'erreur d'approximation du système initial est donnée par l'erreur de reconstruction du signal $u(t)$, en partant du signal $u(k)$, c'est-à-dire la différence $u(t) - \hat{u}(t)$. Cette erreur serait nulle si la reconstruction du signal à temps continu était réalisée par un filtre passe-bas idéal.

Soit le cas où le signal à temps continu $\hat{u}(t)$ est reconstruit avec un bloqueur d'ordre zéro. À la Figure Annexe VIII.2, est donnée la réponse impulsionnelle du bloqueur $h_B(t)$. L'expression de cette réponse est donc :

$$h_B(t) = u(t) - u(t - T_e) \quad (1)$$

avec $u(t)$ est l'échelon unitaire.

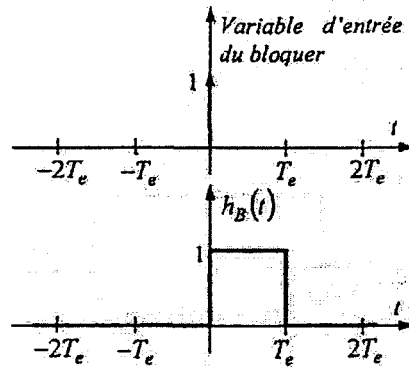


Figure Annexe VIII.2 : Réponse impulsionnelle du bloqueur d'ordre 0

La fonction de transfert du bloqueur est la transformée de Laplace de $h(t)$:

$$\begin{aligned}
 H(s) &= \mathcal{L} \{h(t)\} \\
 &= \mathcal{L} \{u(t)\} - \mathcal{L} \{u(t-T_e)\} \\
 &= \frac{1}{s} - \frac{1}{s} e^{-T_e s}
 \end{aligned} \tag{2}$$

Donc

$$H_B(s) = \frac{1 - e^{-T_e s}}{s} \tag{3}$$

La réponse fréquentielle est :

$$H_B(j\omega) = \frac{1 - e^{-j\omega T_e}}{j\omega} \tag{4}$$

Soit

$$H_B(j\omega) = T_e e^{-j\omega T_e/2} \sin c \frac{\omega T_e}{2} \tag{5}$$

Donc les caractéristiques de fréquences sont :

$$G_B(\omega) = |H_B(j\omega)| = T_e \left| \sin c \frac{\omega T_e}{2} \right| \tag{6}$$

$$\varphi_B(\omega) = \arg(H_B(j\omega)) = -\frac{\omega T_e}{2} \tag{7}$$

Ces caractéristiques sont représentées à la Figure Annexe VIII.3. On voit que l'approximation des caractéristiques idéales est acceptable seulement en basse fréquence.

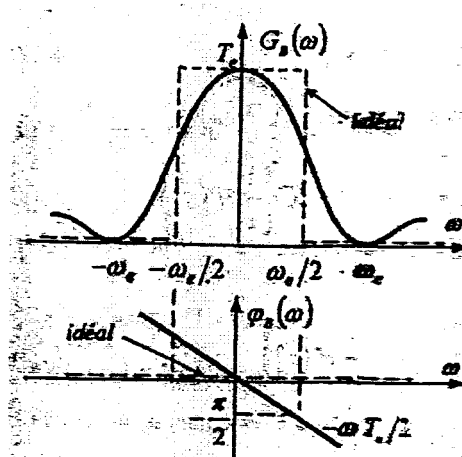


Figure Annexe VIII.3 : Caractéristiques de fréquence du bloqueur d'ordre 0

Conformément au schéma de la Figure Annexe VIII.1, la fonction de transfert du système à temps discret, $H(z)$, ayant l'entrée $u(k)$ et la sortie $y(k)$, est :

$$H(z) = \mathcal{L} \left\{ H_B(s) H(s) \right\} \quad (8)$$

Si on utilise le bloqueur d'ordre zéro on obtient :

$$H(z) = \mathcal{L} \left\{ \frac{1 - e^{-T_s s}}{s} H(s) \right\} = (1 - z^{-1}) \cdot \mathcal{L} \left\{ \frac{1}{s} H(s) \right\} \quad (9)$$

car

$$\mathcal{L} \left\{ e^{-T_s s} \frac{1}{s} H(s) \right\} = z^{-1} \mathcal{L} \left\{ \frac{1}{s} H(s) \right\} \quad (10)$$

$e^{-T_s s}$ étant l'opérateur de retard, comme l'opérateur z^{-1} .

Soit $H(s) = \frac{K}{T_s s + 1}$ la fonction de transfert d'un système du premier ordre. L'utilisation du

bloqueur d'ordre zéro donne :

$$H(s) = (1 - z^{-1}) \cdot \mathcal{L} \left[\frac{1}{s} \cdot \frac{K}{Ts + 1} \right] = (1 - z^{-1}) \cdot \mathcal{L} \left[\frac{K/T}{s(s + 1/T)} \right] \quad (11)$$

Si on décompose la fonction de transfert $\frac{K/T}{s(s + 1/T)}$ en éléments simples, on obtient :

$$\frac{K/T}{s(s + 1/T)} = \frac{K}{s} - \frac{K}{s + 1/T} \quad (12)$$

On peut alors écrire

$$\begin{aligned} \mathcal{L} \left[\frac{K/T}{s(s + 1/T)} \right] &= \mathcal{L} \left[\frac{K}{s} \right] - \mathcal{L} \left[\frac{K}{s + 1/T} \right] \\ &= \frac{K}{1 - z^{-1}} - \frac{K}{1 - a_1 z^{-1}} \\ &= \frac{K(1 - a_1)z^{-1}}{(1 - z^{-1})(1 - a_1 z^{-1})} \end{aligned} \quad (13)$$

Soit
$$H(z) = \frac{b_1 z^{-1}}{1 - a_1 z^{-1}} \quad (14)$$

avec
$$\begin{cases} a_1 = \exp\left(-\frac{T_e}{T}\right) \\ b_1 = K(1 - a_1) \end{cases} \quad (15)$$

On peut alors étendre le processus pour une fonction de transfert de la forme

$$H(s) = \sum_{k=1}^n \frac{r_k}{1 - p_k} \quad \text{où } n \text{ est l'ordre du filtre, } p_k \text{ et } r_k, \text{ les pôles et résidus, respectivement.}$$

On obtient alors :

$$H(z) = \sum_{k=1}^n \frac{b_k z^{-1}}{1 - a_k z^{-1}} \quad (16)$$

avec

$$\begin{cases} a_k = \exp(T_e \cdot p_k) \\ b_k = -\frac{r_k}{p_k}(1-a_k) \end{cases} \quad (17)$$

➤ Approche basée sur la transformée bilinéaire entre les variables s et z : méthode de Tustin

On pose la relation $z = e^{sT_e}$ sous la forme

$$z = e^{sT_e} = \frac{e^{\frac{sT_e}{2}}}{e^{-\frac{sT_e}{2}}} = \frac{1 + \frac{1}{1!} \frac{sT_e}{2} + \frac{1}{2!} \left(\frac{sT_e}{2}\right)^2 + \dots}{1 - \frac{1}{1!} \frac{sT_e}{2} + \frac{1}{2!} \left(\frac{sT_e}{2}\right)^2 - \dots} \quad (18)$$

En retenant les premiers termes, on peut écrire

$$z \cong \frac{2 + sT_e}{2 - sT_e} \quad (19)$$

Selon cette relation, on explicite la variable s par :

$$s = \frac{2}{T_e} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \quad (20)$$

On obtient alors une transformation bilinéaire, qui projette l'axe des imaginaires $s = j\omega$ sur le cercle de rayon unité $|z| = 1$. Les points du demi-plan gauche des « s » se retrouvent à l'intérieur de ce cercle.

Ce procédé, nommé aussi la méthode de Tustin consiste à remplacer la variable s par l'expression (20) :

$$H(z) = H(s) \Big|_{s = \frac{2}{T_e} \cdot \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}} \quad (21)$$

Par exemple, la discrétisation d'un système du premier ordre donne :

$$H(z) = \frac{K}{Ts+1} \Big|_{s = \frac{2}{T_e} \cdot \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}} = \frac{K}{\frac{2T}{T_e} \cdot \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} + 1} = \frac{b_1(1+z^{-1})}{1+a_1z^{-1}} \quad (22)$$

où

$$a_1 = \frac{\frac{2T}{T_e} - 1}{\frac{2T}{T_e} + 1} ; \quad b_1 = \frac{K}{\frac{2T}{T_e} + 1} \quad (23)$$

On peut généraliser pour un système d'ordre n $H(s) = \sum_{k=1}^n \frac{r_k}{1-p_k}$ où p_k et r_k sont

respectivement les pôles et résidus.

$$H(z) = \sum_{k=1}^n \frac{r_k}{1-p_k} \Big|_{s = \frac{2}{T_e} \cdot \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}} = \frac{b_k(1+z^{-1})}{1+a_kz^{-1}} \quad (24)$$

avec

$$a_k = \frac{\frac{2}{T_e} + p_k}{\frac{2}{T_e} - p_k} ; \quad b_k = \frac{r_k}{\frac{2}{T_e} - p_k} \quad (25)$$

ANNEXE IX

Théorie sur les bruits blancs

Un bruit blanc théorique [36] a la fonction de corrélation (Figure Annexe IX.1) :

$$R_{bb}(\tau) = \sigma^2 \cdot \delta(\tau) \quad (1)$$

et la fonction de densité spectrale de puissance :

$$S_{bb}(\omega) = F[R_{bb}(\tau)] = \sigma^2 \quad (2)$$

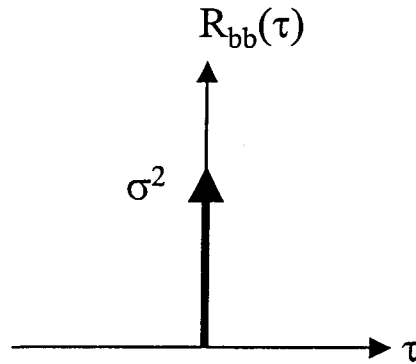


Figure Annexe IX.1 : Représentation de la fonction de corrélation pour un bruit blanc

Soit $w(i)$, $i=\overline{1,N}$ une série aléatoire avec une distribution normale et $\sigma_w^2 = 1$, engendrée numériquement (par ordinateur). Les valeurs discrètes de la fonction de corrélation sont représentées comme exemple à la Figure Annexe IX.2.

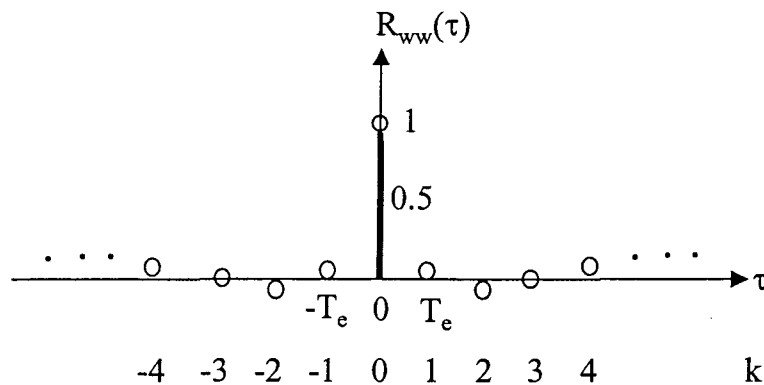


Figure Annexe IX.2 : Représentation des valeurs discrètes de la fonction de corrélation d'un bruit blanc

Pour cette situation, on peut adopter – comme une approximation analytique – les fonctions de corrélation $\tilde{R}_{ww}(\tau)$ ou $\hat{R}_{ww}(\tau)$ qui donnent les caractéristiques spectrales de puissance :

$$\tilde{S}_{bb}(\omega) = T_e \operatorname{sinc}\left(\frac{\omega T_e}{2}\right) \quad (3)$$

$$\hat{S}_{bb}(\omega) = T_e \operatorname{sinc}^2\left(\frac{\omega T_e}{2}\right) \quad (4)$$

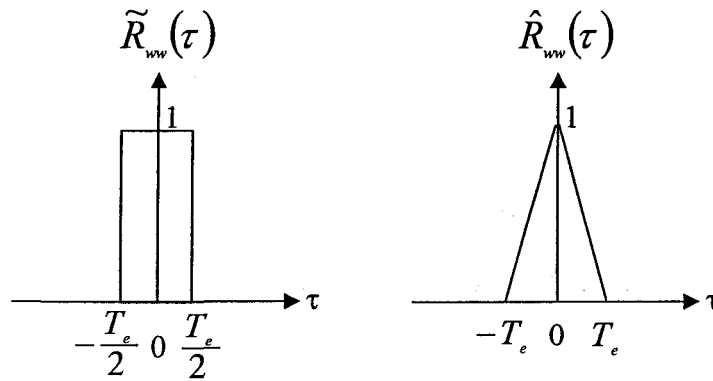


Figure Annexe IX.3 : Représentation des fonctions de corrélation $\tilde{R}_{ww}(\tau)$ et $\hat{R}_{ww}(\tau)$

Pour les basses fréquences, on a $\operatorname{sinc}(\cdot) \cong 1$, donc on obtient la relation :

$$S_{ww}(f) \cong T_e \quad (5)$$

Annexe X

***Cartes des emplacements des différentes tours de mesures
du programme du MRN***

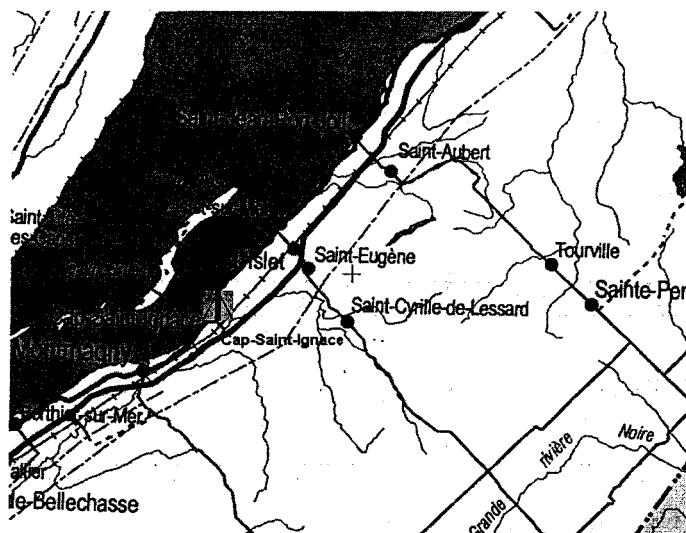


Figure Annexe X.3 : Localisation de la station de Cap-Saint Ignace

Tableau Annexe X.2 : Tableau des distances (km) avec la station de Cap-Saint-Ignace

Montmagny	10,4	L'islet sur Mer	11,3	Saint Jean-Port-Joli	23,6
-----------	------	-----------------	------	----------------------	------

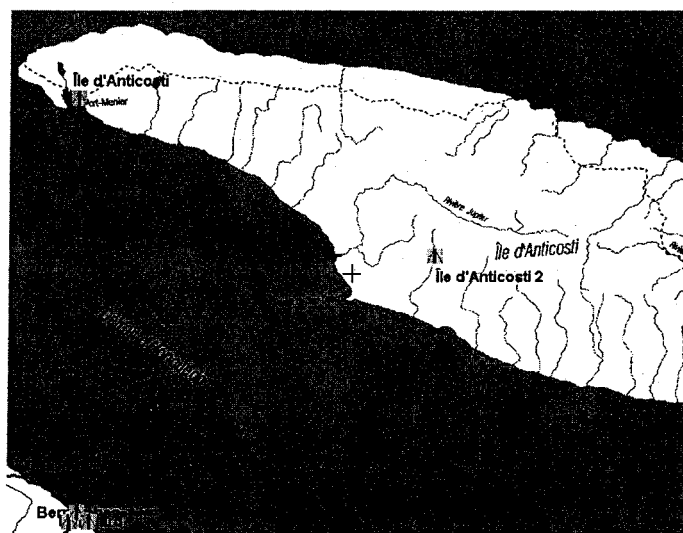


Figure Annexe X.4 : Localisation des stations de l'île d'Anticosti

Tableau Annexe X.3 : Tableau des distances (km) pour les stations de l'île d'Anticosti

Station 1 – Station 2	93,3	Station 1 – Rivière-au-Renard	91,1	Station 1 – Rivière-au-Renard	92,8
-----------------------	------	-------------------------------	------	-------------------------------	------

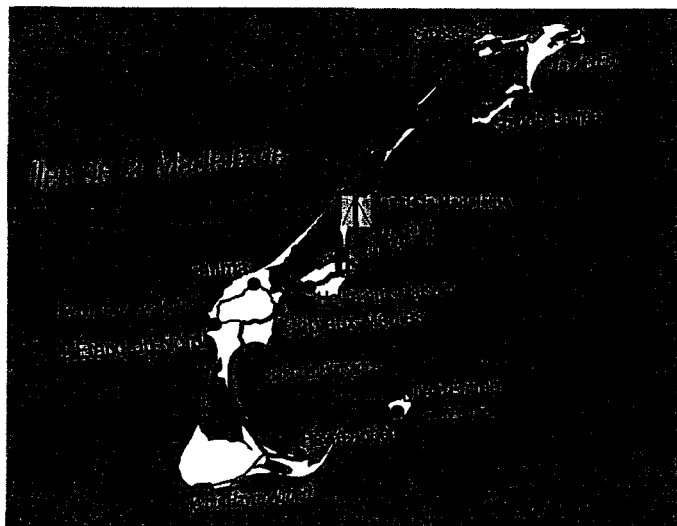


Figure Annexe X.5 : Localisation de la station des Îles-de-la-Madeleine

Tableau Annexe X.4 : Tableau des distances (km) avec la station des Îles-de-la-Madeleine

Cap au Meule	13,4	L'étang du Nord	19,4	Havre au Maisons	9,6
Grande Entrée	17,5	Fatima	13,4		

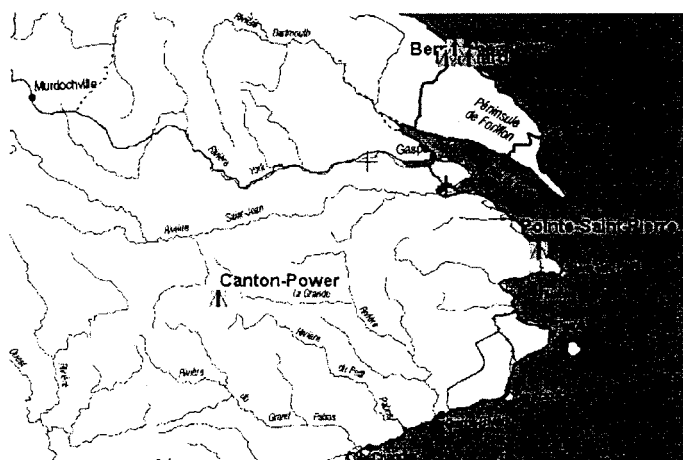


Figure Annexe X.6 : Localisation des stations de Canton-Power et de Pointe-Saint-Pierre

Tableau Annexe X.5 : Tableau des distances (km) pour les stations de Canton-Power et de Pointe-Saint-Pierre

Pointe-Saint-Pierre – Gaspé	26,5	Canton-Power – Murdochville	51,3
Pointe-Saint-Pierre – Percé	15,7	Canton-Power – Gaspé	48,3
Pointe-Saint-Pierre – Rivière-au-Renard	39,4	Canton-Power – Percé	62
Canton-Power – Rivière-au-Renard	64,7	Canton-Power – Chandler	39,6

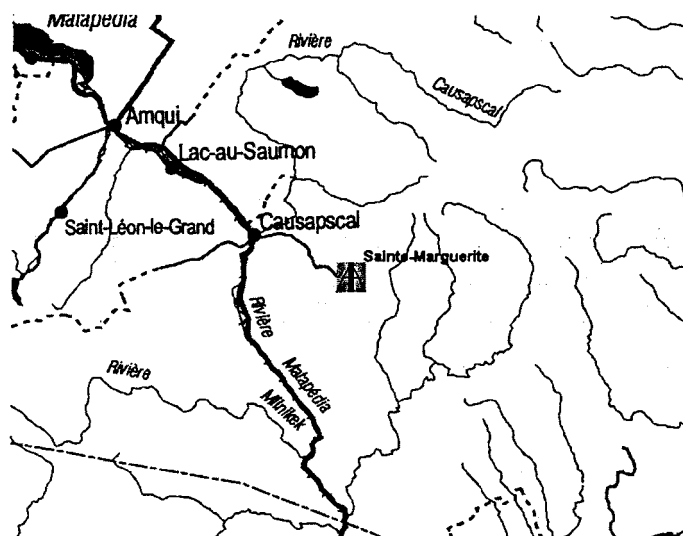


Figure Annexe X.7 : Localisation de la station de Sainte-Marguerite

La distance entre la station de Sainte-Marguerite et Causapsca est de 11,4 km.

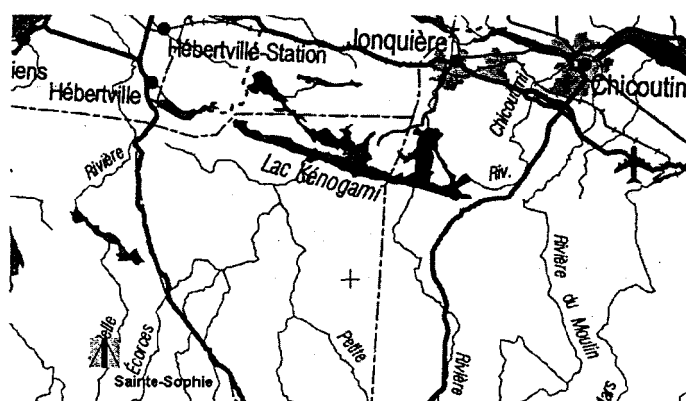


Figure Annexe X.8 : Localisation de la station de Sainte-Sophie

Tableau Annexe X.6 : Tableau des distances (km) avec la station de Sainte-Sophie

Chicoutimi	60	Jonquière	48,9	Hébertville	29,7
------------	----	-----------	------	-------------	------

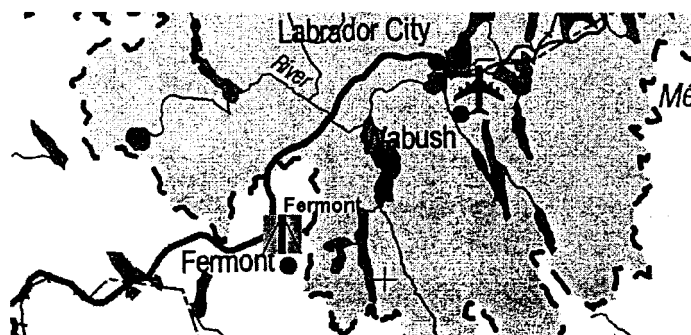


Figure Annexe X.9 : Localisation de la station de Fermont

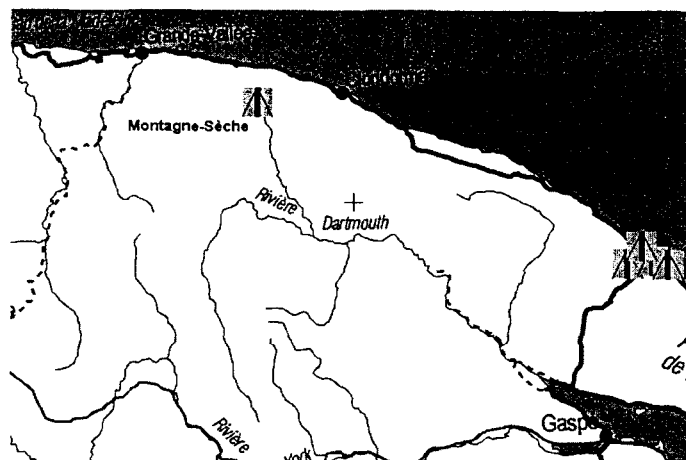


Figure Annexe X.10 : Localisation de la station de Montagne-Sèche

Tableau Annexe X.7 : Tableau des distances (km) avec la station de Montagne-Sèche

Cloridorme	8,9	Grande Vallée	13,4	Rivière-au-Renard	45,7
------------	-----	---------------	------	-------------------	------

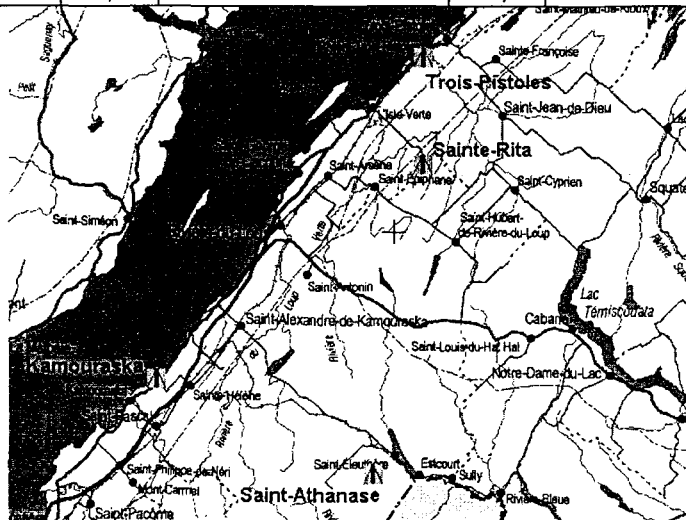


Figure Annexe X.11 : Localisation des stations de Kamouraska, Saint-Athanase, Sainte-Rita et Trois-Pistoles

Tableau Annexe X.8 : Tableau des distances (km) pour les stations de Kamouraska, Saint-Athanase, Sainte-Rita et Trois-Pistoles

Kamouraska – Saint-Athanase	39.4	Saint-Athanase – Trois-Pistoles	71.1
Kamouraska – Sainte-Rita	57.4	Saint-Athanase – Rivière-du-Loup	45.1
Kamouraska – Trois-Pistoles	70.5	Sainte-Rita – Trois-Pistoles	17.9
Kamouraska – Rivière-du-Loup	33.3	Sainte-Rita – Rivière-du-Loup	25.8
Saint-Athanase – Sainte-Rita	52.8	Trois-Pistoles - Rivière-du-Loup	36.9